

ANTONIO LUÍS DE CAMPOS MARIANI

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTOS  
TURBULENTOS EM PASSAGENS CURTAS COM  
SENSORES MULTÍFUROS MULTIDIRECIONAIS**

Tese a ser apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Doutor em Engenharia

São Paulo  
2000

ANTONIO LUÍS DE CAMPOS MARIANI

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTOS  
TURBULENTOS EM PASSAGENS CURTAS COM  
SENSORES MULTÍFUROS MULTIDIRECIONAIS**

Tese a ser apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica

Orientador:  
Prof. Dr. Marcos de Mattos Pimenta

São Paulo  
2000

Homenagem à  
Minha Querida Mãe (in memoriam)  
Força marcante que sempre me impulsiona

Ceci, Samuel, Ana Clara e Raquel  
Presentes que recebi de Deus  
Prova de Seu amor infinito

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Marcos de Mattos Pimenta, pela sua contínua e paciente orientação, pelo seus conselhos técnicos refinados, pela sua sensibilidade nos momentos difíceis. Por acreditar sempre, como verdadeiro mestre, na possibilidade do acerto.

À minha esposa Ceci, companheira, amiga serena, e comprometida, obrigado por todo apoio, infraestrutura e especialmente pela paciente colaboração na edição final deste texto.

A meu querido pai, minhas irmãs, Carmen Lúcia e Maria Cecília, ao Marcelo e Steve, por acompanharem de modo solidário e atento minhas atividades neste trabalho, compreendendo minha ausência física na vida familiar.

Ao meu amigo José Guilherme Campetella, pela sua competência técnica e atuação profissional segura e exemplar, peças fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao José Francisco e ao Tiago pela importante colaboração e disponibilidade permanente, em exaustivos ensaios, tratamentos de dados, dias de dúvidas e de certezas.

Ao Luís Gustavo pela extensa colaboração na montagem e organização do Laboratório de Instrumentação, pela sua disponibilidade, pelos geniais programas de computador e pela amizade que construímos.

Aos professores de Mecânica dos Fluidos, Celso, Fernandes, Fábio, Jayme, Marcos, Maurício, Milton, Nabhan, Saburo, Sadalla, Souza Neto, e Tufi, amigos que sempre me incentivaram, paradigmas de compromisso com a Escola Politécnica, exemplo de equipe.

Aos colegas Fábio Saltara, Júlio Meneghini, Flávio Fiorelli, Alberto Hernandez, pelo incentivo permanente, pelo apoio de infraestrutura computacional, fotográfica e de amizade.

Ao Prof. Douglas Lauria pelo incentivo nas minhas atividades docentes, pelas recomendações em minhas atividades de pesquisa.

Ao Prof. Oswaldo Horikawa, pela oportunidade de interagir metrologicamente, em conversas e medições.

Aos alunos, motivadores para meu cotidiano profissional, em especial aqueles com quem interagi nos últimos anos, Rafael, Eduardo, Celso, George, pessoal do CAM, equipes do mini baja, dos carrinhos de rolemã, dos escritório-piloto, ..., àqueles que descobriram a importância de estar ativo na interação com a Escola e que isto torna o processo de aprendizado mais eficiente.

Aos profissionais competentes e ao apoio técnico do Laboratório de Vazão do IPT, imprescindível para a realização deste trabalho. Marcos Tadeu, Cláudia, Fernando, Nilson, Luciana, Pucci, Paulinho, Silvio, Ieda, Gim, Marcio, Fernando, Kazuto, Valmir, Jorge, muito obrigado. Espero que eu possa retribuir algum dia, com a mesma amizade e alguma pequena contribuição técnica compatível com a envergadura deste Laboratório.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica - PMC, que estiveram presentes no meu cotidiano com incentivo, compreensão e colaboração. Em especial àqueles que atuam nas atividades de pós-graduação.

À Blue Tec Soluções Técnicas, que tem apoiado diversos trabalhos que temos feito na área de instrumentação aplicada, especialmente aos seus diretores Romeu e Rui Baptista, este último, meu professor de eletrônica, agradeço o apoio técnico específico a este projeto, com suporte de material e do simpático pessoal técnico, na pessoa do Jonas, Hirata e equipe.

À Veranum Tempus e Vectus Importatum, que patrocinaram e viabilizaram a aquisição dos microsensores. Ao seus diretores e equipe técnica, em especial ao Wili, profissional competente, que não economizou conversas e idéias para incentivar este projeto.

Ao Miguel, Célio e Liriani, equipe técnica da Análise Engenharia, pelo gerador de fumaça, pela disponibilidade em sempre colaborar.

À SMACNA Chapter Brasil, que sempre me incentivou, seus diretores, seu pessoal da secretaria, inclusive pelo apoio no acesso à publicações e pelo empréstimo do medidor de vazão tipo coifa.

Ao Raul Bolliger Jr., mestre de ar condicionado por excelência, agradeço por ser meu professor e amigo, incondicionalmente o maior exemplo de dedicação à causa técnica que conheci.

Ao Osmar G. Silva, incentivador permanente de minhas atividades, pessoa de sensibilidade ímpar, certamente um dos maiores promotores de eventos de divulgação técnico-científico de HVAC no Brasil nos últimos 10 anos.

Ao Celso Simões Alexandre pelo atencioso apoio sempre prestou às minhas atividades. À Trox do Brasil, ao Milton e equipe, pelos acessórios cedidos para esta pesquisa, e troca de informações.

Ao João Hamilton de Abreu, incentivador de minhas atividades didáticas, ajudando-me a perceber as possibilidades de interface das atividades acadêmicas com o meio produtivo.

À ABRAVA, seu pessoal operacional e técnico, especialmente ao Simon Jacques Levy, meu primeiro professor de ar condicionado, e ao pessoal do competente Centro de Documentação, Rosa e Cida.

A D. Odette, Cândida, Ana Luíza, João Guilherme e à maravilhosa família, Carol, Paula, Juliana, Renata, Magda e Ademar que olham pela minha família, garantindo suporte carinhoso para as minhas filhas gêmeas,

Às Comunidades de Vida Cristã (CVX), espaço privilegiado de dividir a vida, dom maior que recebemos, pelo acompanhamento e apoio atento. Especialmente ao Herreros e ao John.

Ao apoio de verdadeiros amigos que enobrecem o sentido desta palavra.

## ERRATA

página	linha ou localização	onde se lê	leia-se
i	Lista de símbolos		Q <sub>pad</sub> = vazão de ar em volume na condição do ar padrão, e corrigida pela curva de calibração do instrumento.
i	Lista de símbolos		P <sub>i</sub> = pressão no orifício i
i	Lista de símbolos		$\Delta P_{2-E} = P_2 - P_{esteira}$
3	última	... finalidade de <b>reciclar</b> o ar ...	... finalidade de <b>renovar</b> o ar ...
25	legenda da tabela	... medidores de vazão de ar externo.	... medidores de vazão de ar externo ( <b>KETTLER, 2000</b> ).
34	legenda da figura	... sondas direcionais.	... sondas direcionais ( <b>BRYER e PANKHURST, 1971</b> )
35	legenda da figura	... sondas direcionais.	... sondas direcionais ( <b>BRYER e PANKHURST, 1971</b> )
36	legenda da figura	... 5 orifícios.	... 5 orifícios ( <b>BRYER e PANKHURST, 1971</b> )
40	título	... ESCOAMENTO ATRAVÉS PASSAGEM CURTA...	... ESCOAMENTO ATRAVÉS DE PASSAGEM CURTA...
46	legenda da figura	... passagem curta, o <b>canhão</b> do anemômetro laser e ...	... passagem curta, a <b>sonda emissora-receptora</b> do anemômetro laser e ...
47	1ª linha do último parágrafo	...- LDA, de fabricação da Dantec, com potência de 200 mW.	...- LDA, é de fabricação da Dantec, com potência de <b>300 mW</b> .
48	3ª linha	... que suporta o <b>canhão</b> emissor-receptor ...	... que suporta a <b>sonda emissora-receptora</b> ...
51	8ª linha	... movimentava-se o <b>canhão</b> do laser...	... movimentava-se o <b>sonda emissora-receptora</b> do laser...
54	1ª, 8ª e 10ª linha	... <b>canhão</b> ...	... <b>sonda emissora-receptora</b> ...
58	2ª linha	... numeradas de A.1 a <b>A.6.</b> , ...	... numeradas de A.1 a <b>A.5</b> , ...
79	2ª linha	... e KINGHORN (1972), <b>citados na revisão bibliográfica.</b> Atualmente ...	... e KINGHORN (1972). Atualmente ...

81	1ª linha	... para os planos xz e yz, do que para o plano xy.	... nas direções y e z, do que na direção x.
82	2ª. linha	... observado na figura 4.3 que...	... observado na figura 4.4 que...
85	7ª linha	... com diâmetro d = 2.0 mm.	... com diâmetro d = 1.25 mm.
85	18ª linha	... falta de repetitividade ...	... baixa repetitividade ...
92	2ª linha	... dos três orifícios sensores ...	... dos três conjuntos de orifícios sensores ...
114	1ª linha	... valores de $\Delta P_{2-E}$ , da pressão efetiva de esteira $P_{esteira}$ , sendo o valor de $P_2$ calculado com a diferença entre ambas.	... valores de $\Delta P_{2-E}$ , e da pressão de esteira, $P_{esteira}$ , sendo o valor de $P_2$ calculado com a soma de ambos.
120	2ª linha	$v_s$ = velocidade do fluido ao longe	$v_\infty$ = velocidade do fluido ao longe
143	8ª linha	... entrada do bocal, conforme foi apresentado na figura 7.5.	... entrada do bocal.
148	4ª coluna, três últimas linhas	0.75%	$\pm 0.75\%$
172	13ª linha	... sistema de polares, ...	... sistema de coordenadas polares, ...
172	19ª linha	... tabelas 8.10 a 8.19..	... tabelas 8.10 a 8.18.
201	16ª linha	... apresentados em um plano próximo à parede, ...	... apresentados em planos próximos à parede, ...

Tabela da errata

Adiciona-se às alterações da tabela as seguintes substituições de páginas:

Páginas 67, 68 e 69: substituir os gráficos das figuras 3.22 a 3.27 que representam perfis de velocidade na passagem curta em perspectiva, por representações do campo de velocidades em planos xy, para maior clareza e visualização do comportamento das velocidades.

Páginas 178 a 182: que no texto contém as figuras 8.9 a 8.17 estão sendo substituídas pelas que seguem, nas quais foram representados os vetores velocidade  $V_{xy}$  adotados para traçar os perfis de velocidade nas respectivas figuras.

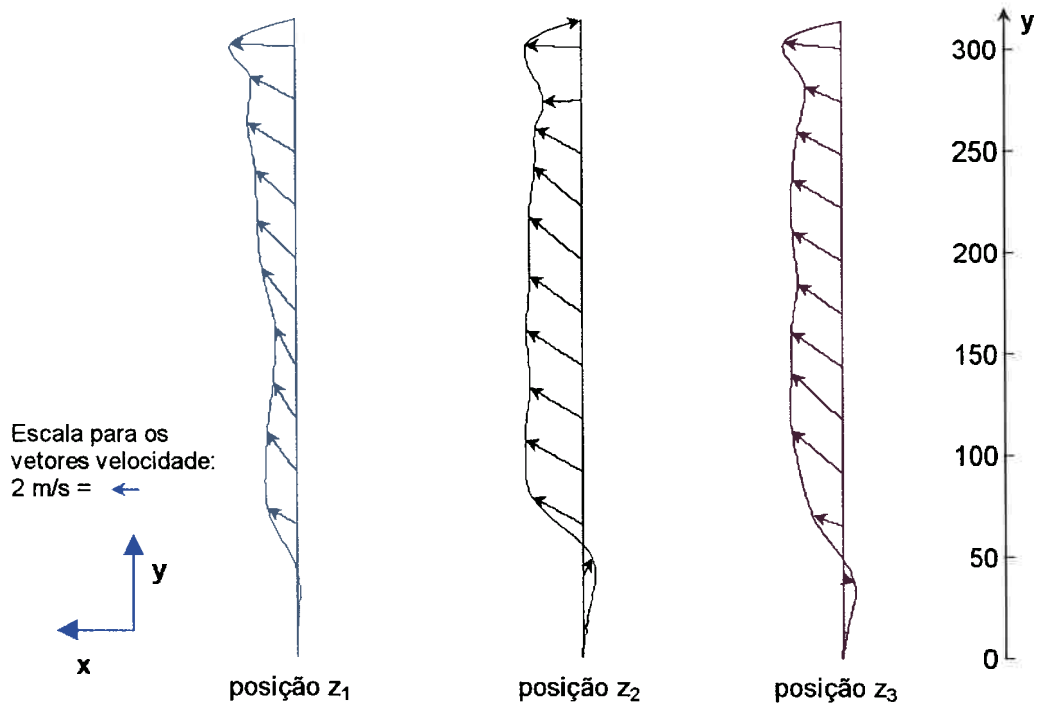


Figura 3.22: Representações de perfis de velocidades  $V_{xy}$  em planos  $xy$ . As posições indicam distâncias do plano à parede da passagem curta:  $z_1 = 34.5$  mm,  $z_2 = 103.0$  mm e  $z_3 = 171.5$  mm. Condições do escoamento:  $Q_{ref} = 380$  L/s, configuração 1: veneziana.

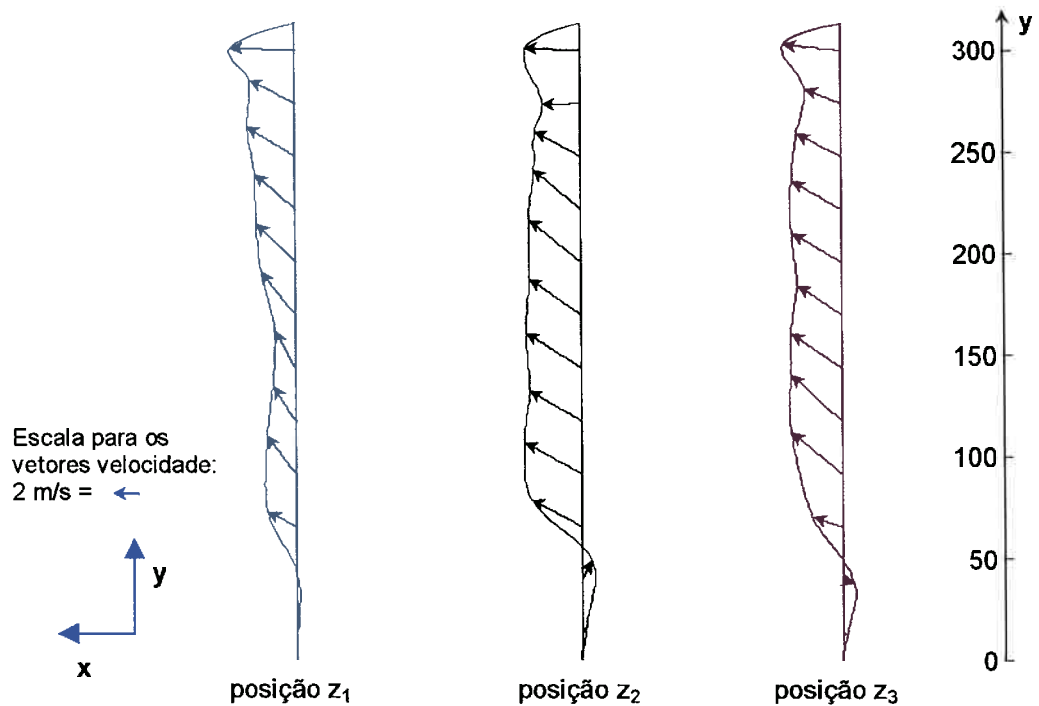


Figura 3.23: Representações de perfis de velocidades  $V_{xy}$  em planos  $xy$ . As posições indicam distâncias do plano à parede da passagem curta:  $z_1 = 34.5$  mm,  $z_2 = 103.0$  mm e  $z_3 = 171.5$  mm. Condições do escoamento:  $Q_{ref} = 640$  L/s, configuração 1: veneziana.



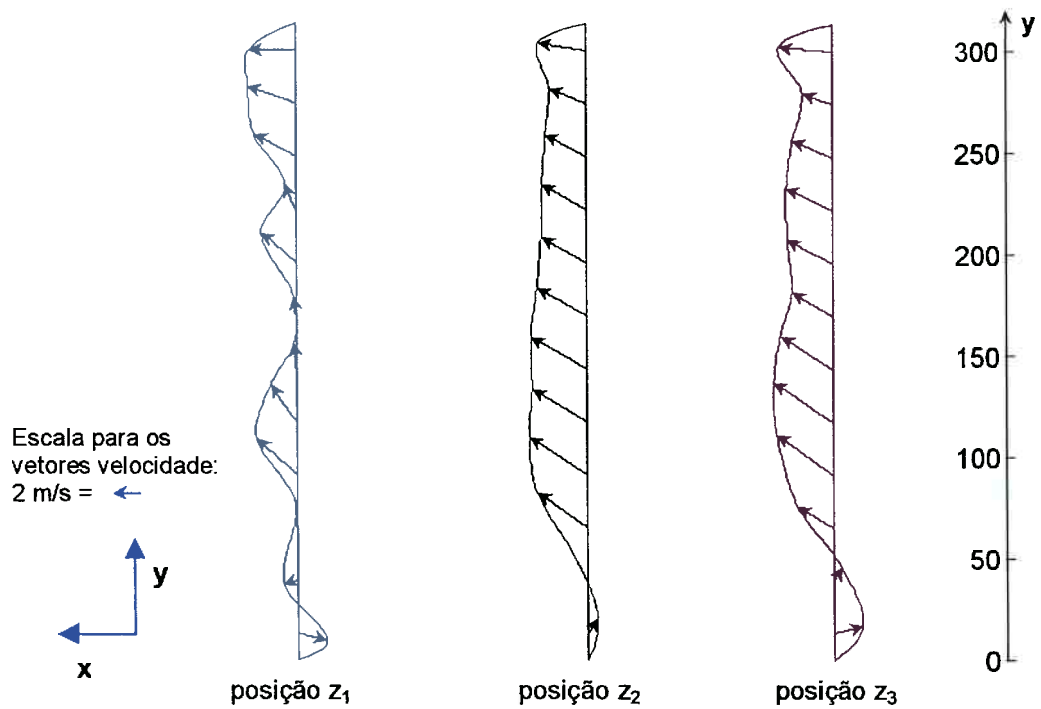


Figura 3.24: Representações de perfis de velocidades  $V_{xy}$  em planos  $xy$ . As posições indicam distâncias do plano à parede da passagem curta:  $z_1 = 34.5$  mm,  $z_2 = 103.0$  mm e  $z_3 = 171.5$  mm. Condições do escoamento:  $Q_{ref} = 380$  L/s, configuração 2: veneziana e filtro.

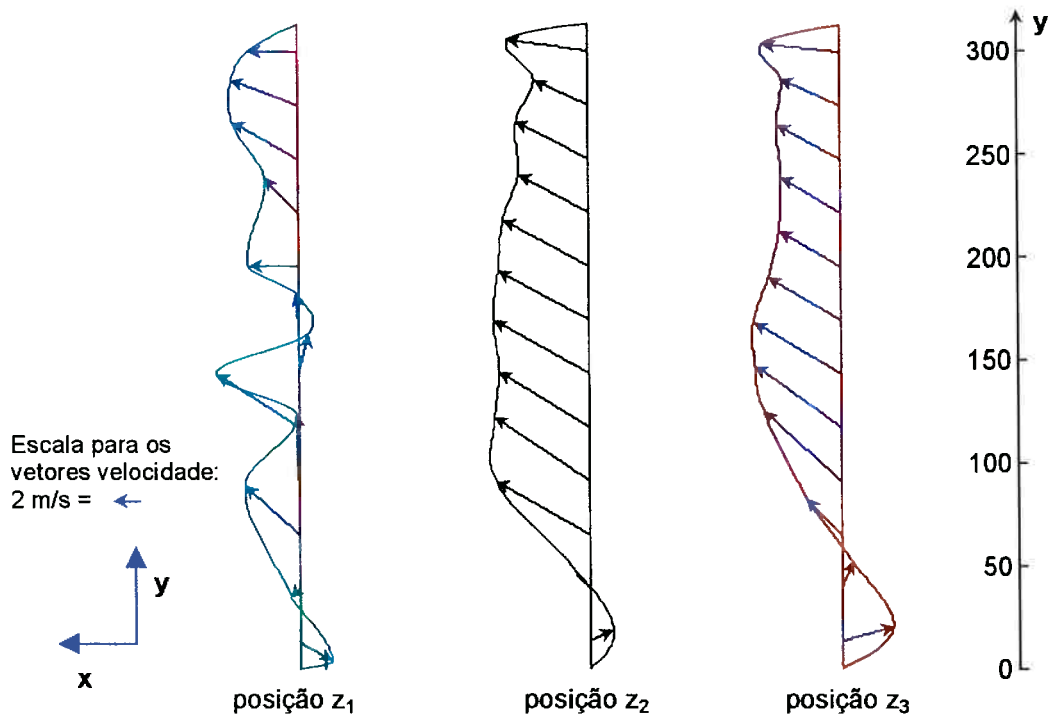


Figura 3.25: Representações de perfis de velocidades  $V_{xy}$  em planos  $xy$ . As posições indicam distâncias do plano à parede da passagem curta:  $z_1 = 34.5$  mm,  $z_2 = 103.0$  mm e  $z_3 = 171.5$  mm. Condições do escoamento:  $Q_{ref} = 640$  L/s, configuração 2: veneziana e filtro.

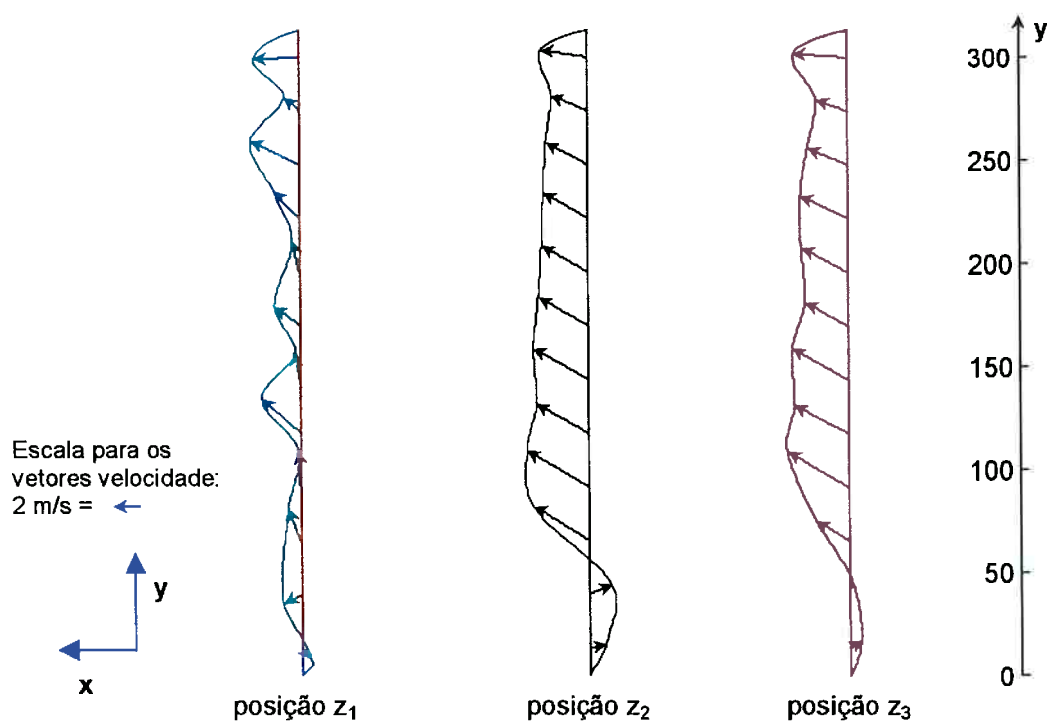


Figura 3.26: Representações de perfis de velocidades  $V_{xy}$  em planos  $xy$ . As posições indicam distâncias do plano à parede da passagem curta:  $z_1 = 34.5$  mm,  $z_2 = 103.0$  mm e  $z_3 = 171.5$  mm. Condições do escoamento:  $Q_{ref} = 380$  L/s, configuração 3: veneziana, filtro e registro a  $60^\circ$ .

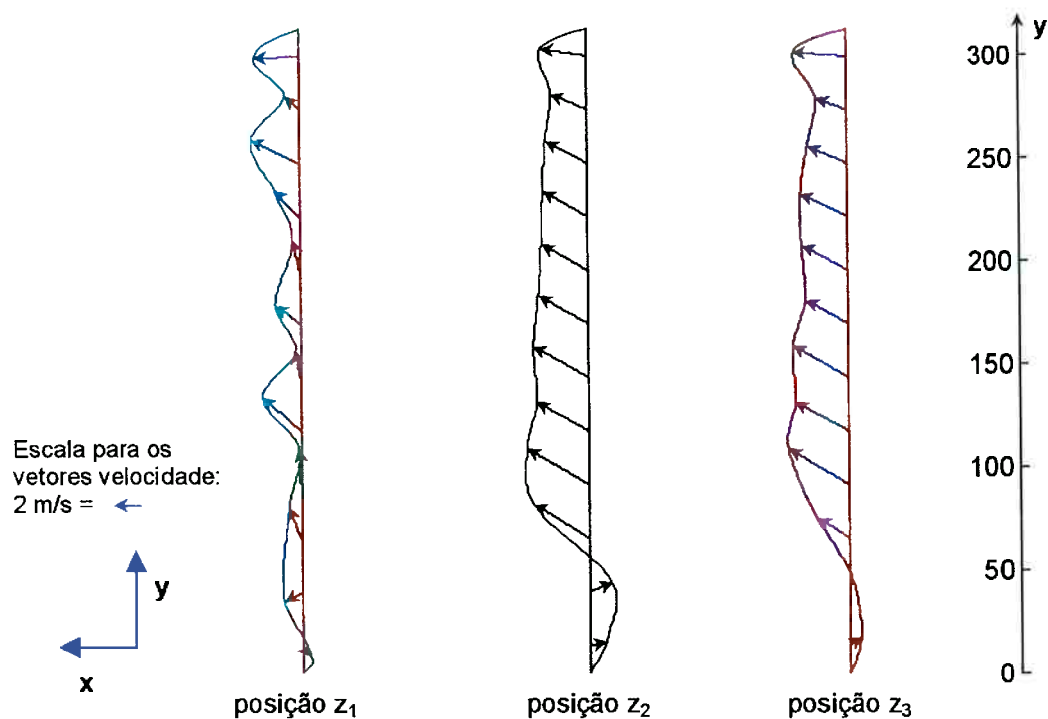


Figura 3.27: Representações de perfis de velocidades  $V_{xy}$  em planos  $xy$ . As posições indicam distâncias do plano à parede da passagem curta:  $z_1 = 34.5$  mm,  $z_2 = 103.0$  mm e  $z_3 = 171.5$  mm. Condições do escoamento:  $Q_{ref} = 640$  L/s, configuração 3: veneziana, filtro e registro a  $60^\circ$ .

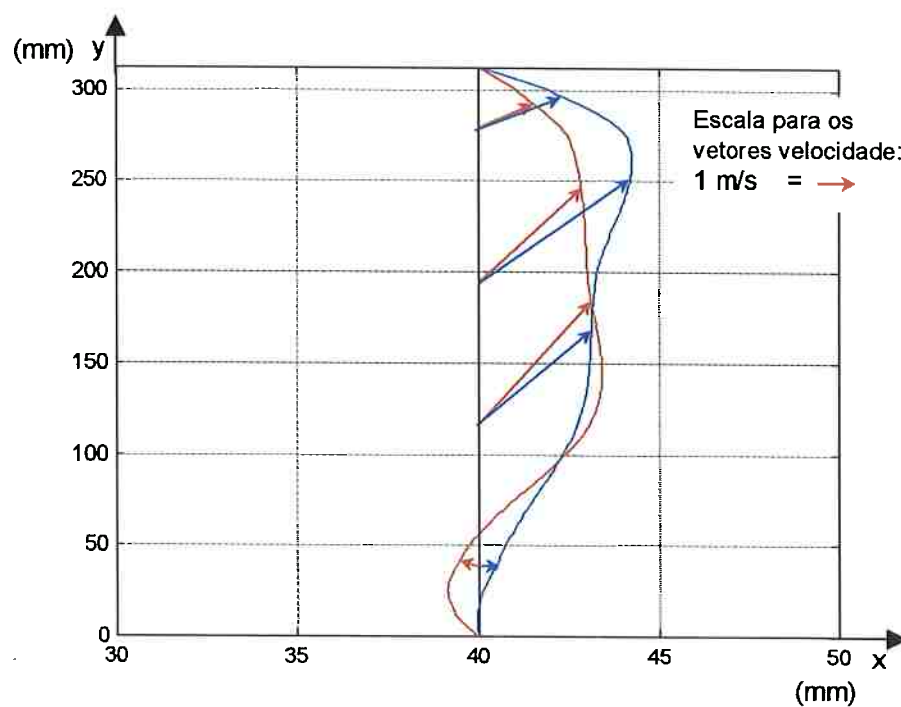


Figura 8.9 : Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 300$  L/s, configuração 1 = veneziana.

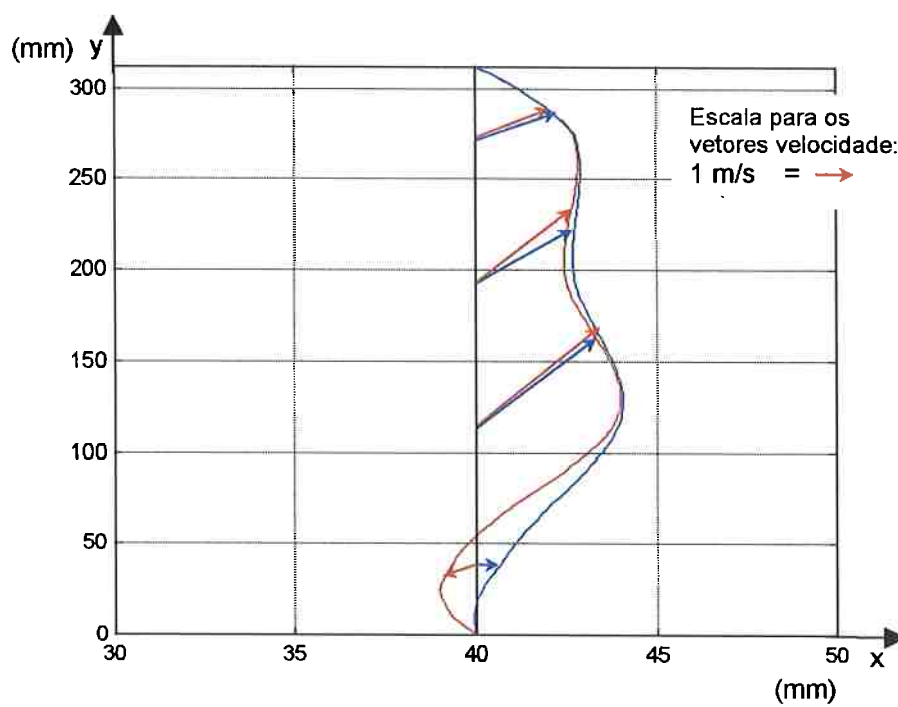


Figura 8.10: Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 300$  L/s, configuração 2 = veneziana e filtro.

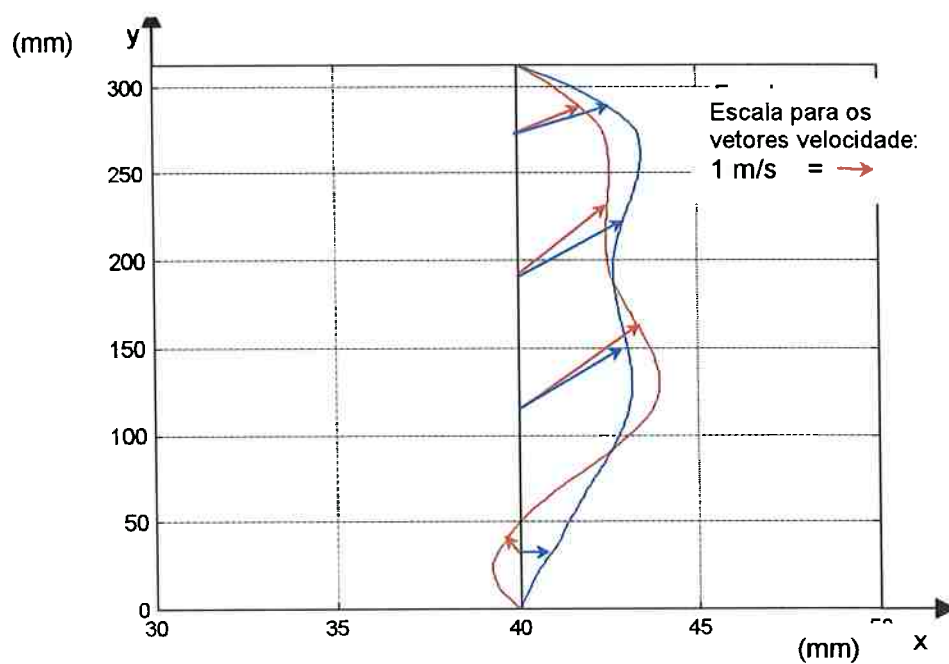


Figura 8.11: Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 300$  L/s, configuração 3 = veneziana, filtro e registro 60°.

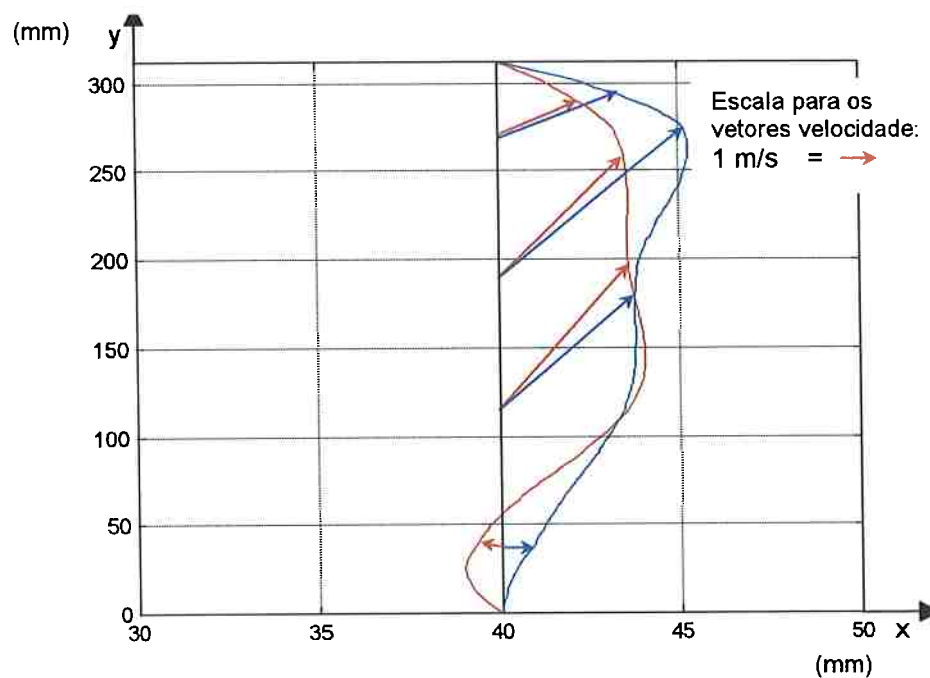


Figura 8.12 : Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 370$  L/s, configuração 1 = veneziana.

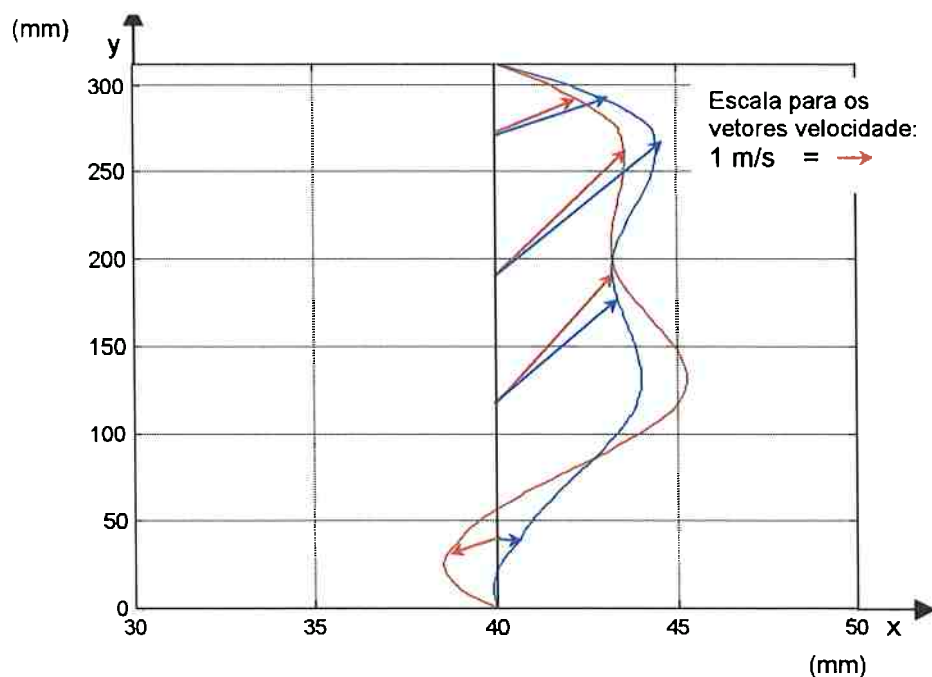


Figura 8.13: Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 370 \text{ L/s}$ , configuração 2 = veneziana e filtro.

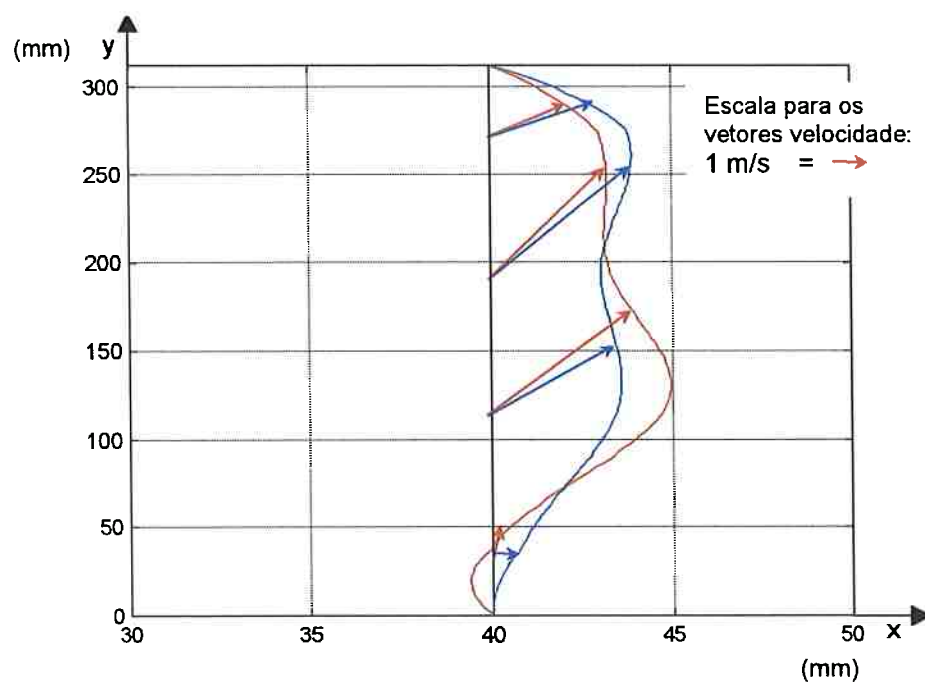


Figura 8.14: Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 370 \text{ L/s}$ , configuração 3 = veneziana, filtro e registro  $60^\circ$ .

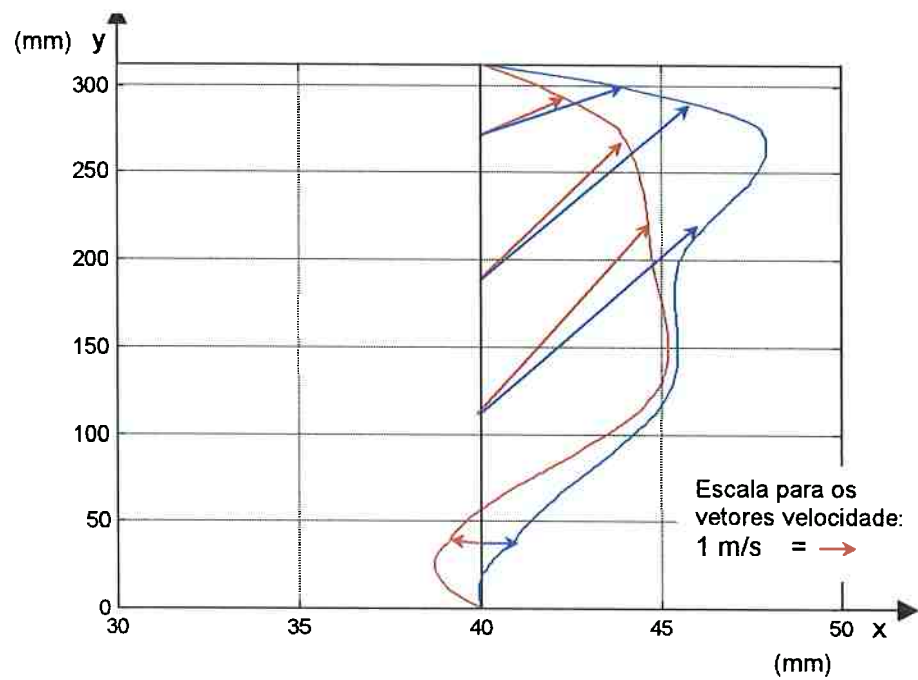


Figura 8.15: Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 510$  L/s, configuração 1 = veneziana.

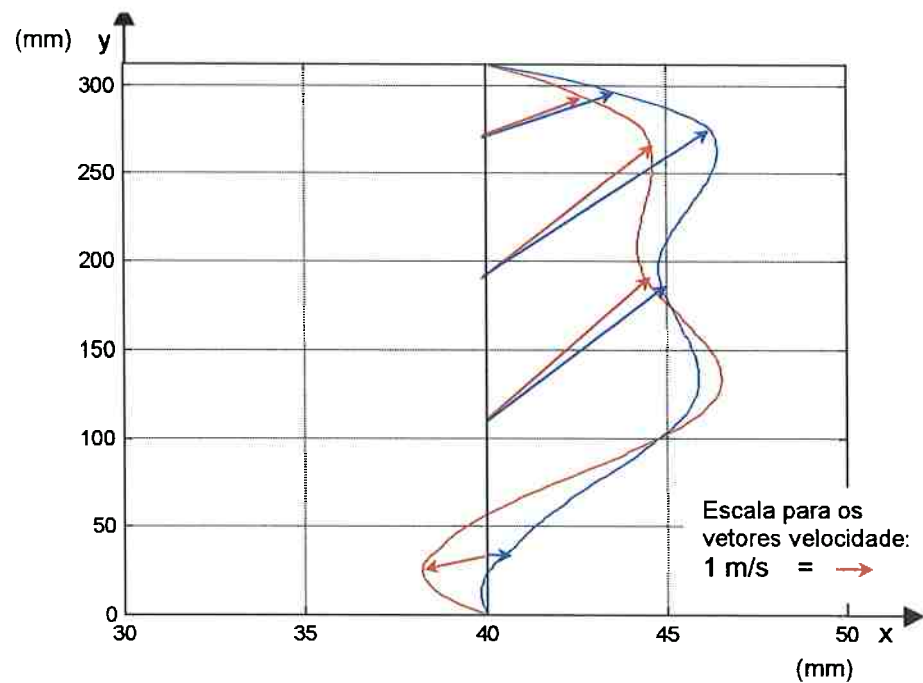


Figura 8.16: Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 510$  L/s, configuração 2 = veneziana e filtro.

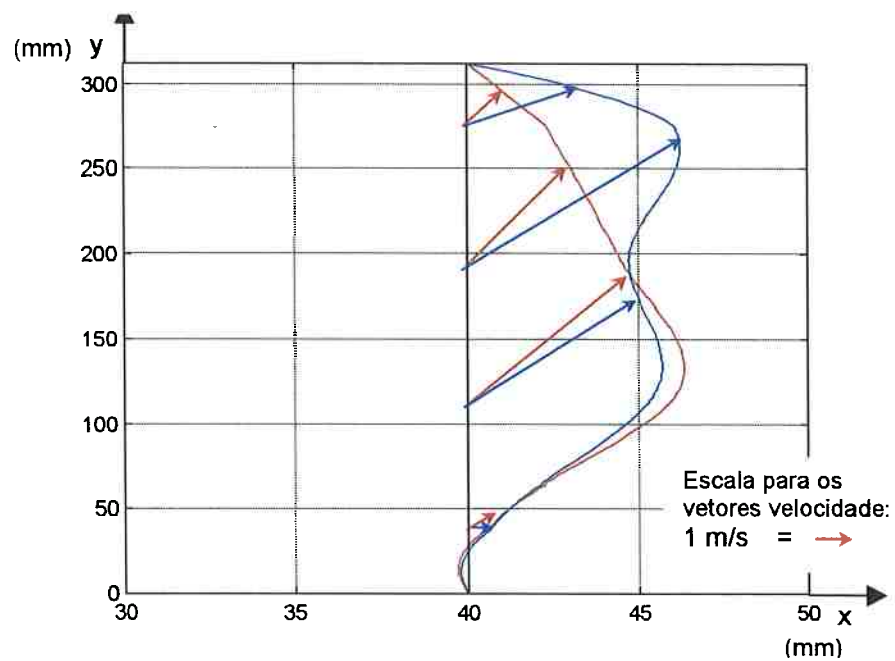


Figura 8.17: Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 510$  L/s, configuração 3 = veneziana, filtro e registro  $60^\circ$ .

## SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE TABELAS

LISTAS DE FIGURAS

RESUMO

*ABSTRACT*

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1.	Medição de vazão em sistemas de tratamento de ar: motivação deste desenvolvimento	1
1.2.	A qualidade do ar interior e a vazão de ar externo	3
1.3.	As instalações de condicionamento de ar e o controle da vazão do ar externo	6
1.4.	Os medidores de vazão tipo multífuros	10
1.5.	Objetivos e estrutura da pesquisa	16
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
2.1.	A medição de vazão de ar externo em sistemas de condicionamento de ar	18
2.1.1	Medição de vazão e os parâmetros correlacionados	18
2.1.2.	Sistemas de volume de ar variável e a vazão mínima de ar externo	20
2.1.3.	Técnicas e sensores para medição da vazão de ar externo: análise comparativa.	24
2.2	Sondas para medição da velocidade e da direção do escoamento	26
2.2.1.	Evolução histórica do tubo de Pitot	27
2.2.2.	O tubo multífuro	30
2.2.3.	Medição da direção do escoamento	33
2.2.4.	Sondas combinadas para medir a velocidade e direção do escoamento	35



<b>3.</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO ATRAVÉS DE PASSAGEM CURTA COM ACESSÓRIOS</b>	<b>40</b>
3.1.	Definição de parâmetros dos acessórios a serem testados	40
3.2.	Metodologia e arranjo experimental	45
3.3.	Procedimento experimental	53
3.4.	Dados obtidos e resultados calculados	56
3.5.	Análise dos resultados e apresentação gráfica do campo de velocidades	70
<b>4.</b>	<b>PROJETO E FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO</b>	<b>74</b>
4.1.	Características do protótipo	74
4.1.1.	Geometria externa das sondas e sua dimensão	75
4.1.2.	Número de orifícios nos tubos multífuro, seu posicionamento e número de sondas na grade	78
4.1.3.	Diâmetro dos orifícios	85
4.1.4.	Arranjo interno das sondas	86
4.1.5.	Grade sensora	86
4.2.	Fabricação das sondas e da grade sensora multidirecional	87
4.3.	Características operacionais da grade sensora	92
4.4.	O Sistema Monitor de Pressões (SMP)	94
<b>5.</b>	<b>INTERAÇÃO DO ELEMENTO SENSOR COM O ESCOAMENTO</b>	<b>100</b>
5.1.	Introdução	100
5.2.	Simulação numérica	101
5.2.1.	Parâmetros para investigação	102
5.2.2.	Resultados das simulações	103
5.3.	Ensaio experimentais	107
5.3.1.	Metodologia	107
5.3.2.	Arranjo experimental	109
5.3.3.	Procedimento experimental	112
5.3.4.	Resultados	114
5.4.	Comparação entre os resultados de simulação numérica e	115

ensaios experimentais

<b>6.</b>	<b>EQUACIONAMENTO E MODELO SEMI-EMPÍRICO PARA SENSORES</b>	<b>117</b>
6.1.	Sondas tipo Pitot e tipo multifuro	117
6.2.	Sondas cilíndricas direcionais	119
6.3.	Determinação do ângulo $\alpha$	124
6.4.	Determinação do módulo da velocidade	125
6.5.	Equações aplicadas ao protótipo	126
<b>7.</b>	<b>MÓDULO EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VAZÃO</b>	<b>133</b>
7.1.	Características gerais	133
7.2.	A câmara plenum	136
7.3.	A grade sensora instalada na passagem curta	139
7.4.	A linha de fluido para medição da vazão	141
7.5.	Conjunto Motor-Ventilador	145
7.6.	Instrumentação	146
7.7.	Sistema de aquisição de dados	151
7.8.	Teste para avaliação de vazamentos no módulo experimental	153
<b>8.</b>	<b>ENSAIOS PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO E DE VELOCIDADES NA SEÇÃO TRANSVERSAL DA PASSAGEM CURTA</b>	<b>157</b>
8.1.	Metodologia	157
8.2.	Procedimento experimental	158
8.3.	Procedimentos para tratamento dos dados	160
8.4.	Resultados para medição de vazão	163
8.5.	Resultados para medição de velocidade.	171
<b>9.</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES</b>	<b>183</b>
9.1.	Análise dos resultados	183
9.1.1.	Campo de velocidades	183
9.1.2.	Sondas multifuradas multidirecionais	186

9.1.3. Ensaio com grade no módulo experimental	190
9.2. Conclusões	201
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>206</b>

## **ANEXOS**

Anexo A	Resultados das medições do campo de velocidades na passagem curta – medições com anemômetro laser	A.1
Anexo B	Resultados de simulações numéricas do escoamento em torno do cilindro	B.1
Anexo C	Resultados de ensaios experimentais do escoamento em torno de cilindro	C.1
Anexo D	Sistema monitor de pressões – curvas de calibração de sensores e desenhos de fabricação e montagem	D.1
Anexo E	Resultados de ensaios de medição de velocidades e de vazão com grade sensora multidirecional e com placa de orifício	E.1
Anexo F	Resultados de ensaios de calibração de instrumentação – módulo experimental	F.1
Anexo G	Programa para a grade sensora multidirecional	G.1
Anexo H	Equações para análise de incertezas	H.1

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras maiúsculas

<b><math>C_d</math></b>	coeficiente de descarga
<b><math>C_i</math></b>	coeficiente de correção
<b><math>CL</math></b>	coeficiente de vazamento
<b><math>C_p</math></b>	coeficiente de pressão
<b><math>D</math></b>	diâmetro da tubulação
<b><math>DP</math></b>	diferença de pressões
<b><math>DP_i</math></b>	diferença entre a pressão ( $P_i$ ) e a pressão de esteira ( $P_E$ )
<b><math>D_h</math></b>	diâmetro hidráulico
<b><math>E</math></b>	coeficiente de compressibilidade
<b><math>K</math></b>	coeficiente de vazão
<b><math>K_\alpha</math></b>	adimensional para determinar $\alpha$
<b><math>K_v</math></b>	adimensional para determinar $v$
<b><math>L</math></b>	comprimento
<b><math>P</math></b>	pressão efetiva
<b><math>P_E</math></b>	pressão de esteira
<b><math>P_{atm}</math> ou <math>P_b</math></b>	pressão atmosférica ou pressão barométrica
<b><math>N_n</math></b>	número de nós
<b><math>N_v</math></b>	número de vórtices
<b><math>O_x</math></b>	semireta que define origem do sistema de coordenadas polares
<b><math>Q</math></b>	vazão em volume
<b><math>Q_m</math></b>	vazão em massa
<b><math>Q_{ref}</math></b>	vazão em volume adotada como referência

<b>Re</b>	número de Reynolds
<b>Re<sub>d</sub></b>	número de Reynolds em função de <b>d</b> .
<b>RMS</b>	raiz quadrada da variância associada à flutuação dos valores da velocidade
<b>S</b>	área (de uma seção transversal)
<b>Sp</b>	área livre de passagem de ar
<b>S<sub>T</sub></b>	área total
<b>T</b>	temperatura
<b>TBS</b>	temperatura de bulbo seco
<b>TBU</b>	temperatura de bulbo úmido
<b>TPO</b>	temperatura de ponto de orvalho
<b>V</b>	velocidade média
<b>V<sub>max</sub></b>	velocidade máxima
<b>V<sub>x</sub></b>	velocidade média na direção x
<b>V<sub>y</sub></b>	velocidade média na direção y
<b>V<sub>xy</sub></b>	velocidade média no plano xy
<b>∇</b>	volume

#### **Letras minúsculas**

<b>d</b>	diâmetro
<b>g</b>	aceleração da gravidade
<b>i</b>	índice
<b>n</b>	número de elementos
<b><math>\vec{n}</math></b>	versor normal
<b>r</b>	raio ou coordenada radial

<b>t</b>	tempo
<b>turb</b>	intensidade de turbulência associada a uma componente da velocidade
<b>turb<sub>xy</sub></b>	intensidade de turbulência associada a $V_{xy}$
<b>v</b>	velocidade local
<b>w<sub>i</sub></b>	fator de ponderação
<b>(x; y; z)</b>	eixos em um sistema cartesiano de coordenadas

### Letras gregas

$\alpha$	ângulo da direção da velocidade em coordenadas polares
$\beta$	relação de áreas
$\gamma$	peso específico
$\varepsilon$	coeficiente de compressibilidade para fluido (placa de orifício)
$\phi$	ângulo para referenciar direção do escoamento
$\theta$	ângulo ou posição angular no cilindro
$\mu$	viscosidade dinâmica
$\rho$	massa específica
$\omega$	umidade absoluta do ar
$\psi$	ângulo para referenciar direção do escoamento

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1.1:	Quadro Comparativo entre valores propostos para vazão volumétrica mínima de ar externo em diferentes ambientes	5
Tabela 2.1:	Comparação de sistemas medidores de vazão de ar externo	25
Tabela 3.1:	Determinação da área de passagem do ar na veneziana em função das várias seções desde a face de entrada até a face de saída.	44
Tabela 3.2:	Dados para venezianas de tomadas de ar externo.	45
Tabela 3.3:	Identificação dos arquivos e condições dos ensaios	55
Tabela 4.1:	Parâmetros iniciais para definições do protótipo da grade sensora	75
Tabela 4.2:	Valores para a área livre de passagem do ar na grade sensora e na veneziana.	77
Tabela 5.1:	Parâmetros utilizados na simulação numérica	102
Tabela 5.2:	Relação de tabelas com comparação de resultados de simulações duas a duas para definição do parâmetro número de vórtices	103
Tabela 5.3:	Relação de gráficos com resultados de simulações para determinação de pressões e $C_p$ em diferentes velocidades	104
Tabela 5.4:	Instrumentação utilizada nos ensaios.	112
Tabela 6.1	Valores calculados para $K_{21}$ em função da velocidade e do ângulo $\alpha$ (graus)	127
Tabela 6.2	Valores calculados para $K_{23}$ em função da velocidade e do ângulo $\alpha$ (graus)	128
Tabela 6.3	Valores calculados para $K_{v21}$ em função da velocidade e do ângulo $\alpha$ (graus)	129

Tabela 6.4	Valores calculados para $Kv_{23}$ em função da velocidade e do ângulo $\alpha$ (graus)	130
Tabela 7.1:	Identificação dos sensores de pressão e temperatura do módulo experimental, com as incertezas sistemáticas e faixa de operação	148
Tabela 7.2:	Resultados do ensaio de vazamento. DP é a diferença de pressão entre a câmara	156
Tabela 8.1:	Identificação da configuração dos acessórios utilizados na tomada de ar externo para os ensaios realizado	158
Tabela 8.2:	Relação de tabelas com resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, identificadas a configuração de ensaio	163
Tabela 8.3:	Relação de tabelas com resultados de valores medidos para determinação da vazão de ar com placa de orifício	164
Tabela 8.4:	Resumo de resultados comparando a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 1-veneziana.	165
Tabela 8.5:	Resumo de resultados comparando a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 2 - veneziana e filtro	166
Tabela 8.6:	Resumo de resultados comparando a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 3 - veneziana, filtro e registro 60°	167
Tabela 8.7:	Resumo de resultados comparando a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 4 - veneziana, filtro e registro 30°	168
Tabela 8.8:	Resumo de resultados comparando a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 5 - veneziana, filtro e registro 45°	169



Tabela 8.9:	Resumo de resultados comparando a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 6 veneziana, filtro e registro 90°	170
Tabela 8.10:	Comparação de resultados para valores médios de velocidade, $V_{xy}$ e ângulos $\alpha$ , medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 1 = veneziana. Vazão de referência: 300 L/s	173
Tabela 8.11:	Comparação de resultados para valores médios de velocidade, $V_{xy}$ e ângulos $\alpha$ , medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 2 = veneziana e filtro. Vazão de referencia: 300 L/s.	173
Tabela 8.12:	Comparação de resultados para valores médios de velocidade, $V_{xy}$ e ângulos $\alpha$ , medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 3 = veneziana, filtro e registro 60°. Vazão de referencia 300 L/s.	174
Tabela 8.13:	Comparação de resultados para valores médios de velocidade, $V_{xy}$ e ângulos $\alpha$ , medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 1 = veneziana. Vazão de referencia: 370 L/s	174
Tabela 8.14:	Comparação de resultados para valores médios de velocidade, $V_{xy}$ e ângulos $\alpha$ , medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 2 = veneziana e filtro. Vazão de referencia: 370 L/s	175
Tabela 8.15:	Comparação de resultados para valores médios de velocidade, $V_{xy}$ e ângulos $\alpha$ , medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 3 = veneziana, filtro e registro 60°. Vazão de referencia:370 L/s.	175

Tabela 8.16:	Comparação de resultados para valores médios de velocidade, $V_{xy}$ e ângulos $\alpha$ , medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 1 = veneziana. Vazão de referencia: 510 L/s.	176
Tabela 8.17:	Comparação de resultados para valores médios de velocidade, $V_{xy}$ e ângulos $\alpha$ , medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 2 = veneziana e filtro. Vazão de referencia: 510 L/s.	176
Tabela 8.18:	Comparação de resultados para valores médios de velocidade, $V_{xy}$ e ângulos $\alpha$ , medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 3 = veneziana, filtro e registro 60°. Vazão de referencia: 510 L/s-	177
Tabela 9.1:	Resumo de resultados comparativos entre a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 1- veneziana. Nova equação (9.3) adotada para o cálculo da vazão.	196
Tabela 9.2:	Resumo de resultados comparativos entre a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 2- veneziana e filtro. Nova equação (9.1) adotada para o cálculo da vazão	197
Tabela 9.3:	Resumo de resultados comparativos entre a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 3, 4, 5 e 6- veneziana, filtro e registro com ângulos de 60°, 30°, 45° e 90°. Nova equação (9.2) adotada para o cálculo da vazão	199

**TABELAS DOS ANEXOS**

Tabela A1 a A.5:	Resultados da medição do campo de velocidades com anemômetro laser. Plano xy – vazões de referência: 290 L/s a 760 L/s.	A.1
Tabela A.6 a A.10:	Resultados da medição do campo de velocidades com anemômetro laser. Direção z – vazão de referência: 290 L/s a 760 L/s.	A.6
Tabela A11:	Resultados da medição do campo de velocidades com anemômetro laser. Plano xy – vazões de referência: 380 L/s	A.11
Tabela A12:	Resultados da medição do campo de velocidades com anemômetro laser. Plano xy – vazões de referência: 640 L/s	A.12.
Tabela A13:	Resultados da medição do campo de velocidades com anemômetro laser. Plano xy – vazões de referência: 380 L/s	A.13
Tabela B.1:	Resultados da simulação numérica – comparação entre diferentes número de vórtices	B.1
Tabela B.2:	Resultados da simulação numérica – comparação entre diferentes número de vórtices	B.3
Tabela B.3:	Resultados da simulação numérica – comparação entre diferentes número de vórtices	B.5
Tabela B.4:	Resultados da simulação numérica – comparação entre diferentes número de vórtices	B.7
Tabela B.5	Comparação de resultados da simulação numérica e ensaios experimentais para valores de distribuição de pressão sobre o cilindro, $v = 2\text{m/s}$	B.17

Tabela B.6	Comparação de resultados da simulação numérica e ensaios experimentais para valores de distribuição de pressão sobre o cilindro, $v = 5\text{m/s}$	B.18
Tabela B.7	Comparação de resultados da simulação numérica e ensaios experimentais para valores de distribuição de pressão sobre o cilindro, $v = 10\text{m/s}$	B.19
Tabela C1:	Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento. Velocidades na seção de testes $v=2\text{ m/s}$	C.1
Tabela C2:	Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento. Velocidades na seção de testes $v=3\text{ m/s}$ .	C.4
Tabela C3:	Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento. Velocidades na seção de testes $v=4\text{ m/s}$ .	C.7
Tabela C4:	Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento. Velocidades na seção de testes $v=5\text{ m/s}$ .	C.10
Tabela C5:	Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento. Velocidades na seção de testes $v=6\text{ m/s}$ .	C.15
Tabela C6:	Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento. Velocidades na seção de testes $v=7\text{ m/s}$ .	C.18
Tabela C7:	Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento. Velocidades na seção de testes $v=8\text{ m/s}$	C.21

Tabela C8:	Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento. Velocidades na seção de testes $v=9$ m/s	C.26
Tabela C9:	Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento. Velocidades na seção de testes $v=10$ m/s	C.29
Tabelas E.1 a E.10:	Resultados dos ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 1, $Q_{ref} = 200$ L/s a $Q_{ref} = 640$ L/s	E.1
Tabelas E.11 a E.20:	Resultados dos ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 2, $Q_{ref} = 200$ L/s a $Q_{ref} = 640$ L/s.	E.11
Tabelas E.21 a E.30:	Resultados dos ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 3, $Q_{ref} = 200$ L/s a $Q_{ref} = 640$ L/s.	E.21
Tabelas E.31 a E.40:	Resultados dos ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 4, $Q_{ref} = 200$ L/s a $Q_{ref} = 640$ L/s	E.31
Tabelas E.41 a E.50:	Resultados dos ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 5, $Q_{ref} = 200$ L/s a $Q_{ref} = 640$ L/s	E.41
Tabelas E.51 a E.60:	Resultados dos ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 6, $Q_{ref}=200$ L/s a $Q_{ref} = 640$ L/s	E.51
Tabelas E.61 a E.66:	Resultados de valores medidos para determinação da vazão de ar com placa de orifício, configuração 1 a 6.	E.61

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1:	Tubo multifuro clássico, NBR 10396 (1988).	12
Figura 1.2:	Medidor de vazão tipo coifa, SMACNA (1991)	14
Figura 2.1:	Sistema denominado "fan-trecking" proposto por Levenhagen (1992) e Hittle(1997)	22
Figura 2.2:	Tubo de Pitot utilizado por Henri Pitot (1732)	28
Figura 2.3	Exemplos de tubos de Pitot padronizados (FOLSOM, 1956)	30
Figura 2.4	Tubo multifuro apresentado por PLACHE (1974)	31
Figura 2.5	Exemplos de construções de sondas direcionais	34
Figura 2.6	Exemplos de construções de sondas direcionais	35
Figura 2.7	Tubo Pitot de 5 orifícios	36
Figura 2.8	Esquema do posicionamento do sistema de referência no sensor. (Duas representações: LEE e ASH, WRIGTH)	39
Figura 3.1	Conjunto veneziana-registro-filtro – VDF, reprodução folheto Trox (1998a).	42
Figura 3.2	Figura 3.2: Veneziana AWK – vista frontal e corte	43
Figura 3.3	Veneziana AWK, detalhe da vista em corte. Medidas em milímetros.	44
Figura 3.4	Foto a) Vista frontal do túnel de vento. Observa-se o dispositivo adaptador que representou a passagem curta, o canhão do anemômetro laser e seu braço posicionador. b) Medidores de pressão atmosférica e temperaturas de bulbo seco e de ponto de orvalho.	46
Figura 3.5	Arranjo Experimental – Ensaio com Anemômetro laser	49

Figura 3.6	Foto a) Aparato em acrílico para simular passagem curta com dispositivo de localização dos pontos de medição na seção de testes. Foto b) Anemômetro laser durante o processo de medição.	51
Figura 3.7	Esquema identificando os pontos de medição e sistema de coordenadas adotado. O paralelepípedo representa a passagem curta.	52
Figura 3.8	Perfis das componentes da velocidade $v_x$ , $v_y$ na seção de medição; $Q_{ref} = 193$ L/s; configuração 1 = veneziana ; ensaio "V3xy".	60
Figura 3.9	Perfis das componentes da velocidade $v_x$ , $v_y$ na seção de medição; $Q_{ref} = 245$ L/s; configuração 1 = veneziana ; ensaio "V4xy"	60
Figura 3.10	Perfis das componentes da velocidade $v_x$ , $v_y$ na seção de medição; $Q_{ref} = 310$ L/s; configuração 1 = veneziana ; ensaio "V5xy".	61
Figura 3.11	Perfis das componentes da velocidade $v_x$ , $v_y$ na seção de medição; $Q_{ref} = 370$ L/s; configuração 1 = veneziana ; ensaio "V6xy".	61
Figura 3.12	Perfis das componentes da velocidade $v_x$ , $v_y$ na seção de medição; $Q_{ref} = 510$ L/s; configuração 1 = veneziana ; ensaio "V7xy"	62
Figura 3.13	Perfis das componentes da velocidade $v_x$ , $v_y$ na seção de medição; $Q_{ref} = 640$ L/s; configuração 1 = veneziana ; ensaio "V8xy"	62
Figura 3.14	Perfis das componentes da velocidade $v_x$ , $v_y$ na seção de medição; $Q_{ref} = 290$ L/s; configuração 2 = veneziana e filtro ; ensaio "V11xy"	63

Figura 3.15	Perfis das componentes da velocidade $v_x$ , $v_y$ na seção de medição; $Q_{ref} = 370$ L/s; configuração 2 = veneziana e filtro ; ensaio "V12xy"	63
Figura 3.16	Perfis das componentes da velocidade $v_x$ , $v_y$ na seção de medição; $Q_{ref} = 510$ L/s; configuração 2 = veneziana e filtro ; ensaio "V13xy"	64
Figura 3.17	Perfis das componentes da velocidade $v_x$ , $v_y$ na seção de medição; $Q_{ref} = 640$ L/s; configuração 2 = veneziana e filtro ; ensaio "V14xy"	64
Figura 3.18	Perfis das componentes da velocidade $v_x$ , $v_y$ na seção de medição; $Q_{ref} = 290$ L/s; configuração 3 = veneziana, filtro e registro $60^\circ$ ; ensaio "V15xy"	65
Figura 3.19	Perfis das componentes da velocidade $v_x$ , $v_y$ na seção de medição; $Q_{ref} = 380$ L/s; configuração 3 = veneziana, filtro e registro $60^\circ$ ; ensaio "V15xy"	65
Figura 3.20	Perfis das componentes da velocidade $v_x$ , $v_y$ na seção de medição; $Q_{ref} = 510$ L/s; configuração 3 = veneziana, filtro e registro $60^\circ$ ; ensaio "V10xy"	66
Figura 3.21	Perfis das componentes da velocidade $v_x$ , $v_y$ na seção de medição; $Q_{ref} = 640$ L/s; configuração 3 = veneziana, filtro e registro $60^\circ$ ; ensaio "V18xy"	66
Figura 3.22	Perfis da velocidade $v_{xy}$ em planos xy representados em metade da seção de medição; $Q_{ref} = 380$ L/s; configuração 1 = veneziana; ensaio "V21xy"	67
Figura 3.23	Perfis da velocidade $v_{xy}$ em planos xy representados em metade da seção de medição; $Q_{ref} = 640$ L/s; configuração 1 = veneziana; ensaio "V22xy"	67



Figura 3.24	Perfis da velocidade $v_{xy}$ em planos $xy$ representados em metade da seção de medição; $Q_{ref} = 380$ L/s; configuração 2 = veneziana + filtro; ensaio "V23xy"	68
Figura 3.25	Perfis da velocidade $v_{xy}$ em planos $xy$ representados em metade da seção de medição; $Q_{ref} = 640$ L/s; configuração 2 = veneziana + filtro; ensaio "V24xy"	68
Figura 3.26	Perfis da velocidade $v_{xy}$ em planos $xy$ representados em metade da seção de medição; $Q_{ref} = 380$ L/s; configuração 3 = veneziana + filtro + registro 60°; ensaio "V25xy"	69
Figura 3.27	Perfis da velocidade $v_{xy}$ em planos $xy$ representados em metade da seção de medição; $Q_{ref} = 640$ L/s; configuração 3 = veneziana + filtro + registro 60°; ensaio "V26xy"	69
Figura 4.1	Representação da divisão da seção em equi-áreas e identificação do centro das mesmas. As coordenadas dos centros das áreas foram adotadas para posicionar os orifícios na grade sensora.	80
Figura 4.2	Protótipo da grade sensora multidirecional – vista frontal	83
Figura 4.3	Desenho em perspectiva do protótipo da grade sensora multidirecional. Detalhe da lateral superior esquerda	84
Figura 4.4	Detalhe do cilindro sensor – corte transversal	84
Figura 4.5	Processo de fabricação dos protótipos das sondas	89
Figura 4.6	Protótipo de sonda concluído	89
Figura 4.7	Fotografias da grade sensora instalada	91
Figura 4.8:	Sistema monitor de pressões. Visualização das placas de circuito impresso com sensores e microprocessadores durante processo de montagem.	96

Figura 4.9	Teste de estanqueidade nos terminais do sistema monitor de pressão	97
Figura 5.1	Gráfico com curvas de $C_p \times \theta$ , resultado de simulação para vários números de vórtices, $N_v = 1000$ a $N_v = 5000$ .	103
Figura 5.2	Gráfico com curvas de $C_p \times \theta$ , resultado de simulação para várias velocidades. $N_v = 2000$ , e $N_{nós} = 72$ .	105
Figura 5.3	Corpo de prova fixado em base sobre mesa de posicionamento angular da seção de testes do túnel de vento do IPT.	110
Figura 5.4	Vista frontal da seção de testes do túnel de vento. Corpo de prova em processo de posicionamento. Observa-se tubo de Pitot, e sensores de TPO e TBS.	111
Figura 6.1	Representação de um tubo de Pitot estático inserido no escoamento	117
Figura 6.2	Esquema da seção transversal da sonda cilíndrica. Identificação dos ângulos de incidência da velocidade em sistema de coordenadas com origem em $Ox$ .	119
Figura 6.3	Representação do cilindro com 4 orifícios identificados por 1, 2, 3 e E.	121
Figura 6.4	Curva de $K_{21}$ médio em função do ângulo $\alpha$ com a respectiva equação de ajuste.	128
Figura 6.5	Curva de $K_{23}$ médio em função do ângulo $\alpha$ com a respectiva equação de ajuste.	129
Figura 6.6	Curva de $K_{v_{21}}$ médio em função do ângulo $\alpha$ com a respectiva equação de ajuste.	130
Figura 6.7	Curva de $K_{v_{23}}$ médio em função do ângulo $\alpha$ com a respectiva equação de ajuste.	131

Figura 7.1	Esquema do arranjo experimental módulo de medição de vazão MV	135
Figura 7.2	Desenho da câmara plenum	136
Figura 7.3	Aplicação de resina poliéster na porta de acesso da câmara	137
Figura 7.4	Vista geral da câmara plenum	138
Figura 7.5	A foto da esquerda apresenta o bocal que faz a conexão da tubulação na câmara. A foto da direita mostra o detalhe da passagem curta entre a câmara e o anteparo de madeira que é a parede externa simulada	139
Figura 7.6	Vista lateral esquemática da tomada de ar externo, indicando as posições relativas dos dispositivos instalados.	140
Figura 7.7	Vista da conexão da grade sensora com o sistema monitor de pressão	141
Figura 7.8	Distâncias de trechos retos no módulo experimental para medição de vazão MV	142
Figura 7.9	Na foto da esquerda estão as tomadas de pressão para a placa de orifício. Na foto da direita observa-se o termopar que faz a medição da temperatura no duto e a válvula borboleta principal.	144
Figura 7.10	Psicrômetro de aspiração com termopares	149
Figura 7.11	Vista geral da instrumentação e da tubulação onde é medida a vazão de ar.	150
Figura 7.12	Vista da câmara plenum preparada para teste de vazamento	154

Figura 8.1	Uso do medidor de vazão tipo coifa para acerto da vazão de referência em ensaio	160
Figura 8.2	Gráfico dos valores da tabela 8.4. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 1 – veneziana	165
Figura 8.3	Gráfico dos valores da tabela 8.4. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 2– veneziana e Filtro.	166
Figura 8.4	Gráfico dos valores da tabela 8.4. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 3 – veneziana, filtro e registro 60°.	167
Figura 8.5	Gráfico dos valores da tabela 8.4. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 4 – veneziana, filtro e registro 30°.	168
Figura 8.6	Gráfico dos valores da tabela 8.8. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 5 – veneziana, filtro e registro 45°.	169
Figura 8.7	Gráfico dos valores da tabela 8.9. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios6 – veneziana, filtro e registro 90°.	170

- Figura 8.8 Gráfico dos valores das tabelas 8.6 a 8.9. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: veneziana, filtro e registro em 4 posições de ângulos. 171
- Figura 8.9 Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 300$  L/s, configuração 1 = veneziana. 178
- Figura 8.10 Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 300$  L/s, configuração 2 = veneziana e filtro. 178
- Figura 8.11 Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 300$  L/s, configuração 3 = veneziana, filtro e registro  $60^\circ$ . 179
- Figura 8.12 Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 370$  L/s, configuração 1 = veneziana. 179
- Figura 8.13 Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 370$  L/s, configuração 2 = veneziana e filtro. 180
- Figura 8.14 Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 370$  L/s, configuração 3 = veneziana, filtro e registro  $60^\circ$ . 180

Figura 8.15	Perfis de velocidade $V_{xy}$ para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul. $Q_{ref} = 510$ L/s, configuração 1 = veneziana.	181
Figura 8.16	Perfis de velocidade $V_{xy}$ para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul. $Q_{ref} = 510$ L/s, configuração 2 = veneziana e filtro.	181
Figura 8.17	Perfis de velocidade $V_{xy}$ para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul. $Q_{ref} = 510$ L/s, configuração 3 = veneziana, filtro e registro $60^\circ$ .	182
Figura 9.1	Gráfico dos valores da tabela 9.1. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 1- veneziana. Nova equação (9.3) para o cálculo da vazão	196
Figura 9.2	Gráfico dos valores da tabela 9.2. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 2- veneziana e filtro. Nova equação (9.1) para o cálculo da vazão	198
Figura 9.3	Gráfico dos valores da tabela 9.3. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 2, 3, 4, 5 e 6 – veneziana, filtro e registro. Nova equação (9.2) para o cálculo da vazão	200

## FIGURAS DOS ANEXOS

Figura B.1	Gráfico de $C_p \times \theta$ , resultado de simulação numérica para $V=2$ m/s, $N_{\text{nós}}=72$	B.9
Figura B.2	Gráfico de $C_p \times \theta$ , resultado de simulação numérica para $V=2$ m/s, $N_{\text{nós}}=288$	B.10
Figura B.3	Gráfico de $C_p \times \theta$ , resultado de simulação numérica para $V=5$ m/s, $N_{\text{nós}}=72$	B.11
Figura B.4	Gráfico de $C_p \times \theta$ , resultado de simulação numérica para $V=5$ m/s, $N_{\text{nós}}=144$	B.12
Figura B.5	Gráfico de $C_p \times \theta$ , resultado de simulação numérica para $V=5$ m/s, $N_{\text{nós}}=288$	B.13
Figura B.6	Gráfico de $C_p \times \theta$ , resultado de simulação numérica para $V=5$ m/s, $N_{\text{nós}}=360$	B.14
Figura B.7	Gráfico de $C_p \times \theta$ , resultado de simulação numérica para $V=10$ m/s, $N_{\text{nós}}=144$	B.15
Figura B.8	Gráfico de $C_p \times \theta$ , resultado de simulação numérica para $V=10$ m/s, $N_{\text{nós}}=72$	B.16
Figura C.1	Pressão (Pa) x ângulo (graus); Velocidade de 2 m/s.	C.34
Figura C.2	$C_p$ x ângulo (graus); Velocidade de 2 m/s.	C.34
Figura C.3	Pressão (Pa) x ângulo (graus); Velocidade de 3 m/s.	C.35
Figura C.4	$C_p$ x ângulo (graus); Velocidade de 3 m/s.	C.35
Figura C.5	Pressão (Pa) x ângulo (graus); Velocidade de 4 m/s.	C.36
Figura C.6	$C_p$ x ângulo (graus); Velocidade de 4 m/s.	C.36
Figura C.7	Pressão (Pa) x ângulo (graus); Velocidade de 5 m/s.	C.37
Figura C.8	$C_p$ x ângulo (graus); Velocidade de 5 m/s.	C.37
Figura C.9	Pressão (Pa) x ângulo (graus); Velocidade de 6 m/s.	C.38
Figura C.10	$C_p$ x ângulo (graus); Velocidade de 6 m/s.	C.38

Figura C.11	Pressão (Pa) x ângulo (graus); Velocidade de 7 m/s.	C.39
Figura C.12	Cp x ângulo (graus); Velocidade de 7 m/s.	C.39
Figura C.13	Pressão (Pa) x ângulo (graus); Velocidade de 8 m/s.	C.40
Figura C.14	Cp x ângulo (graus); Velocidade de 8 m/s.	C.40
Figura C.15	Pressão (Pa) x ângulo (graus); Velocidade de 9 m/s.	C.41
Figura C.16	Cp x ângulo (graus); Velocidade de 9 m/s.	C.41
Figura C.17	Pressão (Pa) x ângulo (graus); Velocidade de 10 m/s.	C.42
Figura C.18	Cp x ângulo (graus); Velocidade de 10 m/s.	C.42
Figuras C.19 a C.27	Diferença de pressão (Pa) x ângulo (graus); Velocidade de 2 m/s a 10 m/s.-C.19	C.43
Figura D.1	Gráficos dos resultados da calibração dos sensores 1 e 2, com equação de ajuste linear.	D.1
Figura D.2	Gráficos dos resultados da calibração dos sensores 3 e 4, com equação de ajuste linear.	D.2
Figura D.3	Gráficos dos resultados da calibração dos sensores 5 e 6, com equação de ajuste linear.	D.3
Figura D.4	Gráficos dos resultados da calibração dos sensores 7 e 8, com equação de ajuste linear.	D.4
Figura D.5	Gráficos dos resultados da calibração dos sensores 9 e 10, com equação de ajuste linear.	D.5
Figura D.6	Gráficos dos resultados da calibração dos sensores 11 e 12, com equação de ajuste linear.	D.6
Figura D.7	Desenho da caixa do sistema monitor de pressões	D.7
Figura D.8	Vista frontal do posicionamento dos sensores na caixa e nas placas de circuito impresso	D.8
Figura D.9	Desenho das disposições dos sensores de pressão na placa de circuito impresso. Cada sensor está identificado	D.9



pele seu número de série e pelo número do terminal de saída onde será conectado.

Figura D.10	Desenho da disposição dos sensores de pressão na placa de circuito impresso. Cada sensor está identificado pelo seu número de série e pelo número do terminal de saída onde será conectado	D.10
Figura D.11.	Desenhos dos terminais de tomada de pressão.	D.11
Figura F.1	Tabelas com resultados e gráficos com o ajuste de polinômio interpolador para cada um dos termopares	F.1
Figura F.2	Tabelas com resultados e gráficos com o ajuste de polinômio interpolador para cada um dos transdutores de pressão diferencial	F.2
Figura F.3	Resultados da avaliação dimensional da placa de orifício Padrão para a medição da vazão	F.3
Figura F.4	Tabelas com resultados e gráfico de calibração do medidor de vazão tipo coifa na escala: 200 a 470 L/s	F.4
Figura F.4	Tabelas com resultados e gráfico de calibração do medidor de vazão tipo coifa na escala: 400 a 940 L/s	F.4

## RESUMO

Este trabalho teve como proposta investigar a interação entre o escoamento de ar em uma passagem curta, que representa uma tomada de ar externo de um sistema de ar condicionado, e uma grade sensora multidirecional desenvolvida para avaliar vetores de velocidades médias na seção onde deseja-se medir a vazão. Nesta passagem curta foi estabelecida uma seção de medição localizada entre a veneziana e o registro e filtro.

Para determinar o campo de velocidades na passagem curta com a presença de acessórios foram realizadas medições com sistema de anemometria laser. O intervalo de vazões foi de 0.200 m<sup>3</sup>/s a 0.640 m<sup>3</sup>/s, determinado a partir dos acessórios selecionados para a simulação. Um conceito novo de sondas cilíndricas multifuradas multidirecionais foi desenvolvida a partir dos resultados obtidos para os perfis de velocidade.

Para capacitar as sondas cilíndricas para medir velocidade e direção do escoamento foram realizados simulações numéricas e ensaios experimentais com número de Reynolds no intervalo  $2000 < Re_d < 10000$ . Os parâmetros de direcionalidade foram obtidos a partir dos resultados da distribuição de pressões no cilindro sensor. Modelo semi-empírico definiu números adimensionais, cujas curvas viabilizaram a aplicação dos sensores.

Para os ensaios que simularam a aplicação de um protótipo da grade sensora em uma tomada de ar externo, foi projetado e fabricado, um módulo experimental com a simulação de uma câmara de mistura de uma instalação de ar condicionado, um sistema monitor de pressões multicanal acoplado a um microcomputador que fez o gerenciamento e tratamento dos dados, e uma grade sensora multifurada multidirecional.

Os resultados dos ensaios no módulo experimental apresentaram valores de velocidade e vazão na seção de medição próximos à aqueles medidos com o anemômetro laser e placa de orifício, adotada como padrão de referência de vazão. Estes resultados indicaram que para o metodologia de cálculo de vazão adotada ocorreu um diferença da ordem de 2.8% para configuração com veneziana, 1.5% para configuração com veneziana e filtro e 3.2% para a configuração com os três acessórios. As curvas que relacionam vazão medida com a grade e com a placa tiveram comportamento linear, indicando a possibilidade de seu uso em sistemas de controle.

## ABSTRACT

The main objective of this study is the investigation of air flow in short passages of air conditioning mixing chamber inlets, and its interaction with a multidirectional sensor grid, developed to measure average velocities in a cross section. In this short passage it is defined a measuring cross section between the louvers and the damper and filter.

In order to determine the velocities in this short passage with the effect of accessories, measurements are performed with laser anemometry. The interval of flowrates,  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $0.640 \text{ m}^3/\text{s}$ , was determined from the selection of accessories for this simulation. A new concept of multidirectional and multiholed cylindrical probe was develop from the analysis of the velocity profiles.

To making possible these cylindrical sensors to measure flow velocity and direction, on performed numerical simulations and experimental tests as Reynolds numbers  $2000 < Re_d < 10000$ . The directionality parameters were obtained from the pressure distribution around the cylindrical sensor. A semi-empirical model was defined non-dimensional numbers, giving curves and correlations that made possible the sensor application.

This tests to simulate the application of the grid prototype for on external air intake were developed and built on experimental test apparatus simulating on air conditioning mixing chamber, a pressure monitoring system attached to a microcomputer which menages and treats the data from the sensing grid.

The test results from the experimental apparatus presented velocity and flowrate values close to those measured with laser anemometry and orifice plate adopted as reference. These results, indicated for the adopted evaluation show a difference of 2.8 % with the louver configuration, 1.5% for louver plus filter and 3.2% in the with on three accessories. The flow curves with the grid and plate present a linear behavior, which indicates the possibility of its use in control systems.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Medição de vazão em sistemas de tratamento de ar: motivação deste desenvolvimento

Realizar a medição de vazão em sistemas onde há movimentação de ar nem sempre é tarefa simples que pode ser realizada com instrumentação e técnicas tradicionais. Há seções de passagem em sistemas de tratamento de ar onde é necessário determinar o valor da vazão de ar para fins de controle, ou com o objetivo de avaliar as condições de operação do mesmo, porém, verifica-se que nestas seções, predominam dificuldades na obtenção de bons resultados através de recursos economicamente compatíveis com as instalações em questão.

Nos sistemas de movimentação de ar condicionado e de ventilação, as dificuldades na medição de vazão ocorrem devido a condições onde o escoamento está perturbado. Estas situações são provocadas pelo uso de equipamentos e acessórios, como dutos, curvas, tês, alargamentos, reduções, câmaras plenum, grelhas, venezianas, difusores, registros (*dampers*), filtros, trocadores de calor, etc. As perturbações podem ser críticas quando impõem às partículas de fluido movimentos desordenados, e em direções distintas à da direção principal do escoamento, alterando significativamente os caminhos aos quais o ar é induzido, passando o fluxo a comportar-se de modo errático e aumentando o nível de turbulência. Esta situação é antagônica à caracterizada pelo escoamento com perfil de velocidades uniforme e plenamente desenvolvido em um conduto, que é a mais indicada para medições de vazão.

Nesta pesquisa a investigação foi realizada para conhecer as propriedades do escoamento e técnicas para medição de vazão nos casos em que o escoamento de ar atravessa trechos retos de pequenos comprimentos e seção constante, denominada passagem curta. Como referência para caracterizar uma passagem curta adotou-se o seguinte intervalo:

$$0.2 < \frac{L}{D_H} < 2.0$$

onde:

L é comprimento da passagem

$D_H$  é o diâmetro hidráulico da seção transversal

Em geral, estas passagens fazem a conexão entre câmaras plenum, caixas terminais e ambientes, caixas de mistura e ambientes, etc., e possuem acessórios instalados, tais como filtros, venezianas, registros, grelhas, etc..

No presente estudo, o caso de passagem curta selecionado é o da tomada de ar externo de instalações de ar condicionado, que faz a conexão direta entre o meio exterior e a câmara de mistura do sistema de tratamento de ar, na qual, atualmente, há significativa importância na medição de vazão. Foram consideradas três alternativas de acessórios que podem estar instalados na passagem: veneziana, filtro e registro.

Para o desenvolvimento da pesquisa foi necessário conhecer as características do campo de velocidades do escoamento de ar através da passagem curta, de modo que fosse possível conduzir a investigação que propôs um sistema de medição de vazão utilizando uma grade sensora multidirecional.

Enfocando questões atuais relacionadas com sistemas de tratamento de ar (Ar Condicionado e Ventilação - ACV), enfatiza-se que nas últimas décadas, em nível mundial, destacam-se duas preocupações que foram elementos motivadores desta pesquisa: o uso racional de energia e a qualidade do ar em ambientes interiores. Para melhorar o desempenho dos sistemas de condicionamento de ar especialmente nestes dois aspectos, passou-se a adotar controles mais sofisticados de parâmetros importantes, sendo um destes a vazão de ar, o que exige medições com maior exatidão e repetitividade.

São requeridos nos sistemas em questão, medidores de vazão simples, confiáveis, com boa repetitividade e baixa manutenção. Em geral, utilizam-se medidores que indicam indiretamente a velocidade média, ou a velocidade local a ser integrada, determinada a partir de uma diferença de pressão, como ocorre no tradicional tubo de Pitot.

O ponto de partida para estabelecer uma grade sensora de vazão foi resultado de uma combinação de propostas de sondas que realizam a determinação da direção do escoamento de um fluido, com uma família de medidores de vazão derivados do tubo de Pitot, chamados medidores tipo tubo multifuro.

## **1.2. A qualidade do ar interior e a vazão de ar externo**

Nos estudos recentes que enfocam a Qualidade do Ar de Interiores (QAI), usualmente conhecida pela abreviação do inglês IAQ - *Indoor Air Quality*, tem havido um destaque especial para a definição do volume de ar externo que é introduzido no ambiente com a finalidade de reciclar o ar

recirculante, diluindo os contaminantes presentes no ambiente. Alguns textos recentes que confirmam o citado são o manual da SMACNA (1998), *Indoor Air Quality: A System Approach*, os trabalhos de ALEXANDRE (1998 e 1999), de HOWARD III (1999), da ABRAVA (1999) e de MARIANI e BOLLIGER JR (1999). Normas e legislações tem sido publicadas com o mesmo intuito, como a norma norte americana, reconhecida internacionalmente, ASHRAE Standard 62 (edições de 1989 e 1999) - "*Ventilation for acceptable indoor air quality*", e a recente Portaria 3.523 de 1998 do Ministério da Saúde do Brasil.

Neste contexto surge a questão: Qual a vazão de ar externo necessária para determinada condição de operação de um sistema de tratamento de ar ?

Muitos trabalhos propõe respostas para esta pergunta. As normas e legislações estabelecem valores para a taxa do volume de ar externo em função do tipo de utilização do ambiente, e proporcionalmente ao número de ocupantes ou à área dos ambientes, estando definida neste caso uma taxa de ocupantes por unidade de área. Porém os valores não são consensuais, tendo inclusive sofrido alterações significativas dentro de uma mesma norma, conforme verifica-se nas várias edições da ASHRAE 62, atualmente em revisão permanente. Os projetos das instalações brasileiras de ar condicionado, em geral, seguem a norma brasileira da ABNT (1980) – NBR 6401: Instalações centrais de ar condicionado para conforto - Parâmetros básicos de projeto. Um exemplo de valores divergentes pode ser observado na tabela 1.1 a seguir, retirada do trabalho de MARIANI e BOLLIGER JR (1999).

É preciso chamar a atenção para o fato que a condição de massa específica do ar, que está associada aos valores de vazão volumétrica na quase totalidade das normas e legislações, é omitida. Assim sendo, considera-

se que os valores apresentados estão referidos sempre à condição padrão (“*standard*”) do ar, estabelecida com os valores de temperatura de bulbo seco, TBS = 21°C, pressão atmosférica,  $P_{atm} = 101.325 \text{ kPa}$  e umidade relativa, UR = 0 %, o que resulta para a massa específica do ar,  $\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$ . Deste modo podem ser verificados os valores de vazão de ar externo em termos de massa, o que é compatível com os propósitos de QAI, onde inclusive os valores limites de concentração de contaminantes são apresentados em geral em ppm (partículas por milhão). A título de exemplo, o valor de  $27 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{pessoa})$ , estabelecido pela Portaria 3523 do Ministério da Saúde, corresponde a  $32.5 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{pessoa})$ , e este valor quando aplicado à condição de pico de verão na cidade de São Paulo, com  $\rho = 1.036 \text{ kg/m}^3$ , corresponde a uma vazão volumétrica de  $31.4 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{pessoa})$  de ar externo.

Aplicação	NBR 6401-80 $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}\cdot\text{pessoa}}\right)$	ASHRAE 62-89* $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}\cdot\text{pessoa}}\right)$	Portaria 3523 $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}\cdot\text{pessoa}}\right)$
Bancos	13	25.5	27
Escritórios - públicos	17	---	27
Escritórios - privados	25	34	27
Lojas	13	17	27
Restaurantes	20	36	27
Teatros / Auditórios sem fumantes	8	25.5	27
Teatros / Auditórios com fumantes	17	25.5	27

Tabela 1.1: Quadro Comparativo entre valores propostos para vazão volumétrica mínima de ar externo em diferentes ambientes

\* **Nota:** Para obter-se os valores da ASHRAE 62-89 em  $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{pessoa})$ , partiu-se dos valores em pés cúbicos por minuto (cfm) ali apresentados .



Assim sendo, medir a vazão do ar externo que entra na câmara de mistura de um sistema de AC, local onde o ar externo dilui-se no ar recirculado, passa a ser um requisito para instalações que propõe-se a garantir a qualidade do ar interno – QAI. Esta medição pode ocorrer ocasionalmente, ou ser realizada com monitoração permanente.

Dentre as instalações que possuem monitoração permanente, podem ser citadas aquelas existentes em edifícios denominados “inteligentes”, ou com sistemas de gerenciamento informatizado e automação predial, conhecido pela sigla BMS - *Building Management System*. Nas situações onde a determinação da vazão ocorre de modo não permanente, os exemplos recaem nos casos de avaliação operacional do sistema de AC, como quando executado o TAB - Teste, Ajuste e Balanceamento da instalação de tratamento de ar.

### **1.3. As instalações de condicionamento de ar e o controle da vazão do ar externo**

No intuito de analisar como a vazão de ar externo participa dos processos de tratamento de ar é proposta uma classificação das instalações de ar condicionado central, que atendem múltiplos ambientes através de redes de distribuição de ar. Estas são a seguir agrupadas tomando como parâmetro as características dos circuitos de movimentação do ar e os equipamentos empregados para controlar a distribuição deste ar:

- a) Instalação com ventilador e ambientes operando com vazão constante. A vazão mássica da mistura de ar externo com ar recirculado pode variar apenas devido a alterações de massa específica do ar externo.

- b) Instalação com ventilador acionado através de motor elétrico com controle de rotação, do tipo inversor estático de frequência, e sistema de distribuição de ar com vazão variável, controlada através de equipamentos moduladores de vazão denominados caixas de volume de ar variável (VAV).
- c) Instalação com ventilador operando com rotação constante e sistema de distribuição de ar com vazão variável, controlada por caixas de volume de ar variável (VAV).
- d) Instalação com ventilador acionado através de motor elétrico com controle de rotação, do tipo inversor estático de frequência, e sistema de distribuição de ar com vazão constante. Este caso exige que todos os ambientes façam parte de uma mesma zona, isto é as necessidades de remoção de carga térmica e de entrada de ar externo sejam idênticas

Analisando os casos tendo como enfoque a vazão do ar externo conclui-se que:

- no caso a) a vazão de ar externo não estará sujeitas a mudanças expressivas. Porém alterações nas condições climáticas implicam em variações da massa específica do ar externo e podem exigir medições desta vazão para certificar se o sistema está nas condições corretas de operação.
- no caso b), uma redução de vazão provocada por uma, ou mais, caixas de volume de ar variável, irá fazer com o que o controle de rotação associado ao ventilador reduza a rotação do mesmo, mudando seu ponto de operação e fazendo que haja uma menor depressão na câmara de mistura, reduzindo assim a vazão de ar exterior. Caso haja a necessidade de controlar ou impedir esta redução, uma solução é atuar sobre um registro associado à

tomada de ar externo, ou em outro ponto adequado, como por exemplo na linha de retorno.

- no caso c) a redução de vazão nas caixas VAV leva o ventilador a uma nova condição de operação, que influenciará a condição de pressão na câmara de mistura, provocando alteração na vazão de ar externo. Caso a redução do ar externo tenha sido excessiva, esta pode ser modificada para o valor correto através de atuação em registro(s) posicionado(s) adequadamente.
- no caso d), os controles verificando que existe menor necessidade de vazão na rede de distribuição de ar, reduzem a vazão do ventilador, diminuindo a sua rotação. O ar externo será também reduzido, devendo haver uma verificação se a sua vazão está dentro do que é requerido pelo sistema nesta nova condição de operação.

Observa-se que a medição da vazão de ar externo tem grande importância para que as condições de operação e de projeto sejam respeitadas.

Variações para os sistemas de condicionamento de ar que vão além dos quatro tipos relacionados são encontradas, e possuem objetivos determinados. Por exemplo, com objetivo de economizar energia, são empregados os chamados ciclos economizadores (*economizers*) (SMACNA, 1998), ou sistemas com "*return pass and by pass*" (BOLLIGER JR e MARIANI, 1997).

Os ciclos economizadores, muitas vezes chamados de sistemas com controle entálpico, fazem o controle da vazão do ar de retorno do ambiente e do ar externo para situações de condições climáticas favoráveis à economia de

energia de refrigeração, como também de aquecimento, determinadas pela análise psicrométrica. Nestas situações, o ar exterior com menor entalpia que o ar de retorno tem sua vazão aumentada e a parcela de ar que recircula é reduzida, através dos equipamentos de controle, que atuam em registros posicionados de modo adequado.

No sistema "*return pass and by pass*" o subsistema de controle monitora adicionalmente às variáveis presentes no ambiente, os parâmetros do ar que retorna, assim como do ar que é insuflado no ambiente. Analisando as condições dos parâmetros de interesse, temperatura e umidade, ele opera os registros de *pass* e de *by-pass* decidindo o quanto de ar será enviado para ser tratado nos estágios de resfriamento e umidificação, e quanto será reinserido no trecho de insuflação após os estágios de tratamento. Logo, a quantidade de ar externo que é aspirado para a câmara de mistura altera-se em função das posições dos registros citados. Novamente, registra-se a importância de poder medir corretamente a vazão de ar externo neste tipo de sistemas, auxiliando a atuação dos controles.

Para instalações de ACV em edifícios onde há um sistema que faz gerenciamento e automação predial, um controle da vazão do ar externo integrado no sistema de gerenciamento predial pode também auxiliar na economia da energia empregada para trazer este ar externo até as condições de insuflação. Um exemplo de como esta integração pode ser feita, considera que os usuários da edificação possuem cartão magnético ou com código de barras, de modo que na medida em o prédio for sendo ocupado pelas pessoas, o sistema de controle de entrada e saída indica o número de ocupantes, e a vazão de ar externo pode ser ajustada em função desta ocupação.

#### 1.4. Os medidores de vazão tipo multifuros

A medição de vazão nas seções de entrada existentes em câmaras dos sistemas de tratamento de ar pode ser efetuada utilizando-se diversos tipos de instrumentos e técnicas. Em campo, profissionais que realizam verificações sobre o funcionamento, ou realizam TAB - Teste, Ajuste e Balanceamento dos sistemas de tratamento de ar geralmente utilizam anemômetros de pás, termo-anemômetros, velômetros, tubos de Pitot, como também medidores de vazão tipo coifa, cujos sensores são grades de tubos multifuros. Dentre os métodos citados apenas o último, medidor de vazão tipo coifa indica como resultado a vazão, os outros avaliam velocidades locais, que serão correlacionadas com um valor de velocidade média e áreas para resultar na vazão.

Neste trabalho deseja-se investigar uma proposta para se realizar a medição de vazão em uma passagem curta com configurações na qual o perfil de velocidades possui perturbações, alterações de direção, provocadas pela presença de acessórios, como uma veneziana, um registro e um filtro ali instalados.

A grade sensora multifurada multidirecional é proposta e tem seu projeto desenvolvido e um protótipo fabricado. Este desenvolvimento utilizou como referência os medidores da direção do escoamento e os tubos multifuro. Seu teste foi realizado em uma passagem curta de uma câmara de mistura simulada.

Pode-se dizer que a família de medidores de vazão tipo tubo multifuro teve sua origem em um modelo clássico que é empregado na determinação da vazão de fluidos que escoam através de condutos forçados.

Este tubo multifuro clássico é composto de um tubo cilíndrico com vários orifícios e pode-se afirmar que ele comporta-se 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.

A denominação de tubo multifuro é originada na norma NBR 10.396 (1988), elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Esta norma propõe uma classificação para os medidores de vazão em dois grandes grupos: volumétricos e de vazão instantânea. Na 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 multifuro. Neste grupo, junto com o multifuro, estão outros medidores como a placa de orifício, o tubo de Venturi, o bocal e o tubo de Pitot.

Uma proposta construtiva para o medidor multifuro clássico, retirada da norma NBR 10396 (1988) é apresentada na figura 1.1. Trata-se de um tubo cilíndrico, 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, ou seja viabilizar uma diferença de pressão que é proporcional à pressão dinâmica, ou seja à velocidade.

Convém observar que o termo cilíndrico utilizado no parágrafo anterior, assim como 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.

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:

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

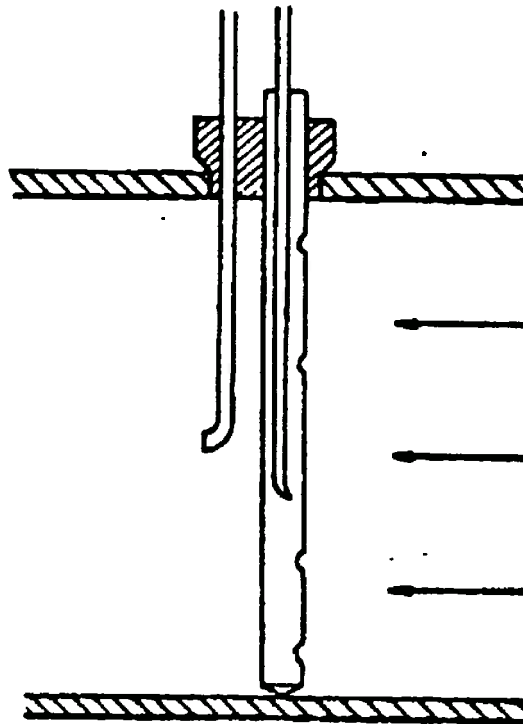


Figura 1.1 - Tubo multifuro clássico, NBR 10396 (1988).

O desenvolvimento desse dispositivo ocorreu a partir da evolução dos tradicionais tubos de Pitot, com o objetivo de se obter de maneira rápida e

simples a velocidade média com que o fluido escoar em um 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 elemento primário, de maneira a se obter resultados confiáveis e com exatidão, está condicionada à obtenção experimental de coeficientes de correção para o cálculo da vazão.

Em sistemas de ar condicionado e ventilação (ACV) também são verificadas múltiplas aplicações para os diversos tipos de tubo multifuro. Pode ser em substituição aos anemômetros, velômetros e tubos de Pitot, tradicionalmente usados nas redes de ar, ou no lugar de medidores por pressão diferencial instalados em linhas de água gelada.

Dois exemplos de emprego de medidores tipo tubo multifuro em sistemas de ar condicionado e ventilação para medição de vazão de ar são:

- os medidores de vazão tipo coifa, representado na figura 1.2, recomendados nos manuais da ASHRAE (1989, 1993, 1997) e da SMACNA (1993) para avaliação de vazão em saídas de ar, grelhas, difusores. Em geral, estes medidores utilizam uma grade sensora multifurada que mede apenas um diferencial de pressão, entre os orifícios direcionados para montante e os orientados para jusante.
- os sensores de vazão utilizados em alguns modelos de caixas de distribuição dos sistemas de ar condicionado que operam por Volume de Ar Variável (VAV).



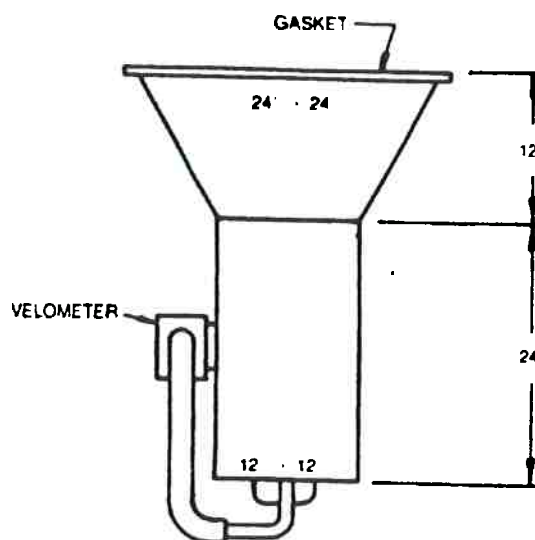


Figura 1.2 - Medidor de vazão tipo coifa, SMACNA (1993)

O medidor de vazão tipo coifa, tem sido muito indicado, conforme as referências citadas para a medição da vazão de ar em seções estabelecidas nas entradas e saídas de redes de distribuição de ar, em geral, em locais onde há a presença de acessórios que interferem no escoamento. Porém, a aplicação deste instrumento implica em:

- Exige a presença de um técnico para sua operação, não está disponível em modelo para ficar fixo monitorando a distância.
- Necessidade de espaço para o posicionamento do mesmo perpendicularmente à face onde está a entrada ou saída de ar, em geral ele possui 1,1 m de comprimento total. E este comprimento é importante para que através do convergente haja uma uniformização do campo de velocidades, de modo que na seção onde é instalada uma grade multifurada tradicional seja possível medir a vazão

- Os valores medidos são indicados em um mostrador localizado no próprio instrumento para ser lido pelo técnico que está operando o mesmo.
- Tem custo elevado no Brasil, pois não há fabricantes no país, devendo ser importado. Os procedentes dos Estados Unidos são chamados de "*Flow Hood*", ou "*Balometer*".

Os tubos tipo múltifuro instalados em caixas VAV são do modelo tubos cruzados ou em estrela, e tem como objetivo colaborar no sistema de controle, sem a preocupação de medir, ou informar com exatidão, qual é a vazão que está atravessando aquela seção, mas de atuar junto com o controle de temperatura. Na operação da caixa VAV, o sensor de temperatura atua sobre um registro simples tipo borboleta, em geral posicionado imediatamente antes dos múltifuros, a alteração da vazão é provocada pelo sensor de temperatura e o medidor de vazão impede que haja uma oscilação do tipo abre-fecha do registro borboleta.

Assim, verifica-se que para a medição da vazão em tomadas de ar externo em sistemas ACV, é relevante que o escoamento seja bem caracterizado, verificando as variações de orientação direcional que ocorrem no mesmo, presença de pulsações de pressão. Esta análise deve ser feita em várias configurações da tomada de ar externo, obtendo-se os elementos para o desenvolvimento de uma grade sensora multidirecional inteligente, pois esta deve ser capaz de reavaliar a direção e o módulo da velocidade a partir de variação nos diferentes sinais de pressão medidos.

### 1.5. Objetivos e estrutura da pesquisa

O objetivo geral deste trabalho consiste em investigar a interação entre o escoamento de ar em uma passagem curta, que representa uma tomada de ar externo de um sistema de condicionamento de ar, e uma grade sensora multidirecional desenvolvida para avaliar vetores de velocidades médias na seção onde deseja-se medir vazão. As configurações para a passagem curta investigadas adotaram a instalação de uma veneziana, de um registro e de um filtro.

Esta pesquisa foi desenvolvida obedecendo a seguinte estrutura:

- Caracterização do comportamento do escoamento do ar na seção de medição da vazão através da determinação de perfis de velocidades, realizando ensaios com o emprego de anemometria laser.
- Definição de parâmetros que relacionam a interação entre sensores cilíndricos e o escoamento em questão, de modo a possibilitar que os estes sensores determinem a direção e o módulo da velocidade média associada a uma seção pré-definida.
- Determinação de valores para os parâmetros definidos para sondas cilíndricas, através de métodos de simulação numérica e ensaios experimentais.
- Estabelecimento de condições e equações de modo a viabilizar a integração da grade sensora com sistemas de controle que a tornasse “inteligente” apresentando respostas coerentes inclusive com a mudança dos padrões do escoamento.
- Desenvolvimento um sistema monitor de pressão que opere na faixa de pressões diferenciais compatíveis com os valores apresentados pela

grade sensora, que possa ser integrado a microcomputadores ou outros recursos informatizados e que tenha custos compatíveis com a viabilidade econômica deste projeto.

- Viabilização de um módulo experimental para a simulação de escoamentos em uma câmara de mistura de um sistema de condicionamento de ar. Para este módulo foi selecionada e aferida instrumentação adequada para realização de ensaios no intuito de avaliar o comportamento da grade sensora multidirecional instalada em uma tomada de ar externo.
- Realização de ensaios no módulo experimental e obtenção de valores para velocidades e para a vazão na seção de medição através da grade sensora multidirecional. Os valores de vazão foram comparados a resultados medidos com uma placa de orifício e as velocidades foram comparadas com resultados obtidos com as medições realizadas com o anemômetro laser.
- Análise dos resultados obtidos para a compreensão do processo de interação entre o escoamento de ar na seção de medição e a grade sensora, validando o sistema de medição de vazão, grade sensora e monitor de pressões, para atuarem em passagens curtas.

Este estudo é uma contribuição que ao oferecer elementos para a compreensão do comportamento de escoamentos turbulentos em passagens curtas possibilita a proposição de uma alternativa de instrumentação que pode ser empregada em tomadas de ar externo, colaborando com questões importantes, como a qualidade do ar de ambientes interiores e conservação de energia.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresenta dois aspectos que foram importantes para as diretrizes tomadas neste trabalho: o primeiro enfoca a medição de vazão nas tomadas de ar externo presentes em sistemas de condicionamento de ar, sua importância e sua relação com outras variáveis, e o segundo apresenta uma revisão das propostas de sondas que realizam a medição de pressão e de velocidade e que podem auxiliar a determinação da vazão.

### 2.1. A medição de vazão de ar externo em sistemas de condicionamento de ar

No levantamento bibliográfico realizado verificou-se que a o tema da medição de vazão do ar externo não possui um extenso conjunto de referências, talvez por tratar-se de tema que teve destaque na última década. Foram localizados vários artigos elaborados por um ciclo restrito de autores, onde destacou-se Kettler.

#### 2.1.1 Medição de vazão e os parâmetros correlacionados

Conforme apresentado no capítulo anterior, a quantidade de ar externo introduzida em sistema de ACV é um dos fatores que influenciam a qualidade do ar interno (QAI) em edificações. Nos sistemas de ACV os estudos promovidos pela ASHRAE em seus "*Research Project*" (RP) e divulgados através do Grupo de Trabalho permanente da norma ASHRAE 62 mostra que há uma ampliação cada vez maior das relações que existem entre garantia de

QAI e as quantidades de ar externo que é destinado aos ocupantes dos edifícios, considerando o tipo de atividade exercida em cada ambiente. A norma ASHRAE 62:1989 propõe o desafio de medir-se e controlar a quantidade de ar externo que se está introduzindo no sistema. Assim a medição com exatidão e o monitoramento com registros destas informações de vazão de ar externo, situação de ocupação, horários, podem oferecer dados para que soluções aos problemas de QAI sejam propostas.

Os sistemas de condicionamento de ar que utilizam equipamentos do tipo VAV (Volume de Ar Variável) estão entre os que exigem maior cuidado na sua análise operacional no que se refere à quantidade de ar externo introduzida em cada ambiente e no sistema como um todo. O uso da variação do volume de ar em cada ambiente foi amplamente difundida a partir da década de 80, motivada por ser uma proposta que auxilia o sistema de condicionamento de ar a economizar energia, modulando a quantidade de ar que é insuflada em determinado ambiente ou setor da edificação a partir das necessidades efetivas de remoção da carga térmica em determinado instante. MUMMA E WONG (1990) destacam que a maioria dos edifícios destinados para fins comerciais passaram a utilizar as chamadas "caixas VAV". SMITH (1990) confirma o amplo uso de sistemas VAV em prédios adotados para fins comerciais, e indica que também há o seu uso em larga escala em instalações industriais e de institucionais. Sendo a quantidade de ar insuflado nos ambientes variável, o controle da vazão de ar externo passa a ser exigida, controlada e até registrada.

Nos sistemas de ar condicionado de médio e de grande porte, onde há uma preocupação com a conservação de energia passou-se também a empregar uma técnica denominada “ciclo economizador” ou “*economizer*”, como descrito no *Handbook da ASHRAE Applications de 1999, capítulo 45*, e citado por MUMMA E WONG (1990). Esta proposta adota um sistema de controle mais completo que realiza a comparação entre as condições do ar externo à edificação e as necessidades de remoção da carga térmica, podendo aumentar a quantidade de ar externo a ser misturado no ar de retorno, sem que este seja tratado, reduzindo o consumo de energia. Neste caso o valor da vazão de ar externo é uma informação útil para orientar o sistema de controle, a atuação de registros motorizados (*dampers*), podendo chegar a situações onde há a utilização de 100% de ar externo, sendo todo o ar de retorno exaurido para o meio externo.

### **2.1.2 Sistemas de volume de ar variável e a vazão mínima de ar externo**

Diversos autores discutem a limitação do sistema de volume de ar variável diante das exigências de vazão mínima de ar externo estabelecido pelas normas e legislações, como a ASHRAE 62:1989, de modo a garantir as condições de Qualidade do Ar Interior. Nestas análises destaca-se a necessidade da monitoração da vazão de ar externo, as limitações em realizá-la com os instrumentos disponíveis, apresentando o estágio do conhecimento que foi motivador para o desenvolvimento deste trabalho.

AVERY (1989) analisa as instalações de ACV que adotam caixas VAV associadas a ciclo economizador (*economizer*), indicando que há necessidade

de atualizar as instalações selecionando para estas, controles e registros (*dampers*) associados a um sistema que monitore a vazão de modo adequado, a fim de possibilitar que haja estabilidade nas várias condições de operação do sistema. O autor indica que há dificuldade em se medir a vazão de ar externo utilizando instrumentos tradicionais, como estações de medição, em geral grades multifuradas tradicionais. Ele propõe que na entrada de ar externo haja o emprego de dois registros motorizados, operando cada um deles em uma faixa menor de vazão, selecionados de modo adequado, com comportamento linear, de modo que nesta combinação obtenha-se um controle estável e atendendo os requisitos projetados para a instalação. Porém nem sempre é possível realizar uma instalação desta forma, que exige custos mais elevados, pois utiliza sistemas de controle com maior número de elementos.

KETTLER (1998) discute em seu artigo a dificuldade para realizar o controle da condição de mínima ventilação (ar externo) nos sistemas de condicionamento de ar com VAV. O desafio deste tipo de instalação pode ser verificado através do seguinte exemplo: seja um sistema de grande porte, onde nas condições de projeto está prevista uma vazão de insuflação de  $47 \text{ m}^3/\text{s}$  de ar e o mínimo de ar externo exigido é de aproximadamente  $7 \text{ m}^3/\text{s}$ . Em uma situação onde a carga térmica da edificação é reduzida para 60%, a vazão de ar externo reduz-se também para 60% da original, ou seja cai para cerca de  $4.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , valor menor que o mínimo exigido neste caso. Assim é preciso controlar com exatidão a vazão de ar externo, mantendo o mínimo de  $7 \text{ m}^3/\text{s}$ , o que exige sensores e controles com boa exatidão e adequados a esta faixa de vazão, propõe o autor.



Para suprir a deficiência de vazão de ar externo em sistemas VAV, LEVENHAGEN (1992) e HITTLE(1997) propuseram o uso do sistema denominado "fan-tracking", onde são instalados dois ventiladores, um na insuflação e outro no retorno, assim como registros de vazão para regular o volume de ar que é inserido através da tomada de ar externo (M-1) e para modular o ar que é recirculado de volta para o ambiente (M-2). Segundo relatam os defensores desta solução os componentes "chave" para o sistema são as estações de medição de vazão colocadas a montante do ventilador de retorno e à jusante do ventilador de insuflação, conforme pode ser visto na figura 2.1, onde estão indicadas como AFS (*air flow station*). Os sinais resultantes das estações de medição de vazão são enviados para a unidade de controle (AFC-1), a qual ajusta a condição de rotação do ventilador de retorno através de um inversor estático de frequência, de modo a manter fixa a diferença entre os volumes movimentados pelos ventiladores.

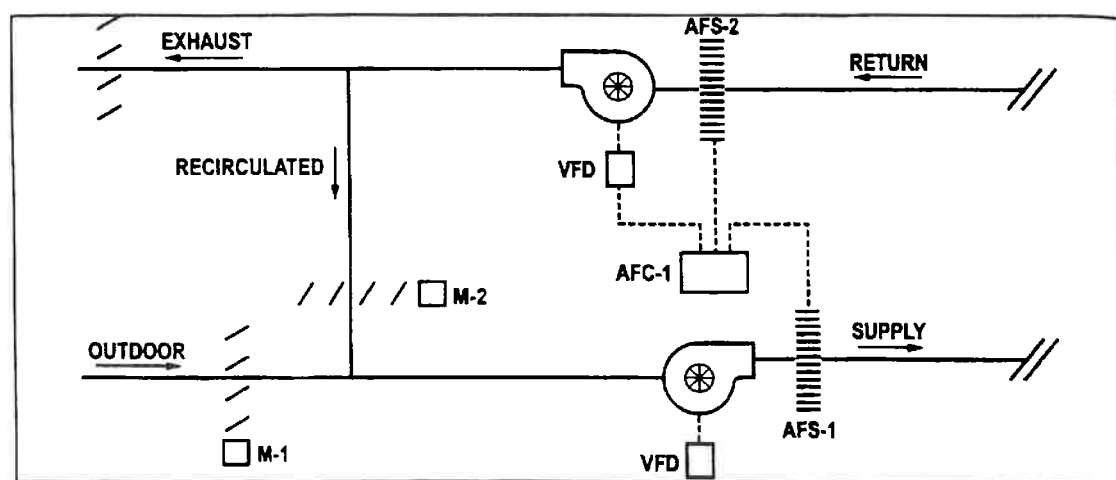


Figura 2.1 - Sistema denominado "fan-tracking" proposto por Levenhagen (1992) e Hittle(1997)

KETTLER (1998) critica as propostas de LEVENHAGEN (1992) e HITTLE(1997), retomando o exemplo da instalação de grande porte que opera com 47 m<sup>3</sup>/s e tem sua vazão reduzida para 40 m<sup>3</sup>/s. Aponta que, mesmo realizando uma técnica de medição perfeita, ocorrem erros da ordem de +/- 5% que são causados pelos transdutores e pelo sistema de controle. A principal causa é atribuída aos valores de pressão lidos nos sensores de vazão, que são extremamente pequenos, da ordem de 10 Pa na insuflação e de 1.7 Pa no retorno. A propagação deste erro, acumulado a outros trazidos por fatores como perfis de velocidade pouco uniformes devido ao local onde são realizadas as medições, podem resultar em vazões de ar externo desviadas 50% dos valores desejados. Fato este confirmado, segundo Kettler, por Cohen nas publicações da Associated Air Balance Contractors (AABC).

Uma outra proposta para solucionar o problema de garantir a vazão de ar externo em sistemas VAV propõe o uso de estações de medição posicionadas junto aos acessórios da tomada de ar. KETTLER (1998) discute a aplicação desta técnica em seu artigo, onde as dificuldades estão associadas aos seguintes fatores: efeitos do alto nível de turbulência geradas pelas venezianas que produzem escoamento em direções erráticas, que podem ser minimizadas através do uso de condicionadores de escoamento, grandes variações de temperatura no ar externo (verão/inverno) em determinados locais, como cidades dos USA, o que inviabiliza a eficiência de estações de medição que utilizam sensores do tipo fio/filme quente. Assim surge como alternativa mais interessante o uso de sondas do tipo multifuros, ou Pitot-médio, similares às adotadas nas caixas VAV.

Esta última alternativa atende parte das condições de operação do sistema, passando a ter restrições para situações onde a vazão é mínima , como por exemplo 15% da total instalada. Nesta situação estima-se que a leitura de pressão através do sensor seja da ordem de 2,0 Pa, e supondo que o controle exija variações menores que 10% neste resultado, esta incerteza em valores absolutos é da ordem de 0.2 Pa, o que na prática não é de fácil viabilização, sugerindo que para vazões mínimas os erros serão expressivos.

KETTLER (1998) conclui sua análise das duas alternativas anteriores afirmando que em sistemas VAV para atender a condição de vazão mínima estes métodos não oferecem exatidão compatível com a garantia de que a vazão de ar externo está sendo respeitada. Medir diretamente a quantidade de ar externo é a melhor solução.

### **2.1.3 Técnicas e sensores para medição da vazão de ar externo: análise comparativa.**

Indicando a atualidade do tema QAI e sua relação com o controle do ar externo inserido no sistema, a ASHRAE em sua recente publicação IAQ Applications, apresenta um novo artigo de KETTLER (2000) que faz uma revisão sobre as diferentes técnicas adotadas atualmente para realizar a medição de vazão de ar externo em um sistema de ar condicionado.

Os sistemas de medição de vazão analisados são descritos na tabela 2.1 que segue.

Sistema	Vantagens	Desvantagens
Fan-tracking	Teóricamente garante a vazão de ar através da manutenção de uma pressão diferencial entre insuflação e retorno	Alto custo. Baixa exatidão. Pequenos erros em altas vazões, grandes erros em baixas vazões
Injection Fan (Possui ventilador em separado para garantir a vazão mínima de ar externo em um sistema convencional de AC)	Aumenta a velocidade do ar externo para níveis adequados para serem medidos e recebidos pelos equipamentos de controle	Alto custo. Pode haver dificuldade de implementação em determinadas unidades. Mede e controla vazões mínimas somente
Estação de medição na área total da tomada de ar externo	Permite a leitura da vazão desde valores mínimos até 100% de ar externo	Consumo de energia elevado (penalizado) devido à alta perda de pressão imposta pela maximização de valores da velocidade de modo a garantir boas medidas para condição de vazão mínima. Baixo valor para o sinal em baixas vazões pode ser fortemente afetado pelo vento.
Plenum Pressure Control (Perda de pressão através do registro de ar externo na posição de mínimo)	Baixo custo inicial e em termos de energia. Não requer acréscimo de condicionadores de escoamento ou estações de medição. Sinal de diferencial de pressão relativamente alto comparado ao efeito do vento	Aplicável para garantir vazão mínima de ar somente. Não aplica-se para medição da condição de mínima vazão até 100% de ar externo. Pode tornar-se de difícil ajuste e controlar se a vazão mínima de ar externo tiver de ser ajustada ao nível de ocupantes em um setor / ambiente.
Vazão de ar dinâmica combinado com registro (Calibrado para controlar a pressão diferencial através de registro móvel)	A pressão diferencial (sinal de vazão) aumenta com a redução de vazão de modo que haja um sinal de alta qualidade para escoamentos de em baixa vazão.	Alto custo. Exige calibração individual de modo a obter-se a curva de calibração de cada registro para realizar o controle, sendo isto seu maior custo
Gases traçadores (CO <sub>2</sub> ) Comparação entre o ar externo, o ar de retorno e o ar de insuflação para calcular a porcentagem de ar externo	Sob grande ocupação, pode ser utilizado como elemento de controle da vazão de ar externo, como também da condição mínima para ventilação (ar externo).	Alto custo. Requer uma estação de medição de vazão para calcular a vazão real de ar. Requer sensores de CO <sub>2</sub> diferenciais entre o ar externo e o de retorno com boa exatidão, de modo a evitar erros em situações de baixa ocupação. Manutenção da bomba de amostragem e do sensor de CO <sub>2</sub> tem alto custo.
Estações de medição em tomadas de ar externo divididas	Permite leitura direta da vazão mínima de ar externo. Pode ser dimensionado para compatibilizar sinais de controle e vazão mínima de ar	Não possibilita a medição da vazão total de ar externo. Leituras são impossibilitadas quando o registro da vazão máxima de ar externo está ativado.

Tabela 2.1: Comparação de sistemas medidores de vazão de ar externo

## **2.2 Sondas para medição da velocidade e da direção do escoamento**

Sendo um dos propósitos desta investigação fabricar um protótipo de uma grade sensora multidirecional que possa medir a vazão em uma passagem curta, e como o princípio de funcionamento desta grade está relacionado com sondas que determinam a direção do escoamento e com os medidores tipo tubo multifuro, foram analisadas referências bibliográficas sobre estes temas.

Os medidores de vazão do tipo tubo multifuro são sensores que buscam fazer uma estimativa da velocidade média em uma seção de escoamento. Pesquisando sobre sua origem pode-se dizer que se trata de um medidor de vazão que surgiu a partir da proposta do tubo de Pitot e de suas variações. Contudo o tubo de Pitot é um sensor de velocidade local.

A avaliação da velocidade local em um escoamento de fluidos pode ser executada de vários modos, utilizando-se instrumentos distintos, porém sempre de modo indireto, ou seja, uma outra grandeza é medida e correlacionada com a velocidade.

O mais antigo e tradicional desses métodos utiliza a relação entre um valor de pressão avaliado em uma determinada linha de corrente e a velocidade das partículas naquela posição. O primeiro sensor proposto para realizar esta medição foi conhecido como tubo de Pitot, e esta denominação foi generalizada para muitas das sondas alternativas que foram desenvolvidas com este propósito.

Nos próximos itens são enfocados instrumentos medidores de velocidade tipo tubo de Pitot, são apresentadas as variações geométricas que

foram adotadas no desenvolvimento deste para aplicações específicas em escoamentos de diferentes tipos, em distintas seções, destacando os medidores multífuros de maior interesse para este estudo. Por fim são aprofundadas as características de sensores da direção do escoamento como o chamado tubo de Pitot de cinco orifícios, que permite determinar o módulo e a direção da velocidade em determinado ponto de um escoamento. Os vários aspectos detalhados foram elementos que auxiliaram a definição das características do protótipo da grade multifurada direcional proposta.

### **2.2.1. Evolução histórica do tubo de Pitot**

COLE (1935) faz uma revisão histórica do tubo de Pitot, que teve sua origem em 1732 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 especialmente por não utilizar a variável tempo.

Outro engenheiro francês, Darcy, 125 anos depois, propôs um novo modelo para o tubo de Pitot, com tubos conjugados. 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.

No relato de COLE (1935), é citado que 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, em alguns 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).

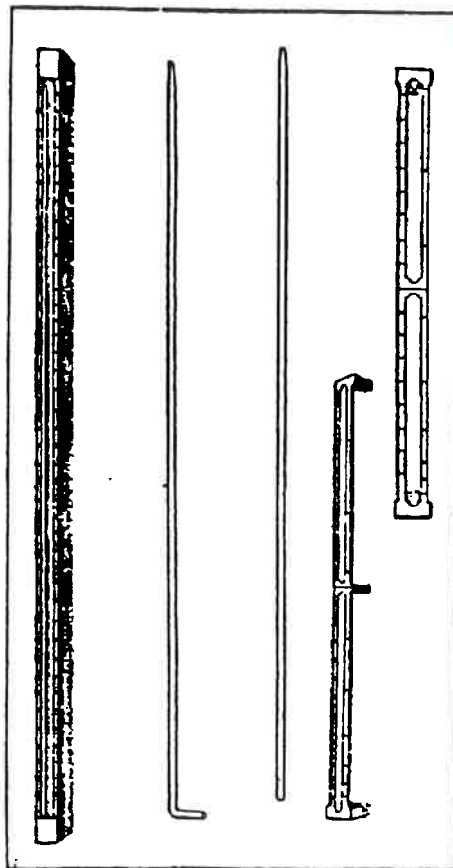


Figura 2.2 Tubo de Pitot utilizado por Henri Pitot (1732)

Em 1902, foi 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 que determina 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 que escoar.

Conforme COLE (1935) e FOLSOM (1956), 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.

Consolidando os resultados dos trabalhos de pesquisas, alguns modelos de tubos de Pitot desenvolvidos e testados em diferentes centros de pesquisa, 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 2.3.

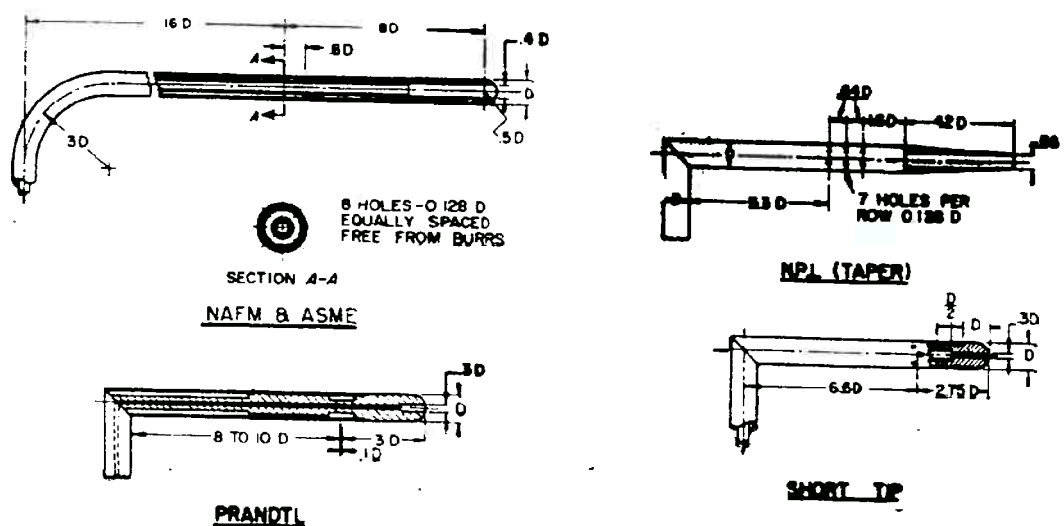


Figura 2.3: Exemplos de tubos de Pitot padronizados (FOLSOM, 1956)

### 2.2.2. O tubo múltifuro

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

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.

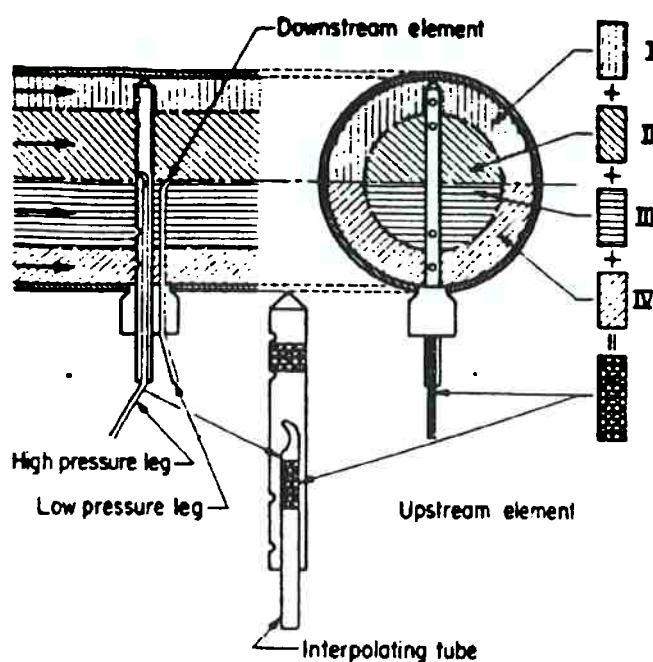


Figura 2.4- Tubo multifuro apresentado por PLACHE (1974)

Em seu artigo, PLACHE (1974) faz uma comparação entre o multifuro e o Pitot convencional, aplicados à medições em linhas industriais. Uma das vantagens salientadas no multifuro, 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 multifuro 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 multifuro está menos sujeito a este tipo de problema.

Novos modelos surgiram, como os apresentados por BRITTON; MESNARD (1982), 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. Estes autores discutem também uma nova geometria proposta para a seção transversal do corpo cilíndrico em forma de diamante, um octógono irregular, ensaiados comparativamente aos de formato circular. Os resultados indicam que para Reynolds, calculado em função do diâmetro da tubulação, no intervalo entre  $10^5$  e  $10^6$ , esta nova geometria tem melhor desempenho indicado por pequenas variações no coeficiente de vazão K. Para faixas de Reynolds mais baixas, como é a região de interesse deste trabalho,  $3 \cdot 10^4 < Re_{DH} < 7 \cdot 10^4$ , os resultados de MARIANI (1995) são os únicos encontrados para este tipo de sonda.

Uma característica importante para a presente pesquisa deste tipo de sensor está associada ao valor de resposta de pressão que ele oferece, conforme THOI e SOH (1979), TAYLOR (1988). Pelo fato de utilizar a pressão de esteira para determinar a diferença de pressão, esta assume um valor maior que os sensores que utilizam a pressão estática, ou seja o sinal de resposta em termos de DP fica amplificado neste instrumento. Esta propriedade é de grande interesse quando aplica-se estes sensores em velocidades baixas, e os sinais de pressão são reduzidos.

### 2.2.3. Medição da direção do escoamento

Sondas de pressão são utilizadas como indicadores de direção, e podem ser boa alternativa em relação a "tufts", traçadores, ou outros indicadores da direção da velocidade que não conseguem avaliá-la efetivamente, e até em certos casos interferem no escoamento provocando distorções indesejadas.

As sondas que avaliam a direção de um escoamento, conforme apresentado por BRYER e PANKHURST (1971), podem utilizar dois métodos. O primeiro denominado "leitura nula" ou "equilibrado", quando a sonda movimenta-se dentro do escoamento procurando uma posição onde o resultado das leituras de pressão nos seus múltiplos orifícios atinjam uma condição previamente determinada e permitam uma avaliação da direção da velocidade e de sua magnitude. O outro método utiliza a sonda fixa, e através da medição dos valores de pressão, correlacionados com resultados obtidos em uma calibração, calcula-se os valores do módulo e direção da velocidade. Em ambos os métodos, as sondas que são aplicadas são similares e possuem múltiplos orifícios, geralmente posicionados simetricamente.

Alguns exemplos de sondas estão apresentados na figuras 2.5 e 2.6, retiradas do texto de BRYER e PANKHURST (1971).

Foram analisados com maior interesse para este trabalho as sondas direcionais que adotam um corpo cilíndrico na sua geometria, como os exemplos identificados na figura 2.6 pelas letras a) e c). Os ângulos adotados para a separação dos orifícios nestas sondas foram, para a sonda cilíndrica da

figura 2.6 a)  $\Phi = 45^\circ$ , e para a sonda com perfil triangular da figura 2.6 c)  $\theta = 30^\circ$ .

BRYER e PANKHURST (1971) discutem também a sensibilidade das sondas para a avaliação da direção do escoamento. Para avaliar a sensibilidade, adotam um adimensional definido pela relação entre as pressões entre dois orifícios da sonda e o ângulo com que o escoamento está direcionado e a pressão dinâmica, dado pela equação a seguir:

$$\frac{p_1 - p_2}{\frac{1}{2} \rho V^2 \psi} \quad (2.2)$$

A sonda transversal cilíndrica, conforme denominação destes autores, teve sua sensibilidade mantida constante, para ensaios na faixa de Reynolds, calculado em função do diâmetro da sonda,  $2 \cdot 10^3 < Re_d < 1.5 \cdot 10^5$ .

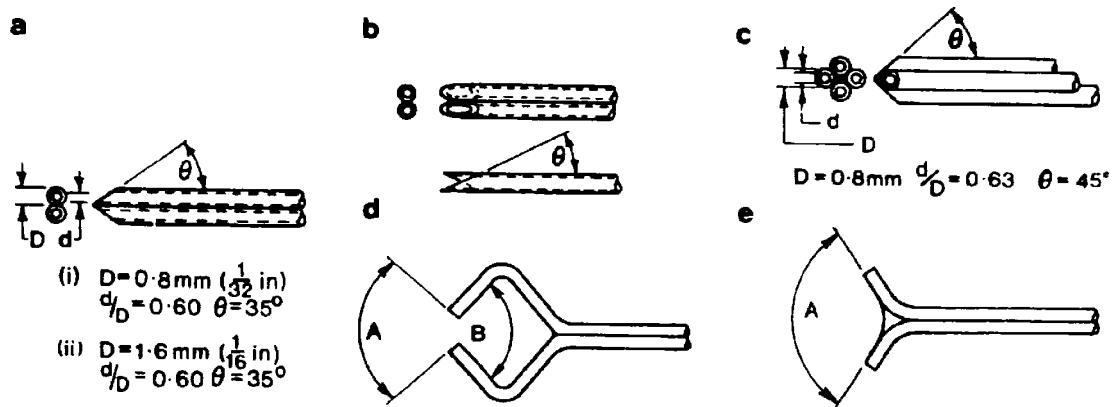


Figura 2.5: Exemplos de construções de sondas direcionais

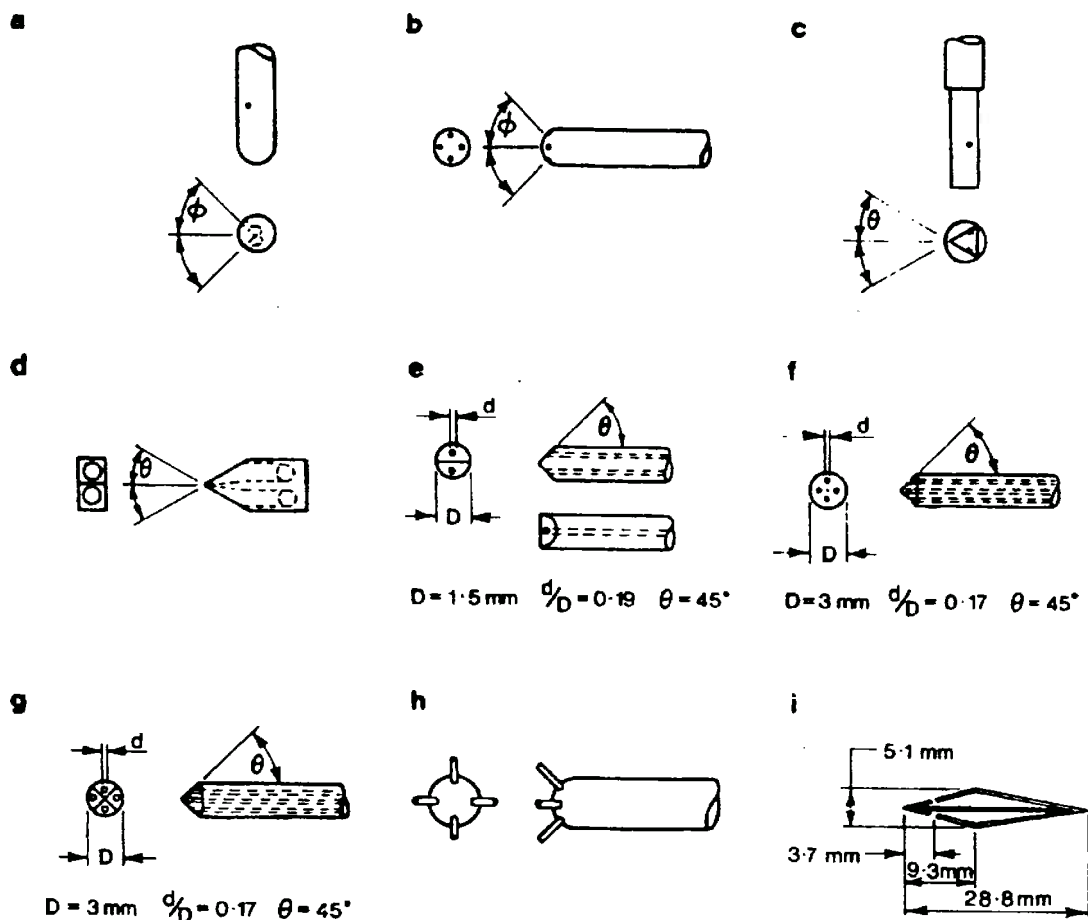


Figura 2.6: Exemplos de construções de sondas direcionais

#### 2.2.4. Sondas combinadas para medir a velocidade e direção do escoamento

Para medir o módulo e a direção da velocidade existem alternativas de sondas de pressão denominadas como combinadas. Os sensores mais tradicionais são identificados como tubos de Pitot de cinco orifícios.

Este sensor foi proposto em diversas formas geométricas, onde costuma também ser caracterizado pela geometria da extremidade do sensor,

que pode ser esférica, hemisférica, cônica, piramidal, etc. Uma das configurações mais pesquisadas possui a extremidade no formato esférico ou hemisférico, como no modelo proposto pelo trabalho de VAN DER HEGGE ZIJNEN (1929) apud. BRYER e PANKHURST (1971), primeiro a realizar um trabalho de calibração para este sensor. Na figura 2.7 estão apresentados alguns tipos de montagem para estas sondas.

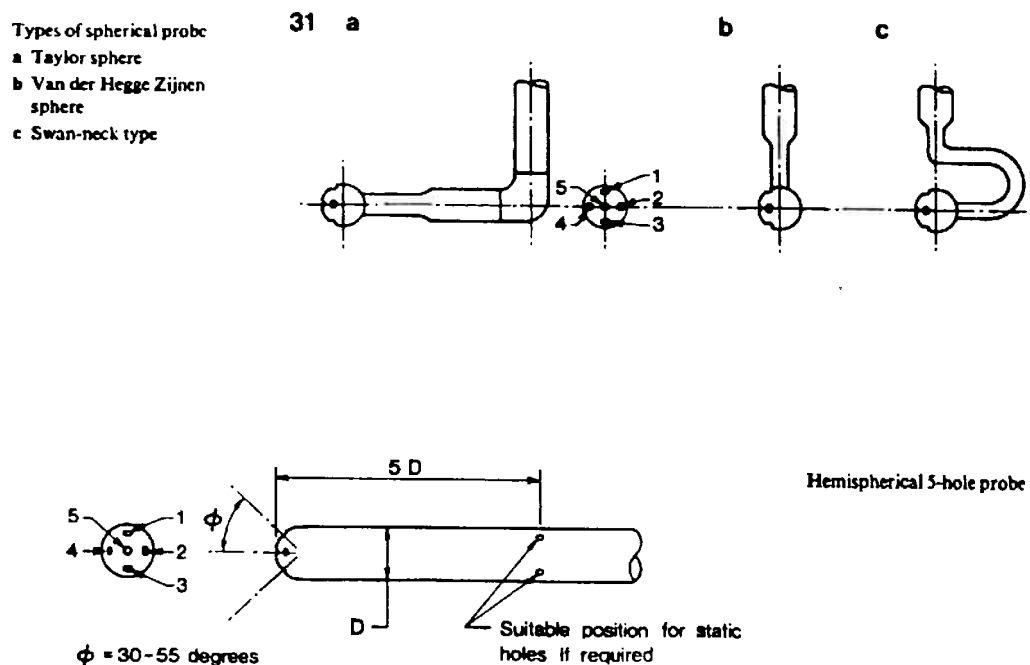


Figura 2.7: Tubo Pitot de 5 orifícios

As aplicações mais típicas deste sensor de pressão tem sido para o levantamento do campo de velocidades em fornalhas cilíndricas, para trabalhos de investigação de perfis de velocidade em máquinas de fluxo, e em escoamentos turbilhonares, como pode-se encontrar nos artigos de TRIGO et al (1989), LEE e ASH (1956) e WRIGTH (1970).

As principais características deste tipo de sonda, conforme relatam os autores dos artigos, são:

- versatilidade: com a exceção da temperatura, todos os outros parâmetros de escoamento (módulo e direção da velocidade e pressão estática) podem ser determinados simultaneamente;

- exatidão: como resultado desta versatilidade, este instrumento é menos exato que aqueles projetados para a medição de cada parâmetro em particular;

- dimensões: pela necessidade de se acomodar em uma mesma cabeça cinco tomadas de pressão independentes, há dificuldades construtivas e suas dimensões são maiores se comparadas às das sondas “especialistas”.

- construção: a usinagem da cabeça de sonda é bastante delicada e qualquer desvio afeta significativamente o desempenho da sonda. Por esta razão cada sonda exige calibração individual;

- calibração: a calibração deste tipo de sonda é trabalhosa e relativamente tediosa;

- adicionalmente estas sondas não necessitam de movimentação angular para a obtenção das leituras. A determinação da direção e magnitude da velocidade é feita através das relações entre os valores registrados pelas várias tomadas de pressão, referindo-se aos diafragmas de calibração do instrumento.

Este instrumento possui cinco tomadas de pressão numeradas de 0 a 4, conforme apresentado na figura 2.8. Estas cinco tomadas de pressão são perfuradas radialmente na extremidade da hemisfera, e estão conectadas



por capilares ao longo de toda a haste da sonda até a extremidade, onde estão colocadas conexões para as mangueiras ligadas ao medidor de pressão empregado. A geometria da haste da sonda é feita de forma que o eixo alinhado com a parte reta desta haste passe pela cabeça da sonda exatamente na posição da tomada de pressão central, na figura denominada de número zero.

A determinação da direção do escoamento se faz através da associação ao módulo da velocidade de dois ângulos de posição ( $\delta$  e  $\phi$ ), de forma a compor o vetor velocidade do escoamento em relação ao a um sistema de referência fixo na sonda.

Este sistema de referência, utilizado para a determinação da direção da velocidade do escoamento, é caracterizado por três eixos ortogonais onde o eixo  $x$  é alinhado axialmente com o trecho reto da haste projetando-se deste hemisfério para o lado externo do passando pela tomada de pressão central, e os eixos  $y$  e  $z$  formam um plano transversal. O ângulo  $\delta$  é aquele formado entre o plano  $xy$  e o pano que contem o eixo  $x$  e o vetor velocidade. O ângulo  $\phi$  é aquele formado entre o eixo  $x$  e o vetor velocidade, conforme representação empregada na parte superior da figura 2.8.

O ângulo de separação entre a tomada de pressão central (O) e as tomadas periféricas (1 a 4) é definido entre  $40^\circ$  e  $45^\circ$

O sensor, posicionado de modo fixo no escoamento, realiza a determinação da velocidade, seu módulo e sua direção, podendo também determinar o valor da pressão estática, utilizando as correlações oferecidas no processo de calibração.

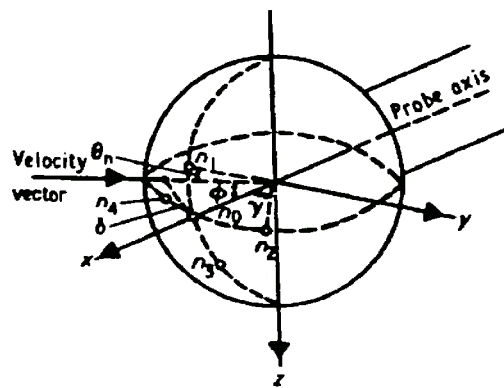
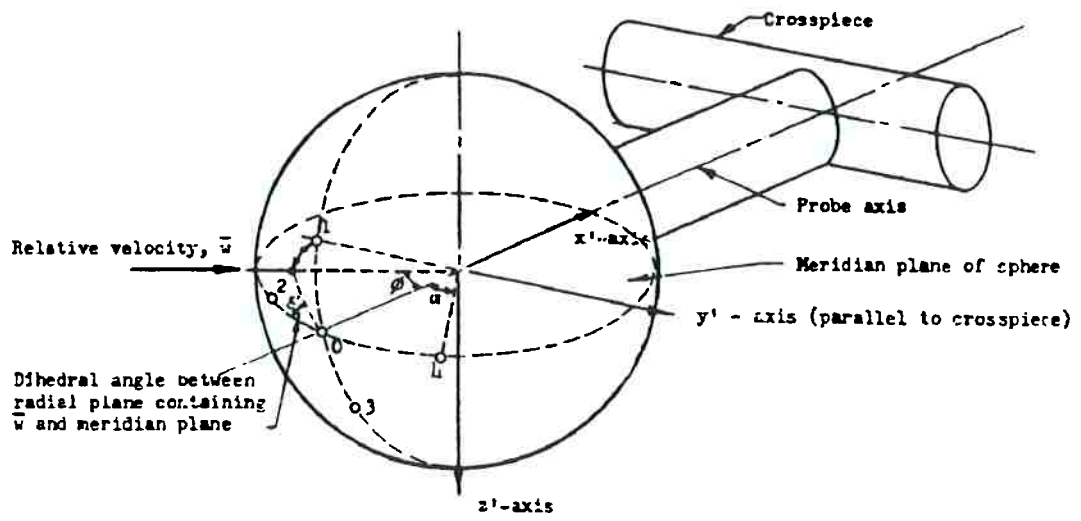


Figura 2.8: Esquema do posicionamento do sistema de referência no sensor. Duas representações: LEE e ASH (1956) no desenho superior, WRIGTH (1970) no desenho inferior.

### **3. CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO ATRAVÉS PASSAGEM CURTA COM ACESSÓRIOS**

Para desenvolver uma grade sensora que possibilitasse medir a vazão de ar que atravessa uma passagem curta onde estão presentes dispositivos que interferem no escoamento foram realizadas medições em uma seção de interesse a fim de caracterizar o comportamento do campo de velocidades. Neste capítulo são apresentados a metodologia adotada, os dados e resultados obtidos para que fossem conhecidas propriedades do escoamento que são de interesse para o presente estudo.

Algumas etapas se sucederam nesta fase do estudo: definição dos acessórios que serão utilizados nos ensaios, viabilização de aparato experimental para realizar a medição de velocidades, procedimento experimental, coleta de dados, processamento dos dados, análise de resultados e apresentação gráfica dos mesmos.

#### **3.1. Definição de parâmetros dos acessórios a serem testados**

No presente estudo foram definidos alguns dispositivos através dos quais ocorre a passagem do ar. Considerado o contexto apresentado nos capítulos anteriores, a seleção recaiu sobre os acessórios que permitem a entrada de ar exterior para dentro de uma câmara de mistura. Nas instalações de tratamento de ar que realizam a renovação do ar recirculado através da mistura de ar externo no ar que retorna do ambiente, podem ser encontradas alternativas para os acessórios que são instalados na chamada "tomada de ar externo".

Existem sistemas que simplesmente utilizam uma veneziana com uma tela, outros, utilizam a veneziana associada a apenas um filtro ou somente a um registro, outros ainda, utilizam uma combinação com veneziana, registro e filtro. Esta última possibilidade, mais completa, oferece a melhor solução no estabelecimento de condições adequadas para que os ambientes tenham condições condizentes com os padrões definidos para que haja qualidade do ar interior (QAI).

Surge também uma variação utilizada em instalações de tratamento de ar com controles mais sofisticados, onde o registro que realiza o controle da vazão do ar externo é posicionado através de atuador, possibilitando a modulação deste parâmetro em função de outros inerentes aos ambientes e ao processo realizado no sistema.

No processo de seleção dos acessórios, optou-se por empregar o conjunto completo, isto é com veneziana, registro (usualmente denominado no mercado de “*damper*”) e filtro. Contudo, para que a análise de casos fosse ampliada, foi selecionado um conjunto modular, no qual foi possível realizar testes utilizando os elementos desacoplados, gerando três situações de ensaios: apenas veneziana, veneziana e filtro e veneziana, filtro e registro.

Para definir dimensões do conjunto a ser empregado nos ensaios, assim como caracterizar a faixa de vazões em que estes operam, foi realizada uma consulta a dois dos principais fabricantes de acessórios para sistemas de movimentação de ar em nível de Brasil: a Trox do Brasil Ltda e a Tropical Artefatos de Metal Ltda.

Na Trox, foram feitos extensos contatos sobre as aplicações de acessórios em tomadas de ar externo. O levantamento<sup>1</sup> realizado resultou em um modelo denominado por este fabricante como: “Tomada de Ar VDF” (abreviação de veneziana-damper-filtro), com as medidas nominais (397 x 297) mm. Na figura 3.1 pode ser visualizado o conjunto VDF da Trox, através de ilustração retirada do catálogo do fabricante.

Na Tropical obteve-se informações<sup>2</sup> que indicaram o conjunto veneziana-registro-filtro para ser utilizado nas tomadas de ar externo são especificadas pelo modelo TAE completa. Foi esclarecido que neste modelo a maior comercialização é realizada para produtos com dimensões dentro do intervalo (300 x 300) mm e (500 x 500) mm.

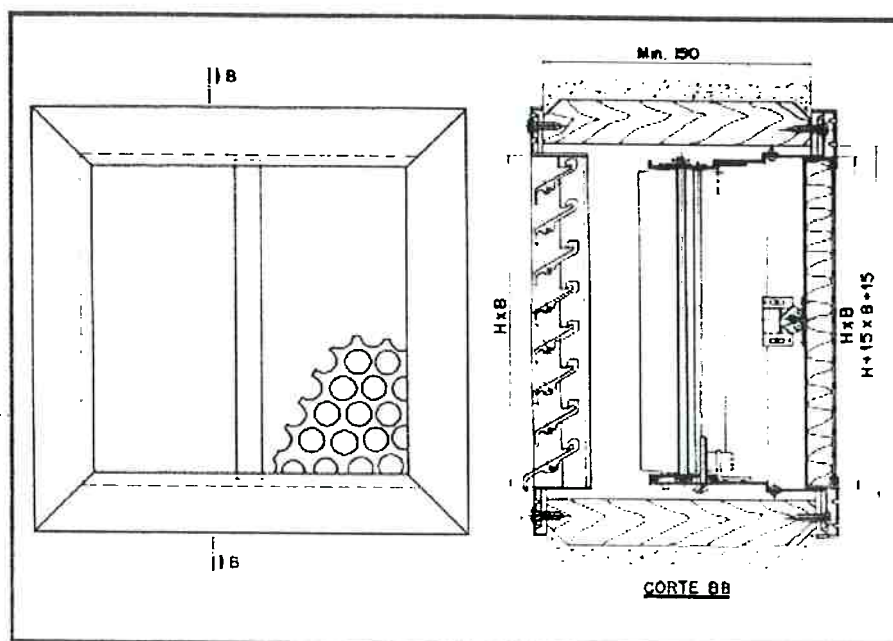


Figura 3.1: Conjunto veneziana-registro-filtro – VDF, reprodução folheto Trox (1998a)

<sup>1</sup> Celso Simões Alexandre prestou informações sobre levantamento realizado junto à linha de produção da Trox para identificar quais as características do modelo que possui maior comercialização. 1998 e 1999.

<sup>2</sup> Gilberto Bogato prestou informações sobre modelos de acessórios para tomada de ar externo. 1999.

A partir destas informações optou-se por utilizar um modelo VDF de fabricação da Trox, com dimensões (397 x 297) mm. O dispositivo foi cedido pelo fabricante, que forneceu os três elementos separados conforme solicitado, para que fosse facilitada a montagem do filtro na veneziana sem o uso do registro, pois normalmente este dois vem vinculados através de rebites. Foram utilizados filtros classificados como finos, tipo F1, conforme ABNT NBR 6401 (1980).

A veneziana do conjunto VDF da Trox, é identificada como modelo AWK, é fabricada em alumínio, possui 12 aletas inclinadas em um ângulo de 30° em relação à horizontal. O ar atravessa os espaços entre as aletas que possuem geometria e dimensões representados nas figuras 3.2 e 3.3.

A área livre de passagem do ar foi estimada a partir dos dados apresentados na figura 3.3 e estão apresentados na tabela 3.1.

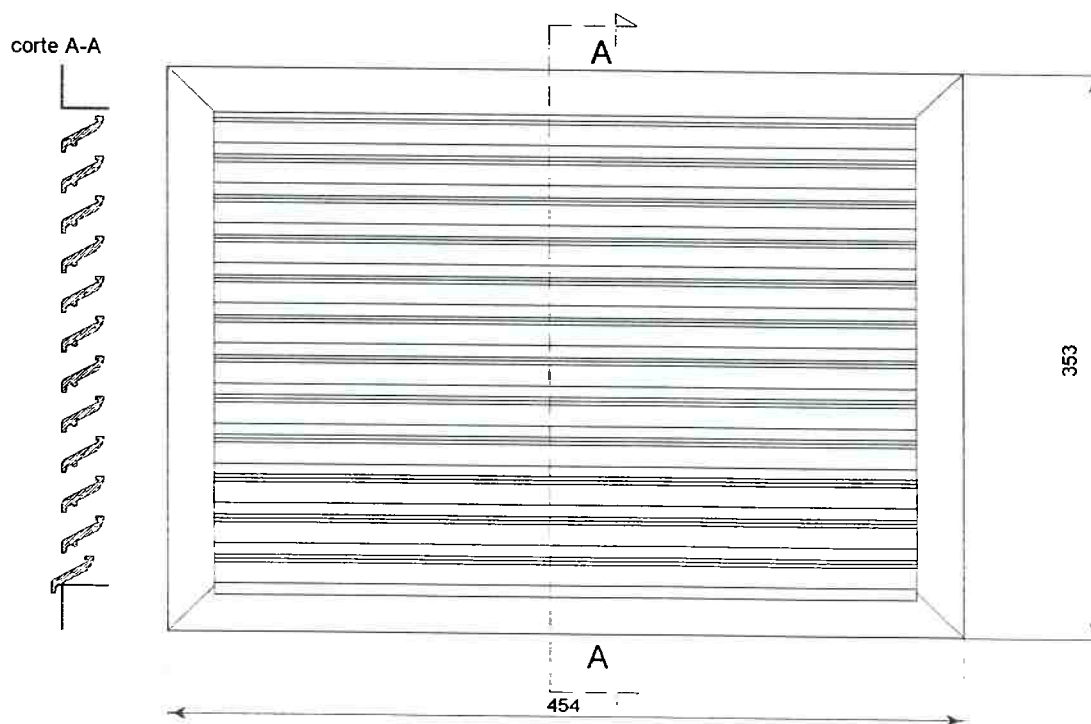


Figura 3.2: Veneziana AWK – vista frontal e corte

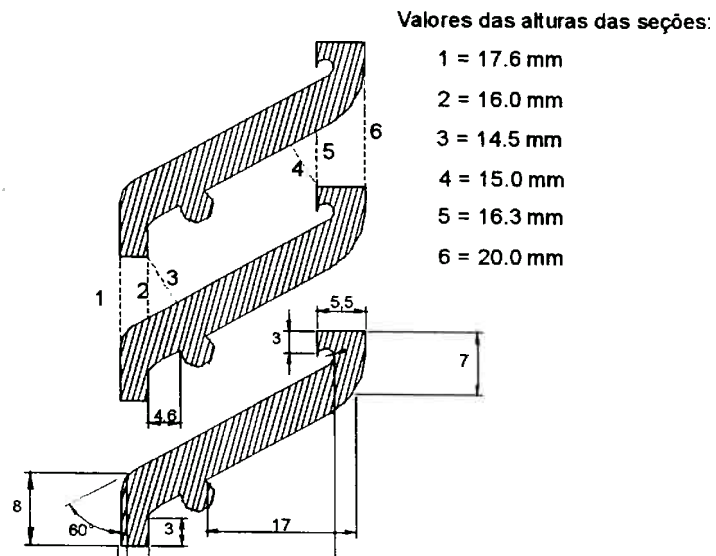


Figura 3.3: Veneziana AWK, detalhe da vista em corte. Medidas em milímetros.

Identificação da seção de passagem na veneziana (conforme figura 3.3)	Altura (m)	Área livre total através da veneziana para cada seção considerada = Área de passagem ( $S_{Pvenez}$ ) ( $m^2$ )	Área útil = $(100 * S_{Pvenez} / S_T)$ (%)
1	0.0176	0.0764	65.5
2	0.0160	0.0707	60.7
3	0.0145	0.0642	55.1
4	0.0150	0.0664	56.9
5	0.0163	0.0720	61.8
6	0.0200	0.0881	75.6
<b>Valores da veneziana utilizados para os cálculos da parte superior da tabela</b>			
Largura livre da veneziana (m)		0.395	
Número de fendas		11	
Área da fenda superior, mais estreita ( $m^2$ )		0.0012	
Área total (sem moldura) $(0.295 \times 0.395) m = S_T (m^2)$		0.1165	

Tabela 3.1: Determinação da área de passagem do ar na veneziana em função das várias seções desde a face de entrada até a face de saída.

A faixa de vazão a que é submetido este acessório foi estabelecida a partir das informações dos dois fabricantes, para tomadas de ar externo de medidas nominais (400 x 300) mm. Nos catálogos da TROX (1998b) e da TROPICAL (1998) os valores de velocidades e vazões recomendadas para

estas venezianas definiram que a velocidade associada a área livre de passagem do ar ( $S_{Pvenez}$ ) na face externa da veneziana varia entre 2.0 m/s e 10.0 m/s.

Estas informações podem ser convertidas em vazão volumétrica considerando valores de área de passagem, também chamada área efetiva, conforme está apresentado na tabela 3.2 a seguir.

	$S_{Pvenez}$	$Q_{min}$	$Q_{min}$	$Q_{max}$	$Q_{max}$
Fabricante	( $m^2$ )	( $m^3/s$ )	( $m^3/h$ )	( $m^3/s$ )	( $m^3/h$ )
Trox	0.0764	0.1527	550	0.5345	1924
Tropical	0.0550	0.1092	393	0.5458	1965

Tabela 3.2: Dados para venezianas de tomadas de ar externo

Com estas informações dos fabricantes e levando em conta dados típicos de projetos, obtidos junto a engenheiros projetistas de sistemas de ACV, e considerando ainda, o fato de que existe uma tendência de aumentar a quantidade de ar exterior em função da garantia da QAI, foi possível definir uma faixa para a vazão de ar para o presente estudo. O intervalo de valores adotado foi  $0.200 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 0.640 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 3.2. Metodologia e arranjo experimental

Para conhecer como ocorria o escoamento de ar após este atravessar uma veneziana foram realizados ensaios experimentais que tinham como objetivo a caracterização do campo de velocidades e a intensidade de turbulência associada a estas.



Nesta etapa obteve-se apoio do Laboratório de Vazão do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT, sendo os ensaios realizados no Laboratório de Anemometria.

Neste laboratório foi montado um dispositivo adaptador especialmente fabricado para posicionar o conjunto veneziana-registro-filtro na saída da seção de testes do túnel de vento, de modo que fosse possível realizar medições na seção de interesse com o uso de um anemômetro a laser. Esta montagem experimental está apresentada nas figuras 3.4.b), 3.5 e 3.6.

a)



b)



Figura 3.4: Foto a) Vista frontal do túnel de vento. Observa-se o dispositivo adaptador que representou a passagem curta, o canhão do anemômetro laser e seu braço posicionador. b) Medidores de pressão atmosférica e temperaturas de bulbo seco e de ponto de orvalho.

Os equipamentos utilizados nos ensaios foram:

- túnel de vento
- anemômetro laser e acessórios: braço posicionador e gerador de fumaça
- quadro com fios de nylon localizador das posições de medição
- medidor de vazão tipo coifa (*Flow Hood*)
- medidor de temperatura de ponto de orvalho e de temperatura de bulbo seco
- medidor de pressão atmosférica

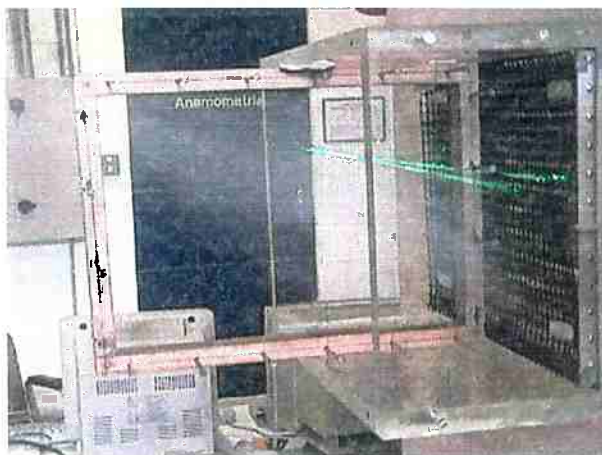
O túnel de vento é do tipo circuito aberto, com seção de testes de 500 x 500 mm, e a movimentação do ar é realizada por um ventilador centrífugo acionado por um motor elétrico de 70 cv, conforme descrito em TAIRA e PEREIRA (1995). O ajuste da condição de vazão é obtido através de um inversor estático de frequência que estabelece a rotação do motor. Para selecionar a vazão pode-se utilizar também um registro radial instalado na entrada do ventilador.

Anemômetro a laser, também conhecido por *Laser Doppler Anemometer* – LDA, de fabricação da Dantec, com potência de 200 mW. Este medidor determina a velocidade através da interferência de pequenas partículas que atravessam o volume de controle definido pelo cruzamento dos feixes, estas estão em suspensão no ar e acompanham seu movimento. Um sistema ótico especial detecta o desvio provocado no laser e calcula a velocidade. O modelo utilizado possui apenas um par de feixes, possibilitando a medição de uma componente da velocidade em apenas uma direção em cada tomada de dados.

seção de testes. Neste quadro vazado foram fixados fios de nylon com espessura de 0.2 mm, que cruzavam-se no ponto onde deseja-se medir. Linhas auxiliares, traçadas no acrílico, auxiliavam o posicionamento, juntamente com um nível e um esquadro.

O procedimento para marcação dos pontos nas escalas do braço posicionador eletromecânico do laser era o seguinte: posicionava-se o quadro com os fios de nylon na seção de testes, acionava-se o ventilador e o gerador de fumaça, movimentava-se o canhão do laser atuando no painel do posicionador até que o encontro dos feixes coincidisse com o encontro dos fios de nylon. O movimento do braço posicionador era realizado nas duas direções, que definiam o plano de medição, vertical e horizontal, paralelas aos eixos y e z da figura 3.7 respectivamente. Este processo pode ser visualizado através da imagem da figura 3.6.

a)



b)



Figura 3.6: Foto a) Aparato em acrílico para simular passagem curta com dispositivo de localização dos pontos de medição na seção de testes. Foto b) Anemômetro laser durante o processo de medição.

O mapeamento da seção de medição foi, na primeira etapa de coleta de dados, definido com 24 pontos. Porém havia uma limitação no sistema posicionador que combinada com a distância focal do feixe de laser e com as

dimensões da seção de medição, permitia que fosse mapeada apenas metade da seção de testes., o que foi suficiente dada a simetria dos contornos. Assim a coleta de dados foi realizada neste etapa em apenas 12 pontos da seção de testes identificados conforme representado na figura 3.7.

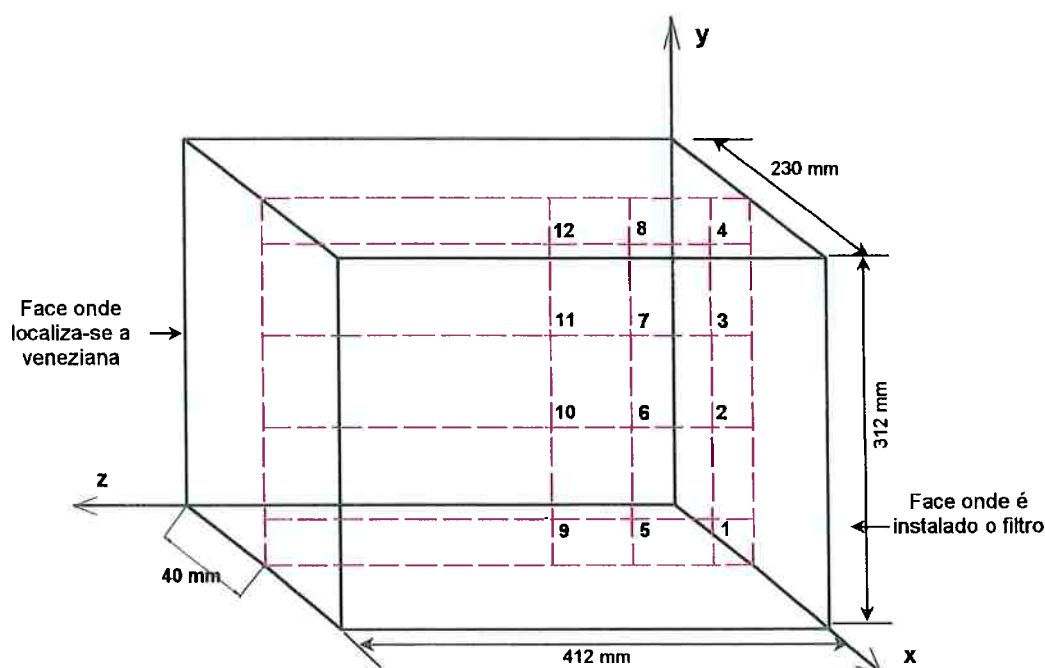


Figura 3.7: Esquema identificando os pontos de medição e sistema de coordenadas adotado. O paralelepípedo representa a passagem curta.

A localização dos 12 pontos foi estabelecida a partir do critério de divisão da seção de medição em sub-áreas iguais, e o centro de cada área definia a posição onde as velocidades foram medidas. Este critério foi o mesmo adotado no projeto do protótipo da grade sensora, baseado na proposta da AMCA 203 (1990) conforme será discutido no próximo capítulo.

Em cada um dos 12 pontos foram avaliadas três componentes da velocidade, que resultaram em  $V_x$ ,  $V_y$  e  $V_z$ , associadas a um sistema triortogonal  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Este sistema de eixos, conforme pode ser observado na

figura 3.7, possui as seguintes direções: eixo  $x$  está posicionado horizontalmente, com direção perpendicular à face da veneziana, eixo  $y$  é vertical e paralelo à face da veneziana, e eixo  $z$  é horizontal e também paralelo à face da veneziana.

Três configurações para a instalação de acessórios na passagem curta foram consideradas nestes ensaios: 1- veneziana, 2- veneziana e filtro, 3 - veneziana, filtro e registro posicionado a  $60^\circ$ .

Uma segunda etapa neste levantamento do campo de velocidades foi realizada com a utilização de 36 pontos de medição localizados em meia seção, o que equivale a 72 pontos para toda a seção. Estes ensaios tiveram como objetivo obter com maior detalhe a distribuição de velocidades em planos  $xy$ , possibilitando um refinamento nas informações obtidas com 12 pontos. Foram realizados ensaios em duas condições de vazão para cada uma das três situações de aplicação do conjunto VDF.

### **3.3. Procedimento experimental**

O procedimento para cada medição foi o seguinte:

- a) Acionado o túnel de vento e o gerador de fumaça, procurava-se estabelecer uma vazão pré-determinada de referência medida através do medidor de vazão tipo coifa posicionando na saída do túnel após a passagem pela veneziana e pela abertura. Convém notar que as vazões indicadas no mesmo instrumento, medidor de vazão tipo coifa, foram adotadas como referência tanto para estes ensaios como para os realizados na câmara de mistura, no laboratório da Escola Politécnica da USP – EPUSP.

- b) Ajustava-se o canhão de laser nas posições identificadas por 1, 2, 3, 4, seguindo para as posições 8, 7, 6 e 5 e finalmente 9, 10 11 e 12, seguindo sempre esta ordem. Em uma primeira tomada de dados, isto é para determinada vazão, eram medidas as componentes  $V_x$ , componente horizontal da velocidade na direção perpendicular à veneziana e  $V_y$ , componente vertical da velocidade na direção paralela ao plano da veneziana, obtidas para uma mesma posição apenas rotacionando o canhão do laser de  $90^\circ$ .
- c) A medição da componente  $V_z$  foi realizada após um novo posicionamento do canhão de laser, colocado verticalmente, acima da seção de medição, fixado em um prolongador do braço eletromecânico. Desta forma o plano formado pelo feixe de laser é paralelo ao plano da veneziana e a direção do eixo  $z$ , horizontal, possibilitando medir-se  $V_z$ .
- d) Eram também anotados os dados para as variáveis psicrométricas, TBS, TPO e  $P_{atm}$  do ar que possibilitavam o cálculo da massa específica nas condições locais.
- e) Encerrado o mapeamento em uma determinada vazão alterava-se seu valor e iniciava-se novamente todo este processo.
- f) Ao concluir os ensaios com uma configuração, modificava-se a composição de acessórios e repetia-se todos os procedimentos descritos de a) a e).

O processo de aquisição de dados medidos com o anemômetro laser era realizado com o emprego de um microcomputador tipo PC dedicado, que operando com programa específico fornecido pela Dantec, registrava em

arquivos os dados registrados. Havia um conjunto de parâmetros que se estabelecia para realizar uma coleta de dados. Os principais parâmetros eram: número de amostras, adotado como 500; tempo máximo de coleta, adotado como 100 s; espectro de frequências dentro do qual o equipamento irá realizar medições. O espectro definia a faixa de medição de velocidades e sua resolução, sendo portanto estabelecido em função dos valores de velocidade que estavam sendo medidos. Outros ajustes eram ocasionalmente realizados para atender condições específicas, como para regiões de velocidade muito baixa, quando o nível de partículas de fumaça e/ou a potência do laser era incrementado para se obter sinais de maior intensidade.

A segunda etapa de ensaios foi realizada repetindo as medições de  $V_x$  e  $V_y$  apenas para as vazões de referência de 380 L/s e 640 L/s, porém com um maior número de pontos na seção de testes. Foram adotados 36 pontos para a metade da seção que foi mapeada, onde eram localizados 12 pontos em cada eixo, segundo o mesmo critério de áreas iguais adotado para os ensaios anteriores, porém com uma maior subdivisão.

A tabela 3.3 apresenta um resumo dos ensaios realizados e as condições estabelecidas para cada um deles.

Família de Arquivos	Qref L/s	Qpad (L/s)	$\rho_{local}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Qm (kg/s)	Registro	Filtro
V2-XY	135	130	1.08	156	não	não
V3-XY	193	172	1.07	207	não	não
V4-XY	245	224	1.07	269	não	não
V5-XY	310	262	1.07	315	não	não
V6-XY	370	306	1.07	368	não	não
V7-XY	510	432	1.08	520	não	não
V8-XY	640	549	1.08	660	não	não
V9-XY	760	663	1.08	798	não	não
V10-XY	510	432	1.08	520	sim	sim

Tabela 3.3: Identificação dos arquivos e condições dos ensaios (continua)

Família de Arquivos	Qref L/s	Qpad (L/s)	$\rho_{local}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Qm (kg/s)	Registro	Filtro
V6-Z	370	306	1.07	368	não	não
V7-Z	510	432	1.07	520	não	não
V8-Z	640	549	1.07	660	não	não
V10-Z	510	432	1.07	520	sim	sim
V11-Z	290	249	1.07	300	não	sim
V12-Z	370	306	1.07	368	não	sim
V13-Z	510	432	1.06	520	não	sim
V14-Z	640	549	1.07	660	não	sim
V15-Z	290	249	1.07	300	sim	sim
V16-Z	380	314	1.06	378	sim	sim
V17-Z	510	432	1.08	520	sim	sim
V18-Z	640	549	1.06	660	sim	sim
V19-Z	760	663	1.06	798	sim	sim
V15-XY	290	249	1.06	300	sim	sim
V16-XY	380	314	1.06	378	sim	sim
V18-XY	640	549	1.06	660	sim	sim
V19-XY	760	663	1.06	798	sim	sim
V11-XY	290	249	1.08	300	não	sim
V12-XY	370	306	1.07	368	não	sim
V13-XY	510	432	1.07	520	não	sim
V14-XY	640	549	1.07	660	não	sim
V20-XY	760	663	1.07	798	não	sim
V21-XY	380	314	1.09	378	não	não
V22-XY	640	611	1.09	736	não	não
V23-XY	380	314	1.08	378	não	sim
V24-XY	640	611	1.08	736	não	sim
V25-XY	380	314	1.08	378	sim	sim
V26-XY	640	611	1.08	736	sim	sim

Tabela 3.3: Identificação dos arquivos e condições dos ensaios

### 3.4 Dados obtidos e resultados calculados

Os dados foram, então, tratados com o uso de um programa específico, também fornecido pela Dantec – *Floware* versão 3.2. Os resultados eram apresentados na forma de gráficos que mostravam o espectro da distribuição de velocidades e os valores numéricos para a velocidade média e



para a intensidade de turbulência em cada ponto e em cada direção ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).

Um arquivo do tipo texto foi gerado para cada conjunto de resultados.

A intensidade de turbulência, em termos percentuais, para cada valor de velocidade média é calculada a partir das relações abaixo:

$$\text{turb} (\%) = \frac{\text{RMS}}{V} * 100$$

onde :

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_i (v_i - V)^2}{N}}$$

$v_i$  é a velocidade instantânea para uma amostra  $i$

$V$  é a velocidade média para um conjunto de  $N$  amostras

Os resultados foram importados para uma planilha de cálculo onde receberam um tratamento final. As componentes  $V_x$  e  $V_y$ , que expressam velocidades médias, e suas respectivas intensidades de turbulência foram organizadas nestas planilhas. Seus valores estão apresentados para cada ponto definido na seção de medição.

Essas mesmas componentes,  $V_x$  e  $V_y$ , foram somadas vetorialmente obtendo-se a resultante  $V_{xy}$  em cada ponto. Os resultados de  $V_{xy}$  estão apresentados em um sistema de coordenadas polares, através do módulo do vetor velocidade e de um ângulo. A semi-reta que define a origem deste sistema tem a mesma direção que o eixo  $Ox$  do sistema cartesiano que foi adotado no posicionamento dos pontos na seção de medição, conforme apresentado na figura 3.7. A intensidade de turbulência associada a cada velocidade  $V_{xy}$  foi calculada a partir da média quadrática dos valores de turbulência de cada uma das componentes.

No anexo A estão apresentadas tabelas com os principais resultados numéricos. Cada uma das tabelas, numeradas de A.1 a A.6., foram organizadas com ensaios realizados em valores próximos de vazão, de modo que fosse possível visualizar, lado a lado, os resultados encontrados em cada uma das configurações ensaiadas, veneziana, veneziana e filtro e veneziana, filtro e registro a 60°. Na parte superior das tabelas estão os valores das componentes  $V_x$  e  $V_y$ , e as respectivas intensidades de turbulência em termos percentuais. Logo abaixo estão as médias globais destas componentes,  $V_x$  e  $V_y$ , da turbulência, e as médias calculadas sem os pontos 1, 5 e 9, localizados na região inferior da seção. Ainda na mesma tabela, mais abaixo, estão apresentados os valores para a resultante  $V_{xy}$ , sua turbulência e ângulo em coordenadas polares dentro do intervalo 0° a 360°. Convém notar que os sinais negativos nas componentes  $V_x$  e/ou  $V_y$ , foram incorporados na determinação dos ângulos, não ocorrendo  $V_{xy} < 0$ .

As tabelas A.6 a A.10 apresentam os resultados de velocidade média para a componente  $V_z$  e as respectivas intensidades de turbulência. O número de ensaios realizados para se obter as velocidades  $V_z$  não foi tão grande quanto os realizados para  $V_x$  e  $V_y$ , pois, ficou evidenciado nas medições realizadas para  $V_z$ , que não havia escoamento nesta direção.

As tabelas A.11 a A.16 trazem resultados para as velocidades  $V_{xy}$  obtidas com as medições em 36 pontos, realizadas em uma 2ª etapa.

Foram selecionados resultados representativos dentro da ampla faixa de vazões que é objeto deste estudo,  $Q=200$  L/s e  $Q=640$ L/s, para expressar através de gráficos a distribuição das velocidades na seção de medição.

Nas figuras 3.8 a 3.21, estão representados os perfis de velocidade das componentes  $V_x$  e  $V_y$ , nos planos  $xz$  e  $yz$ , em perspectiva. Estes perfis foram obtidos das medições com 12 pontos localizados em meia seção, extrapolados por simetria para a seção total.

Os perfis de velocidade do vetor resultante  $V_{xy}$  nos planos  $xy$  estão nas figuras 3.22 a 3.27. Para compor estes perfis  $V_{xy}$ , foram utilizados resultados de medições com 36 pontos localizados em meia seção, ou seja em cada perfil há 12 valores de velocidade contribuindo para seu formato.

A interpolação para ajustar as curvas que definem os perfis de velocidade utilizou regressões cúbicas, executadas através de rotina programada no aplicativo MATLAB. Os pontos extremos de cada perfil, que representam as velocidades do escoamento junto à parede, foram considerados com velocidade igual a zero, respeitando o princípio da aderência completa.

As escalas dos gráficos indicam dimensões lineares da passagem curta estudada. Os valores das velocidades foram parametrizados para serem representados nestas mesmas escalas lineares em milímetros, ainda que para as velocidades a unidade dos resultados é dada em (m/s). Um fator de escala igual a 7, realizou esta compatibilização de escalas e de unidades, dentro do programa utilizado para traçar os gráficos em perspectiva.

A visualização da distribuição das velocidades foi elemento auxiliar para a definição da grade sensora multidirecional, validação de sua aplicação, assim como para avaliação comparativa de seu desempenho.

As linhas vermelhas das figuras representam os perfis de velocidade  $V_y$  na direção  $y$  e em azul os perfis na direção  $x$ , ou seja as velocidades  $V_x$ .

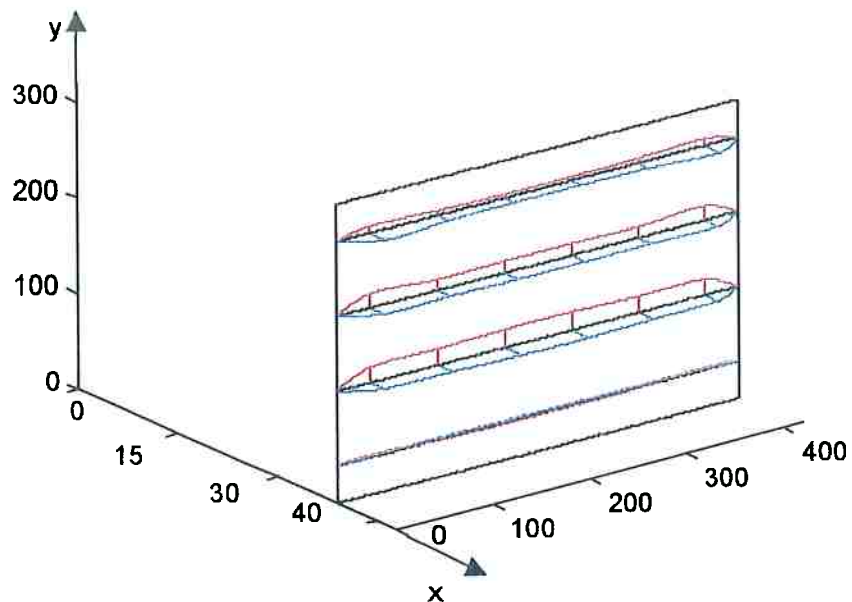


Figura 3.8 : Perfis das componentes da velocidade  $V_x$  em azul e  $V_y$  em vermelho, na seção de medição;  $Q_{ref} = 193$  L/s; configuração 1 = veneziana ; ensaio "V3xy".

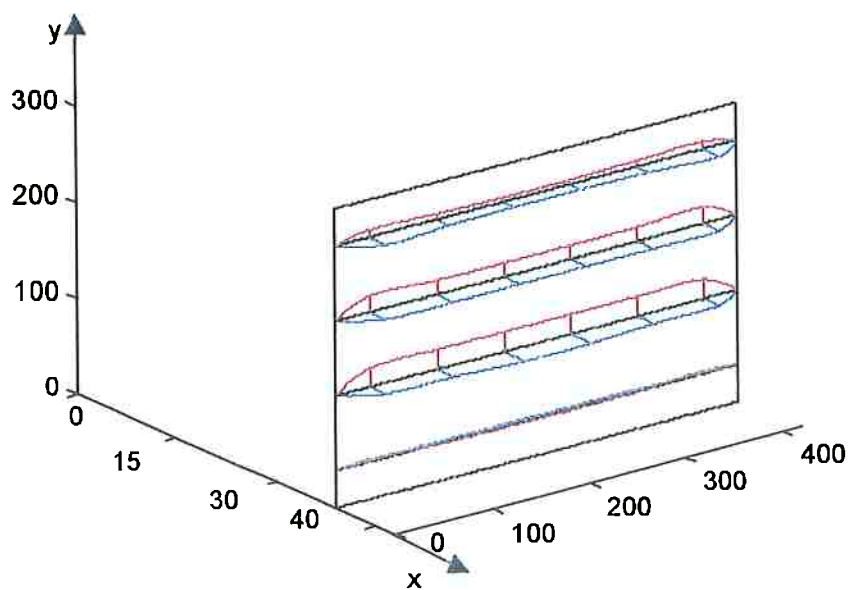


Figura 3.9 : Perfis das componentes da velocidade  $V_x$  em azul e  $V_y$  em vermelho, na seção de medição;  $Q_{ref} = 245$  L/s; configuração 1 = veneziana ; ensaio "V4xy".

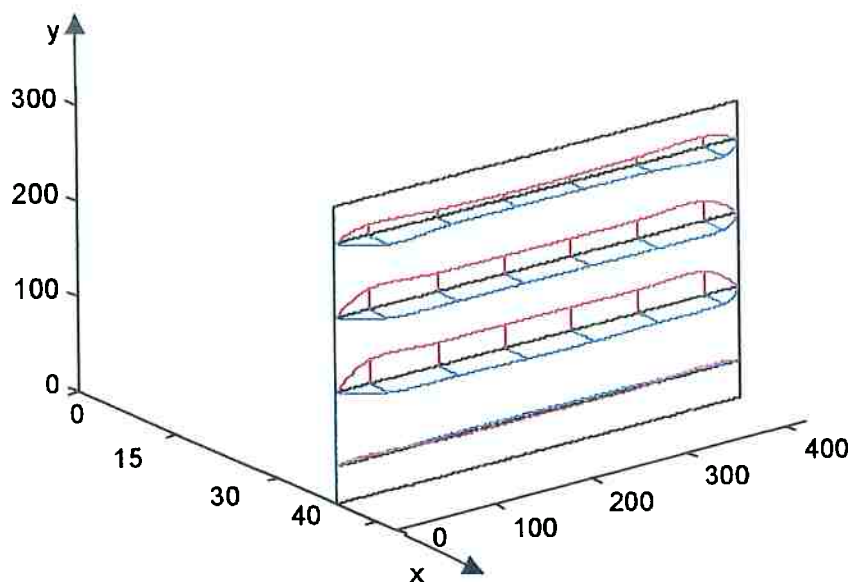


Figura 3.10: Perfis das componentes da velocidade  $V_x$  em azul e  $V_y$  em vermelho, na seção de medição;  $Q_{ref} = 310$  L/s; configuração 1 = veneziana ; ensaio "V5xy".

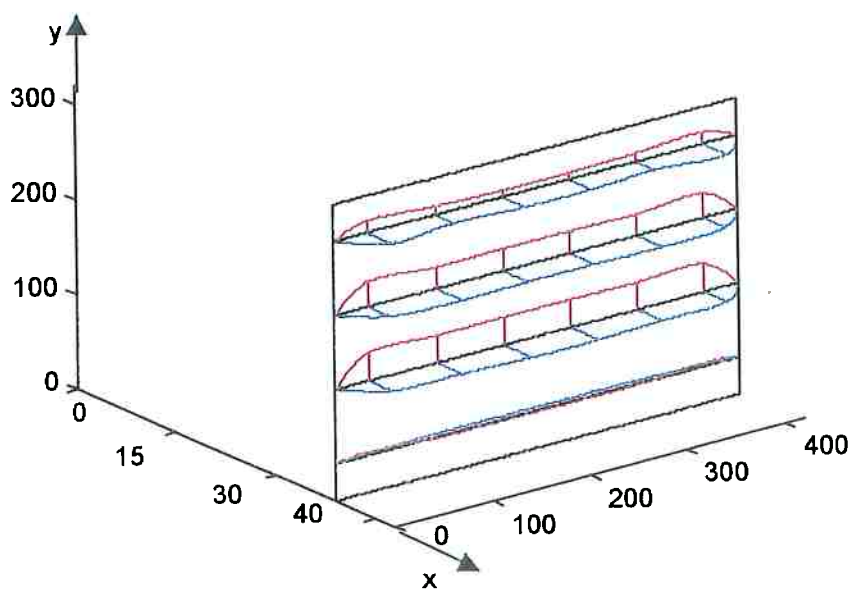


Figura 3.11: Perfis das componentes da velocidade  $V_x$  em azul e  $V_y$  em vermelho, na seção de medição;  $Q_{ref} = 370$  L/s; configuração 1 = veneziana ; ensaio "V6xy".

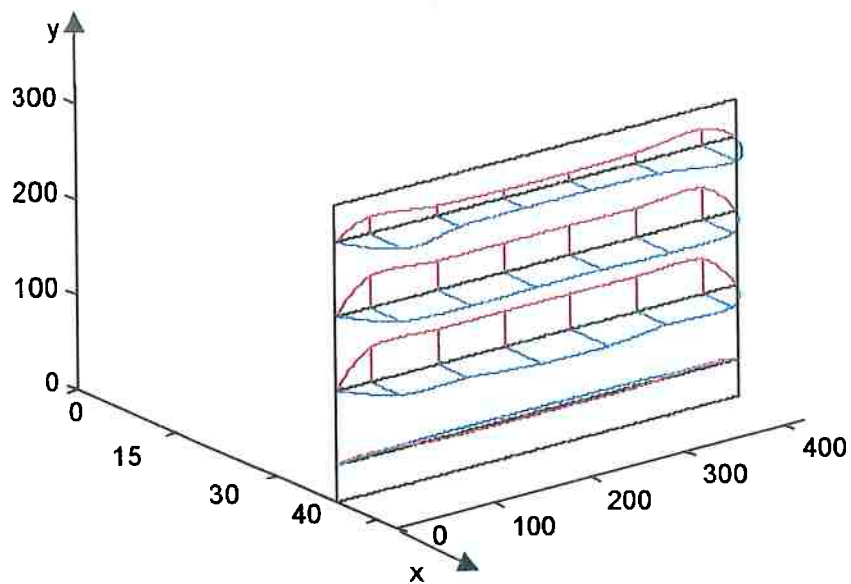


Figura 3.12: Perfis das componentes da velocidade  $V_x$  em azul e  $V_y$  em vermelho, na seção de medição;  $Q_{ref} = 510$  L/s; configuração 1 = veneziana ; ensaio "V7xy"

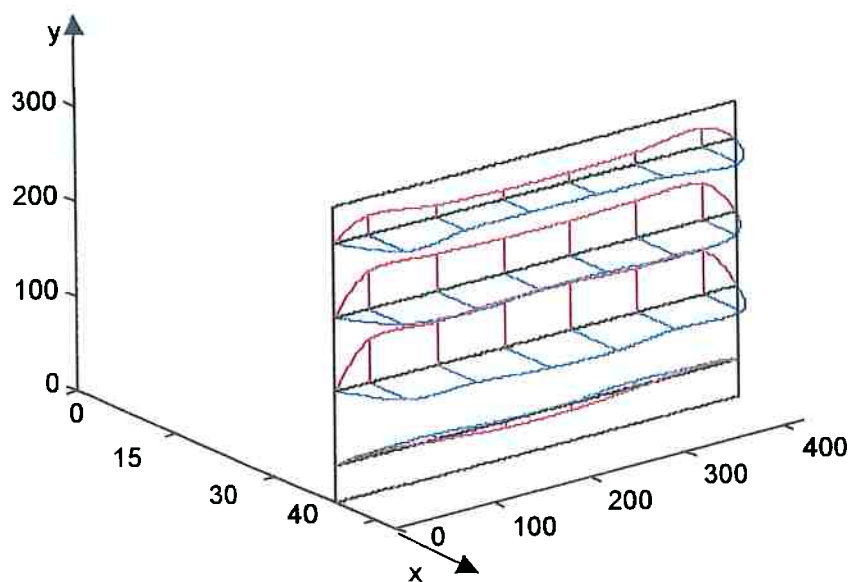


Figura 3.13: Perfis das componentes da velocidade  $V_x$  em azul e  $V_y$  em vermelho na seção de medição;  $Q_{ref} = 640$  L/s; configuração 1 = veneziana ; ensaio "V8xy"

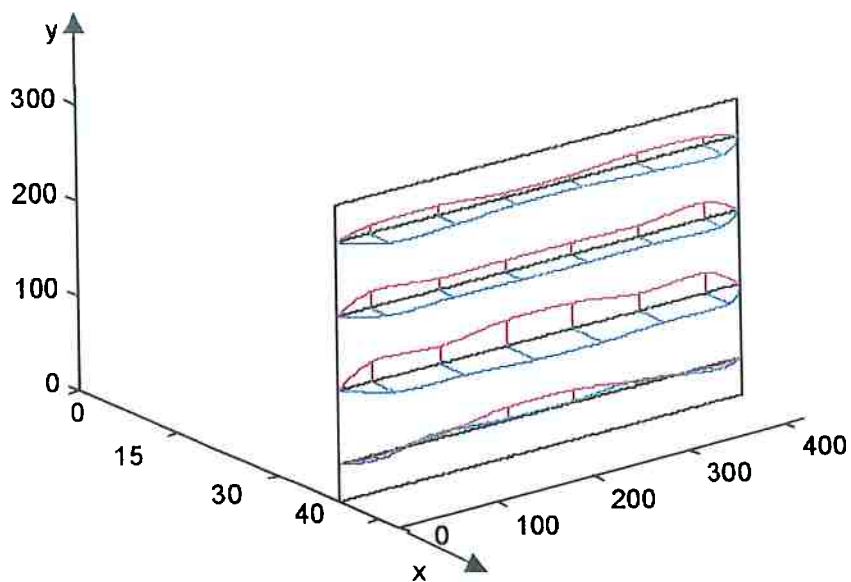


Figura 3.14: Perfis das componentes da velocidade  $V_x$  em azul e  $V_y$  em vermelho na seção de medição;  $Q_{ref} = 290$  L/s; configuração 2 = veneziana e filtro ; ensaio "V11xy"

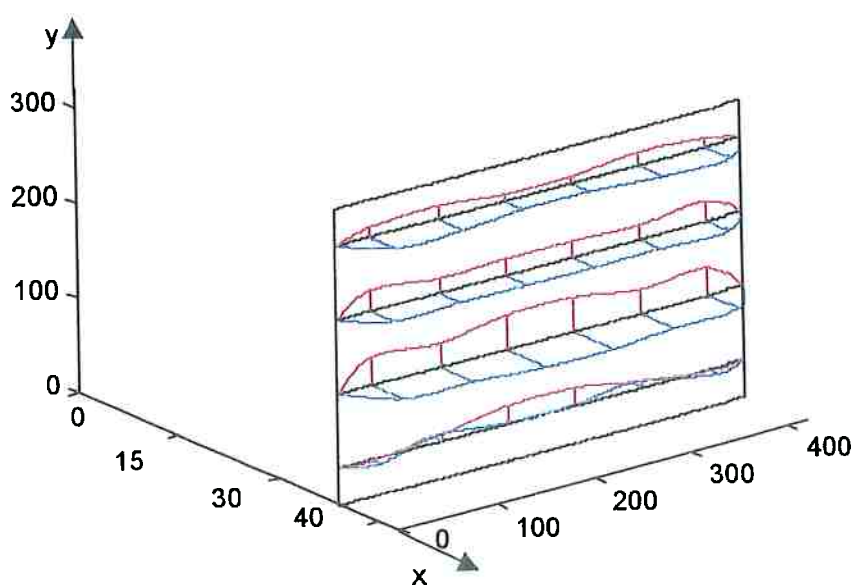


Figura 3.15: Perfis das componentes da velocidade  $V_x$  em azul e  $V_y$  em vermelho, na seção de medição;  $Q_{ref} = 370$  L/s; configuração 2 = veneziana e filtro ; ensaio "V12xy"

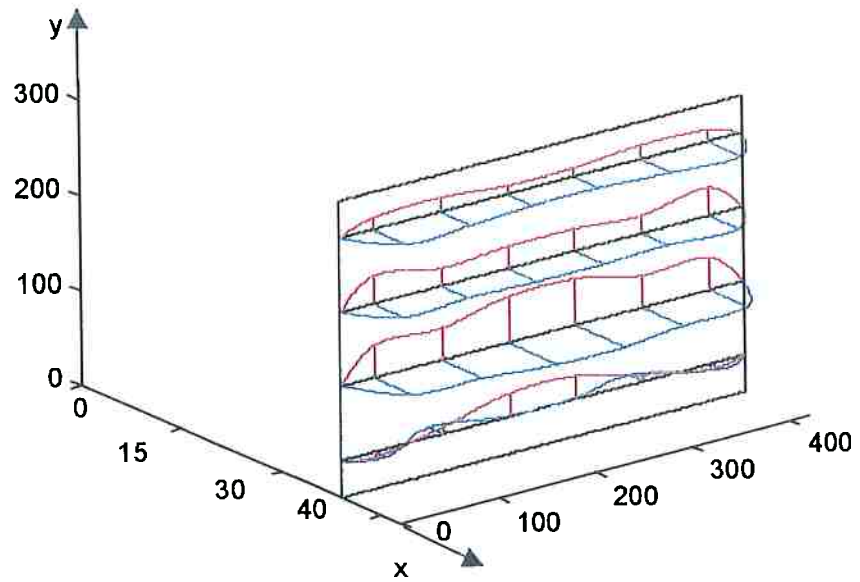


Figura 3.16: Perfis das componentes da velocidade  $V_x$  em azul e  $V_y$  em vermelho, na seção de medição;  $Q_{ref} = 510$  L/s; configuração 2 = veneziana e filtro ; ensaio "V13xy"

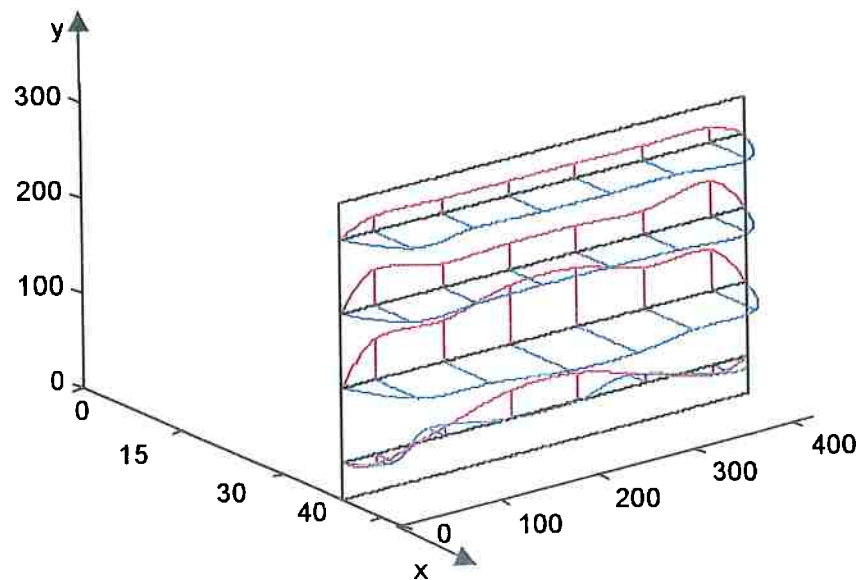


Figura 3.17: Perfis das componentes da velocidade  $V_x$  em azul e  $V_y$  em vermelho, na seção de medição;  $Q_{ref} = 640$  L/s; configuração 2 = veneziana e filtro ; ensaio "V14xy"



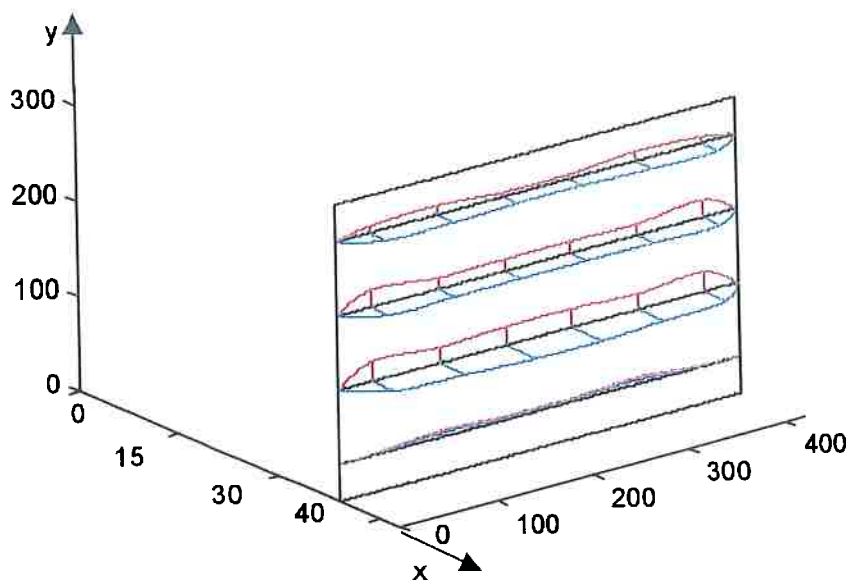


Figura 3.18: Perfis das componentes da velocidade  $V_x$  em azul e  $V_y$  em vermelho, na seção de medição;  $Q_{ref} = 290$  L/s; configuração 3 = veneziana, filtro e registro  $60^\circ$ ; ensaio "V15xy"

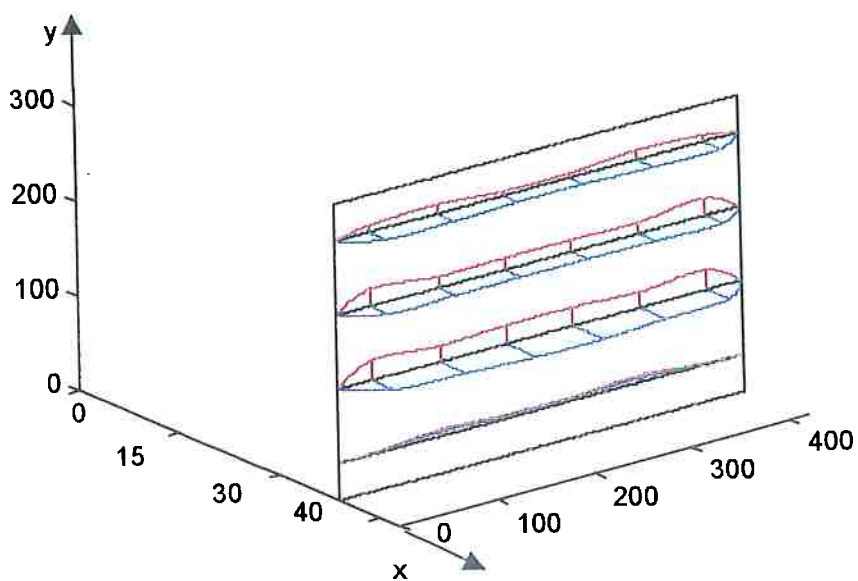


Figura 3.19: Perfis das componentes da velocidade  $V_x$  em azul e  $V_y$  em vermelho, na seção de medição;  $Q_{ref} = 380$  L/s; configuração 3 = veneziana, filtro e registro  $60^\circ$ ; ensaio "V15xy"

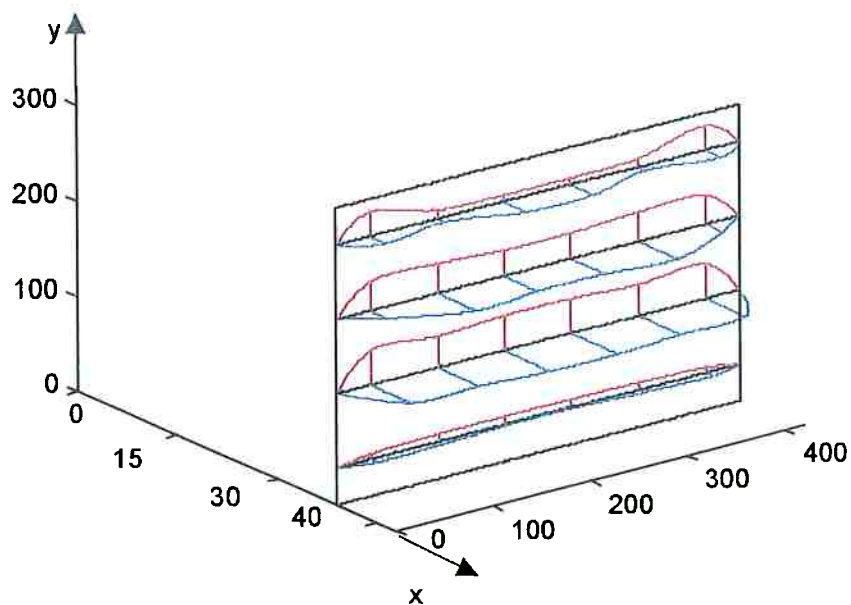


Figura 3.20: Perfis das componentes da velocidade  $V_x$  em azul e  $V_y$  em vermelho, na seção de medição;  $Q_{ref} = 510$  L/s; configuração 3 = veneziana, filtro e registro  $60^\circ$ ; ensaio "V10xy"

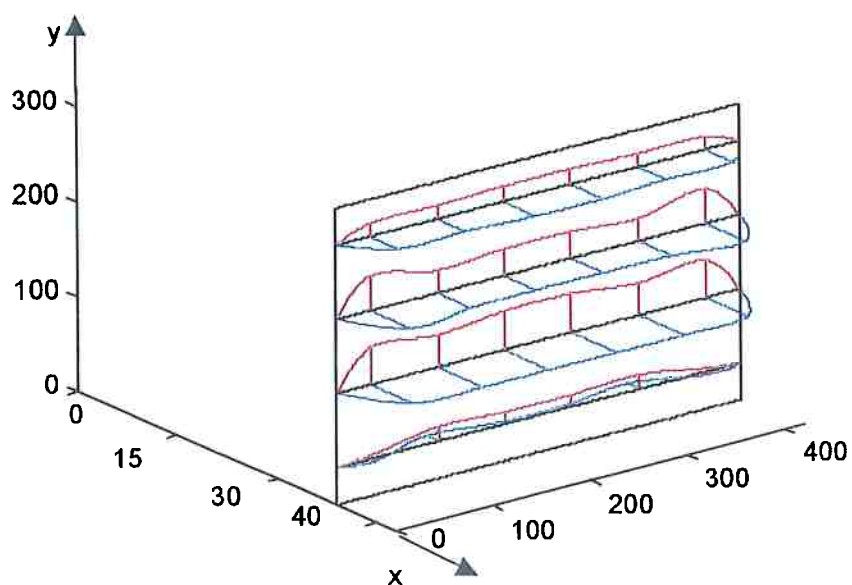


Figura 3.21: Perfis das componentes da velocidade  $V_x$  em azul e  $V_y$  em vermelho, na seção de medição;  $Q_{ref} = 640$  L/s; configuração 3 = veneziana, filtro e registro  $60^\circ$ ; ensaio "V18xy"

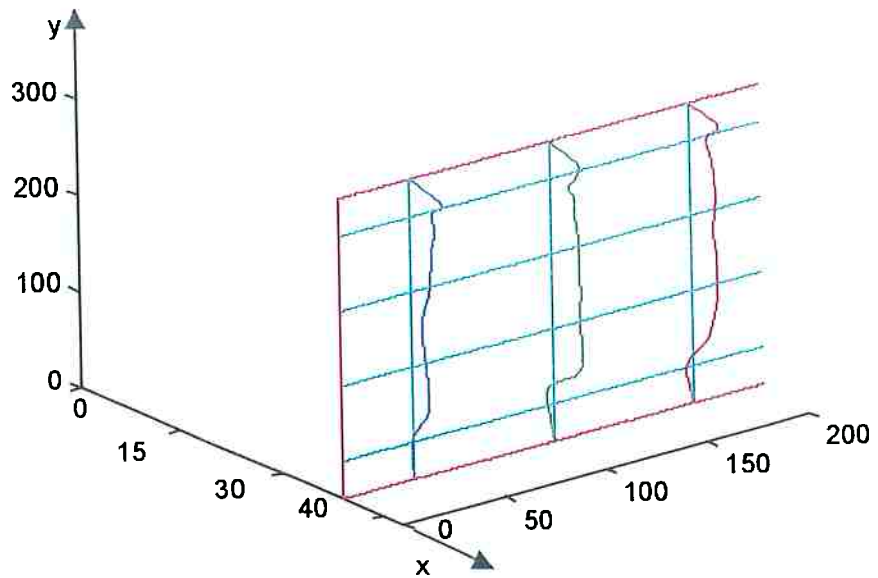


Figura 3.22: Perfis da velocidade  $V_{xy}$  em planos  $xy$  representados em metade da seção de medição;  $Q_{ref} = 380$  L/s; configuração 1 = veneziana; ensaio "V21xy"

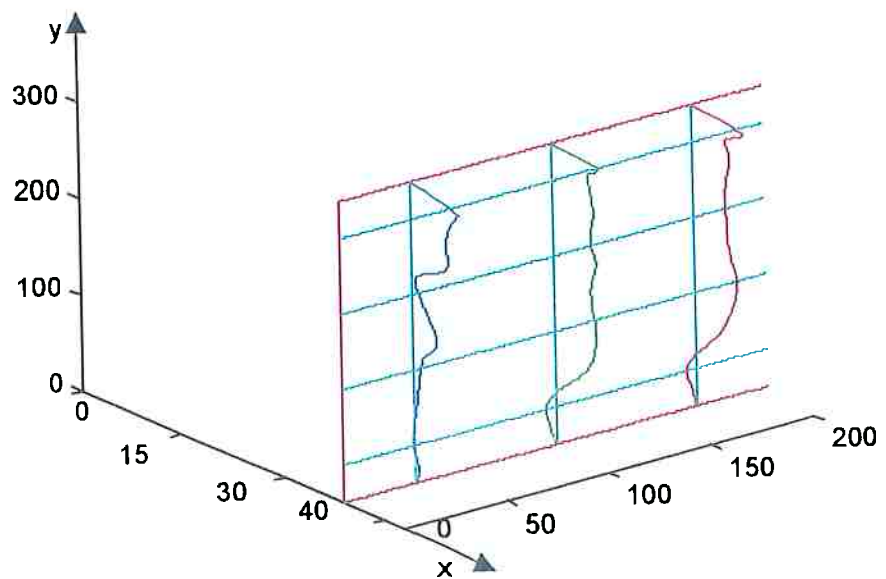


Figura 3.23: Perfis da velocidade  $V_{xy}$  em planos  $xy$  representados em metade da seção de medição;  $Q_{ref} = 640$  L/s; configuração 1 = veneziana; ensaio "V22xy"

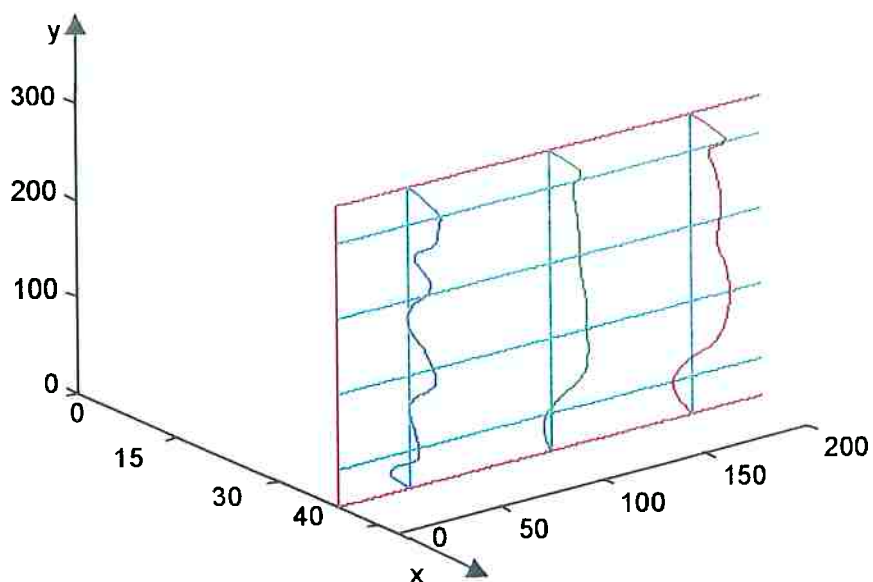


Figura 3.24: Perfis da velocidade  $V_{xy}$  em planos  $xy$  representados em metade da seção de medição;  $Q_{ref} = 380$  L/s; configuração 2 = veneziana e filtro; ensaio "V23xy"

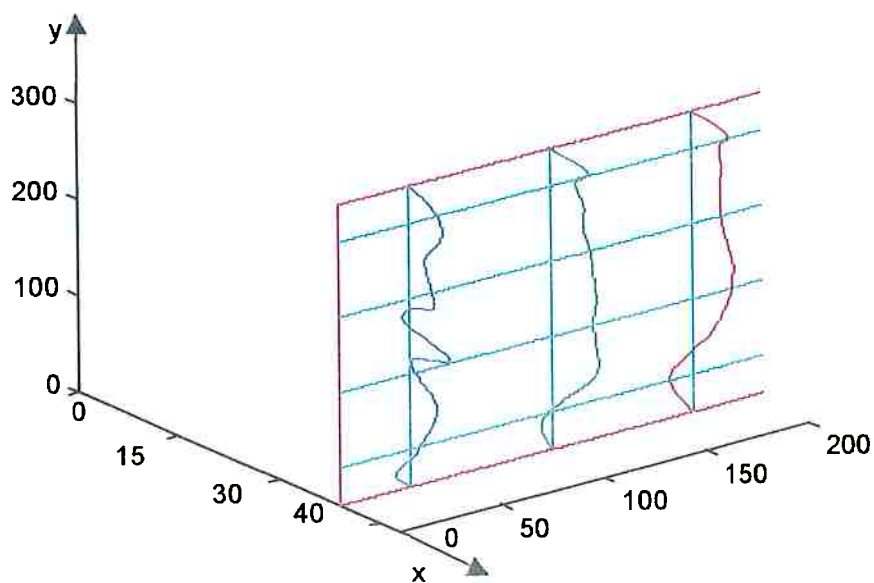


Figura 3.25: Perfis da velocidade  $V_{xy}$  em planos  $xy$  representados em metade da seção de medição;  $Q_{ref} = 640$  L/s; configuração 2 = veneziana e filtro; ensaio "V24xy"

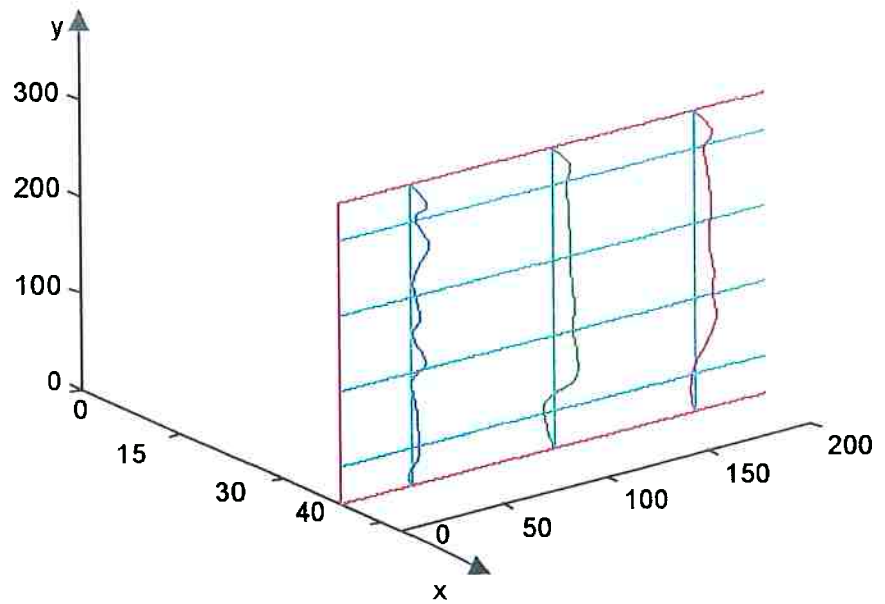


Figura 3.26: Perfis da velocidade  $V_{xy}$  em planos  $xy$  representados em metade da seção de medição;  $Q_{ref} = 380$  L/s; configuração 3 = veneziana, filtro e registro  $60^\circ$ ; ensaio "V25xy"

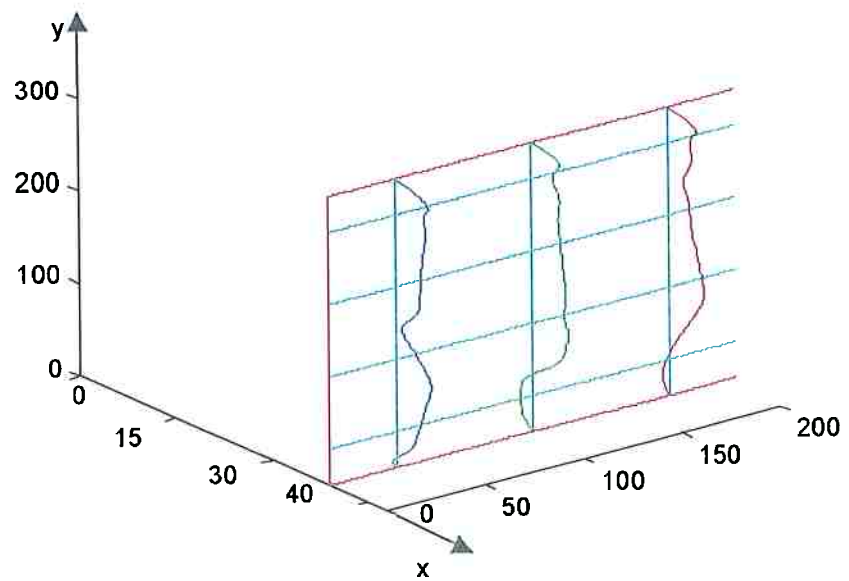


Figura 3.27: Perfis da velocidade  $V_{xy}$  em planos  $xy$  representados em metade da seção de medição;  $Q_{ref} = 640$  L/s; configuração 3 = veneziana, filtro e registro  $60^\circ$ ; ensaio "V26xy"

### **3.5. Análise dos resultados e da apresentação gráfica do campo de velocidades**

Os resultados obtidos caracterizam a influência da veneziana no escoamento de ar presente na seção de medição da passagem curta, como também os efeitos da associação do filtro instalado em um suporte, e do registro.

Observa-se:

- a) Velocidades com valores maiores nas 3/4 partes de cima da seção de medição em relação à 1/4 parte inferior. Isto pode ser verificado através dos gráficos das figuras 3.8 a 3.21, onde o perfil representado nos planos xz e yz da região inferior da seção possui valores próximos de zero, enquanto os outros três localizados acima deste indicam a presença de escoamento. Nas figuras 3.22 a 3.27, onde os perfis estão traçados em planos xy, a constatação é a mesma, quando se observa a parte inferior de cada um deles, onde há indicação clara de escoamento reverso.
- b) Observando cada tabela do anexo A, verifica-se a partir da comparação entre cada par de médias de valores de velocidade calculado logo abaixo da tabela, cuja primeira média considera todos os valores medidos e a segunda retira os pontos de medição 1, 5 e 9, que novamente chega-se à mesma conclusão expressa no item anterior, ou seja as médias sem os pontos 1, 5 e 9 são sempre maiores que a média geral. Ou seja os pontos da região inferior da seção de medição, 1, 5 e 9, estão contribuindo para a redução da média geral entre todos valores medidos, assumindo em alguns

casos valores negativos, representativos de escoamento em sentido contrário daquele que é o sentido principal do escoamento.

- c) O nível de turbulência é em geral alto, acima de 20%. Porém há regiões que a intensidade desta turbulência assume valores muito elevados, acima de 100%. Isto é verificado, principalmente nos pontos 1, 5 e 9, novamente identificados com a região inferior da passagem curta, local onde o fluido não tem sentido preferencial e as flutuações de velocidade são superiores ao respectivo valor médio. Tudo indica que nesta região há fluxo reverso, com a presença de vórtices e recirculação.
- d) A componente da velocidade  $V_z$  apresenta valores muito pequenos, onde a média global de medidas varia na maioria dos casos entre 0.1 m/s e 0.3 m/s, com um valor máximo de 0.5 m/s, inclusive não sendo viável fazer uma representação gráfica. A avaliação dos valores da intensidade de turbulência apresenta resultados extremamente altos. Conclui-se que não há movimento permanente em média na direção z, há apenas flutuações, provavelmente devido a recirculações e presença de vórtices.
- e) Da análise comparativa das intensidades de turbulência em  $V_{xy}$ , cujos valores de modo geral são altos, pode-se depreender que, entre tabelas de uma mesma página do anexo A, as médias de turbulência, suprimidos os pontos 1, 5 e 9, crescem da configuração 1 para a configuração 2 e 3. Ou seja para uma mesma condição de vazão, a introdução de mais acessórios, como registro e filtro, tende

a aumentar a intensidade da turbulência associada as velocidades  $V_{xy}$ , pertencentes aos planos  $xy$ . Ver tabelas A.1 a A.5.

- f) Nas medições de velocidades em  $z$ , ao contrário do que ocorre com  $V_{xy}$ , observa-se nas tabelas A.7, A.8 e A.9, que as médias de valores para intensidade de turbulência, excluídos os pontos 1, 5 e 9, ainda que sejam muito altos, diminuem para a configuração em que é instalado o registro. Isto pode ser explicado pela ordenação ao escoamento que provoca as lâminas do registro posicionadas verticalmente no interior da passagem curta.

O objetivo de calcular médias de valores de velocidade e de intensidade de turbulência, sem os pontos da região inferior da passagem, é pelo fato de que como estão ali presentes velocidades muito pequenas e certas vezes velocidades negativas, quando estes pontos são utilizados na determinação da média, podem trazer uma distorção exagerada, descaracterizando este estimador e tornando-o pouco representativo para análises.

Assim, o escoamento pode ser caracterizado como contido em planos definidos por  $xy$ , retomando que em  $z$ , não existe na prática fluxo. Este fato é fundamental para a definições na proposta da grade sensora.

Os resultados das figuras 3.8 a 3.21, apresentam para os perfis de velocidade  $V_x$  e  $V_y$ , um comportamento uniforme. Esta análise pode ser feita a partir de critérios normalizados, como os encontrados no manual da AMCA 203 (1990),





## 4. PROJETO E FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO

### 4.1. Características do protótipo

Na bibliografia pesquisada foram encontradas formas geométricas e diferentes arranjos físicos para os modelos de sensores empregados para medição de velocidades e da direção do escoamento. Estas informações somaram-se a dados sobre grades sensoras de vazão e aos resultados da investigação experimental desenvolvida na dissertação de mestrado de MARIANI (1995), com o intuito de propor um protótipo para a presente pesquisa.

Tendo em vista o objetivo de investigar a interação do escoamento de ar com um dispositivo sensor de vazão que possa ser inserido em uma passagem curta, onde este escoamento tem a sua direção principal modificada pelos acessórios ali instalados, veneziana, registro e filtro, foram definidas as características de fabricação para o protótipo de uma grade sensora de vazão multidirecional.

Os parâmetros de fabricação e dimensões definidos para o protótipo da grade sensora que foi testada foram as seguintes:

- a) Geometria externa das sondas que compõe a grade sensora.
- b) Número de orifícios sensores posicionados na região frontal da sonda; que são aqueles orientados para montante do escoamento principal
- c) Localização dos orifícios sensores frontais.
- d) Diâmetro dos orifícios frontais
- e) Número de sondas na grade

- f) Número de orifícios que sentem o valor da pressão de esteira, que são as tomadas de pressão direcionadas para jusante do escoamento principal.
- g) Localização dos orifícios que indicam o valor de pressão de esteira
- h) Arranjo físico interno do medidor

Nos próximos itens estão detalhadas as escolhas de parâmetros para um protótipo que foi aplicado a uma seção de medição, estabelecida em uma passagem curta, em que foram realizados os ensaios, cujas dimensões estão definidas por (0.412 x 0.312 x 0.230) m, que se referem a largura x altura x profundidade.

#### 4.1.1 Geometria externa das sondas e sua dimensão

A definição da geometria externa das sondas que compõem a grade foi baseada em valores estabelecidos para diversos parâmetros: faixa de vazão em volume ( $Q$ ), velocidades médias previstas para a seção de medição ( $V$ ), dimensões preliminares das sondas ( $d$ ), número de Reynolds ( $Re_d$ ) baseado no diâmetro  $d$  da seção transversal do cilindro. Para estimar a velocidade média prevista para a seção onde a grade está instalada, foi determinada a área livre de passagem nesta seção ( $S_{Pgrade}$ ). Valores encontrados para estas variáveis estão relacionados na tabela 4.1.

$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$d$ (m)	$S_{Pgrade}$ (m <sup>2</sup> )	$V$ (m/s)	$Re_d$
0.200	0.015	0.08929	2.24	2186
0.200	0.020	0.08110	2.47	3215
0.640	0.015	0.08929	7.17	7000
0.640	0.020	0.08110	7.89	10270

Tabela 4.1: Parâmetros iniciais para definições do protótipo da grade sensora

Nos estudos do comportamento de sensores tipo tubo multifuros apresentados por MARIANI (1995), e BRITTON and MESNARD (1982), são analisadas geometrias diferentes, comparando especialmente corpos prismáticos (cilíndricos) de seção transversal circular e octogonal. No intervalo de valores de Reynolds ( $Re_d$ ), apresentados na tabela 4.1, verificou-se nas referências citadas que há um melhor desempenho das sondas de seção transversal com perfil circular ( $5 \times 10^3 < Re_d < 1 \times 10^4$ ) em relação àquelas com geometria octogonal, sendo estas últimas mais adequadas para valores de Reynolds mais altos ( $Re_d > 1,65 \times 10^4$ ). Este desempenho das sondas nas referências citadas é avaliado a partir da estabilidade obtida para o adimensional **K**, denominado coeficiente de vazão.

Observa-se nas referências que, na região de interesse definida por  $Re_d$ , os valores experimentais do **K** dos sensores multifuros de seção circular tem uma variação suave, bem comportada e de fácil ajuste por curva de interpolação. Os valores de **K** obtidos para a seção transversal octogonal possuem pequenos “degraus” na sua variação com Reynolds dentro da mesma faixa.

Considerando que as semelhanças entre o adimensional **K** e o o coeficiente de pressão **C<sub>p</sub>**, adimensional de interesse para este trabalho, foi escolhido para a geometria externa da sonda um cilindro de seção transversal circular.

O diâmetro externo do cilindro da sonda, também foi objeto de atenta avaliação. Uma informação importante para esta decisão foi dada pela comparação entre as áreas livres de passagem de ar nas seções onde foi

instalada a veneziana e onde foi posicionada a grade sensora. Definiu-se que não seria adequado instalar uma grade sensora que restringisse a área dessa seção de modo a provocar uma obstrução maior que a veneziana do conjunto VDF, primeiro dispositivo a interferir no escoamento de ar. A área livre da veneziana foi avaliada considerando os vários trechos da passagem do ar entre suas lâminas, conforme apresentado na figura 3.3 e na tabela 3.1 do capítulo 3. Uma interferência importante no escoamento, poderia aumentar o nível de turbulência e dificultar a interação entre sonda cilíndrica e o fluxo de ar, prejudicando a capacidade de medição de velocidades médias pela sonda.

Os valores para diâmetros de sondas selecionados para análise foram: 0.015 m e 0.020 m. A avaliação das áreas livres para a passagem do ar nas seções da veneziana e da grade foi elemento que definiu a escolha do diâmetro. As áreas das seções presentes na passagem curta são:

- Área total na passagem curta:  $S_{\text{passagem\_curta}} = (0.412 \times 0.312) \text{ m}^2$
- Área ocupada pela grade sensora:  $S_{\text{grade}}$ . Resulta da soma da área da estrutura metálica e da projeção das áreas dos cilindros das sondas
- Área livre de passagem através da grade sensora:  

$$S_{\text{Pgrade}} = S_{\text{passagem\_curta}} - S_{\text{grade}}$$
- Área livre de passagem na veneziana:  $S_{\text{Pvenez}}$

Os valores resultantes estão na tabela 4.2:

$d_{\text{sonda}} \text{ (m)}$	$S_{\text{passagem\_curta}} \text{ (m}^2\text{)}$	$S_{\text{grade}} \text{ (m}^2\text{)}$	$S_{\text{Pgrade}} \text{ (m}^2\text{)}$	$S_{\text{Pvenez}} \text{ (m}^2\text{)}$
0.015	0.1285	0.0378	0.09074	0.0881
0.020	0.1285	0.0460	0.0825	0.0881

Tabela 4.2: Valores para a área livre de passagem do ar na grade sensora e na veneziana.

Comparando os valores para  $S_{Pgrade}$  e  $S_{Pvenez}$ , verifica-se que, para os cilindros de diâmetro 0.015 m, a área livre para o escoamento através da veneziana e da grade tem valores próximos, evitando que o fluxo de ar passe por expansão ou redução de área, e desta forma haja menor perturbação no escoamento. Por outro lado, para a hipótese de uso de cilindros com diâmetro de 0.020 m, a área livre da grade ( $S_{Pgrade}$ ) é menor que a da veneziana ( $S_{Pvenez}$ ), impondo uma contração no fluxo de ar, que resulta em aumento da velocidade, como também, presença de elementos de maior área transversal que induziriam maior alteração nos padrões do escoamento. Considerando esta análise, optou-se por fabricar o protótipo com cilindros de 0.015 m de diâmetro.

#### **4.1.2 Número de orifícios nos tubos multífuro, seu posicionamento e número de sondas na grade**

Existem alguns aspectos que foram analisados separadamente, de modo que, a composição da análise deles resultou na definição do conjunto de orifícios de uma sonda, e também da grade sensora.

Em primeiro lugar foi analisado o número de pontos de medição que devem estar presentes na seção transversal à passagem curta, onde deseja-se medir a vazão.

A localização e o número de pontos distribuídos na seção transversal de escoamento foi determinada adotando-se como referência as normas e recomendações técnicas que orientam sobre como obter a vazão através de medições em pontos determinados, com aplicação de sensores de velocidade como o tubo de Pitot. Este posicionamento foi tema de diversos estudos como

os de SHERWOOD e SKAPERDAS (1939), WINTERNITZ e FISCHL (1957) e KINGHORN (1972), citados na revisão bibliográfica. Atualmente as propostas de definição das estações de medição para uso de tubos de Pitot em seções transversais de escoamento estão normalizadas ou estabelecidas em manuais de instituições reconhecidas como ASME (1971), BSI 1042 (1983), AMCA 203 (1990), ASHRAE (1997) e AABC (1982).

Para a seção retangular de escoamento utilizada nos ensaios desta pesquisa, adotou-se a recomendação da AMCA 203 (1990), que propõe: áreas menores que  $2.23 \text{ m}^2$  ( $24 \text{ pés}^2$ ) devem ser divididas em um mínimo de 24 sub-áreas de igual dimensão e os pontos de medição devem estar localizados no centro de cada uma das 24 sub-áreas. Os pontos de medição são também denominados estações de medição, no decorrer desse texto.

A representação gráfica desta setorização em equi-áreas, e a localização das posições de medição para a seção de  $(0.412 \times 0.312) \text{ m}$  estão representados na figura 4.1.

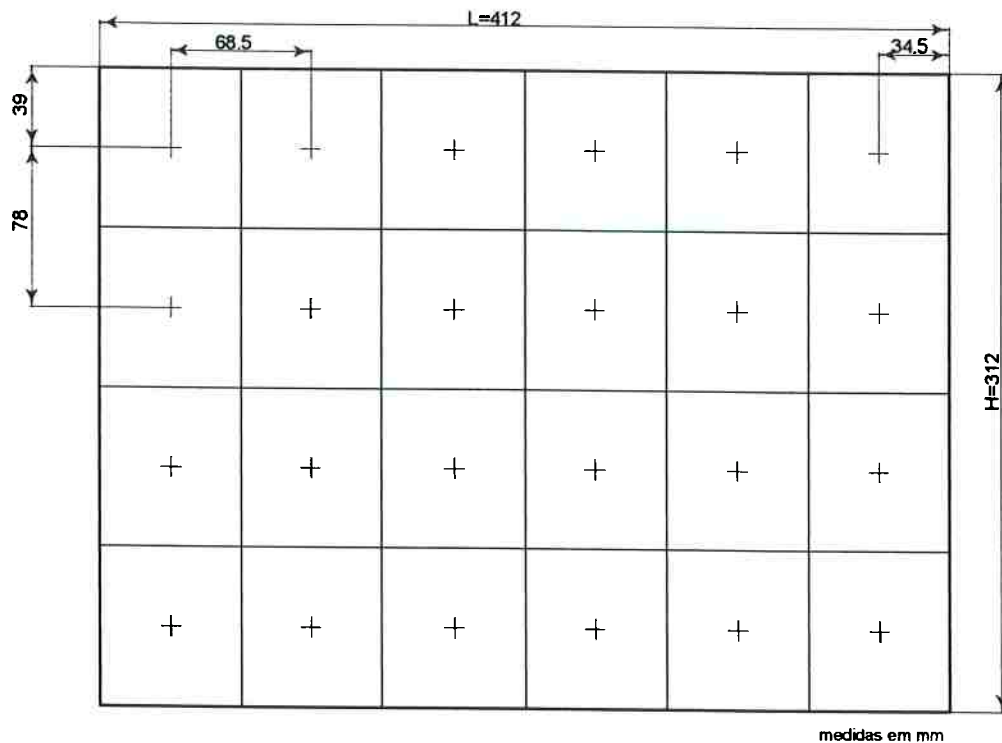


Figura 4.1: Representação da divisão da seção em equi-áreas e identificação do centro das mesmas. As coordenadas dos centros das áreas foram adotadas para posicionar os orifícios na grade sensora.

No projeto do protótipo da grade sensora a localização dos orifícios obedeceu o critério dos centros das equi-áreas conforme proposta da AMCA.

Para implementar as 24 estações de medição nas posições pré-definidas em uma grade, foram analisadas duas possibilidades:

- utilizar 4 sondas posicionadas horizontalmente com 6 estações de medição cada uma
- empregar 6 sondas verticais com 4 estações de medição por cilindro.

A escolha recaiu sobre a primeira alternativa motivada pelos seguintes critérios:

- Os resultados dos perfis de velocidade obtidos na seção de medição descritos no capítulo 3 indicaram uma maior uniformidade



para os planos  $xz$  e  $yz$ , do que para o plano  $xy$ . Assim, definindo o tubo multifuro posicionado paralelo à direção  $z$  (horizontal), as condições do escoamento são mais favoráveis à determinação da velocidade média representativa naquela região.

- O uso de um número menor de tubos multifuros na grade, facilita a viabilização do sistema que monitorara as pressões. Isso porque, como a monitoração é feita individualmente por sonda, uma menor quantidade de sondas implica em menor número de sensores e de variáveis na monitoração.

Assim ficaram definidas as quatro sondas identificadas por letras miúsculas A, B, C e D, onde o comprimento de cada uma delas é de 410 mm. No desenho da figura 4.2 estão apresentadas as sondas posicionadas na grade. O número de orifícios presentes em cada estação de medição foi definido como sendo 4 (quatro). Três dos orifícios estão na parte frontal da sonda e o quarto, na parte de trás. Todos eles estão situados em um mesmo plano transversal que corta o cilindro da sonda na posição de cada estação de medição. O furo da parte de trás da sonda está destinado a medir a pressão de esteira, como nos sensores multifuros tradicionais.

O número de orifícios empregados para medir a pressão de esteira foi idêntico ao número de estações de medição definido pelo critério de equi-áreas. A adoção desta proposta está em conformidade com THOI e SOH (1979) e MARIANI (1995).

Na parte frontal da sonda, em cada estação de medição, foram definidos três orifícios ao invés de um, como ocorre nos multifuros tradicionais. Esta proposta tem como objetivo capacitar a sonda para que ela possa avaliar

a direção do escoamento na região onde está inserida. O ângulo entre os furos foi definido como  $50^\circ$ , conforme pode ser observado na figura 4.3 que apresenta uma vista em corte de uma sonda. O uso de 3 orifícios espaçados de  $50^\circ$  considerou propostas encontradas para sondas direcionais (BRYER e PANKHURST, 1971 e SCHULZE et al, 1952). Na literatura, os ângulos mais sugeridos para defasar orifícios em sondas cilíndricas que indicam a direção do escoamento, estão no intervalo  $40^\circ$  a  $45^\circ$ . Note-se que estas sondas não são tubos tipo multífuro, possuindo apenas 3 orifícios posicionados em uma única seção transversal do cilindro (ver figura 2.6a), e não possuem tomadas de pressão de esteira. Nestas sondas, a avaliação da direção do escoamento é realizada a partir da diferença de pressões entre 2 dos orifícios defasados angularmente. A escolha do ângulo em torno de  $40^\circ$ , para estes casos, é entendida a partir do perfil de distribuição de pressões sobre o cilindro provocada pelo escoamento, onde a pressão tende a zero para este ângulo.

Para o caso do protótipo multífuro, a adoção de ângulo de  $50^\circ$ , foi feita de modo similar, porém, neste caso, utiliza-se valores de diferenças de pressão (**DP**) entre cada orifício frontal e o de esteira, e esta diferença de pressão foi prevista para tender a zero para ângulos em torno de  $50^\circ$ .

Assim, a proposta da sonda multidirecional incorporou o uso de 3 orifícios em cada sonda cilíndrica ao método adotado em medidores multífuros, onde vários furos posicionados longitudinalmente, sentem pressões que são relacionadas por um valor médio. O resultado obtido foi uma sonda cilíndrica com 4 conjuntos de furos, alinhados 6 a 6, totalizando 24 orifícios em cada sonda. Proposta não identificada na literatura, indicando ser inédita.

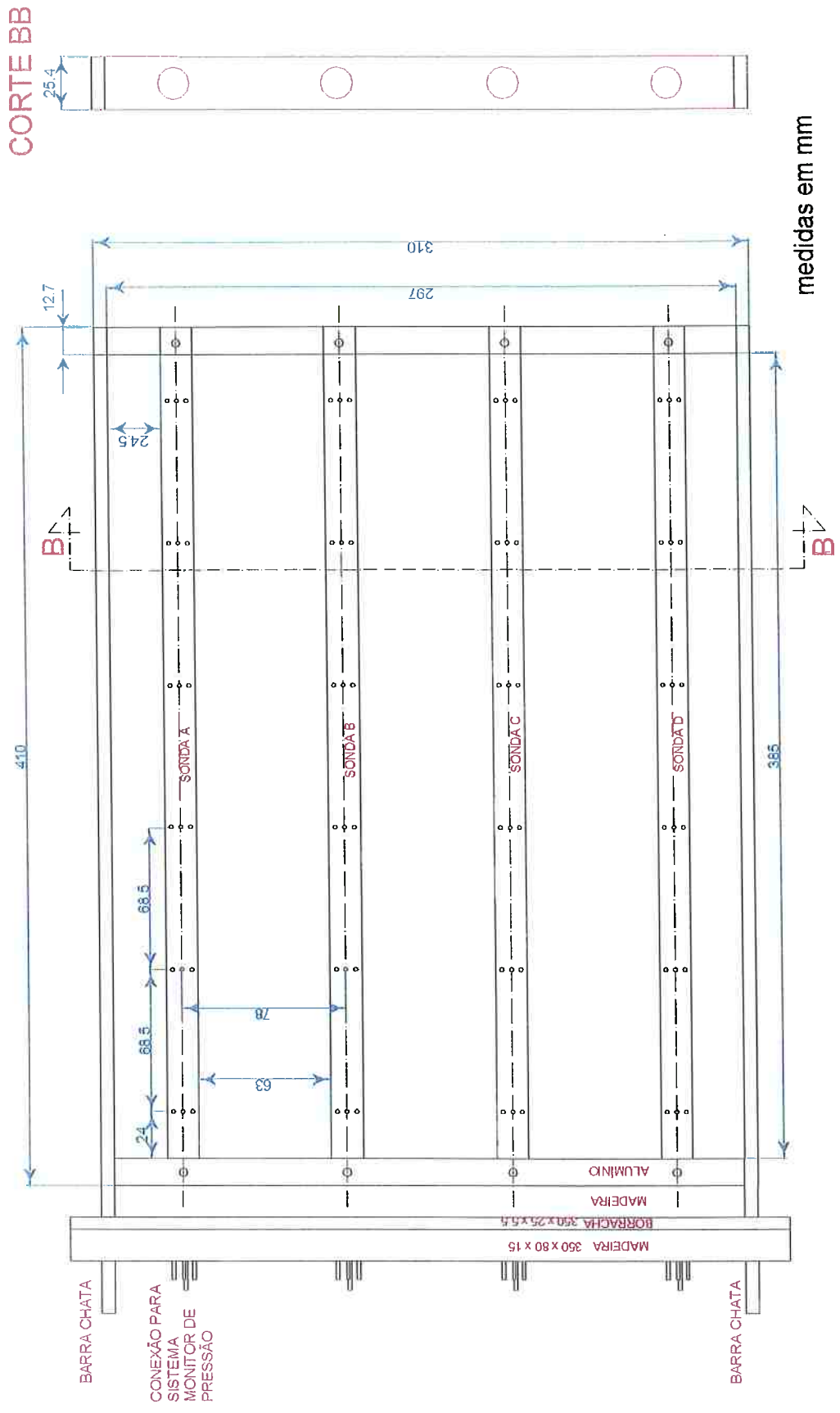


Figura 4.2: Protótipo da grade sensora multidirecional – vista frontal

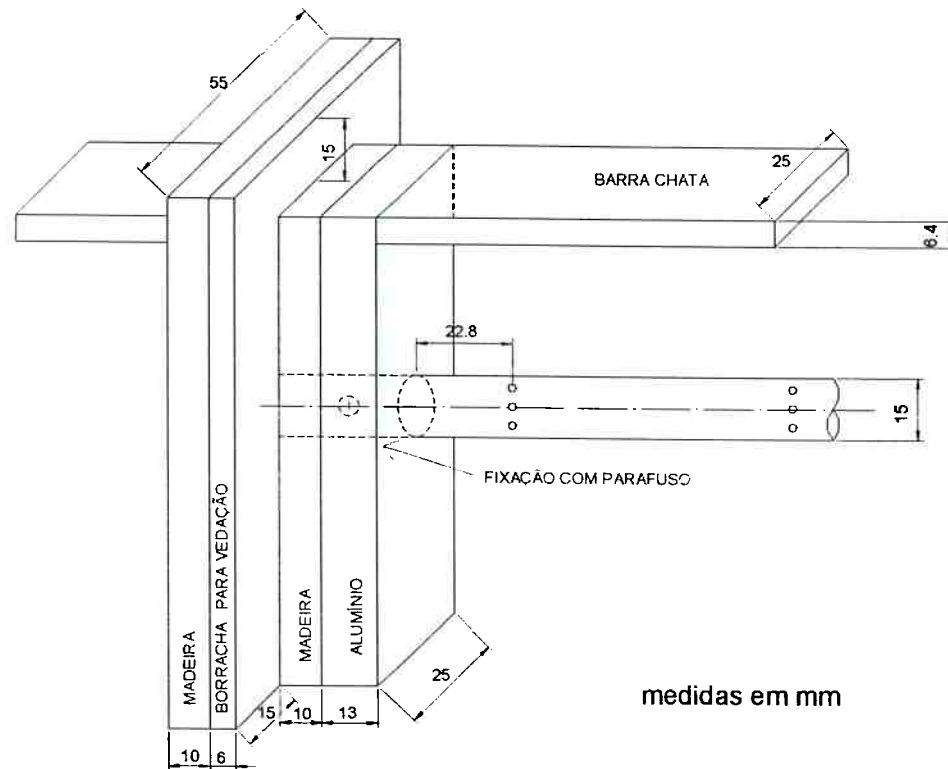


Figura 4.3: Desenho em perspectiva do protótipo da grade sensora multidirecional. Detalhe da lateral superior esquerda

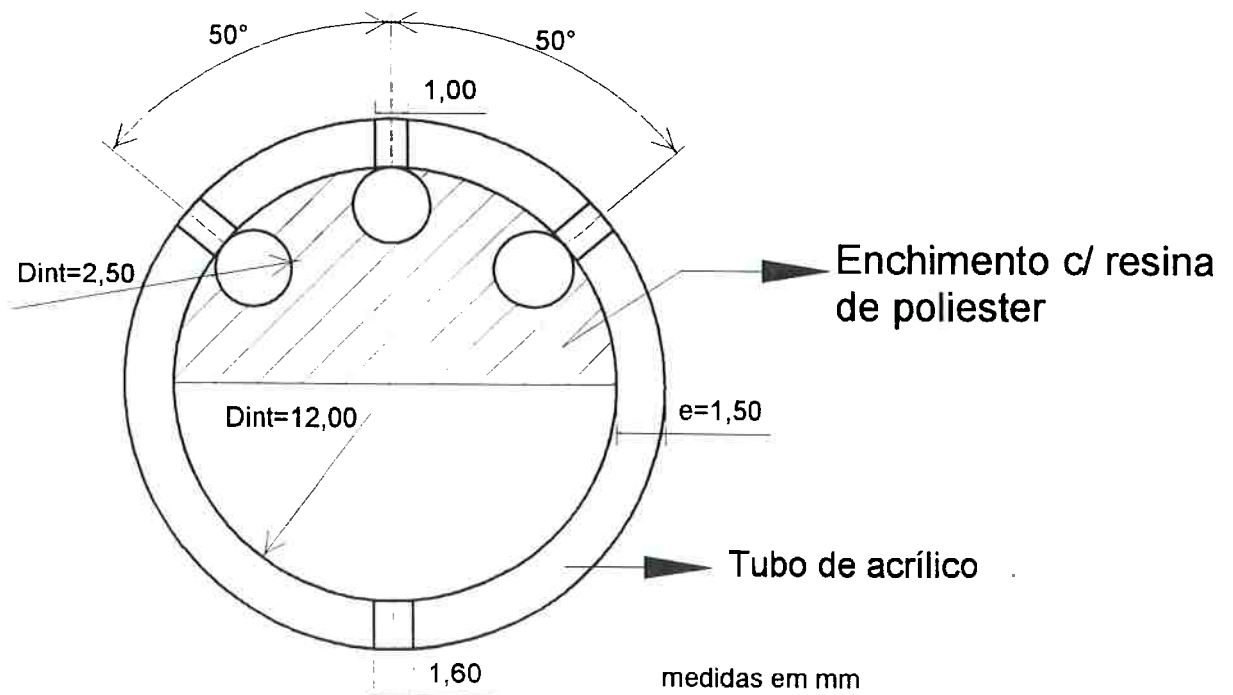


Figura 4.4: Detalhe do cilindro sensor – corte transversal

#### 4.1.3 Diâmetro dos orifícios

A partir de referências que investigaram com diferentes enfoques, o diâmetro de orifícios sensores de pressão em sondas e em tomadas de pressão estática, foram definidos os valores aqui adotados.

O proposto para sondas cilíndricas de 3 orifícios em BRYER e PANKHURST (1971), indica que o diâmetro dos orifícios sensores deve ter dimensões da ordem de  $D/12$  onde  $D$  é o diâmetro externo da sonda cilíndrica. Este critério aplicado ao protótipo indicaria orifícios com diâmetro  $d = 2.0$  mm.

A partir de recomendações propostas em BENEDICT (1969) sobre as características geométricas de orifícios sensores de pressão, optou-se por utilizar furos com no máximo 1.6 mm de diâmetro, posicionados e fabricados na direção radial ao cilindro, com acabamento em canto vivo. Foi também considerada outra proposta do meso autor, de utilizar-se orifícios com uma relação ( $d/D = 0.072$ ), que estabelece a menor dimensão de orifícios sensores em sondas cilíndricas. Esta condição aplicada ao protótipo deste trabalho resulta em furos com diâmetro de 1.0 mm.

Assim, na fase de testes e calibração de cilindros, foram fabricados modelos com orifícios sensores frontais com diâmetros de 1.6 mm e de 1.0 mm. A falta de repetitividade para ensaios de calibração, em baixas velocidades (2 a 5 m/s), de protótipos com orifícios frontais de 1.6 mm fez com que fosse escolhido o valor de 1.0 mm para os diâmetros dos furos frontais.

Os orifícios utilizados para medir a pressão na região de esteira, tiveram seu diâmetro fixado em 1.6 mm em todas as sondas fabricadas,, inclusive porque, através destes orifícios, era injetada a resina poliéster com

uma agulha de 1.5 mm de diâmetro, conforme processo de fabricação das 4 câmaras internas da sonda descrito no item 4.2.

#### **4.1.4 Arranjo interno das sondas**

O arranjo físico interno dos cilindros sensores tipo tubo multifuros foi investigado com detalhe por MARIANI (1995). Utilizando informações deste estudo que analisou sensores que possuem duas câmaras internas, foi idealizado um conceito novo de uma sonda com quatro câmaras, exigência desta pesquisa.

O uso de tubo interpolador, proposto originalmente no trabalho de PLACHE (1971), foi dispensado, em consideração aos resultados obtidos na investigação de MARIANI (1995).

Internamente ao cilindro, as quatro câmaras devem ser independentes e estanques, a menos de comunicações com o meio exterior através dos orifícios sensores e da conexão de saída que transfere o valor resultante da pressão para o sistema monitor de pressões. Em princípio, não há escoamento internamente a estas câmaras, o que dispensa preocupações geométricas importantes. No tubo de conexão de saída de cada câmara é medida a pressão média interna, contribuição dos valores sentidos por todos os orifícios conectados à mesma (TAYLOR, 1963).

#### **4.1.5 Grade sensora**

Para suportar os tubos foi projetado um quadro onde estes cilindros, denominados por sonda A, B, C e D puderam ser fixados, e posicionados na seção de medição, com os orifícios localizados nos pontos de interesse.

Utilizando barras e perfis de alumínio, foi dimensionado um quadro para receber as quatro sondas. Esse quadro ajusta-se perfeitamente na seção de testes da passagem curta, e interfere minimamente no escoamento. O quadro com as sondas e suas dimensões podem ser vistas na figura 4.2.

Neste protótipo, destinado à pesquisa e desenvolvimento, foram estabelecidas algumas soluções que auxiliaram a montagem e desmontagem do mesmo, o reposicionamento dos cilindros, a conexão com o sistema monitor de pressões com facilidade de acesso e verificação. Estas soluções foram:

- Entrada da grade sensora na seção de teste e seu posicionamento através de abertura lateral na parede da passagem curta, sendo que desta forma a grade do protótipo recebeu uma estrutura para fixação e vedação, na sua lateral esquerda, adequada apenas para instalação na câmara de testes.
- Fixação das sondas através de parafusos possibilitando ajustes.
- Sistema monitor de pressões instalado no vão que representa a espessura de uma parede, próximo à grade sensora, fator facilitador para as conexões.

As figuras 4.3 e 4.4 ilustram os detalhes construtivos do protótipo.

#### **4.2. Fabricação das sondas e da grade sensora multidirecional**

A fabricação do protótipo foi realizada no laboratório de Mecânica dos Fluidos - Instrumentação do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, utilizando os recursos de máquinas e ferramentas disponíveis, pelo autor da pesquisa e pelo técnico do laboratório.

Os materiais selecionados para fabricação dos cilindros foram: tubo externo de acrílico com enchimento interno de resina para divisão em câmaras, conexões de cobre na saída e quadro da grade em alumínio.

O tubo de acrílico é utilizado no protótipo para auxiliar na visualização da interação entre as diversas partes e materiais internamente ao sensor.

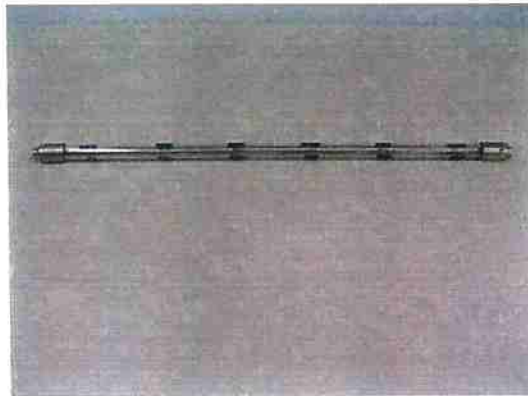
Para as conexões foram empregados tubos de cobre, com o objetivo de atingir resistência, boa qualidade de acabamento além de facilidade construtiva e flexibilidade para conexões.

A estrutura da grade sensora é fabricada de alumínio visando facilidade de fabricação, montagem e acabamento, como também leveza e durabilidade.

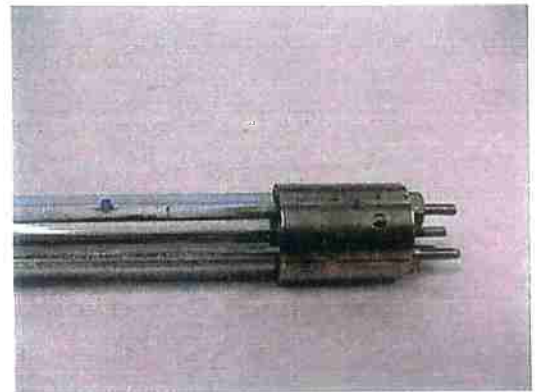
O processo de fabricação dos cilindros passou por vários aprimoramentos, de modo a obter-se um resultado satisfatório. De uma proposta inicial onde haviam três tubos internos ao cilindro, de aço ou cobre, definindo três câmaras e uma região de vazio que operaria como a quarta câmara com vedação de resina, evoluiu-se para utilização de um tubo acrílico transparente onde fossem moldadas internamente as quatro câmaras em resina poliéster.

A fabricação das quatro câmaras internas foi possível a partir da utilização de gabarito onde o tubo de acrílico era montado entre dois suportes que fixavam em posições pré-determinadas varetas de latão, que funcionaram como molde para os canais internos. Estes canais definiam as três câmaras que estavam associadas aos orifícios frontais. Conforme pode ser visto na Figura 4.5.



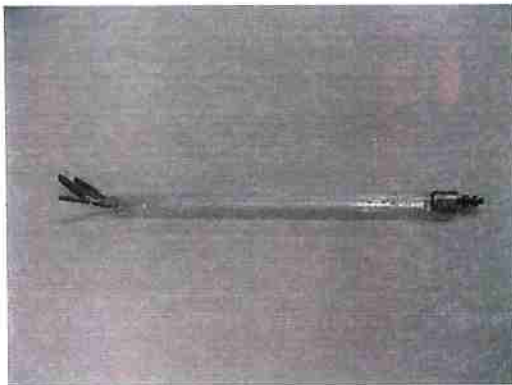


a) Vista geral do protótipo

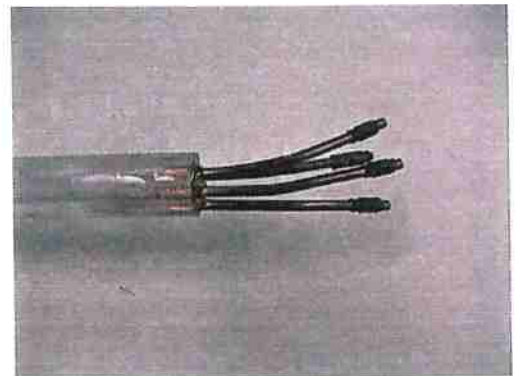


b) Detalhe do dispositivo fixador das varetas de latão

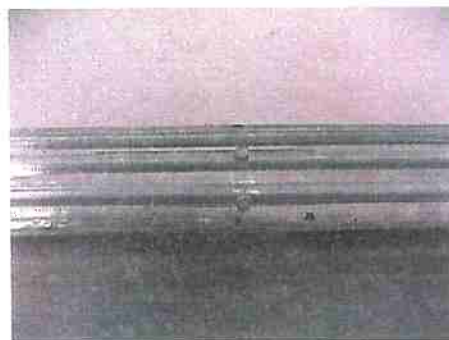
Figura 4.5: Processo de fabricação dos protótipos das sondas



a) Vista geral



b) Detalhe dos terminais de pressão de saída



c) Detalhe das câmaras internas e dos orifícios sensores

Figura 4.6: Protótipo de sonda concluído

Esta evolução custou vários cilindros descartados, pois algumas variáveis do processo de fabricação precisaram ser controladas para que fosse atingido o objetivo. A seguir são citados os principais problemas e algumas soluções encontradas:

Inicialmente adotou-se resina epóxi para encher o cilindro, o que trouxe resultado aparentemente bom, porém houve o descolamento posterior da resina da parede interna do tubo, permitindo vazamentos internos. Assim, esta resina foi substituída por resina poliéster.

Com a aplicação de resina poliéster, foi necessário dosar adequadamente o catalizador de modo a permitir uma cura lenta, onde a reação exotérmica fosse a menor possível, reduzindo o surgimento de tensões concentradas devido ao processo de dilatação e contração.

O uso de diluidor (monômero de estireno) na resina poliéster provocou rachaduras da parede do tubo de acrílico, ainda que este diluidor fosse importante para reduzir a viscosidade da mesma facilitando sua injeção no interior do tubo. A solução para este problema foi não usar diluidor.

A reação de vapores da resina poliéster, presentes no interior do tubo, com o acrílico, durante o processo de cura, provocaram rachaduras e trincamento do acrílico. Para resolver este problema foi usada injeção de ar comprimido no interior do tubo, que diluiu e provocava exaustão dos vapores do processo, colaborando também para a manutenção da estabilidade térmica.

O processo de fabricação de cada sonda cilíndrica pode ser resumido em três etapas:

- a) Inicialmente o tubo de acrílico cortado no comprimento adequado e montado com o gabarito que posicionava as varetas de latão era

posicionado horizontalmente e preenchido através das tomadas de pressão de esteira, já furadas, até pouco mais da metade com resina poliéster, de modo a cobrir todas as varetas de latão e geração dos canais internos. Este processo era feita com uso de ar comprimido.

- b) Posteriormente uma das extremidades era totalmente preenchida com resina e a outra recebia os terminais de tubo de cobre fixados também com resina.
- c) Por fim, com traçagem adequada usando de um graminho e um desempeno, foram localizados os pontos e feitos os furos para as tomadas de pressão frontais.

A montagem das sondas no quadro de alumínio foi realizado com o uso de instrumento de medição por coordenadas e réguas óticas.

Para uma versão a ser fabricada em escala comercial pode ser considerado o uso de um tubo estrudado em material plástico com a geometria interna já definida, o que dispensa o uso das varetas de latão.

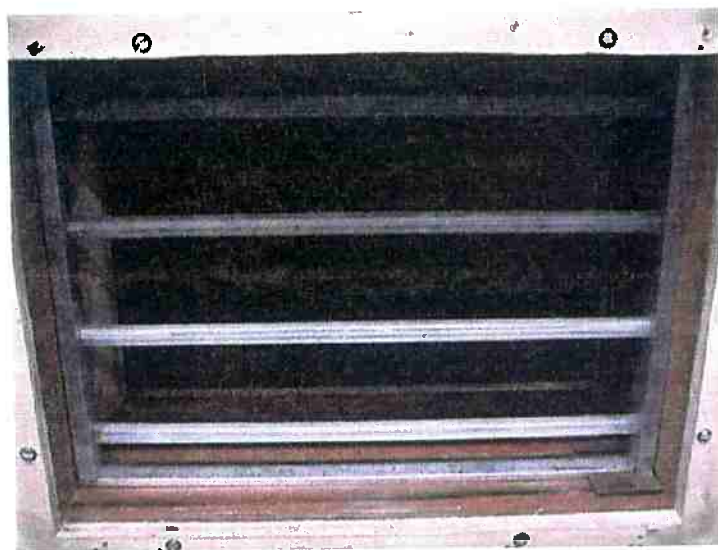


Figura 4.7: Fotografias da grade sensora instalada

### 4.3. Características operacionais da grade sensora

Em cada uma das quatro sondas da grade são medidos valores de pressão diferencial (**DP**) entre cada um dos três orifícios sensores frontais e a pressão de esteira. Assim, na grade totalizam-se doze valores de pressão diferencial.

Para o presente estudo, em que foi feito o desenvolvimento da grade sensora, houve o interesse em se fazer o monitoramento individual de cada DP permitindo avaliar o comportamento da sonda, de um conjunto de orifícios associado a um microsensor, e do próprio microsensor.

Para tanto foi feito o projeto, fabricação e montagem de um sistema de monitoração de pressões adequado para as medições desta pesquisa. Este equipamento foi chamado de Sistema Monitor de Pressões (SMP), e está descrito no próximo item.

Operacionalmente, nos experimentos deste projeto, os valores de DP medidos através do SMP eram transmitidos para um microcomputador tipo PC, através de sua porta serial. O sistema monitor de pressões, enviava para o PC, os dados no formato digital. Para que os dados fossem lidos, convertidos de valores digitais para pressão foi desenvolvido em Visual Basic um programa de aquisição e registro de dados específico para este sistema, chamado MONITORAP.

O programa MONITORAP executa as seguintes operações:

- Ler os dados no formato digital recebidos na porta serial.
- Converter os valores lidos em pressão.
- Mostrar na tela do microcomputador os valores que estão sendo lidos. Estes valores apresentados podem ser médias de

determinado número  $n$  de medidas, onde  $n$  é uma entrada definida pelo usuário. Outro parâmetro que pode ser controlado através de entrada durante a execução do programa é o intervalo de tempo que é estabelecido entre a leitura de dois conjunto de dados, limitado a um valor mínimo de 150 ms.

- Fazer uma leitura inicial dos valores para a condição de pressões diferenciais aplicadas nulas, de modo a avaliar o valor indicado para as pressões e fazer o ajuste de zero. Acionada a opção de ajuste de zero, é gerado um arquivo de valores que corrige o zero e faz com que estes valores possam ser usados até que seja feito novo ajuste de zero.
- Registrar um número  $m$  de dados em um arquivo do tipo texto, que recebe uma identificação conforme o usuário estabelece.

Os arquivos gerados no MONITORAP, que são do tipo texto, foram importados pela planilha de cálculo eletrônica da Microsoft, o Excel.

Para o cálculo dos resultados e suas respectivas incertezas foi utilizado o programa RFINAL, desenvolvido em planilha eletrônica. Em sua rotina, este programa analisa os valores das três pressões diferenciais (DP1, DP2 e DP3) sentidas em cada sonda e, através de condições e equações previstas pelo modelo semi empírico adotado, processa estes sinais de pressão. Os resultados obtidos são: vetor velocidade média na região onde a sonda está inserida, dado pelo módulo e pelo ângulo em coordenadas polares, vazão em volume e em massa em cada região e na seção toda.

Os seguintes dados de entrada são necessários para que os cálculos possam ser realizados: massa específica do ar e área representativa da região

onde a sonda está inserida. Coeficientes e equações de ajuste também podem ser introduzidos no programa RFINAL para adequar os resultados da grade à configuração de acessórios instalados na passagem curta.

Em aplicações da grade sensora monitorada pelo SMP os sinais de saída de pressão podem ser tratados em um microprocessador ou microcomputador programado com algoritmo similar ao RFINAL. Através deste tratamento o processo de avaliação das pressões (DP) torna-se dinâmico e “inteligente” selecionando quais os orifícios sensores estão habilitados para medir a direção e o módulo da velocidade, como também os valores de vazão.

#### **4.4. O Sistema Monitor de Pressões (SMP)**

O SMP foi projetado e fabricado a partir da necessidade de monitoramento de pressões transmitidas pela grade sensora multidirecional.

A unidade fabricada para esta pesquisa teve, no seu projeto e implantação, a adoção de recursos adicionais em relação àquelas que poderão ser acopladas à grades sensoras instaladas em campo.

Os requisitos definidos para o projeto do SMP foram:

- possuir no mínimo 12 sensores para baixas pressões, três para cada sonda. Admitindo grade sensora com 4 sondas.
- operar na faixa de pressões diferenciais: 1 Pa a 100 Pa
- resolução da resposta do sinal de pressão desejável: 0.5 Pa
- possibilidade de acoplamento em microcomputador para a transmissão e registro de dados
- componentes de pequenas dimensões.

A partir destes requisitos, foi pesquisada a disponibilidade de sensores para aquisição, principal elemento para a viabilidade do projeto. Foram avaliadas as alternativas oferecidas pelos fabricantes Motorola, Micromachines e AutoTran.

Foi selecionado o senso modelo 850 da AutoTran, a partir dos critérios: faixa de pressões de operação, dimensões, fornecido com a possibilidade de ser montado em placa de circuito impresso ("board montable"), baixo custo. A importação destes sensores foi viabilizada pela empresa Vectus Importatum, que apoiou este projeto.

O critério mais importante nesta seleção, foi a capacidade de medição de baixas pressões. Em ACV, a aplicação de instrumentação em certos casos, é limitada pela dificuldade de medir-se pressões muito baixas, conforme destaca SMITH (1990).

As principais especificações técnicas dos sensores da AutoTran série 850, adquiridos para o SMP, são:

- Faixa de pressão: -125 Pa a +125 Pa
- Limite de sobre pressão: 100 kPa
- Sinal de saída: 1 a 5 VDC
- Exatidão:  $\pm 1\%$  F.S.O.
- Estabilidade:  $< 2\%$  F.S.O.
- Faixa de compensação de temperatura: 10° a 50°
- dimensões aproximadas: (38 x 33 x 13) mm

O projeto final do SMP adotou o uso de 16 sensores idênticos, sendo quatro como reserva, decisão que considerou a falta de experiência prévia com estes medidores de pressão. Os sensores adquiridos foram identificados por

números, de 1 a 12, e os reservas foram denominados RA, RB, RC, RD. Para conter todos os componentes, foi definida uma caixa metálica, conforme desenho apresentado na figura D.7, do anexo D. O arranjo físico interno dos sensores montados em duas placas de circuito impresso, e a identificação destes estão nas figuras D.8 a D.10 do mesmo anexo D.

Os sensores de pressão são conectados por tubos flexíveis com terminais instalados na parede da caixa. Existe um tubo terminal de pressões positivas para cada sensor e um terminal comum a cada 4 sensores onde são conectadas as pressões negativas. Os desenhos de especificação destes terminais estão na figura D.11. A figura 4.8 apresenta uma vista interna do sistema SMP.

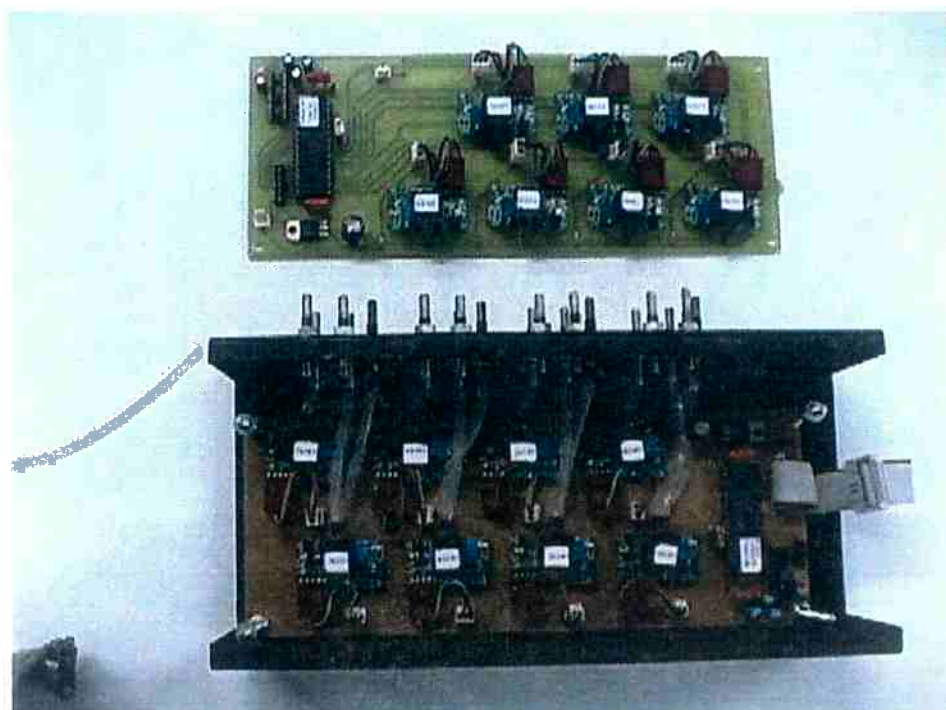


Figura 4.8: Sistema monitor de pressões. Visualização das placas de circuito impresso com sensores e microprocessadores durante processo de montagem.

Os terminais de pressão tiveram sua estanqueidade testada, especialmente o de pressões negativas, que foi fabricado usando processos de



soldagem. Na figura 4.9 estão reproduzidas fotos dos testes de estanqueidade nestes terminais.

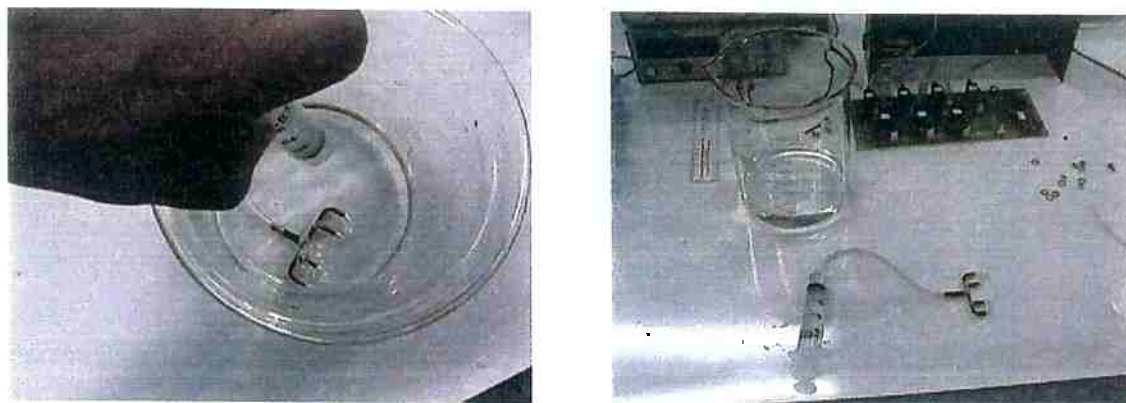


Figura 4.9: Teste de estanqueidade nos terminais do sistema monitor de pressão

A alimentação elétrica e o sinal de resposta são transmitidos para os sensores e microprocessadores através da placa de circuito especialmente desenhada para esta aplicação.

Os microprocessadores selecionados para realizar o tratamento dos sinais dos diversos sensores de pressão são de fabricação da Microchip, de última geração, tipo PIC, modelo 16F877 que possui as seguintes características:

- Conversor interno A/D
- 8 entradas / saídas
- 10 bits
- Linguagem própria, pode ser programado em Assembler
- Saídas compatível com porta serial do PC

A programação dos microprocessadores foi feita com o apoio da Blue Tec Soluções Técnicas, que patrocinou a parte da eletrônica deste projeto, e é

das poucas empresas no Brasil que possui os emuladores e a plataforma para viabilizá-la.

Foram realizados vários testes simulando a operação dos sensores acoplados ao sistema SMP. As oscilações, presentes no sinal de resposta foram amortecidas através do uso de um filtro de médias. Os microprocessadores que fazem a leitura dos sinais dos sensores foram programados de modo que, cada sinal de resposta transmitido é uma média de 16 amostras. O tempo para leitura e conversão de 1 canal, foi avaliado no emulador do microprocessador, considerando a realização de médias de 16 amostras e resultou em 4.2 ms. O tempo total para a leitura, conversão A/D e transmissão do sinal foi estimado para os 16 canais como sendo menor que 130 ms. Esta informação auxiliou a escolha do tempo mínimo de aquisição entre amostras no programa MONITORAP que foi de 150 ms.

A resolução do SMP foi calculada considerando que o microprocessador de 10 bits oferece 1024 dígitos que correspondem ao intervalo de 0 a 5 VDC, ou seja, a cada dígito corresponde 4,9 mV. Em termos de pressão, a faixa toda de leitura do sensor é de 250 Pa (-125 Pa a +125 Pa), resultando em uma resolução de 0.3 Pa para cada dígito transmitido.

Os sensores foram calibrados individualmente, comparados com o manômetro de referência do Laboratório de Instrumentação em Mecânica dos Fluidos, que é de fabricação da *Air Flow*, modelo: type 4. Este equipamento de referência, em sua menor escala de pressão, que é de 0 a 125 Pa, possui resolução de 0.5 Pa, e foi aferido comparativamente a outros instrumentos de baixa pressão, do Laboratório de Vazão do IPT. As curvas de calibração estão apresentadas nas figuras D.1 a D.6 do anexo D. Os resultados obtidos foram

bastante satisfatórios, considerando a linearidade obtida nas curvas de aferição. As equações das curvas ajustadas foram implementadas no programa MONITORAP, para que as respostas de pressão apresentadas pelo SMP já esteja com seus valores corrigidos.

Assim obteve-se um equipamento capacitado para atuar numa faixa de pressões muito baixas, com ótima resolução e boa estabilidade. Note-se que sistema que com estas características não é produzido em nosso país.

## 5. INTERAÇÃO DO ELEMENTO SENSOR COM O ESCOAMENTO

### 5.1. Introdução

A análise e caracterização do escoamento nas passagens curtas de dispositivos de mistura permitiu a escolha de medidores multífuros desde que adaptados em arranjo e fabricação. O elemento sensor do medidor multífuros definido no projeto foi um cilindro com seção transversal circular.

A faixa de vazões de ar estabelecidas neste estudo, está relacionada com números de Reynolds, calculados em relação ao diâmetro do cilindro, dentro do intervalo:  $2000 < Re_d < 10000$ . Verifica-se que estudos que investiguem a interação de cilindros com escoamento nesta faixa possuem poucos resultados apresentados para parâmetros que relacionem a distribuição de pressões, como o coeficiente de pressão ( $C_p$ ) em função de Reynolds, identificamos apenas o trabalho de NORBERG (1992) apud LU, X. et al. (1997). Em geral, os artigos indicam resultados através de gráficos com informações mais qualitativas, de onde é difícil obter valores para determinar com exatidão como é a distribuição da pressão em função do ângulo, que é de interesse para o presente estudo. Os artigos dos mais tradicionais pesquisadores sobre a interação entre escoamento e cilindro, como ROSHKO (1961), ACHENBACH (1968), DELANY e SORENSEN (1953) apresentam resultados para valores de Reynolds acima de  $10^5$ .

Para se obter resultados que caracterizassem o comportamento do escoamento em torno de cilindros, e possibilitar o aperfeiçoamento e detalhamento do projeto de sondas multidirecionais cilíndricas foram realizados dois estudos:

- Simulação numérica
- Levantamento experimental

Estes estudos permitiram o levantamento dos parâmetros relevantes e a formulação de relações paramétricas.

O Coeficiente de pressão foi adotado como: 
$$C_p = \frac{P_\theta - P_\infty}{0.5 * \rho * V^2}$$

## 5.2. Simulação numérica

O escoamento em torno de cilindros tem sido tratado em muitos trabalhos de pesquisa no Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, como os trabalhos de MENEZHINI (1995) SALTARA (1999), SIQUEIRA (1999), e outros.

A simulação de escoamentos é uma ferramenta importante para avaliação dos problemas e direcionamento de pesquisas experimentais. O programa desenvolvido por Saltara, denominado "CILIN", emprega o método dos vórtices discretos para realizar a simulação em situações típicas de medição relacionadas ao presente estudo.

A aplicação do programa foi feita através do uso de estações de trabalho que operam no Laboratório de CFD (Computational Fluid Dynamics) do Departamento de Engenharia Mecânica.

O método dos vórtices discretos foi proposto por CHORIN (1973) e CLEMENTS (1973) apud SALTARA (1999) para escoamentos externos com números de Reynolds típicos desta pesquisa, onde são analisados os movimentos de vórtices pontuais que carregam uma dada circulação através da metodologia Lagrangeana de descrição do escoamento. Conforme relata Saltara (1999), este método foi aplicado originalmente sem o emprego de

malhas, pois o fluido ou era considerado não viscoso, ou o processo de difusão era simulado através de técnicas como o aumento do tamanho do raio dos vórtices proposição de NAGANO (1982) apud SALTARA (1999), ou havendo um deslocamento aleatório sugerido por CHORIN (1973). Neste caso as velocidades para determinar o deslocamento de um dado vórtice eram calculadas pela lei de Biot-Savart, considerando as influências de todos os outros vórtices, somadas à velocidade do escoamento ao longe. O programa **CILIN**, adotado utiliza a técnica lagrangeana acima descrita, com a difusão viscosa realizada através de deslocamentos aleatórios (“*random walks*”.)

### 5.2.1 Parâmetros para a investigação

Foram testados vários valores para os parâmetros, que permitissem melhor avaliar o escoamento sobre cilindros nas condições de interesse desta pesquisa.

Os parâmetros de entrada escolhidos para a aplicação do programa e obtenção de resultados são apresentados na tabela 5.1:

Parâmetro	Símbolo no programa	Faixa de variação
Velocidade do escoamento	U	2 a 10 m/s
Raio do cilindro	r	0.075 m
Massa específica do ar	$\rho$	1.09 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade dinâmica	$\mu$	1.85 x 10 <sup>-5</sup> Pa·s
No. Intervalos de tempo (interações)	n	(100*2*r)/U* $\Delta t$
No. de vórtices	Nv	1000 a 5000
No. de nós (da parede do cilindro)	Nnós	72 a 360 (de 5° em 5° até 1° em 1°.)

Tabela 5.1: Parâmetros utilizados na simulação numérica

## 5.2.2 Resultados das simulações

Para avaliar a influência do parâmetro número de vórtices ( $N_v$ ) sobre os resultados do programa, foram feitas tabelas comparando estes valores dois a dois, mantendo os outros parâmetros fixos. A tabela 5.2 relaciona a localização destes resultados no anexo B, e o gráfico da figura 5.1 sobrepõe as curvas obtidas para  $C_p \times \theta$ , com cada valor adotado para o número de vórtices.

V (m/s)	Nº de intervalos	Nº de vórtices	Nº de nós	Nº da tabela do anexo B
5	1000	1000 e 2000	72	B.1
5	1000	2000 e 3000	72	B.2
5	1000	3000 e 4000	72	B.3
5	1000	4000 e 5000	72	B.4

Tabela 5.2: Relação de tabelas com comparação de resultados de simulações duas a duas para definição do parâmetro número de vórtices

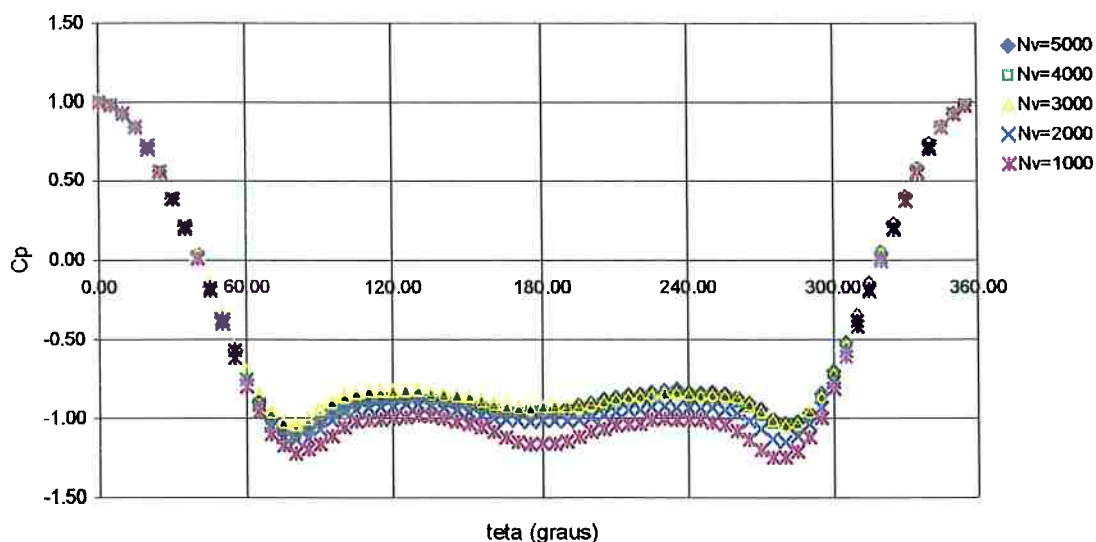


Figura 5.1: Gráfico com curvas de  $C_p \times \theta$ , resultado de simulação para vários números de vórtices,  $N_v=1000$  a  $N_v=5000$ .

Definiu-se a partir da observação das curvas de resultados para  $C_p \times \theta$  apresentada na figura 5.1, que o número de vórtices mais adequado para os

casos que se desejava simular é  $Nv = 2000$ . Esta curva traz a melhor reprodução do comportamento de  $C_p \times \theta$ , comparada com valores da literatura apresentados para Reynolds maiores.

Para as velocidades de 2 m/s, 5 m/s e 10 m/s, representativas dos extremos e do centro do intervalo de interesse, são apresentados os resultados das simulações, onde o número de nós que definiu o contorno do cilindro no escoamento foi variado entre 72 e 360. O número de pontos define também o intervalo de ângulos em que são calculadas as pressões provocadas pelo escoamento. A tabela 5.3 traz a relação das figuras com os gráficos de resultados para de  $C_p \times \theta$ , que estão completos no anexo B.

V (m/s)	Nº de intervalos	Nº de vórtices	Nº de nós	Nº da figura
2	1000	2000	72	B.1
2	1000	2000	288	B.2
5	1000	2000	72	B.3
5	1000	2000	144	B.4
5	1000	2000	288	B.5
5	1000	2000	360	B.6
10	1000	2000	72	B.7
10	1000	2000	144	B.8

Tabela 5.3: Relação de gráficos com resultados de simulações para determinação de pressões e  $C_p$  em diferentes velocidades

A observação dos resultados da simulação dos gráficos do anexo B mostra que aumentar excessivamente o número de nós distorceu o comportamento das curvas, em vez de melhorar a sua resolução.

Os resultados das simulações foram utilizados para:

- Avaliar como são as distribuições de pressões ao redor de um cilindro para vários números de Reynolds.



- Se ter informações para definição dos protótipos posteriormente testados experimentalmente.
- Conhecer as características e limitações deste método de simulação numérica aplicado de modo que seja possível utilizá-lo adequadamente no futuro.

Os valores do coeficiente de pressão em função do ângulo teta,  $C_p \times \theta$ , para velocidades de 2 m/s, 5 m/s e 10 m/s estão reproduzidos no gráfico apresentado na figura 5.2. Todos os valores foram obtidos com  $N_{\text{nós}} = 72$ ,  $N_v = 2000$ , número de interações  $n = 1000$ .

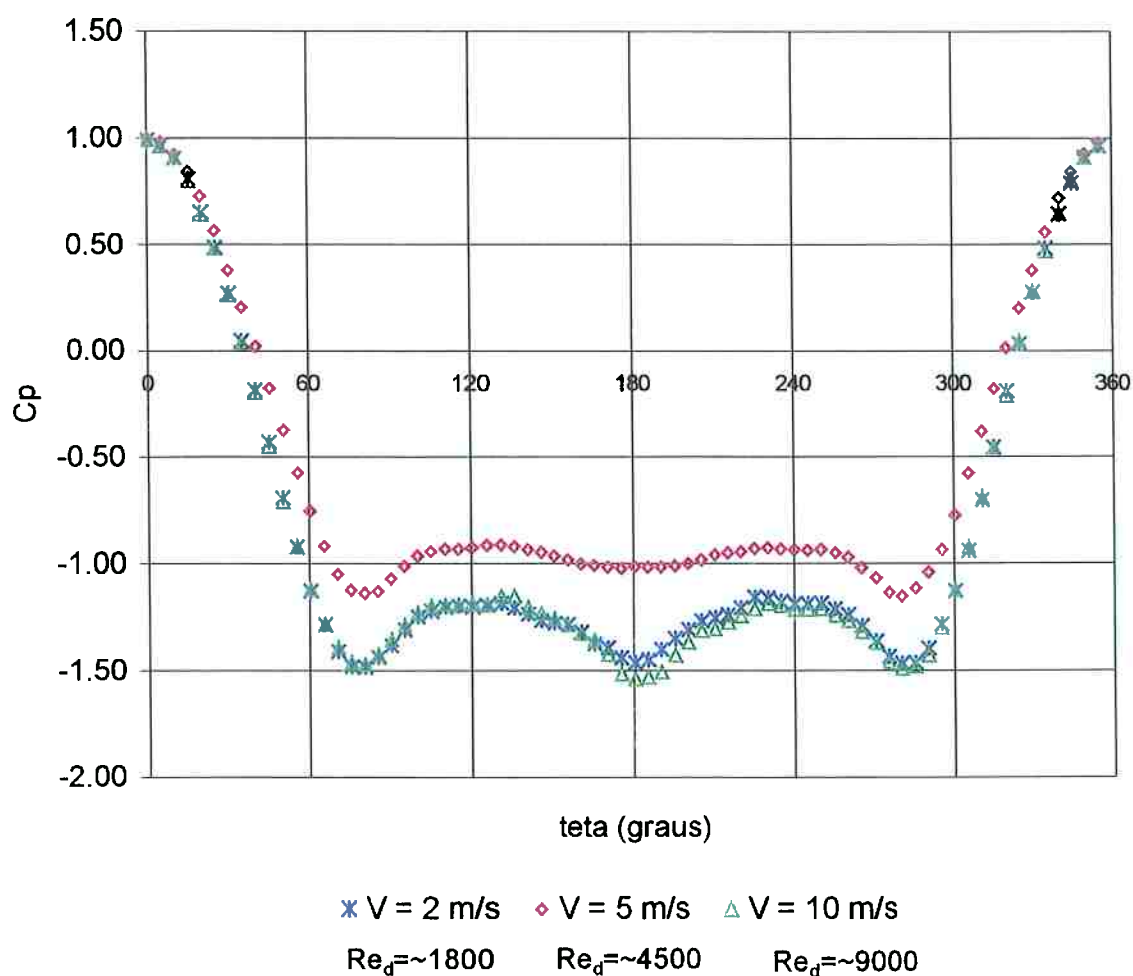


Figura 5.2: Gráfico com curvas de  $C_p \times \theta$ , resultado de simulação para várias velocidades.  $N_v = 2000$ , e  $N_{\text{nós}} = 72$ .

Como conclusões destes resultados tem-se que:

- A distribuição de pressões em torno do cilindro indica: para ângulos em torno de  $40^\circ$  a pressão torna-se nula, e que existem pontos de pressão máxima negativa para ângulos em torno de  $80^\circ$ . Estes resultados são semelhantes aos verificados na literatura para maiores números de Reynolds. A aplicação destas informações foi auxiliar na definição do posicionamento angular dos orifícios sensores de pressão na sonda cilíndrica (ver item 4.1.2).
- Para a menor e maior velocidade simulada,  $v = 2$  m/s e  $v = 10$  m/s, os resultados ( $C_p \times \theta$ ) para ângulos maiores que  $50^\circ$ , apresentaram um comportamento da curva diferente de  $v = 5$  m/s. A variação de  $C_p$  para ângulos entre  $90^\circ$  e  $270^\circ$  é maior nas velocidades de 2 m/s e 10 m/s, inclusive quando comparada com curvas publicadas em referências da literatura para maiores Reynolds.
- Considerando resultados de  $C_p$  e  $p$  para ângulos menores que  $90^\circ$ , a variação dos parâmetros, número de vórtices,  $N_v$ , e número de nós,  $N_{nós}$ , não trouxe alterações relevantes. nas velocidades simuladas.
- Para resultados de pressão na parte de trás do cilindro, em ângulos  $\theta$  entre  $90^\circ$  e  $270^\circ$ , a divergência dos resultados indicaram que a realização de ensaios experimentais é necessária para uso do cilindro como sonda, como é o caso desta pesquisa, quando um dos parâmetros de interesse é a pressão de esteira. O número de nós,  $N_{nós}$ , escolhido tem grande influência nos resultados de pressão e  $C_p$  para este intervalo de ângulos  $\theta$ .
- Os valores de  $C_p$  encontrados para ângulos menores que  $40^\circ$  e maiores que  $320^\circ$ , não sofrem variações importantes.

### 5.3 Ensaaios experimentais

Conforme visto as simulações sugeriram a necessidade de estudo experimental. Foram realizados ensaios de cilindro submetidos a escoamentos para o intervalo de Reynolds,  $Re_d$ , entre 2000 e 10000, com o objetivo de determinar qual é a distribuição de pressões ao redor deste.

Os ensaios experimentais foram realizados para que seus resultados permitissem:

- Conhecer a distribuição de pressões em torno de um cilindro para a faixa de Reynolds estabelecida, que corresponde ao intervalo de velocidades de 2 m/s a 10 m/s
- Obter valores de diferenças de pressão (DP) entre pontos na superfície do cilindro defasados de ângulos conforme proposto para a sonda, e a partir destes DP determinar o módulo e a direção da velocidade.

#### 5.3.1 Metodologia

Para a realização dos ensaios foram fabricados corpos de prova cilíndricos, similares às sondas montadas na grade sensora, utilizando o mesmo processo de fabricação. Estes cilindros possuem câmaras internas que se comunicam com os orifícios sensores de pressão e que conduzem um valor de pressão média para a tomada de pressão na extremidade do mesmo.

Nos ensaios experimentais que tiveram seus resultados consolidados para caracterizar o cilindro como sonda sensora, foi utilizado um protótipo cilíndrico com 15 mm de diâmetro, e com doze orifícios. Estes doze orifícios estão alinhados em dois grupos de seis defasados de  $180^\circ$ . A distância entre os

furos obedece o mesmo critério adotado para as sondas do protótipo da grade descrito no item 4.1.2.

Na posição em que as retas imaginárias que unem cada dois orifícios opostos estão paralelas à direção do escoamento, o orifício apontado para montante, mede a pressão de estagnação e o orifício apontado para jusante mede uma pressão efetiva negativa, que já foi definida como pressão de esteira. A diferença de pressão entre estes dois pontos é identificada como  $\Delta P$  ou  $\Delta P$ . Para esta posição do cilindro em relação ao escoamento foi definido o zero na escala angular adotada para referenciar as novas posições do cilindro no ensaio, quando este foi rotacionado. Foi convencionado que, para movimentos angulares do cilindro orientados no sentido horário, os ângulos variam de modo crescente partindo de zero.

O conjunto de orifícios apontado inicialmente para montante do escoamento foi identificado pelo número 2 e os orifícios apontados para jusante foram denominados por E. A diferença entre as pressões medidas pelos dois conjuntos de orifícios é chamada de  $\Delta P_{2-E}$ .

Foram fabricados corpos de prova cilíndricos e submetidos a testes preliminares no túnel de vento. Esta fase preliminar onde foram ensaiados os protótipos denominados 1, 2, e 3, apresentaram resultados não satisfatórios, sendo estes protótipos 1, 2 e 3 descartados devido a vários fatores que influenciaram os dados tomados com os mesmos. Entre as principais causas estão desalinhamento entre as tomadas de pressão de estagnação e de esteira, isto é não estavam espaçadas de  $180^\circ$ , falta de perpendicularidade entre o protótipo, sua base e a mesa de posicionamento. Orifícios de tomada de pressão frontais com diâmetros inadequados (1.6 mm), e com furação fora

da posição radial também prejudicaram os dados e resultados medidos com estes corpos de prova. Alguns exemplos da influência destes problemas nos resultados foram: perda da simetria que era esperada entre os valores posicionados simetricamente de  $0^\circ$  e  $180^\circ$  e  $180^\circ$  e  $360^\circ$ , falta de repetitividade entre valores medidos em uma mesma posição angular e velocidade.

O corpo de prova cilíndrico que foi adotado para todas as tomadas de dados para os ensaios adotados como referência deste trabalho foi o protótipo denominado número 4, que possui as seguintes características geométricas: diâmetro do cilindro de 15 mm, comprimento de 300 mm, 4 orifícios frontais com 1.0 mm de diâmetro, 4 orifícios com 1.6 mm de diâmetro na parte de trás.

Além das definições geométricas deste protótipo, foram definidos cuidados especiais para a montagem do cilindro em uma base e esta na mesa de posicionamento, e atenção redobrada com os valores de baixas pressões medidos, conforme será visto no procedimento experimental.

### **5.3.2. Arranjo experimental**

Os ensaios dos cilindros foram realizados na seção de testes do túnel de vento do Laboratório de Anemometria do IPT, o mesmo utilizado no estudo do escoamento através da veneziana, apresentado no capítulo 3 deste trabalho.

Na seção de testes do túnel há uma mesa que possibilita o posicionamento angular de um objeto em relação à direção principal do escoamento.

O corpo de prova era engastado em uma peça fabricada em latão, denominada soquete, que de um lado tinha um cilindro vazado, onde o corpo

de prova era inserido, e do outro um eixo com rosca M 5. O soquete com o cilindro, era parafusado em um bloco de aço que fazia a função de base. Conforme está representado na figura 5.3.

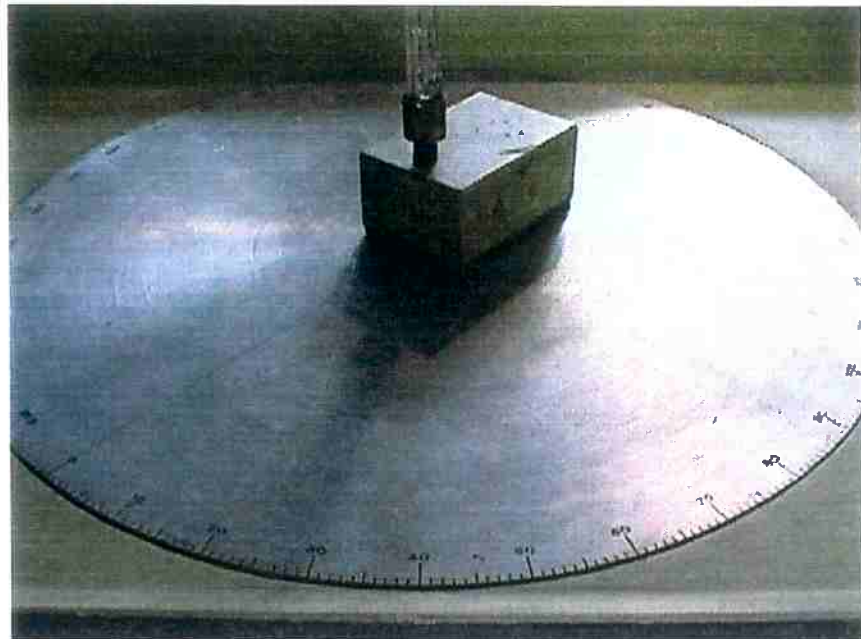


Figura 5.3: Corpo de prova fixado em base sobre mesa de posicionamento angular da seção de testes do túnel de vento do IPT.

O cilindro vinculado à base era posicionado sobre a mesa na seção de testes do túnel de vento de modo que o eixo longitudinal do cilindro estivesse perpendicular e passando pelo centro da mesa. Para obter-se uma centralização com boa exatidão, foram traçadas na base retas defasadas de  $90^\circ$  e passando pelo centro do cilindro. Na mesa de posicionamento também foram traçadas retas passando pelo seu centro e separadas pelo mesmo ângulo de  $90^\circ$ . Um conjunto Mitutoyo de escala, esquadro e nível foram empregados para traçagem e verificação de posicionamento.

Os corpos de prova cilíndricos possuem em uma de suas extremidades terminais fabricados com tubos de cobre para transmitir pressões associados a cada canal interno do cilindro. Estes terminais eram conectados a mangueiras

de látex que conduziam estas pressões até os manômetros onde seriam feitas as medidas. Os terminais eram dirigidos para a face superior da seção de testes, e as mangueiras de látex eram fixadas nesta face superior, observados dois requisitos: que houvesse flexibilidade permitindo a rotação do cilindro livremente, e que não interferissem no escoamento da seção de testes, especialmente na região onde encontra-se o próprio cilindro.

Uma vista geral da seção de testes do túnel de vento está apresentada na figura 5.4, incluindo sensores e acessórios para o posicionamento.



Figura 5.4: Vista frontal da seção de testes do túnel de vento. Corpo de prova em processo de posicionamento. Observa-se tubo de Pitot, e sensores de TPO e TBS.

Foram utilizados nestes ensaios os instrumentos relacionados na tabela 5.2 a seguir.

<b>Instrumentação</b>	<b>Grandeza</b>	<b>Resolução</b>
Tubo de Pitot	Velocidade	-----
Manômetros inclinado de coluna de líquido – Air Flow Mod.: Type 4	Diferença de pressão	Menor faixa: 0.05 Pa
Manômetro eletrônico de pressão diferencial – Air Flow EDM 2500	Diferença de pressão	1 Pa
Medidor de temperatura de ponto de orvalho – Michell Instruments, Mod.: DT	TPO	0.1°C
Medidor de temperatura de bulbo seco - Michell Instruments, Mod.: DT	TBS	0.1°C
Medidor de pressão atmosférica – Desgranges et Huot, Mod: RPM1	Patm	0.0001 mm Hg

Tabela 5.4: Instrumentação utilizada nos ensaios.

### 5.3.3. Procedimento experimental

O procedimento adotado nos ensaios para determinação de pressões sobre uma sonda cilíndrica evoluíram a partir de ensaios preliminares. Os valores baixos de pressão que eram verificados nos casos de ensaios em baixas velocidades foram a razão para agregar alguns cuidados especiais.

O procedimento experimental tinha as seguintes etapas:

- a) Em um desempenho, com auxílio de esquadro e graminho o protótipo era montado na base, sendo avaliados e corrigidos o seu posicionamento vertical, o alinhamento do conjunto de orifícios com a referência da base que foi orientada na direção  $0^\circ$ . Esta direção indicava alinhamento com a direção do escoamento na seção de testes (TAIRA e PEREIRA, 1995)



- b) Na seção de testes do túnel de vento eram feitas as conexões das tomadas de pressão com os tubos de látex, sendo em seguida alinhado o conjunto sobre a mesa de posicionamento angular.
- c) Os manômetros diferenciais eram preparados para operarem, selecionando a escala de pressões adequada para o ensaio e realizando o processo de ajuste de zero cuidadosa e pacientemente. Este ajuste de zero era periodicamente revisto.
- d) Os instrumentos para medir a pressão atmosférica e as temperaturas de ponto de orvalho e de bulbo seco eram ligados.
- e) Com as conexões feitas, o ventilador do túnel era acionado, e ajustava-se a vazão de modo a obter o valor de velocidade dentro da faixa de interesse.
- f) Estabelecida a condição de regime permanente, eram lidos e anotados em uma planilha eletrônica, os valores de  $\Delta P_{2-E}$ ,  $P_{esteira}$ , além de TBS, TPO e  $P_{atm}$ . O valor de  $P_2$  também era lido de modo a validar as medidas de pressão anotadas, este era um procedimento auxiliar detalhado a seguir.
- g) Uma nova posição angular era estabelecida movimentando-se a mesa de posicionamento, e as medidas eram novamente tomadas, após algum tempo.

Os ensaios foram realizados para posições angulares de  $5^\circ$  em  $5^\circ$  no intervalo de  $0$  a  $180^\circ$ , que por simetria apresentava dados para  $360^\circ$ . Para confirmação de resultados foram realizados alguns ensaios cobrindo o intervalo angular de  $180^\circ$  a  $360^\circ$ .

Nos ensaios foram medidos valores de  $\Delta P_{2-E}$ , da pressão efetiva de esteira  $P_{\text{esteira}}$ , sendo o valor de  $P_2$  calculado como a diferença entre ambas. Durante estes levantamentos experimentais uma técnica que auxiliou especialmente o monitoramento de baixas pressões, menores que 10 Pa, foi utilizar um medidor de pressões extra, que media diretamente a  $P_2$ . A comparação entre o valor calculado na planilha de computador utilizada para registro de dados, com aquele indicado no manômetro extra que lia  $P_2$ , auxiliou a validação dos valores que estavam sendo registrados. Na grande maioria das vezes em que não havia a coerência entre o valor medido e calculado, a causa era a perda de "zero" em algum dos instrumentos, que tinham que ser "zerados" periodicamente, conforme já dito.

#### **5.3.4. Resultados**

Os dados dos ensaios foram tratados em planilha eletrônica, onde os principais resultados calculados são: a massa específica do ar, a velocidade do escoamento medida com o Tubo de Pitot, e as pressões que atuam sobre o cilindro. Outros valores característicos do ar escoando estão também apresentados, como umidade absoluta do ar, viscosidade dinâmica e número de Reynolds calculado em função do diâmetro do cilindro.

Os resultados estão apresentados nas tabelas C.1 a C.9 do anexo C, onde cada tabela possui resultados para um valor de velocidade entre 2 m/s e 10 m/s, com intervalo de 1 m/s.

A representação gráfica da distribuição de pressões sobre o cilindro em um sistema de coordenadas polar está apresentada nas figuras de C.1 a C.18 do anexo C, com numeração ímpar. Notar que a região de pressões negativas

está apresentada em módulo, para auxiliar sua visualização. No mesmo conjunto de figuras C.1 a C.18, aquelas que possuem numeração par, apresentam o comportamento das pressões adimensionalizado, representado pelo coeficiente de pressões  $C_p$  em função do ângulo  $\theta$ .

Nas figuras C.19 a C.24, deste mesmo anexo C, estão apresentadas em coordenada polares a variação da diferença de pressão (DP) entre um ponto inicialmente frontal (posição angular:  $0^\circ$ ) e outro na esteira, em função do ângulo  $\theta$ . A análise destes gráficos colaborou de forma importante para as definições no protótipo das sonda da grade sensora, especialmente em relação ao posicionamento angular dos orifícios.

Os resultados numéricos do anexo C são utilizados para a determinação de coeficientes adimensionais conforme proposto na modelagem semi-empírica proposta no próximo capítulo 6, o que viabilizou o uso destes corpos cilíndricos como sensores de velocidade e direção do escoamento.

#### **5.4. Comparação entre os resultados de simulação numérica e ensaios experimentais**

Após a determinação de resultados experimentais para as pressões presentes na superfície do cilindro, foi possível comparar estes valores com aqueles previstos pela simulação numérica. O resultado desta comparação está no anexo B. Nas tabelas B.5, B.6 e B.7 estão registradas as diferenças entre os valores da simulação numérica e os dos ensaios experimentais.

A análise desta comparação confirmou que a simulação numérica com o método utilizado tem resultados próximos aos experimentais para escoamentos com velocidade de 5 m/s e ângulos menores que  $70^\circ$ . Para os

outros valores de velocidade reportados, 2 m/s e 10 m/s, os valores de pressão obtidos nas simulações foram confirmados pelos resultados experimentais apenas para ângulos menores que  $40^\circ$ .

Comparando-se as curvas de  $C_p \times \theta$  observa-se que tomando ângulos de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , a forma da curva obtida para 5 m/s para simulação é a que mais aproximasse dos valores experimentais. Para 2 m/s, a curva obtida com o método numérico afastou-se mais da obtida experimentalmente, o mesmo ocorrendo com a velocidade de 10 m/s. Verificasse portanto, que para velocidades posicionadas nos extremos da faixa pesquisada é preciso ter cuidados para os resultados numéricos, e recomenda-se a validação através de ensaios experimentais

Os resultados experimentais também podem auxiliar o uso da ferramenta computacional confirmando os valores para os parâmetros de entrada que mais se adaptam em casos similares ao deste estudo. Isto aplicado nos resultados aqui discutidos, confirmam as tendências para escolha de parâmetros de entrada no programa

## 6. EQUACIONAMENTO E MODELO SEMI-EMPÍRICO PARA SENSORES

O equacionamento para o medidor de vazão tipo grade multidirecional proposto considera a interação entre um sensor cilíndrico com quatro furos e o escoamento. Os orifícios posicionados na superfície externa do cilindro operam como tomadas de pressão que medindo as pressões resultantes da interação sonda-escoamento oferecem dados que devem ser correlacionados para que seja determinada a direção e a magnitude da velocidade média do escoamento em região definida pela localização da sonda.

### 6.1 Sondas tipo Pitot e tipo tubo multifuro

O princípio de sondas que oferecem resultados de velocidade relacionando pressões ou diferenças de pressões tem a sua origem no tubo de Pitot. Para os modelos deste sensor ditos padrão, propostos pela AMCA (1990), BSI (1982), e outros, a velocidade local em um ponto do escoamento, é determinada pela aplicação direta da equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2, de uma mesma linha de corrente, conforme figura 6.1:

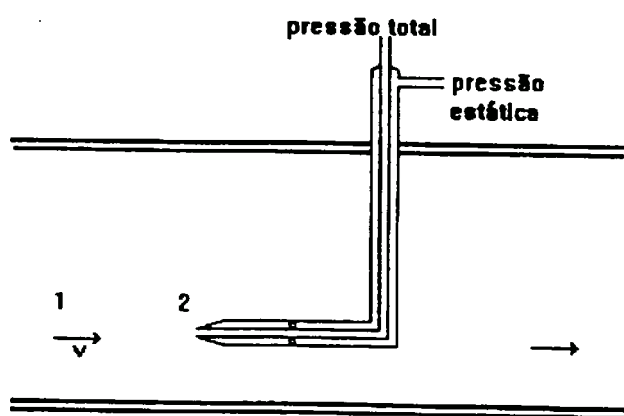


Figura 6.1: Representação de um tubo de Pitot estático inserido no escoamento

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \quad (6.1)$$

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:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}} \quad \text{ou} \quad v = \sqrt{\frac{2(p_{total} - p_{estática})}{\rho}} \quad (6.2)$$

Os medidores de vazão tipo tubo multifuro, por sua vez, tem equacionamento similar ao tubo de Pitot e aos medidores de vazão que operam por perda de pressão. A vazão em volume é determinada pela expressão que relaciona a raiz quadrada da DP com a vazão Q, e adota alguns coeficientes:

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

$$Q = K \cdot S \cdot Y \cdot C_i \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot DP}{\rho}} \quad (6.3)$$

onde:

**Q** - vazão volumétrica

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

$\rho$  - massa específica

**Y** - coeficiente de compressibilidade

**K** - coeficiente de vazão

**$C_i$**  - outros coeficiente de correção

**DP** - pressão diferencial

## 6.2 Sondas cilíndricas direcionais

A grade sensora proposta para o monitorar escoamento de ar em passagens curtas utiliza sondas cilíndricas multifuradas, conforme descrição do projeto para fabricação de protótipo feita no capítulo 4.

A sonda multidirecional que proposta tem a função de avaliar o ângulo  $\alpha$  que orienta o vetor velocidade no plano normal à seção de medição, identificado como plano  $xy$  nas figuras 3.7 e 6.2. Os valores medidos com a sonda devem também, possibilitar a determinação do módulo desta velocidade.

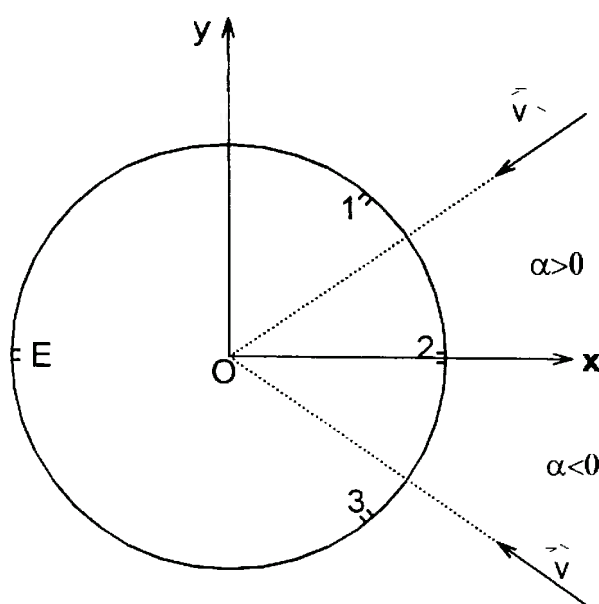


Figura 6.2: Esquema da seção transversal da sonda cilíndrica. Identificação dos ângulos de incidência da velocidade em sistema de coordenadas com origem em  $Ox$ .

Em uma sonda cilíndrica interagindo com o escoamento pode-se estabelecer um equacionamento para determinar a pressão em um ponto  $n$  da superfície do cilindro, partindo da equação de Bernoulli:

$$\frac{\rho v_{\infty}^2}{2} + p_{\infty} + \rho g z_{\infty} = \frac{\rho v_n^2}{2} + p_n + \rho g z_n \quad (6.4)$$

onde:  $p_{\infty}$  = pressão estática ao longe

$p_n$  = pressão no ponto  $n$  no cilindro

$V_s$  = velocidade do fluido ao longe

$V_n$  = velocidade do fluido no ponto  $n$

Admitindo que os termos associados a energia potencial de posição ( $\rho g z$ ) possuem valores muito próximos, pode-se reorganizar a equação de modo a obter:

$$p_n = p_\infty + \rho \frac{v_\infty^2}{2} \left[ 1 - \left( \frac{v_n}{v_\infty} \right)^2 \right] \quad (6.5)$$

Definindo um parâmetro adimensional chamado de fator recuperador de pressão,  $k_n$  de modo que:

$$k_n = 1 - \left( \frac{V_n}{V_s} \right)^2$$

que substituído na equação 6.5 resulta em:

$$p_n = p_\infty + k_n \cdot \rho \frac{v_\infty^2}{2} \quad (6.6)$$

ou ainda pode-se reescrever a equação para  $k_n$ :

$$k_n = \frac{p_n - p_\infty}{\rho \frac{v_\infty^2}{2}} \quad (6.7)$$

Para sondas que medem velocidades em escoamentos tridimensionais o emprego de parâmetros adimensionais que combinam os vários  $k_n$  tem dado bons resultados, conforme os trabalhos de LEE e ASH (1956), WRIGTH (1970), TRIGO et al. (1989).



O comportamento do fator recuperador de pressões,  $k_n$ , depende de características da sonda e do escoamento em que ela está inserida. Em relação à sonda o fator é influenciado pela sua geometria, pelos resultados de sua fabricação, como imperfeições na sua superfície, pelo posicionamento dos orifícios que atuam como tomadas de pressão, e pela direção dos orifícios. Quanto ao escoamento do fluido, este fator é função do Número de Reynolds ( $Re_d$ ) e a direção da velocidade em relação à posição da tomada de pressão  $n$ .

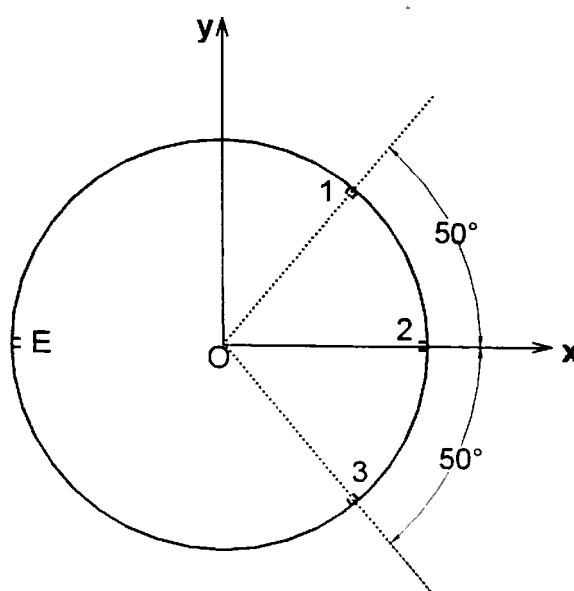


Figura 6.3: Representação do cilindro com 4 orifícios identificados por 1, 2, 3 e E.

Aplicando-se o equacionamento à sonda cilíndrica aqui proposta que possui diversas seções transversais contendo três orifícios posicionados com uma diferença angular  $\alpha = 50^\circ$ , conforme representado na figura 6.3, pode-se escrever a equação (6.6) para cada um dos furos, conforme segue:

$$p_1 = p_\infty + k_1 \cdot \rho \frac{v_\infty^2}{2} \quad (6.8)$$

$$p_2 = p_\infty + k_2 \cdot \rho \frac{v_\infty^2}{2} \quad (6.9)$$

$$p_3 = p_\infty + k_3 \cdot \rho \frac{v_\infty^2}{2} \quad (6.10)$$

Agrupando as equações (6.8), (6.9) e (6.10) duas a duas tem-se:

$$p_1 - k_1 \cdot \rho \frac{v_\infty^2}{2} = p_2 - k_2 \cdot \rho \frac{v_\infty^2}{2} \quad (6.11)$$

$$p_2 - k_2 \cdot \rho \frac{v_\infty^2}{2} = p_3 - k_3 \cdot \rho \frac{v_\infty^2}{2} \quad (6.12)$$

$$p_1 - k_1 \cdot \rho \frac{v_\infty^2}{2} = p_3 - k_3 \cdot \rho \frac{v_\infty^2}{2} \quad (6.13)$$

ou ainda:

$$p_2 - p_3 = (k_2 - k_3) \cdot \rho \frac{v_\infty^2}{2} \quad (6.14)$$

$$p_2 - p_1 = (k_2 - k_1) \cdot \rho \frac{v_\infty^2}{2} \quad (6.15)$$

$$p_1 - p_3 = (k_1 - k_3) \cdot \rho \frac{v_\infty^2}{2} \quad (6.16)$$

A sonda proposta utiliza a metodologia dos múltifuros, operando com valores de pressão diferencial (**DP**) entre cada orifício da parte frontal (**1**, **2** ou **3**) e o orifício de pressão de esteira (**E**). Esta escolha foi feita pois desta forma obtém-se valores medidos maiores que aqueles que ocorreriam se fossem tomados valores de pressão efetiva em cada ponto. Operando com maiores valores de pressão, o processo de medição é favorecido, e a sensibilidade da sonda é maximizada.

Assim as equações (6.14) a (6.16) são reescritas utilizando-se as pressões diferenciais (**DP**) entre a pressão sentida em cada furo e a pressão na esteira da sonda, no lugar do emprego simplesmente da pressão (**p**) medida

em cada orifício. Para simplificar a notação empregada passa-se a utilizar  $v$  no lugar de  $v_\infty$ .

$$DP_2 - DP_3 = (k_2 - k_3) \cdot \rho \frac{v^2}{2} \quad (6.17)$$

$$DP_2 - DP_1 = (k_2 - k_1) \cdot \rho \frac{v^2}{2} \quad (6.18)$$

$$DP_1 - DP_3 = (k_1 - k_3) \cdot \rho \frac{v^2}{2} \quad (6.19)$$

Combinando as equações acima pode-se estabelecer dois conjuntos de números adimensionais. O primeiro conjunto é dado por:

$$K_{21} = \frac{DP_2 - DP_1}{DP_1 - DP_3} = \frac{(k_2 - k_1)}{(k_1 - k_3)} \quad (6.20)$$

$$K_{23} = \frac{DP_2 - DP_3}{DP_1 - DP_3} = \frac{(k_2 - k_3)}{(k_1 - k_3)} \quad (6.21)$$

Os adimensionais  $K_{21}$ ,  $K_{23}$  foram escolhidos para auxiliar a determinação do ângulo  $\alpha$ , e podem ser denominados genericamente de  $K_\alpha$ . Sua aplicação à sonda cilíndrica de três orifícios está apresentado no item à frente.

As equações (6.17) a (6.19) podem ser rearranjadas de modo a obter-se dois outros adimensionais semelhantes ao coeficiente de pressão para cilindros ( $C_p$ ), conforme segue:

$$K_{v23} = \frac{DP_2 - DP_3}{\rho \frac{v^2}{2}} \quad (6.22)$$

$$K_{v21} = \frac{DP_2 - DP_1}{\rho \frac{v^2}{2}} \quad (6.23)$$

Os adimensionais  $K_{v21}$  e  $K_{v23}$  foram definidos para auxiliar a determinação do módulo da velocidade.

Assim o procedimento para a caracterização do vetor velocidade pode ser dividido em duas partes, onde na primeira foi determinado o ângulo  $\alpha$  e na segunda foi calculado o de seu módulo.

### 6.3 Determinação do ângulo $\alpha$

Para a determinação do ângulo  $\alpha$  utilizou-se os parâmetros adimensionais  $K_\alpha$ , dados por  $K_{21}$  e  $K_{23}$ . Os valores destes coeficientes adimensionais foram calculados com os resultados experimentais determinados no capítulo 5 e estão apresentados no item 6.5 à frente.

Retomando o modelo apresentado e observando a orientação adotada para  $\alpha$  conforme a figura 6.2, tem-se que, para uma faixa de ângulos estabelecidos para aplicação da sonda como sensor de velocidade ocorrem três situações que devem ser separadas:

$$(a) \text{ Para } \alpha > 0 \Rightarrow DP_1 > DP_3 \Rightarrow (DP_1 - DP_3) > 0$$

$$(b) \text{ Para } \alpha < 0 \Rightarrow DP_1 < DP_3 \Rightarrow (DP_1 - DP_3) < 0$$

$$(c) \text{ Para } \alpha \cong 0 \Rightarrow DP_1 \approx DP_3 \Rightarrow (DP_1 - DP_3) \cong 0$$

A determinação do ângulo  $\alpha$  foi feita através das equações  $\alpha = \alpha(K_\alpha)$  obtidas do estudo do comportamento da variação das pressões diferenciais  $DP_n = (P_n - P_E)$  em função do ângulo com que a velocidade incidia no cilindro, resultados apresentados no capítulo 5. Assim, é selecionada uma equação a

partir do resultado obtido da comparação entre  $DP_1$  e  $DP_3$  conforme as seguintes situações:

(a) Quando  $(DP_1 - DP_3) > 0 \Rightarrow \alpha > 0$  utiliza-se a equação  $\alpha = \alpha(K21)$

(b) Quando  $(DP_1 - DP_3) < 0 \Rightarrow \alpha < 0$  utiliza-se a equação  $\alpha = \alpha(K23)$

(c) Quando  $(DP_1 - DP_3) \cong 0 \Rightarrow \alpha \cong 0$

A aplicação da condição (c), ou seja condição que  $DP_1 = DP_3$  foi adotada em termos experimentais considerando valores para esta diferença menores que 1 Pa. Este valor foi adotado a partir da análise estatística de resultados e das incertezas de medição. As equações das funções de  $\alpha = \alpha(K\alpha)$  estão apresentadas no item 6.5 deste capítulo.

#### 6.4 Determinação do módulo da velocidade

A determinação do módulo da velocidade foi feita através do emprego dos adimensionais  $Kv$ . Da mesma forma que os coeficientes  $K\alpha$ , estes coeficientes tem equações específicas,  $Kv=Kv(\alpha)$ , determinadas a partir dos resultados dos ensaios do capítulo 5. A seleção de qual adimensional deve ser usado ( $Kv_{21}$  ou  $Kv_{23}$ ) é definida em função do quadrante que encontra-se o vetor velocidade, considerada a faixa de ângulos em que é possível fazer medições com esta sonda cilíndrica, e segundo as situações identificadas a partir dos ângulos  $\alpha$ , conforme descrito a seguir:

(d) Para  $\alpha > 0 \Rightarrow$  utiliza-se  $Kv_{21}=Kv_{21}(\alpha)$

(e) Para  $\alpha < 0 \Rightarrow$  utiliza-se  $Kv_{23}=Kv_{23}(\alpha)$

(f) Para  $\alpha \cong 0 \Rightarrow$  utiliza-se  $Kv_{21}=Kv_{21}(\alpha)$  ou  $Kv_{23} =Kv_{23}(\alpha)$

Um caso particular foi analisado, pois este causa indeterminação no resultado da velocidade, se ocorrer. Trata-se de ângulos  $\alpha$  com valores em torno de  $25^\circ$ . Para esta situação, o coeficiente  $K_v$  tende a zero, e as equações (6.22) ou (6.23) utilizadas para determinar a velocidade ficam indeterminadas. Para contornar esta indeterminação, foi adotado um valor particular para  $K_v$ , quando o resultado para  $K_v$  era nulo na equação de regressão  $K_v = K_v(\alpha)$ . Este valor particular foi determinado através da equação (6.24) a seguir:

$$K_{v_{25^\circ}} = K_{v_2} = \frac{DP_2}{\frac{\rho v^2}{2}} = K_{v_1} = \frac{DP_1}{\frac{\rho v^2}{2}} \quad (6.24)$$

De modo idêntico, para  $\alpha \cong -25^\circ$  a mesma indeterminação ocorre, e isto exige novamente, de modo similar, um valor particular para o adimensional  $K_v$ .

### 6.5 Equações aplicadas ao protótipo

O estudo de escoamento em torno de cilindros e os resultados experimentais obtidos, apresentados no capítulo 5, permitem calcular valores para os coeficientes adimensionais selecionados,  $K_\alpha$  e  $K_v$

A faixa de velocidades escolhida para obter valores para as diferenças de pressão que pudessem ser tratados para resultar nas curvas do interesse deste trabalho foi de 2 a 10 m/s. E o estudo do comportamento das diferenças de pressão em torno do cilindro ( $DP_n = P_n - P_E$ ) foi estabelecido para um posicionamento dos orifícios sensores de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , conforme realizado nos ensaios descritos no capítulo 5.

Para cada  $\alpha$  e para cada velocidade, partindo dos valores de  $DP_n$  foram calculados os coeficientes  $K_\alpha$ , determinando  $K_{21}$  e  $K_{23}$ . Foram,

também, calculados valores para  $K_v$ , resultando em  $K_{v21}$  e  $K_{v23}$ , e o valor de  $K_{v25}^\circ$  que auxiliará a determinação de  $v$  para  $\alpha \cong \pm 25^\circ$ .

A seguir, nas tabelas 6.1 e 6.2, estão apresentados os valores obtidos para respectivamente **K21** e **K23**.

Direção da Velocidade	K21 2 m/s	K21 3 m/s	K21 4 m/s	K21 5 m/s	K21 6 m/s	K21 7 m/s	K21 8 m/s	K21 9 m/s	K21 10 m/s	K21 Médio
<b>0°</b>	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
<b>5°</b>	3.38	3.00	2.95	2.82	2.97	3.08	3.20	3.04	2.99	<b>3.05</b>
<b>10°</b>	1.27	1.28	1.25	1.20	1.19	1.23	1.27	1.24	1.25	<b>1.24</b>
<b>15°</b>	0.63	0.62	0.60	0.62	0.60	0.61	0.61	0.60	0.60	<b>0.61</b>
<b>20°</b>	0.20	0.26	0.24	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.26	<b>0.24</b>
<b>25°</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>
<b>30°</b>	-0.17	-0.21	-0.21	-0.21	-0.21	-0.21	-0.22	-0.21	-0.22	<b>-0.21</b>
<b>35°</b>	-0.42	-0.41	-0.41	-0.42	-0.40	-0.41	-0.42	-0.41	-0.41	<b>-0.41</b>
<b>40°</b>	-0.58	-0.59	-0.59	-0.58	-0.57	-0.58	-0.59	-0.58	-0.58	<b>-0.59</b>
<b>45°</b>	-0.81	-0.77	-0.77	-0.76	-0.74	-0.75	-0.76	-0.75	-0.75	<b>-0.76</b>
<b>50°</b>	-1.00	-1.00	-0.96	-0.98	-0.94	-0.94	-0.94	-0.93	-0.92	<b>-0.96</b>
<b>55°</b>	-1.17	-1.15	-1.16	-1.13	-1.14	-1.14	-1.12	-1.13	-1.11	<b>-1.14</b>
<b>60°</b>	-1.21	-1.24	-1.25	-1.21	-1.22	-1.22	-1.21	-1.21	-1.19	<b>-1.22</b>
<b>65°</b>	-1.30	-1.24	-1.25	-1.22	-1.25	-1.23	-1.23	-1.23	-1.21	<b>-1.24</b>
<b>70°</b>	-1.20	-1.21	-1.20	-1.17	-1.20	-1.18	-1.17	-1.17	-1.13	<b>-1.18</b>
<b>75°</b>	-1.12	-1.09	-1.07	-1.04	-1.08	-1.06	-1.04	-1.05	-1.03	<b>-1.06</b>
<b>80°</b>	-0.97	-0.90	-0.90	-0.86	-0.88	-0.87	-0.85	-0.86	-0.85	<b>-0.88</b>
<b>85°</b>	-0.68	-0.69	-0.69	-0.64	-0.68	-0.67	-0.64	-0.66	-0.66	<b>-0.67</b>
<b>90°</b>	-0.49	-0.49	-0.48	-0.46	-0.49	-0.48	-0.46	-0.48	-0.48	<b>-0.48</b>

Tabela 6.1: Valores calculados para K21 em função da velocidade e do ângulo  $\alpha$  (graus)

Direção da Velocidade	K23 2 m/s	K23 3 m/s	K23 4 m/s	K23 5 m/s	K23 6 m/s	K23 7 m/s	K23 8 m/s	K23 9 m/s	K23 10 m/s	K23 Médio
-90°	0.49	0.49	0.48	0.46	0.49	0.48	0.46	0.48	0.48	0.48
-85°	0.68	0.69	0.69	0.64	0.68	0.67	0.64	0.66	0.66	0.67
-80°	0.97	0.90	0.90	0.86	0.88	0.87	0.85	0.86	0.85	0.88
-75°	1.12	1.09	1.07	1.04	1.08	1.06	1.04	1.05	1.03	1.06
-70°	1.20	1.21	1.20	1.17	1.20	1.18	1.17	1.17	1.13	1.18
-65°	1.30	1.24	1.25	1.22	1.25	1.23	1.23	1.23	1.21	1.24
-60°	1.21	1.24	1.25	1.21	1.22	1.22	1.21	1.21	1.19	1.22
-55°	1.17	1.15	1.16	1.13	1.14	1.14	1.12	1.13	1.11	1.14
-50°	1.00	1.00	0.96	0.98	0.94	0.94	0.94	0.93	0.92	0.96
-45°	0.81	0.77	0.77	0.76	0.74	0.75	0.76	0.75	0.75	0.76
-40°	0.58	0.59	0.59	0.58	0.57	0.58	0.59	0.58	0.58	0.59
-35°	0.42	0.41	0.41	0.42	0.40	0.41	0.42	0.41	0.41	0.41
-30°	0.17	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.21	0.22	0.21
-25°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-20°	-0.20	-0.26	-0.24	-0.24	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	-0.26	-0.24
-15°	-0.63	-0.62	-0.60	-0.62	-0.60	-0.61	-0.61	-0.60	-0.60	-0.61
-10°	-1.27	-1.28	-1.25	-1.20	-1.19	-1.23	-1.27	-1.24	-1.25	-1.24
-5°	-3.38	-3.00	-2.95	-2.82	-2.97	-3.08	-3.20	-3.04	-2.99	-3.05
0°	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabela 6.2: Valores calculados para K23 em função da velocidade e do ângulo  $\alpha$  (graus)

Os valores médios de K21 e K23 obtidos foram representados graficamente, e estão apresentados nas Figuras 6.4 e 6.5, com as respectivas curvas de interpolação de valores.

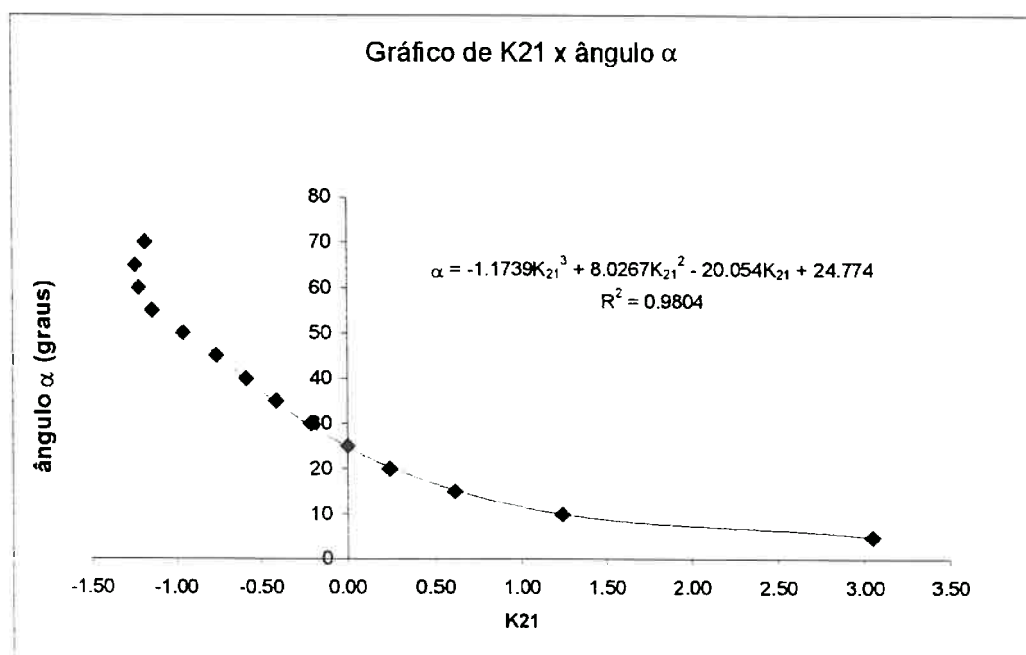


Figura 6.4: Curva de K21 médio em função do ângulo  $\alpha$  com a respectiva equação de ajuste.



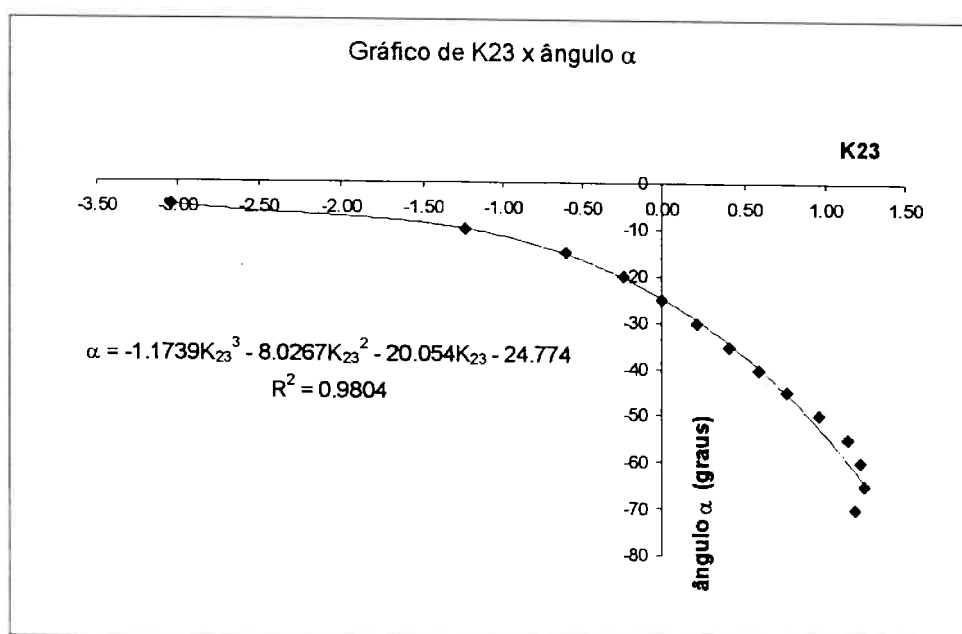


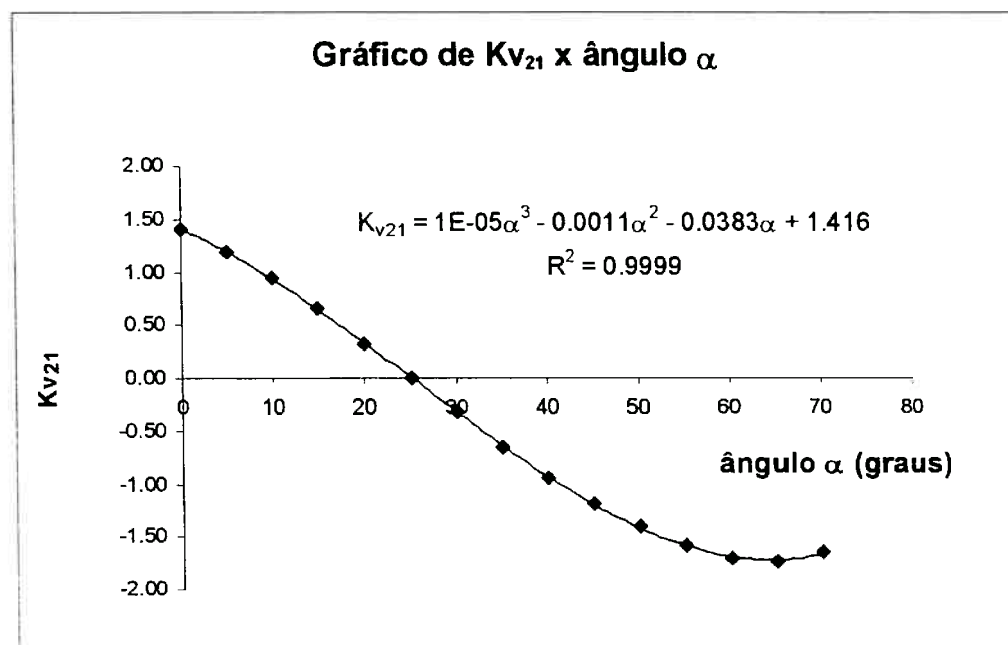
Figura 6.5: Curva de K23 médio em função do ângulo  $\alpha$  com a respectiva equação de ajuste

Os coeficientes **Kv** médios foram determinados a partir dos valores calculados para cada direção e para cada da velocidade.

Direção da Velocidade	Kv <sub>21</sub> 2 m/s	Kv <sub>21</sub> 3 m/s	Kv <sub>21</sub> 4 m/s	Kv <sub>21</sub> 5 m/s	Kv <sub>21</sub> 6 m/s	Kv <sub>21</sub> 7 m/s	Kv <sub>21</sub> 8 m/s	Kv <sub>21</sub> 9 m/s	Kv <sub>21</sub> 10 m/s	Kv <sub>21</sub> Médio
0	1.38	1.43	1.40	1.44	1.40	1.39	1.43	1.40	1.39	1.41
5°	1.21	1.20	1.21	1.18	1.17	1.18	1.21	1.20	1.18	1.19
10°	0.94	0.97	0.97	0.94	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94	0.94
15°	0.67	0.68	0.67	0.66	0.65	0.65	0.65	0.65	0.64	0.66
20°	0.27	0.35	0.33	0.32	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.32
25°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30°	-0.27	-0.35	-0.33	-0.32	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.32
35°	-0.67	-0.68	-0.67	-0.66	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65	-0.64	-0.66
40°	-0.94	-0.97	-0.97	-0.94	-0.93	-0.93	-0.94	-0.94	-0.94	-0.94
45°	-1.21	-1.20	-1.21	-1.18	-1.17	-1.18	-1.21	-1.20	-1.18	-1.19
50°	-1.38	-1.43	-1.40	-1.44	-1.40	-1.39	-1.43	-1.40	-1.39	-1.41
55°	-1.56	-1.60	-1.62	-1.60	-1.57	-1.56	-1.58	-1.60	-1.57	-1.58
60°	-1.67	-1.73	-1.75	-1.73	-1.70	-1.68	-1.68	-1.69	-1.69	-1.70
65°	-1.74	-1.78	-1.78	-1.73	-1.75	-1.73	-1.70	-1.74	-1.71	-1.74
70°	-1.61	-1.70	-1.70	-1.64	-1.68	-1.65	-1.62	-1.66	-1.62	-1.65
75°	-1.50	-1.54	-1.51	-1.47	-1.52	-1.49	-1.44	-1.50	-1.48	-1.49
80°	-1.30	-1.28	-1.28	-1.22	-1.25	-1.23	-1.19	-1.22	-1.20	-1.24
85°	-0.92	-0.98	-0.97	-0.92	-0.96	-0.94	-0.91	-0.94	-0.93	-0.94
90°	-0.67	-0.68	-0.67	-0.67	-0.69	-0.67	-0.65	-0.67	-0.66	-0.67

Tabela 6.3: Valores calculados para Kv<sub>21</sub> em função da velocidade e do ângulo  $\alpha$  (graus)

Direção da Velocidade	Kv <sub>23</sub> 2 m/s	Kv <sub>23</sub> 3 m/s	Kv <sub>23</sub> 4 m/s	Kv <sub>23</sub> 5 m/s	Kv <sub>23</sub> 6 m/s	Kv <sub>23</sub> 7 m/s	Kv <sub>23</sub> 8 m/s	Kv <sub>23</sub> 9 m/s	Kv <sub>23</sub> 10 m/s	Kv <sub>23</sub> médio
-90°	-0.67	-0.68	-0.67	-0.67	-0.69	-0.67	-0.65	-0.67	-0.66	-0.67
-85°	-0.92	-0.98	-0.97	-0.92	-0.96	-0.94	-0.91	-0.94	-0.93	-0.94
-80°	-1.30	-1.28	-1.28	-1.22	-1.25	-1.23	-1.19	-1.22	-1.20	-1.24
-75°	-1.50	-1.54	-1.51	-1.47	-1.52	-1.49	-1.44	-1.50	-1.48	-1.49
-70°	-1.61	-1.70	-1.70	-1.64	-1.68	-1.65	-1.62	-1.66	-1.62	-1.65
-65°	-1.74	-1.78	-1.78	-1.73	-1.75	-1.73	-1.70	-1.74	-1.71	-1.74
-60°	-1.67	-1.73	-1.75	-1.73	-1.70	-1.68	-1.68	-1.69	-1.69	-1.70
-55°	-1.56	-1.60	-1.62	-1.60	-1.57	-1.56	-1.58	-1.60	-1.57	-1.58
-50°	-1.38	-1.43	-1.40	-1.44	-1.40	-1.39	-1.43	-1.40	-1.39	-1.41
-45°	-1.21	-1.20	-1.21	-1.18	-1.17	-1.18	-1.21	-1.20	-1.18	-1.19
-40°	-0.94	-0.97	-0.97	-0.94	-0.93	-0.93	-0.94	-0.94	-0.94	-0.94
-35°	-0.67	-0.68	-0.67	-0.66	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65	-0.64	-0.66
-30°	-0.27	-0.35	-0.33	-0.32	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.32
-25°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-20°	0.27	0.35	0.33	0.32	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.32
-15°	0.67	0.68	0.67	0.66	0.65	0.65	0.65	0.65	0.64	0.66
-10°	0.94	0.97	0.97	0.94	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94	0.94
-5°	1.21	1.20	1.21	1.18	1.17	1.18	1.21	1.20	1.18	1.19
0°	1.38	1.43	1.40	1.44	1.40	1.39	1.43	1.40	1.39	1.41

Tabela 6.4: Valores calculados para Kv<sub>23</sub> em função da velocidade e do ângulo  $\alpha$  (graus)Figura 6.6: Curva de Kv<sub>21</sub> médio em função do ângulo  $\alpha$  com a respectiva equação de ajuste

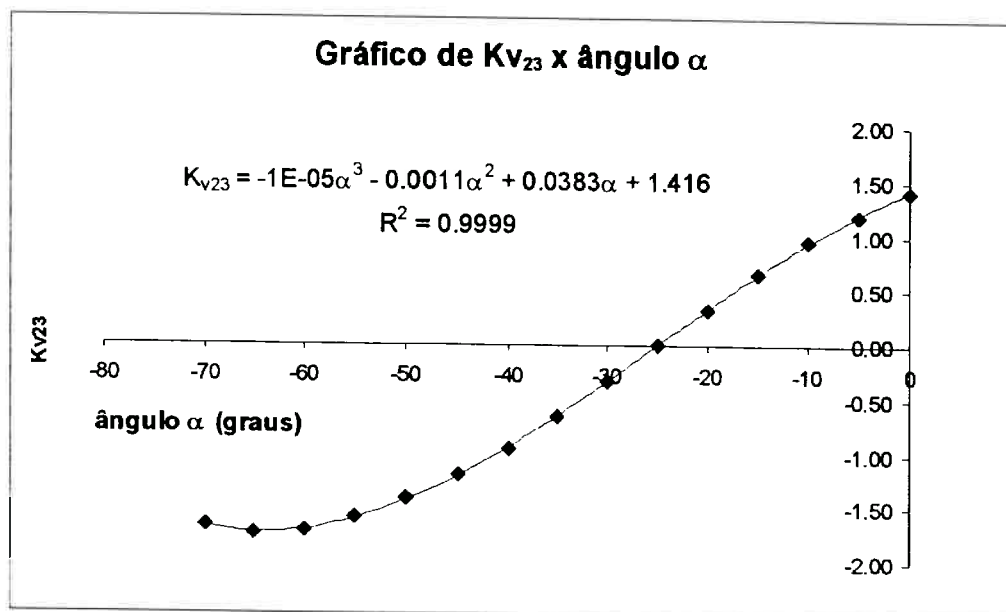


Figura 6.7: Curva de  $K_{v23}$  médio em função do ângulo  $\alpha$  com a respectiva equação de ajuste

Com as curvas das figuras 6.6 e 6.7 pode-se determinar  $K_v$ , ou analiticamente, com a equação que interpola esta curva é possível calcular o  $K_v$  e em seguida o módulo da velocidade a partir das equações 6.22 ou 6.23.

Para o ângulo em torno de  $25^\circ$  o valor de  $K_v$  adotado, resultou da média de valores calculados para os vários valores de velocidade, através da equação 6.24. Os resultados do estudo da distribuição de pressões em cilindros definiu  $K_{v25^\circ} = 1.2673$ .

Ou seja quando no cálculo de  $K_v$  através da equação de regressão o resultado é zero, adota-se o valor de  $K_{v25^\circ}$  e o cálculo da velocidade é feito utilizando um valor médio entre os valores medidos de  $DP1$  e  $DP2$ , ou entre  $DP2$  e  $DP3$

O intervalo de ângulos  $-70^\circ < \alpha < +70^\circ$  foi definido para operação da sonda. Estes limites foram estabelecidos a partir dos resultados expressos nas curvas  $\alpha = \alpha(K\alpha)$ , pois o valor máximo para  $|K\alpha|$  em função de  $\alpha$  ocorre em torno de  $65^\circ$ , conforme pode ser observado nas figuras 6.4 e 6.5.

Desta forma está estabelecido um equacionamento para determinar o vetor velocidade média na região onde a sonda multifurada multidirecional está inserida, obtendo-se seu módulo e sua direção em coordenadas polares.

A vazão através da seção transversal onde está inserida a sonda pode ser calculada a partir da integração da projeção da velocidade na direção normal ao plano desta seção em relação à uma área onde esta velocidade média seja representativa.

Para a grade sensora proposta foi adotado o critério de divisão da seção transversal em áreas iguais proposto pela AMCA (1990), no qual a contribuição de cada área, em princípio possui o mesmo peso. Desta forma a determinação da vazão foi feita através da seguinte equação:

$$Q_m = \rho \sum_i S_i V_i \cos \alpha_i \quad (6.25)$$

Para o caso da área da seção de medição da passagem curta adotada nos testes, adotou-se o valor da área livre de passagem na grade ( $S_{\text{grade}}$ ). Como o nosso sensor possui 4 sondas medindo valores de velocidade nos centros das equi-áreas, o cálculo foi feito com  $S_i = S/4 = 0.08929/4 = 0.02232 \text{ m}^2$ .

## 7. MÓDULO EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

### 7.1. Características gerais

A partir do elemento motivador da pesquisa, ou seja avaliar a vazão de ar através de dispositivos de passagem, com enfoque voltado para aqueles utilizados em sistemas de condicionamento de ar decidiu-se avaliar o desempenho do sistema de medição de vazão proposto utilizando-se uma situação similar típica àquela que é verificada nas instalações de ACV. Assim optou-se por construir uma câmara plenum, para simular a condição de uma caixa de mistura, ou de uma caixa de passagem. O nosso principal interesse é na passagem curta por onde há a entrada de ar na câmara. A passagem foi instalada para receber os acessórios do conjunto VDF selecionado caracterizando a tomada de ar externo.

Uma vez definido o conjunto VDF que possui medidas 397 mm x 297 mm (largura x altura), foi dimensionada uma câmara plenum, de modo que houvesse escoamento de ar similar àquele que ocorre nas instalações. A instalação da tomada de ar externo simulada exigiu que uma das paredes da câmara fosse dupla, com dimensões similares à de uma parede de alvenaria.

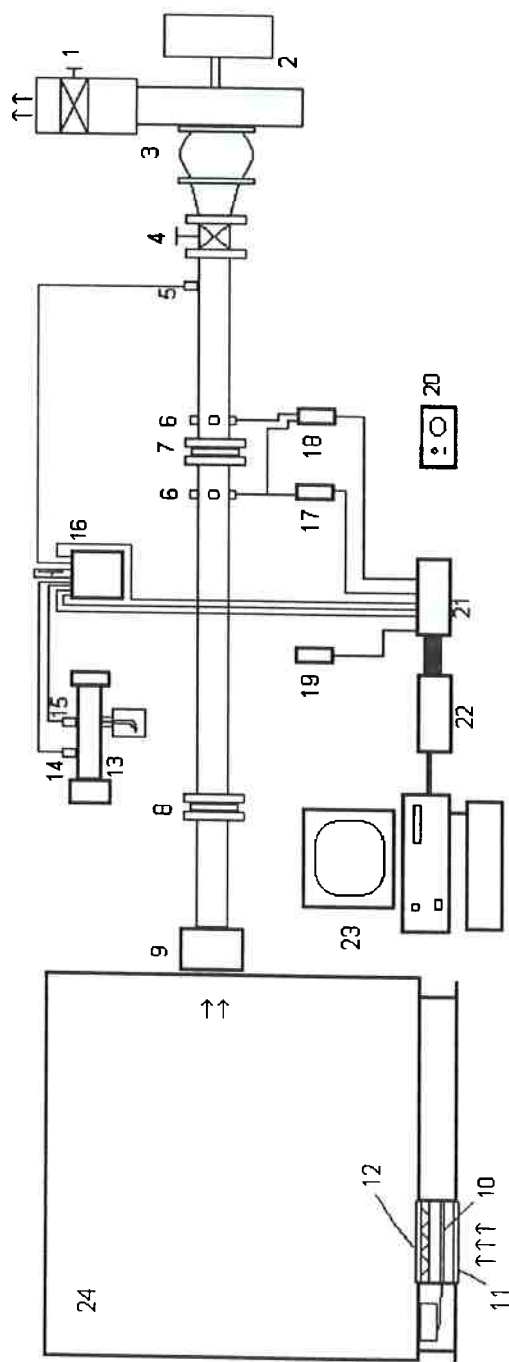
O ar percorre uma redução brusca de seção, do meio externo (área  $\approx$  infinita) para um área restrita dentro da passagem curta, passando por lâminas paralelas de uma veneziana, que provocam uma orientação no escoamento de baixo para cima. Em seguida há uma pequena expansão da área efetiva da veneziana para uma seção retangular, prosseguindo em direção a um registro

de lâminas opostas, e depois passando por um filtro, expandindo para a câmara plenum, ou seja realizando uma expansão brusca.

A medição de vazão na passagem curta foi realizada com a instalação da grade sensora multidirecional no espaço entre a veneziana e o registro.

O ar sai da câmara plenum passando em um bocal e escoando para uma tubulação, que foi caracterizada como linha de fluido para medição de vazão. Nesta linha estão instalados dispositivos que viabilizam a medição de vazão com uma placa de orifício, que será o padrão de trabalho para os ensaios. A movimentação do ar é realizada por um ventilador e o controle da vazão é feito por uma válvula borboleta.

Um esquema que apresenta uma visão geral do módulo experimental, que é composto da câmara plenum, da linha de escoamento de ar e do ventilador, está apresentado na figura 7.1 a seguir. Os subconjuntos que compõem este módulo estão detalhados nos próximos itens.



**Legenda:**

- |                                   |   |  |
|-----------------------------------|---|--|
| 1 - Válvula borboleta (descarga)  | 9 - Bocal                                     | 17 - Transdutor nº2 ( $DP_{placa}$ )   |
| 2 - Conjunto moto-ventilador      | 10 - Grade sensora multidirecional            | 18 - Transdutor nº3 ( $P_{estática}$ ) |
| 3 - Junta de expansão de borracha | 11 - Veneziana (tomada de ar externo)         | 19 - Transdutor nº5 ( $P_{atm}$ )      |
| 4 - Válvula borboleta (aspiração) | 12 - Registro e filtro (tomada de ar externo) | 20 - Fonte CC para transdutores        |
| 5 - Termopar nº 4 (temp. ar duto) | 13 - Psicrômetro                              | 21 - Condicionador de sinal            |
| 6 - Tomadas de pressão estática   | 14 - Termopar nº1 (TBS)                       | 22 - Conversor A/D                     |
| 7 - Placa do orifício             | 15 - Termopar nº2 (TBU)0                      | 23 - Microcomputador PC                |
| 8 - Condicionador de escoamento   | 16 - Junta fria (gelo a 0° C)                 | 24 - Câmara plenum - mistura           |

Figura 7.1: Esquema do arranjo experimental módulo de medição de vazão

## 7.2. A câmara plenum

A câmara plenum foi dimensionada para ter um volume da ordem de  $7 \text{ m}^3$ , com área de uma das paredes compatível para a aplicação de uma tomada de ar externo. Este volume foi definido de modo que a câmara plenum possa ser considerada de grandes dimensões, isto é, com velocidades de escoamento no seu interior aproximadamente nulas. Estas dimensões são também compatíveis com aquelas encontradas em sistemas de condicionamento de ar que aplicam tomadas de ar externo de medidas similares. Assim resultaram as seguintes dimensões: (2,20 x 2,20 x 1,60) m (largura x comprimento x altura).

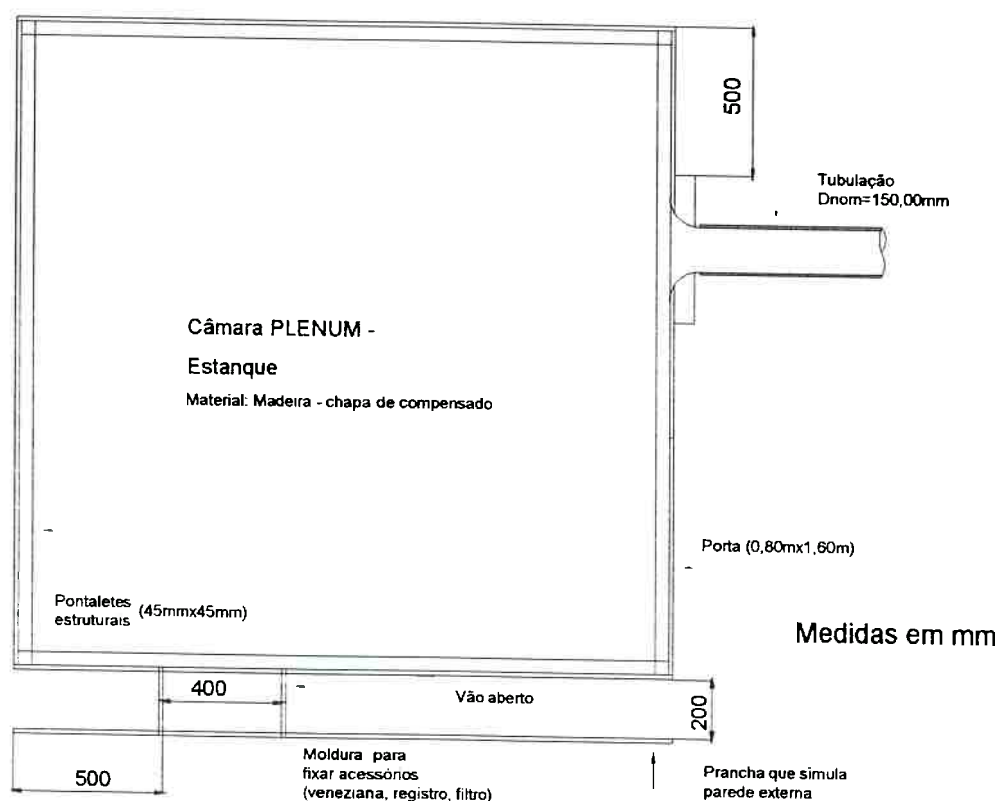


Figura 7.2: Desenho da câmara plenum

O material selecionado para a construção da câmara foi madeira. Os motivos desta escolha foram o peso, a facilidade construtiva, a mobilidade,



além da maior flexibilidade quando a alteração de parâmetros que possibilita nova seleção de acessórios, outras posições de fixação.

A câmara foi construída com pranchas de madeira compensada com espessura de 15 mm vinculadas em suas extremidades à uma estrutura de pontaletes de 45 mm. A estrutura de pontaletes ficou interna à câmara, e as placas de compensado foram fixadas à estrutura através de parafusos do tipo francês.

A vedação da mesma foi uma preocupação permanente durante o processo de montagem. Antes de fixar as placas nos pontaletes toda a superfície de contato recebeu camada de adesivo vinílico e plastificante. Após a colagem e fixação com parafusos, as arestas entre pranchas de madeira e pontaletes, no interior da câmara, recebeu um cordão do mesmo adesivo formando uma camada plastificada nestas possíveis áreas de vazamento. As placas superior e inferior da câmara foram compostas por duas placas emendadas, e na emenda uma camada de adesivo espessa aderiu e penetrou nas frestas impedindo vazamentos.

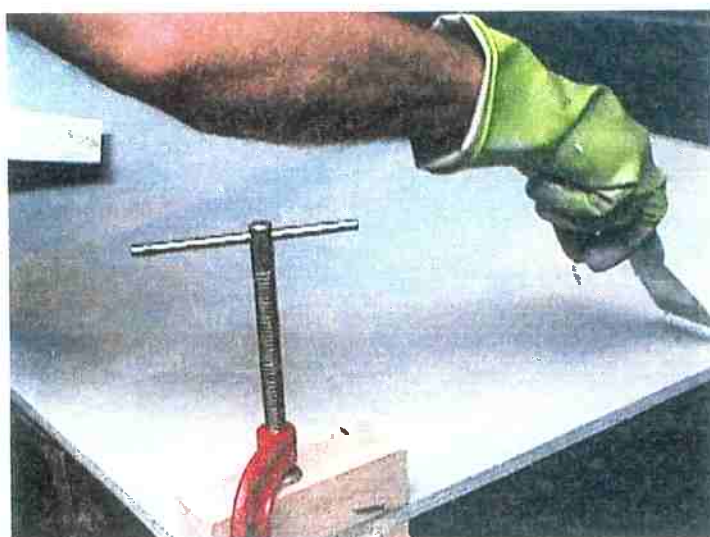


Figura 7.3: Aplicação de resina poliéster na porta de acesso da câmara

Externamente a câmara recebeu acabamento em massa à base de resina poliéster e pintura com esmalte sintético de boa qualidade.

A porta de acesso ao interior da mesma é do tipo removível e fica assentada sobre um batente revestido por uma fita de borracha macia de 6 mm de espessura. O fechamento da porta é feito através de presilhas que a comprimem contra a borracha.



Figura 7.4: Vista geral da câmara plenum

O ar sai da câmara através de uma abertura circular onde foi instalado um bocal fabricado em resina poliéster. A seção de entrada do bocal fica faceada com a parede interna da câmara. Sua vedação é realizada com silicone. Este bocal faz o vínculo entre a câmara e a linha de fluido que realiza a medição de vazão.

A construção da passagem curta, através da qual o ar entra na câmara, foi feita utilizando-se uma moldura de madeira onde foram fixados os acessórios do conjunto VDF usado nos ensaios. A moldura simula a existência

de uma parede de 200 mm de espessura. Uma extremidade da moldura fica presa na parede da câmara através de parafusos e na outra extremidade fixa-se um anteparo de madeira que simula a face externa de uma parede real.



Figura 7.5: A foto da esquerda apresenta o bocal que faz a conexão da tubulação na câmara. A foto da direita mostra o detalhe da passagem curta entre a câmara e o anteparo de madeira que é a parede externa simulada

A preocupação de adotar o anteparo de madeira simulando a parede externa é tomada no sentido de garantir que as trajetórias das partículas de ar que entram na câmara através da veneziana sejam similares àquelas que ocorrem no caso real que é simulado.

### **7.3. A grade sensora instalada na passagem curta**

O protótipo da grade sensora multidirecional foi posicionado na tomada de ar externo conforme representado no esquema da figura 7.6. As distâncias estabelecidas, entre os acessórios aí presentes, foram definidas de modo que a grade sensora ficasse em uma posição intermediária entre a veneziana e o registro, quando este fosse ali instalado. A principal referência para este posicionamento da grade na passagem curta é a distância entre a face interna da veneziana e os cilindros da grade, definida em 40 mm, idêntico ao adotado

nos ensaios de medição do campo de velocidades com anemômetro laser. O comprimento total da passagem curta é de 260 mm.

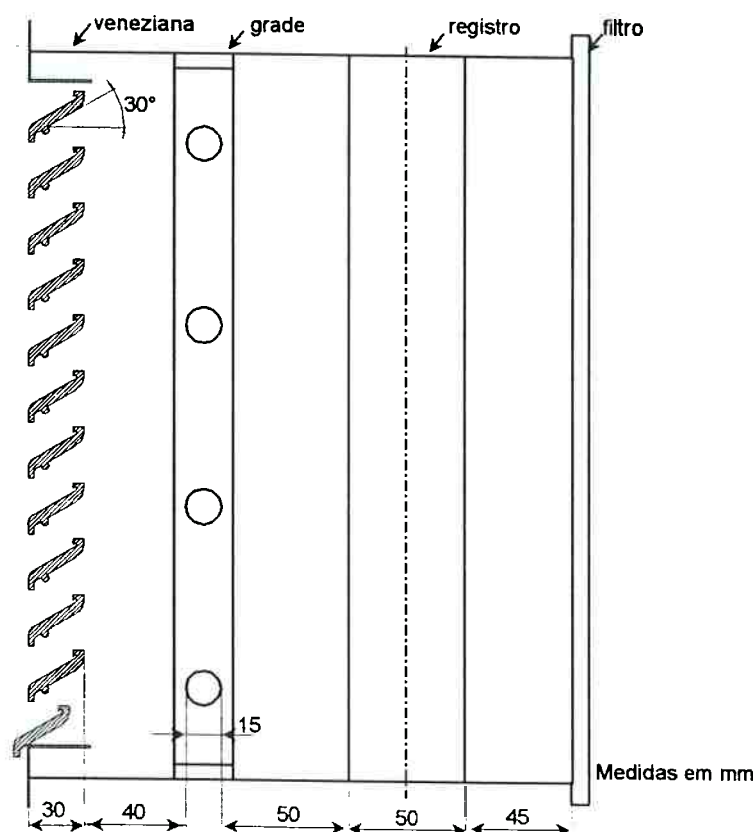


Figura 7.6: Vista lateral esquemática da tomada de ar externo, indicando as posições relativas dos dispositivos instalados.

Para facilitar os testes e as necessidades de montagem e desmontagens exigidas pelo presente estudo, a região de instalação das conexões de pressão da grade sensora e ligações com o sistema monitor de pressões foi posicionada no espaço vazio localizado entre a chapa de madeira que simula a face externa da parede onde foi instalada a tomada de ar externo e a face da câmara. Este espaço na situação real é ocupado por alvenaria. As conexões entre a grade sensora e o sistema monitor de pressões podem ser vistas na figura 7.7

O sistema monitor de pressões realiza a medição das pressões nas várias sondas que compõem a grade sensora multifurada multidirecional. Os sinais correspondentes à estas pressões são transferidos para um microcomputador tipo PC através de uma conexão de comunicação simples para sua porta serial. No microcomputador os sinais recebidos são lidos através de um programa denominado MONITORAP, desenvolvido em Visual Basic, compatível com ambiente Windows da Microsoft.



Figura 7.7: Vista da conexão da grade sensora com o sistema monitor de pressão

As especificações detalhadas do sistema monitor de pressões foram descritas no capítulo 4.

#### **7.4. A linha de fluido para medição da vazão**

Trata-se de uma linha composta por tubos de aço carbono (preto) fabricados conforme a norma DIN 2440, com diâmetro nominal de 150 mm. O

diâmetro interno da tubulação foi medido com paquímetro, em oito posições diferentes, apresentando o valor médio de  $(155,4 \pm 0,6)$  mm.

Foram estabelecidos trechos retos entre as seções de instalação da placa de orifício, adotando-se valores acima daqueles propostos pelas normas consultadas: ISO 5167 (1991) e BSI 1042 (1984).

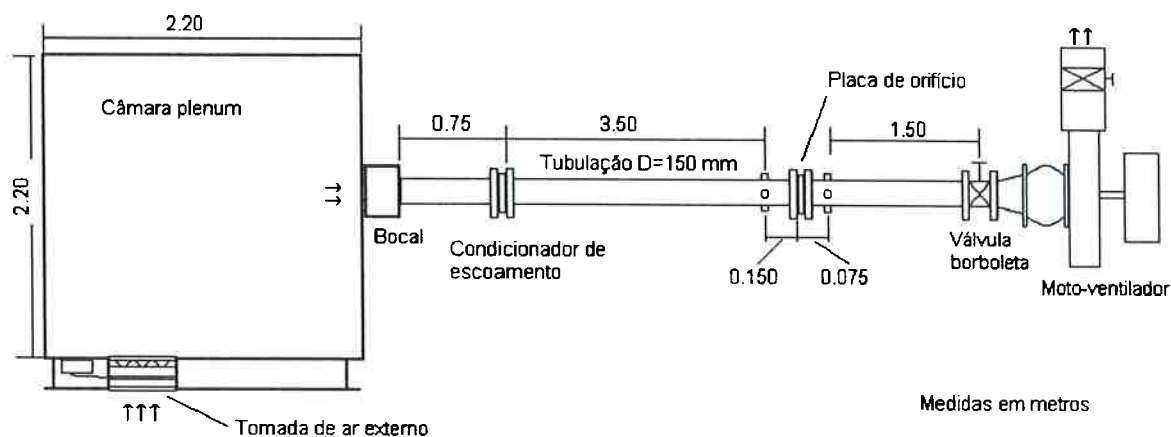


Figura 7.8: Distâncias de trechos retos no módulo experimental para medição de vazão

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.

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 (1990), 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 o bocal do módulo experimental adotou-se:  $r = 0,3 \times D$ .

Este bocal foi fabricado em resina poliéster 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. Para encaixar na Câmara plenum de simulação foi feito um rebaixo de modo a provocar uma concordância entre a face interna da câmara e a entrada do bocal, conforme foi apresentado na figura 7.5.

Nesta linha de escoamento foi instalado um condicionador de escoamento projetado e fabricado a partir da análise de 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 da peça do condicionador foi feita a partir de uma chapa de alumínio desbastada para obter formato circular. Os furos foram 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.

As tomadas de pressão para a placa de orifício 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 Tê", proposta por BLAKE (1976). Ela consiste em um tipo de anel piezométrico, onde em uma mesma seção são colocadas quatro tomadas de pressão espaçadas de 90°. Estas tomadas de pressão são ligadas duas a duas através de dois "Tês", e estes dois são conectados a um terceiro que oferece o valor da pressão a ser medido.

A 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.

O controle da vazão é realizado pelo acionamento de duas válvulas borboleta posicionadas em série. A válvula principal está localizada no final da tubulação do trecho entre a câmara e o ventilador, e a outra fica na tubulação de saída do ventilador. A combinação das duas permite um ajuste fino na seleção da condição de operação do sistema.

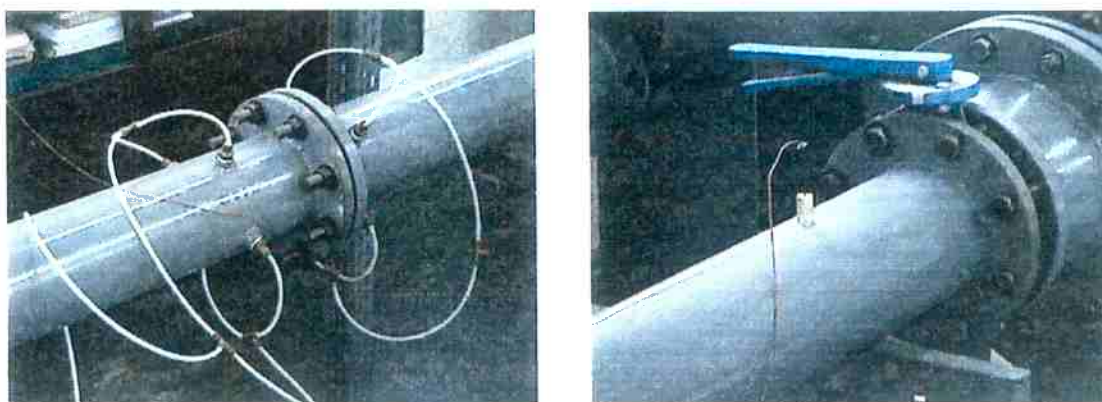


Figura 7.9: Na foto da esquerda estão as tomadas de pressão para a placa de orifício. Na foto da direita observa-se o termopar que faz a medição da temperatura no duto e a válvula borboleta principal.



## 7.5 Conjunto Motor-Ventilador

O ventilador possui as seguintes características:

- 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

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, possibilitando condições de operação alternativas.

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%.

## 7.6. Instrumentação

A seguir estão descritos os instrumentos utilizados no módulo experimental, e apresentadas as informações sobre o processo de calibração a que foram submetidos.

- Sensores de pressão

Na placa de orifício foram utilizados dois transdutores de pressão diferencial, identificados como nº 2 e nº 3, sendo que a diferença de pressão da placa foi avaliada pelo nº 2, e a pressão estática à montante da mesma, pelo nº 3. Para a medição dos valores da pressão atmosférica local foi utilizado o transdutor de pressão identificado pelo nº 5. Todos são do tipo capacitivos. A identificação dos mesmos e suas características metrológicas estão na tabela 7.1. A calibração dos transdutores 2 e 3 foi realizada comparativamente ao padrão de referência do laboratório de mecânica dos fluidos e está apresentada no anexo F. Para o transdutor nº 5 foi utilizada a curva de calibração original de fábrica, validada a partir de medições comparativas de pressão atmosférica simultâneas, feitas em relação ao medidor utilizado no IPT, que por sua vez estava calibrado.

Os transdutores de pressão eram alimentados através de uma fonte de corrente contínua HP modelo E 3617A, que fornece: 0 a 60 V, e 0 a 1 A.

- 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. As características destes sensores estão na tabela 7.1.

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-gelo mantida a 0° C. Para fins de verificação, um termômetro aferido acompanhava a temperatura da mistura durante as medições.

Os termopares foram calibrados em um banho termostático, utilizando padrões do Laboratório de Refrigeração do Departamento de Engenharia Mecânica da EPSUP, que estão rastreados ao Laboratório de Termometria do IPT. Os resultados deste processo de calibração está apresentado no anexo F.

GRANDEZA	INSTRUMENTO	FAIXA DE OPERAÇÃO	INCERTEZA SISTEMÁTICA
Pressão diferencial na placa de orifício	Transdutor nº 2 Transmitel, modelo: 1151DP3	0 a 7474 Pa (0 a 762 mm.c.a.)	± 0.5%
Pressão estática na placa de orifício	Transdutor nº 3 Transmitel, modelo: 1151DP3	0 a 7474 Pa (0 a 762 mm.c.a.)	± 0.5%
Pressão atmosférica	Transdutor nº 5 Smart, modelo: 1151AP5	0 a 106650 Pa (0 a 800 mm.Hg)	± 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 na tubulação - T4	Termopar J nº 4	0 a 50° C	0.75%

Tabela 7.1 – Identificação dos sensores de pressão e temperatura do módulo experimental, com as incertezas sistemáticas e faixa de operação

- Psicrômetro

Na determinação das propriedades físicas do ar, especialmente da massa específica, previu-se o uso de um psicrômetro de aspiração. Este equipamento foi fabricado dentro de um projeto específico desenvolvido no laboratório de Instrumentação em Mecânica dos Fluidos, conforme relatado em NAGUEISHI, M. N. e MARIANI, A. L. C. (1993). O projeto seguiu as recomendações da ASHRAE (1972).

Para operar de modo integrado ao sistema automático de medição foram utilizados os termopares nº 1 e nº 2, na leitura das temperaturas de bulbo seco (TBS) e úmido (TBU), respectivamente. Estes valores de temperatura eram tratados conjuntamente com o valor da pressão atmosférica local, para a obtenção dos parâmetros psicrométricos do ar.

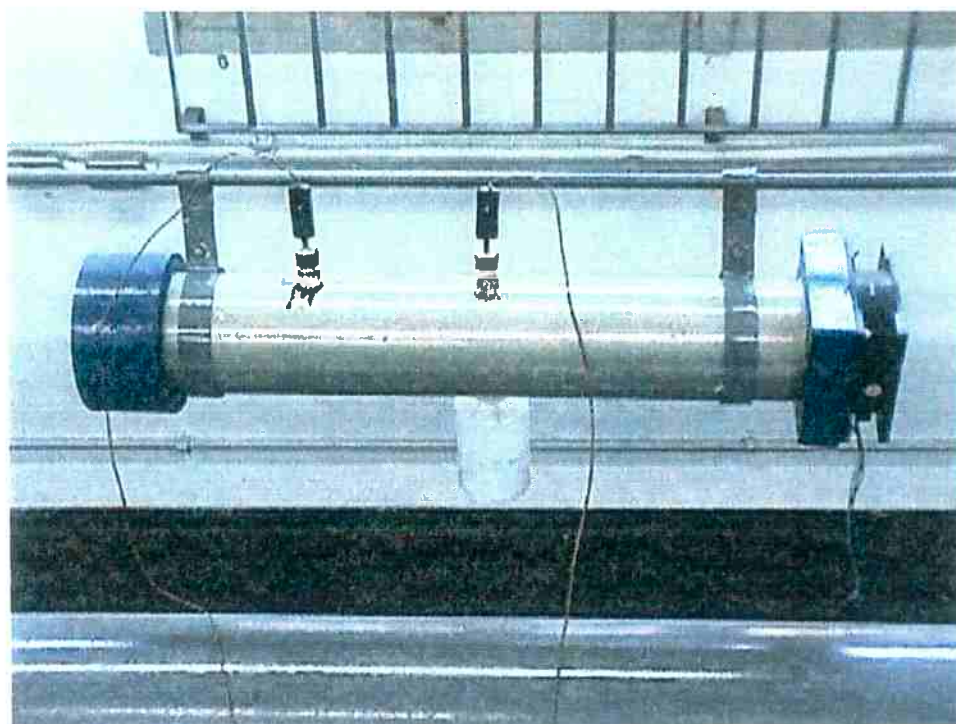


Figura 7.10 - Psicrômetro de aspiração com termopares.

- Medidor de vazão

A Placa de orifício adotada como padrão para a medição de vazão foi projetada 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.

Foi fabricada 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.

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 F3 do anexo F. 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.

Os valores obtidos nesta avaliação dimensional foram utilizados na determinação da coeficiente de descarga da placa de orifício, através da equação de Reader-Harris/Gallagher, proposta na ISO 5167 (1991) atualização de 1998.



Figura 7.11 – Vista geral da instrumentação e da tubulação onde é medida a vazão de ar.

### 7.7. Sistema de aquisição de dados

O sistema de leitura dos instrumentos, aquisição e registro dos dados utilizou um microcomputador tipo PC 386. Este sistema tem como objetivo medir as propriedades do ar no ambiente da sala do laboratório onde está o módulo experimental e nas condições do escoamento no interior da tubulação. Mede também os valores de pressão nos transdutores associados à placa de orifício e pressão atmosférica.

Para que o microcomputador possa acessar estas informações foram utilizados 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. Fabricação da Linx, modelo PCX 0802.
- 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. Fabricação da Linx, modelo CAD 12/36.

Para fazer a leitura e armazenamento dos dados foi desenvolvido programa específico para operar com o conversor A/D. Este programa, denominado CENTRAL2 está detalhado em MARIANI (1995), e 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. O programa foi atualizado para adequar-se aos ensaios desta pesquisa.

Os dados registrados em um arquivo foram tratados através de outro programa, chamado de PLINCERT, que apresentava os resultados acompanhados das respectivas incertezas combinadas. Os programas CENTRAL2 e PLINCERT foram desenvolvidos em linguagem Pascal.

O programa CENTRAL2 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, as médias das grandezas são calculados posteriormente, enquanto no outro modo os valores aquiridos e registrados já são médias representativas de determinado conjunto de dados.

O sistema monitor de pressão, que media pressões na grade sensora, foi acoplado a outro microcomputador, um PC com processador Pentium II, no qual era executado o programa MONITORAP. Este programa, segue metodologia similar ao do CENTRAL2 para a aquisição de dados, informando em tela os valores de pressão, e possibilitando definir quantas medidas poderiam compor cada valor médio a ser registrado no arquivo de dados a ser gerado.

Os arquivos de dados relativos à grade sensora multidirecional foram tratados em uma planilha de cálculo programada identificada como RFINAL. O programa desenvolvido para calcular os resultados medidos com a grade



sensora realiza os cálculos com os valores de DP medidos, e verificava as condições previstas no modelo matemático para selecionar que curvas e coeficientes adimensionais deveriam ser adotados em cada situação. As equações e condições lógicas deste programa foram testadas em vários ensaios e aperfeiçoadas. Assim é possível implantar este algoritmo em um equipamento informatizado, tornando a grade sensora multidirecional um instrumento inteligente.

A estrutura lógica do programa RFINAL está reproduzido em linguagem simplificada no anexo G. Na versão utilizada nesta pesquisa, ele recebe e integra nas suas planilhas os resultados gerados pelo PLINCERT, obtendo destes o valor da massa específica para o ar, dado auxiliar para seu processamento.

#### **7.8. Teste para avaliação de vazamentos no módulo experimental**

Para se certificar que as vazões de ar que são medidas na placa de orifício correspondem aos valores de vazão que são medidos na passagem curta onde está instalada a grade sensora multidirecional foi realizado um teste de vazamento do conjunto câmara plenum e tubulação.

Este teste de vazamento seguiu recomendações e teve seus resultados avaliados segundo critérios propostos pelo manual da SMACNA (1985) – HVAC *Air duct leakage test manual*. Ainda que não tenha sido possível reproduzir as condições de teste exatamente com é proposto nesta referência considera-se que a adaptação utilizada possibilita uma avaliação conclusiva do módulo experimental neste quesito.

Uma diferença foi que no módulo experimental, dadas as condições da instalação, o teste foi feito com depressões, ou seja pressões abaixo da atmosférica, enquanto na SMACNA está proposto que os ensaio seja realizados pressurizando-se o sistema. Outra característica distinta é que na SMACNA (1985) mede-se a vazão em condições de pressão constante, enquanto na proposta adotada foi avaliado o vazamento para diferentes condições de pressão.

O procedimento adotado no teste foi:

- a) Fechamento de todas as entradas do sistema associada ao módulo experimental. Foi colocada uma tampa com vedação em borracha na entrada da câmara de mistura simulada, conforme pode ser observado na figura 7.12.



Figura 7.12: Vista da câmara plenum preparada para teste de vazamento

- b) Estabelecimento de depressão no interior do sistema aproximadamente igual a  $P \cong -1765 \text{ Pa}$  ( $- 180 \text{ mm.c.a.}$ ), através do acionamento do ventilador e de abertura do registro borboleta da tubulação de aspiração do ventilador.

c) Após o fechamento da válvula, foi feita a medição do vazamento através da determinação do tempo subida da pressão no interior da câmara. A classe de pressão máxima considerada no teste é de 1471 Pa (150 mm.c.a.).

d) O tempo de subida da pressão no sistema é registrado para intervalos de variação de pressão de 196 Pa (20 mm.c.a.), contados a partir de 1373 Pa (140 mm.c.a.) até 196 Pa (20 mm.c.a.). São também anotados os valores para as condições de pressão e temperatura para o ar atmosférico.

Supondo o comportamento do ar como gás perfeito, foi estimada a vazão que infiltra na câmara para intervalos de 196 Pa (20 mm.c.a.). Os resultados médios para 4 ensaios foram calculados e estão apresentados na tabela 7.2. Nesta tabela são apresentados valores para a vazão de ar que infiltrado em função da condição de depressão, em termos de vazão em massa e em volume. A Smacna propõe que seja estimada uma vazão específica, isto é, por unidade de área, e que esta seja parametrizada utilizando a pressão efetiva a que é submetida a instalação, resultando em um coeficiente de vazamento CL para a instalação, calculado por uma expressão do tipo:

$$CL = \frac{Q}{S * (DP)^K}$$

onde:

CL é o coeficiente de vazamento

S é a área da superfície submetida ao teste

Q é a vazão volumétrica de vazamentos

DP é a diferença de pressão imposta ao sistema no teste

K é uma constante

DP (Pa)	DP (mmca)	Q <sub>m</sub> (kg/s)	Q <sub>pad</sub> (m <sup>3</sup> /s)	CL
- 1177	-120	0.00245	0.00203	0.55
- 981	- 100	0.00213	0.00177	0.54
- 785	- 80	0.00166	0.00138	0.48
- 589	- 60	0.00144	0.00119	0.50
- 392	- 40	0.00110	0.00091	0.50
- 196	- 20	0.00077	0.00064	0.55

Tabela 7.2: Resultados do ensaio de vazamento. DP é a diferença de pressão entre a câmara e o meio externo, e CL é o coeficiente de vazamento (SMACNA. 1985).

Observa-se que o valor para CL varia pouco, e sua média, CL= 0.52, representa bem o conjunto de ensaios. Analisando este resultado conforme propõe a norma, verifica-se que a estanqueidade do módulo experimental está acima da melhor classe de vazamento encontrada nas categorias apresentadas. Conforme os valores apresentados na tabela 4.1 do manual da SMACNA (1985), a categoria A, que possui a melhor condição de vedação, na qual devem ser utilizados produtos selantes nas juntas, nas costuras e nas paredes, o valor de CL deve ser menor que 3, quando submetidas a diferenças de pressão da ordem de 1000 Pa, 1500 Pa ou 2500 Pa.

Desta forma, pode-se afirmar que o módulo experimental, que teve cuidados especiais na sua construção e montagem, é estanque o suficiente para viabilizar os ensaios da grade sensora de modo adequado.

## **8. ENSAIOS PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO E DE VELOCIDADES NA SEÇÃO TRANSVERSAL DA PASSAGEM CURTA**

Os ensaios que aplicaram a grade sensora multifurada multidirecional em uma passagem curta com escoamento turbulento foram realizados no módulo experimental descrito no capítulo anterior, que está localizado no Laboratório de Instrumentação em Mecânica dos Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP.

### **8.1. Metodologia**

Os ensaios para medição de vazão e velocidade na passagem curta instalada no módulo experimental foram realizados com parâmetros já estabelecidos nesta pesquisa, empregados em outros testes, conforme foi visto em capítulos anteriores. Retomando alguns parâmetros importantes:

- Intervalo de vazão entre 200 e 640 L/s, tomado como vazão de referência, medida com medidor de vazão tipo coifa disponível. Definiu-se realizar medidas de 10 valores de vazão neste intervalo.
- Configurações estabelecidas para os acessórios instalados na tomada de ar externo, identificadas pelos números de 1 a 6, conforme tabela 8.1: Os ângulos associados ao registro, indicam a posição das lâminas em relação ao plano da face do filtro, de modo que a posição 30° foi a que ele esteve mais fechada e na de 90° ele estava totalmente aberto.

<b>Acessórios</b>	<b>Identificação da configuração</b>
Veneziana	1
Veneziana com filtro	2
Veneziana com filtro e registro posicionado a 60°	3
Veneziana com filtro e registro posicionado a 30°	4
Veneziana com filtro e registro posicionado a 45°	5
Veneziana com filtro e registro posicionado a 90°	6

Tabela 8.1: Identificação da configuração dos acessórios utilizados na tomada de ar externo para os ensaios realizados

Estes ensaios forneceram dados para avaliar como as sondas da grade sensora se comportam na interação com o escoamento turbulento. Os vetores de velocidade média foram determinados através do valor do seu módulo e do valor do ângulo em coordenadas polares. A vazão através da seção onde está a grade foi calculada a partir dos valores de velocidade integrados na área da seção transversal da passagem curta em que a grade estava posicionada.

Os resultados obtidos para o módulo da velocidade associada a planos  $xy$ ,  $v_{xy}$ , foram analisados utilizando os resultados das medições com anemômetro laser como referência. Os valores calculados para a vazão em massa através da grade multifurada multidirecional foram avaliados comparativamente com aqueles medidos com a placa de orifício, padrão disponível no módulo experimental.

## 8.2. Procedimento experimental

Os ensaios foram realizados obedecendo os seguintes procedimentos:

- a) Era instalada a configuração de acessórios na tomada de ar externo a ser testada. Fechada a câmara plenum, verificados os pontos de vedação no módulo experimental

- b) A instrumentação era colocada em operação, tomados os cuidados com os valores de referência para temperatura, junta fria com água e gelo a 0°C, e para pressão no sistema monitor de pressão. Como estes sensores de pressão trabalham com diferenças de pressões muito pequenas, havia a espera de um tempo para estabilização dos sinais de resposta, inclusive considerando a compensação de temperatura interna. Antes do acionamento do ventilador, era ajustado o zero para todos os sensores de pressão do sistema monitor.
- c) O conjunto motor-ventilador era acionado, e após entrar em regime passava-se a abrir as válvulas borboleta de modo a encontrar a vazão de referência ( $Q_{ref}$ ) pré-estabelecida, e avaliada com o medidor tipo coifa posicionado na tomada de ar externo
- d) Os microcomputadores mostravam em tela valores para os parâmetros. O sistema de aquisição de dados, operado através do programa CENTRAL2, instalado no microcomputador PC 386, indicava em tela medidas de parâmetros psicrométricos e da vazão na placa de orifício. Quando acionado o comando de registro, o programa gerava um arquivo de dados, onde cada um destes era uma média de 3000 valores lidos. Este número foi adotado em função da taxa de aquisição, menor que 1 kHz. O sistema monitor de pressão, conectado a um microcomputador Pentium II, apresentava na tela valores de pressão em cada um dos sensores, através do programa MONITORAP. Neste caso, a taxa de aquisição de dados era baixa, sendo que um conjunto de valores era recebido a cada 150 ms. Ao acionar o comando de gravação, os dados, também médias de valores

aquistados, eram remetidos para um arquivo tipo texto. Cada arquivo continha 30 valores por parâmetro.

- e) Estabelecida a condição de regime permanente, os operadores geravam arquivos de dados simultaneamente nos dois microcomputadores.
- f) Alterava-se a vazão através das válvulas e repetia-se o procedimento para registro de dados.



Figura 8.1: Uso do medidor de vazão tipo coifa para acerto da vazão de referência em ensaio

### 8.3 Procedimentos para tratamento dos dados

Os arquivos de dados da placa de orifício, gerados pelo programa CENTRAL2 eram tratados pelo programa PLINCERT, que apresentava os resultados no formato de arquivo texto. Os criados pelo MONITORAP eram importados por uma pasta do Excel na qual eram executados os procedimentos propostos pelo RFINAL. O arquivo gerado pelo PLINCERT, também era incorporado em uma planilha dentro da mesma pasta do Excel.

O programa PLINCERT a partir do arquivo de dados, realizou os cálculos da vazão em volume ( $Q_{placa}$ ) nas condições de pressão e temperatura



do escoamento, da vazão em massa correspondente ( $Q_{m\_placa}$ ), da velocidade média no conduto ( $V_{tub}$ ), da viscosidade dinâmica do ar ( $\mu$ ), do número de Reynolds ( $Re_y$ ), do coeficiente de compressibilidade ( $E_1$ ), e do coeficiente de descarga da placa ( $C_{placa}$ ). Os parâmetros psicrométricos já haviam sido calculado durante o processo de aquisição de dados pelo programa CENTRAL2, conforme já havia sido citado. Todos os valores foram apresentados em uma tabela final acompanhados de suas respectivas incertezas combinadas.

Os valores das incertezas sistemáticas associadas à instrumentação estão incorporados nos programas PLINCERT e RFINAL. O equacionamento empregado no cálculo das incertezas foi desenvolvido para cada uma das grandezas e está apresentado no anexo H.

Os programas de computador utilizados foram elaborados em a linguagem Turbo Pascal e em planilhas de cálculo do Excel.

Os arquivos de resultados foram consolidados em pastas com planilhas de cálculo do aplicativo Excel, 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 elaborados os gráficos entre as variáveis de interesse, com representação das incertezas, da equação do ajuste com interpolações adequadas, e respectivo coeficiente de correlação.

As principais equações utilizadas para os cálculos de vazão com a placa de orifício, foram obtidas na norma ISO 5167 (1990) e estão a seguir apresentadas:

$$Q_{placa} = \varepsilon_1 \frac{C_d}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2 DP_{placa}}{\rho_1}} \quad (8.1)$$

sendo o coeficiente de compressibilidade dado por:

$$\varepsilon_1 = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{DP_{placa}}{1.4 P_1} \quad (8.2)$$

O coeficiente de descarga  $C_d$  foi calculado por um processo iterativo dentro do programa PLINCERT utilizando a equação de Reader-Harris/Gallagher, considerando-se que as tomadas de pressão eram do tipo D e D/2:

$$\begin{aligned} C_d = & 0.5961 + 0.261\beta^8 + \\ & + 0.000521 \left( \frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063A) \beta^{3.5} \left( \frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.3} + \\ & + (0.043 + 0.080e^{-10L_1} - 0.123e^{-7L_1})(1 - 0.11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} + \\ & - 0.0031(M'_2 - 0.8M'_2{}^{1.1}) \beta^{1.3} \end{aligned} \quad (8.3)$$

onde  $\beta = d/D$

$$L_1 = 1$$

$$M'_2 = \frac{2L'_2}{1-\beta}$$

$Re_D$  = número de Reynolds em função do diâmetro da tubulação

$$L'_2 = 0,47$$

$$A = \left( \frac{19000}{Re_D} \right)^{0.8}$$

#### 8.4 Resultados para medição de vazão

Os resultados completos dos ensaios realizados no módulo experimental para cada configuração, estão apresentados no anexo E, em tabelas numeradas de E.1 a E.66.

A tabela 8.2 a seguir identifica as condições estabelecidas em cada ensaio com grade sensora multidirecional e a localização dos resultados no anexo E.

Identificação de tabela no anexo E	Configuração do ensaio	Vazão de referência (L/s)	Identificação de tabela no anexo E	Configuração do ensaio	Vazão de referência (L/s)
E.1	1	200	E.31	4	200
E.2	1	250	E.32	4	250
E.3	1	300	E.33	4	300
E.4	1	350	E.34	4	350
E.5	1	400	E.35	4	400
E.6	1	450	E.36	4	450
E.7	1	500	E.37	4	500
E.8	1	550	E.38	4	550
E.9	1	600	E.39	4	600
E.10	1	640	E.40	4	640
E.11	2	200	E.41	5	200
E.12	2	250	E.42	5	250
E.13	2	300	E.43	5	300
E.14	2	350	E.44	5	350
E.15	2	400	E.45	5	400
E.16	2	450	E.46	5	450
E.17	2	500	E.47	5	500
E.18	2	550	E.48	5	550
E.19	2	600	E.49	5	600
E.20	2	640	E.50	5	640
E.21	3	200	E.51	6	200
E.22	3	250	E.52	6	250
E.23	3	300	E.53	6	300
E.24	3	350	E.54	6	350
E.25	3	400	E.55	6	400
E.26	3	450	E.56	6	450
E.27	3	500	E.57	6	500
E.28	3	550	E.58	6	550
E.29	3	600	E.59	6	600
E.30	3	640	E.60	6	640

Tabela 8.2: Relação de tabelas com resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, identificadas a configuração de ensaio

A tabela 8.3 relaciona a localização dos resultados medidos com a placa de orifício no anexo E, para os ensaios realizados no módulo experimental.

<b>Identificação de tabela no anexo E</b>	<b>Configuração do ensaio</b>	<b>Faixa de vazão de referência (L/s)</b>
E.61	1	200 a 640
E.62	2	200 a 640
E.63	3	200 a 640
E.64	4	200 a 640
E.65	5	200 a 640
E.66	6	200 a 640

Tabela 8.3: Relação de tabelas com resultados de valores medidos para determinação da vazão de ar com placa de orifício.

Os resumos dos resultados comparando valores de vazão medidos com o protótipo da grade sensora e a placa de orifício foram agrupados segundo cada de configuração testada e estão nas tabelas 8.4 a 8.9 a seguir. Para cada conjunto de resultados, que está associado a uma configuração, foi feita uma representação gráfica e ajustada uma curva através de regressões lineares. Estes ajustes estão apresentados conjuntamente com os gráficos nas figuras de 8.2 a 8.7.

Os dados das configurações 3, 4, 5 e 6, todas com veneziana, filtro e registro, porém com o registro em diferentes ângulos de abertura foram agrupados e ajustados segundo a reta apresentada na figura 8.8.

Nas tabelas estão os valores das principais grandezas envolvidas nos testes, acompanhados de suas respectivas incertezas combinadas,.

A partir dos valores do coeficiente de correlação foi avaliada a adequação do ajuste selecionado aos resultados.

Ensaio	$Q_{ref}$	$Q_{m\_placa}$	+/- inc	$Q_{m\_grade}$	+/- inc
	(L/s)	(kg/s)		(kg/s)	
1	200	0.206	0.003	0.191	0.007
2	250	0.241	0.004	0.237	0.008
3	300	0.284	0.004	0.258	0.009
4	350	0.344	0.005	0.327	0.011
5	400	0.374	0.006	0.361	0.013
6	450	0.429	0.007	0.406	0.014
7	500	0.489	0.007	0.467	0.017
8	550	0.537	0.008	0.503	0.018
9	600	0.592	0.009	0.538	0.020
10	640	0.632	0.010	0.578	0.022

Legenda:

$Q_{ref}$  = Vazão de referência (medidor tipo coifa)

$Q_{m\_placa}$  = Vazão em massa na placa de orifício

$Q_{m\_grade}$  = Vazão em massa na grade sensora multidirecional

+/- inc = incerteza combinada da variável

Tabela 8.4: Resumo de resultados comparando a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 1- veneziana.

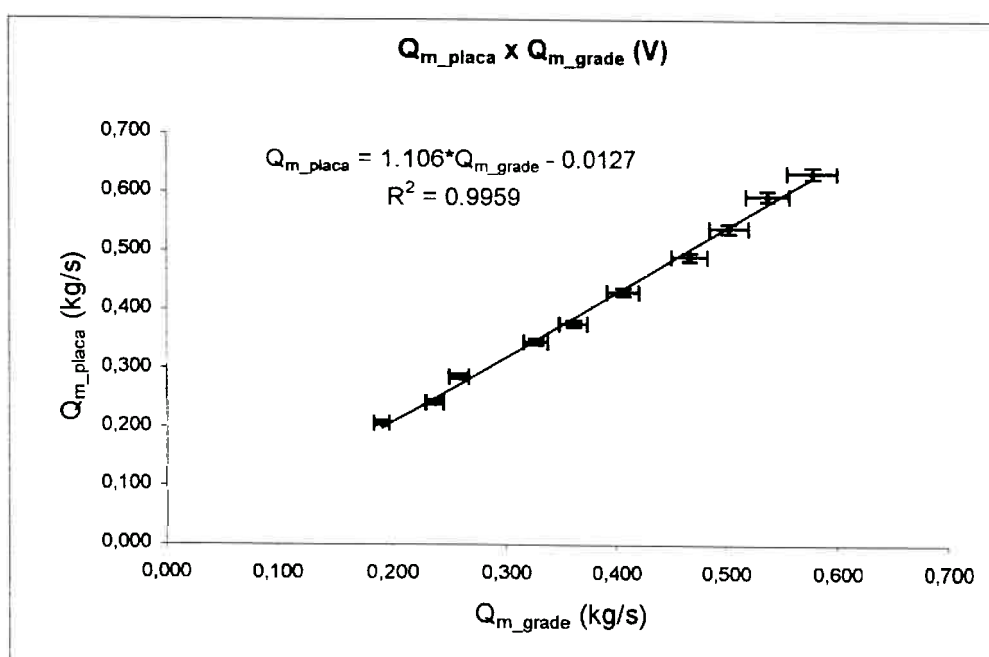


Figura 8.2: Gráfico dos valores da tabela 8.4. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 1 - veneziana.

Ensaio	$Q_{ref}$	$Q_{m\_placa}$	+/- inc	$Q_{m\_grade}$	+/- inc
	(L/s)	(kg/s)		(kg/s)	
1	200	0.203	0.003	0.189	0.006
2	250	0.243	0.004	0.218	0.007
3	300	0.291	0.004	0.261	0.009
4	350	0.331	0.005	0.290	0.010
5	400	0.375	0.006	0.344	0.011
6	450	0.436	0.007	0.380	0.013
7	500	0.481	0.007	0.425	0.014
8	550	0.541	0.008	0.472	0.016
9	600	0.597	0.009	0.515	0.018
10	640	0.634	0.010	0.548	0.020

Legenda:

$Q_{ref}$  = Vazão de referência (medidor tipo coifa)

$Q_{m\_placa}$  = Vazão em massa na placa de orifício

$Q_{m\_grade}$  = Vazão em massa na grade sensora multidirecional

+/- inc = incerteza combinada da variável

Tabela 8.5: Resumo de resultados comparando a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 2- veneziana e filtro.

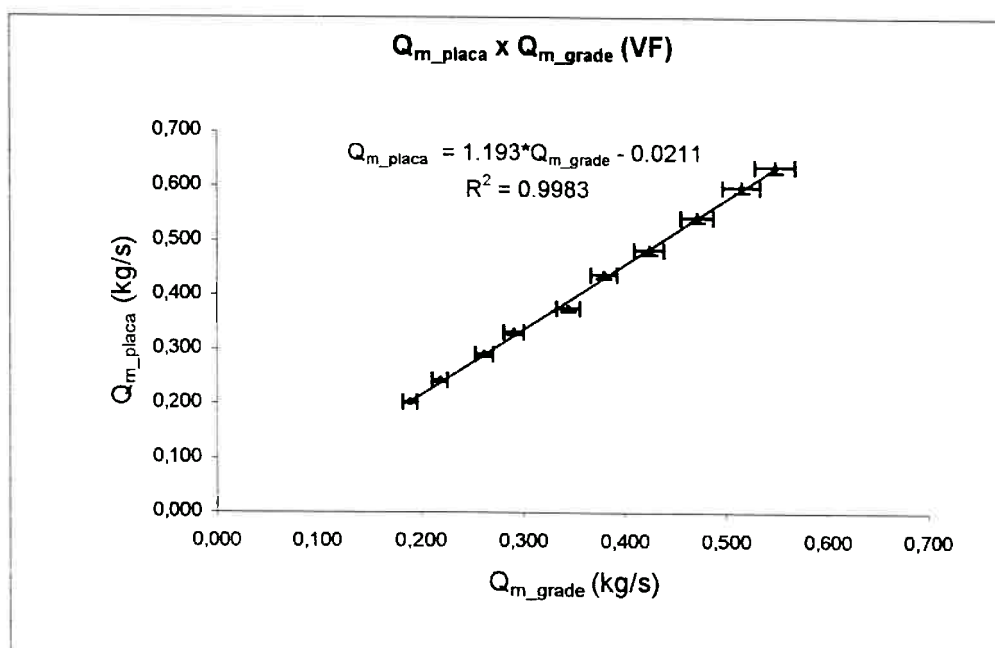


Figura 8.3: Gráfico dos valores da tabela 8.4. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 2 – veneziana e Filtro.

Ensaio	$Q_{ref}$	$Q_{m\_placa}$	+/- inc	$Q_{m\_grade}$	+/- inc
	(L/s)	(kg/s)		(kg/s)	
1	200	0.204	0.003	0.154	0.005
2	250	0.246	0.004	0.216	0.007
3	300	0.285	0.004	0.247	0.008
4	350	0.329	0.005	0.270	0.009
5	400	0.367	0.006	0.314	0.010
6	450	0.428	0.007	0.358	0.012
7	500	0.491	0.007	0.411	0.014
8	550	0.544	0.008	0.462	0.015
9	600	0.588	0.009	0.498	0.016
10	640	0.633	0.010	0.537	0.018

Legenda:

$Q_{ref}$  = Vazão de referência (medidor tipo coifa)

$Q_{m\_placa}$  = Vazão em massa na placa de orifício

$Q_{m\_grade}$  = Vazão em massa na grade sensora multidirecional

+/- inc = incerteza combinada da variável

Tabela 8.6: Resumo de resultados comparando a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 3 – veneziana, filtro e registro 60°.

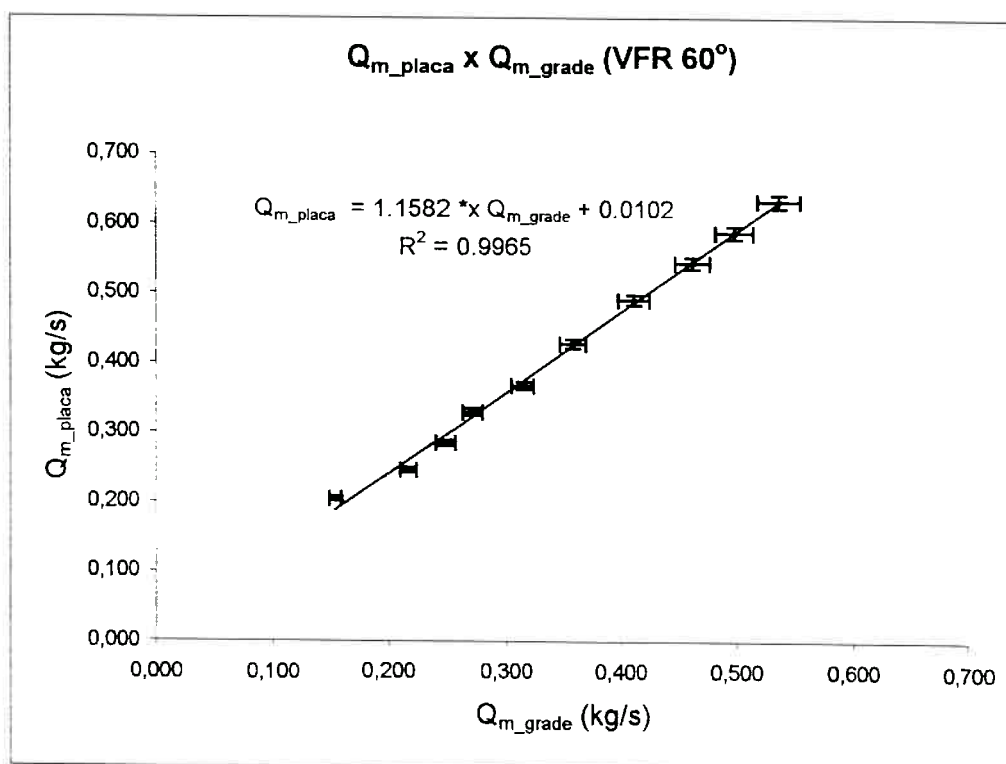


Figura 8.4: Gráfico dos valores da tabela 8.4. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 3 – veneziana, filtro e registro 60°.

Ensaio	$Q_{ref}$	$Q_{m\_placa}$	+/- inc	$Q_{m\_grade}$	+/- inc
	(L/s)	(kg/s)		(kg/s)	
1	200	0.204	0.003	0.165	0.005
2	250	0.241	0.004	0.218	0.007
3	300	0.288	0.004	0.257	0.008
4	350	0.332	0.005	0.296	0.009
5	400	0.373	0.006	0.321	0.010
6	450	0.426	0.007	0.363	0.012
7	500	0.493	0.008	0.418	0.013
8	550	0.538	0.008	0.464	0.015
9	600	0.588	0.009	0.483	0.016
10	640	0.630	0.010	0.474	0.016

Legenda:

$Q_{ref}$  = Vazão de referência (medidor tipo coifa)

$Q_{m\_placa}$  = Vazão em massa na placa de orifício

$Q_{m\_grade}$  = Vazão em massa na grade sensora multidirecional

+/- inc = incerteza combinada da variável

Tabela 8.7: Resumo de resultados comparando a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 4 – veneziana, filtro e registro 30°.

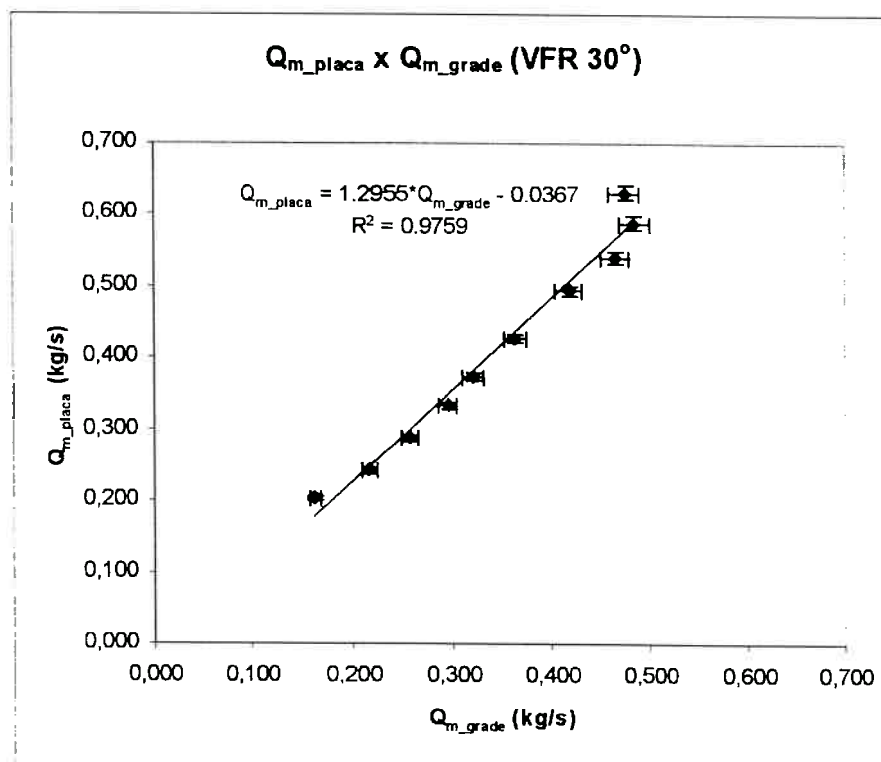


Figura 8.5: Gráfico dos valores da tabela 8.4. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 4 - veneziana, filtro e registro 30°.



Ensaio	$Q_{ref}$ (L/s)	$Q_{m\_placa}$ (kg/s)	+/- inc	$Q_{m\_grade}$ (kg/s)	+/- inc
1	200	0.198	0.003	0.171	0.005
2	250	0.240	0.004	0.205	0.007
3	300	0.289	0.004	0.238	0.008
4	350	0.332	0.005	0.260	0.008
5	400	0.373	0.006	0.300	0.010
6	450	0.423	0.006	0.324	0.010
7	500	0.490	0.007	0.392	0.013
8	550	0.538	0.008	0.437	0.014
9	600	0.593	0.009	0.485	0.016
10	640	0.629	0.010	0.523	0.018

Legenda:

$Q_{ref}$  = Vazão de referência (medidor tipo coifa)

$Q_{m\_placa}$  = Vazão em massa na placa de orifício

$Q_{m\_grade}$  = Vazão em massa na grade sensora multidirecional

+/- inc = incerteza combinada da variável

Tabela 8.8: Resumo de resultados comparando a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 5 - veneziana, filtro e registro 45°.

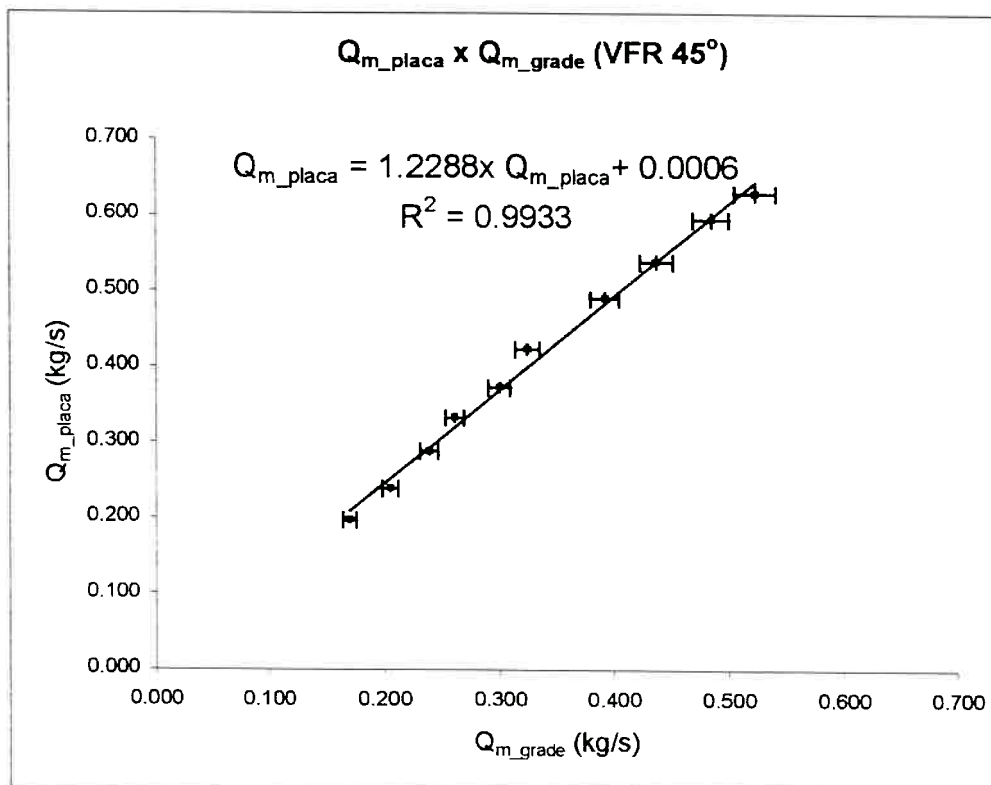


Figura 8.6: Gráfico dos valores da tabela 8.8. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 5 - veneziana, filtro e registro 45°.

Ensaio	$Q_{ref}$	$Q_{m\_placa}$	+/- inc	$Q_{m\_grade}$	+/- inc
	(L/s)	(kg/s)		(kg/s)	
1	200	0.206	0.003	0.173	0.006
2	250	0.242	0.004	0.204	0.007
3	300	0.287	0.004	0.254	0.008
4	350	0.328	0.005	0.275	0.009
5	400	0.371	0.006	0.320	0.011
6	450	0.435	0.007	0.390	0.013
7	500	0.484	0.007	0.431	0.015
8	550	0.540	0.008	0.461	0.016
9	600	0.597	0.009	0.487	0.016
10	640	0.635	0.010	0.553	0.020

Legenda:

$Q_{ref}$  = Vazão de referência (medidor tipo coifa)

$Q_{m\_placa}$  = Vazão em massa na placa de orifício

$Q_{m\_grade}$  = Vazão em massa na grade sensora multidirecional

+/- inc = incerteza combinada da variável

Tabela 8.9: Resumo de resultados comparando a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 6 - veneziana, filtro e registro 90°.

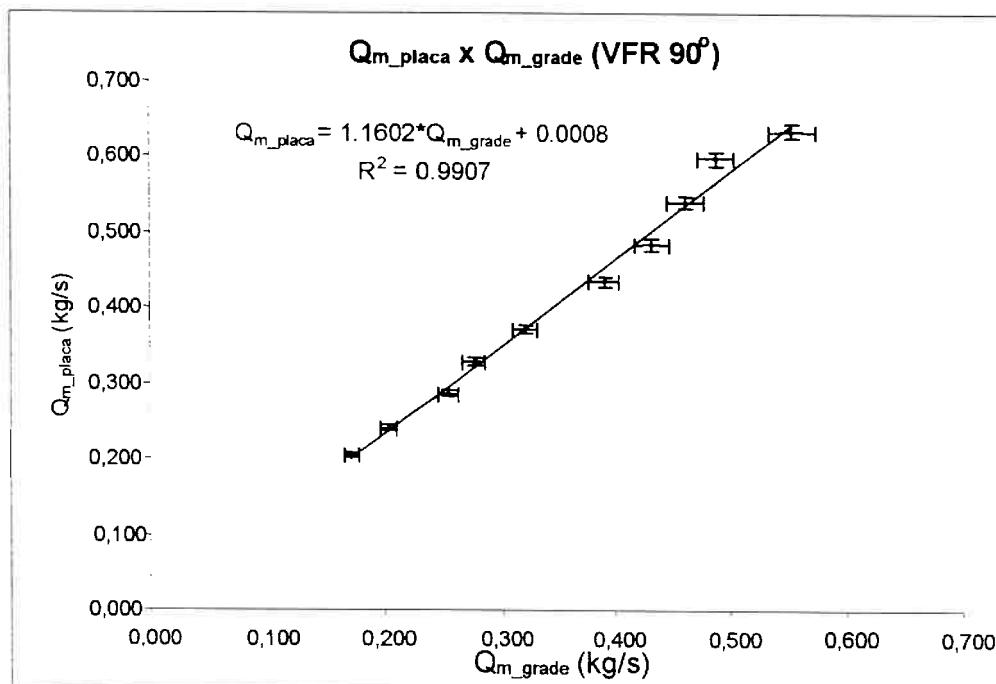


Figura 8.7: Gráfico dos valores da tabela 8.9. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 6 - veneziana, filtro e registro 90°.

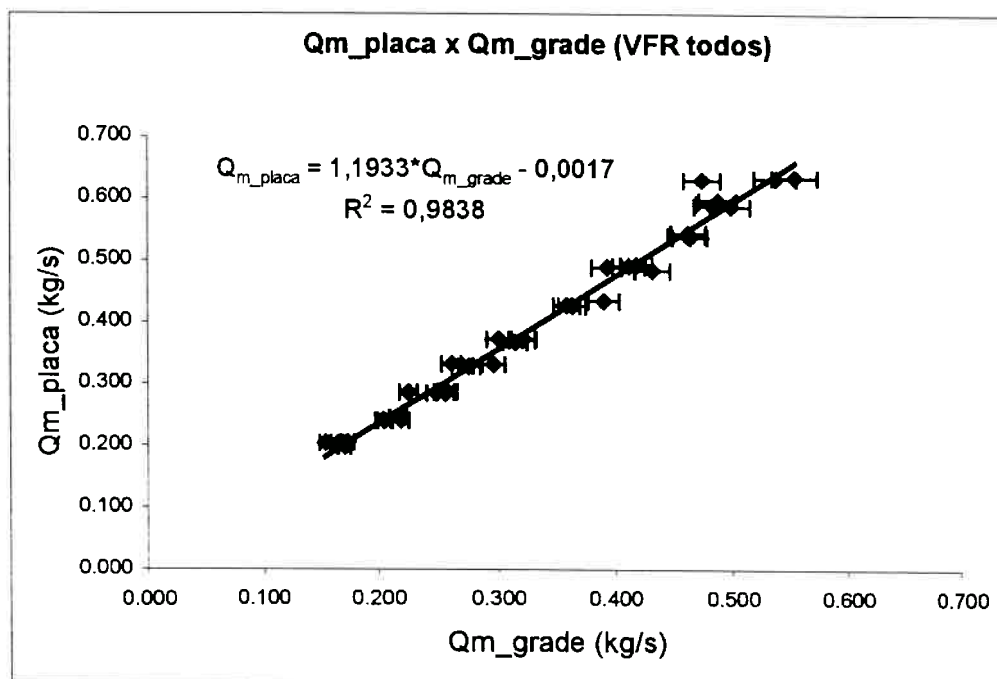


Figura 8.8: Gráfico dos valores das tabelas 8.6 a 8.9. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: veneziana, filtro e registro em 4 posições de ângulos.

### 8.5. Resultados para medição de velocidade

Os resultados de velocidade obtidos para cada sonda que compõe a grade sensora multidirecional, estão apresentados nas tabelas do anexo E. Estes resultados representam o valor de uma velocidade média na região onde a sonda foi posicionada, pois a sonda multifurada recebe a contribuição de várias velocidades pertencentes a planos **xy** paralelos ao longo de seu comprimento, alinhado com a direção **z**.

Estas orientações são as mesmas adotadas na figura 3.7, quando foram feitas medidas do campo de velocidades com o anemômetro laser.

Para avaliar comparativamente os resultados de velocidades medidas por cada sonda com o anemômetro laser, foram organizadas as tabelas 8.10 a 8.19.

Ainda que as vazões adotadas nos ensaios para a medição do campo de velocidades com laser, no túnel do IPT, não são exatamente iguais às utilizadas nos ensaios no módulo experimental da EPUSP, procurou-se relacionar os valores próximos para que a comparação fosse adequada.

Tomando-se as configurações 1, 2 e 3, foram separados nas tabelas, os valores de velocidade nos pontos que correspondiam à posição de cada sonda. Por exemplo, os pontos 4, 8 e 12, adotados na medição com laser, correspondem à sonda A, os pontos 3, 7 e 11 à sonda B e assim por diante sucessivamente. As velocidades resultantes  $V_{xy}$  medidas em cada 3 pontos foram relacionadas através de um valor médio,  $V_{xy}$  médio. Este valor médio foi comparado com a velocidade média determinada pela sonda da grade.

Da mesma forma foram comparados os ângulos do vetor  $v_{xy}$  em um sistema de polares, determinados através das medições apresentadas no capítulo 3 e as medições realizadas com a grade sensora.

Os vetores de velocidade média  $V_{xy}$  associados aos ângulos  $\alpha$  determinam perfis de velocidades no plano  $xy$ , com os resultados do anemômetro laser e da grade sensora multidirecional. Gráficos foram traçados para cada uma das condições de vazão e de configuração dos dados das tabelas 8.10 a 8.19.. Estes gráficos apresentam o perfil de velocidades das medições com anemômetro laser em vermelho e da grade sensora multidirecional em azul, nas figuras 8.9 a 8.17.

	Medições com Anem. Laser *				Med. Grade**		Medições com Anem. Laser				Med. Grade	
	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	Vxy <sub>médio</sub> (m/s)	V <sub>grade</sub> (m/s)	Diferença (%)	α (graus)	α (graus)	α (graus)	α <sub>médio</sub> (graus)	α <sub>grade</sub> (graus)	Diferença (%)
Pontos 4, 8 e 12	3.4	2.5	2.3	2.7	4.4	-63.8	26	26	21	24	21	14.0
Pontos 3, 7 e 11	4.2	4.1	4.0	4.1	4.1	1.1	47	42	41	43	38	12.8
Pontos 2, 6 e 10	4.6	4.6	4.9	4.7	3.6	23.3	51	48	46	48	40	17.5
Pontos 1, 5 e 9	0.5	0.6	0.7	0.6	0.5	17.8	113	189	192	165	0	100.0

\*Ensaio adotado: V5XY

\*\*Ensaio adotado: V300

Tabela 8.10: Comparação de resultados para valores médios de velocidade, Vxy e ângulos α, medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 1 = veneziana. Vazão de referência: 300 L/s

	Medições com Anem. Laser *				Med. Grade**		Medições com Anem. Laser				Med. Grade	
	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	Vxy <sub>médio</sub> (m/s)	V <sub>grade</sub> (m/s)	Diferença (%)	α (graus)	α (graus)	α (graus)	α <sub>médio</sub> (graus)	α <sub>grade</sub> (graus)	Diferença (%)
Pontos 4, 8 e 12	3.3	3.1	2.1	2.9	4.1	-42.8	20	27	20	22	20	12.6
Pontos 3, 7 e 11	3.6	2.9	3.0	3.1	3.1	0.2	42	35	35	38	30	19.3
Pontos 2, 6 e 10	4.6	4.5	5.9	5.0	4.3	14.2	40	35	41	39	37	4.9
Pontos 1, 5 e 9	1.1	1.3	1.9	1.4	0.9	39.3	348	151	99	199	0	100.0

\*Ensaio adotado: V11XY

\*\*Ensaio adotado: VF300

Tabela 8.11: Comparação de resultados para valores médios de velocidade, Vxy e ângulos α, medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 2 = veneziana e filtro. Vazão de referência: 300 L/s.

	Medições com Anem. Laser *				Med. Grade **		Medições com Anem. Laser				Med. Grade	
	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	V <sub>grade</sub> (m/s)	Diferença (%)	α (graus)	α (graus)	α (graus)	α (graus)	α <sub>sonda</sub> (graus)	Diferença (%)
Pontos 4, 8 e 12	2.7	2.8	2.2	2.6	3.5	-37.2	21	29	17	22	17	22.1
Pontos 3, 7 e 11	3.7	3.0	3.0	3.2	3.0	6.9	44	34	36	38	28	25.4
Pontos 2, 6 e 10	4.4	4.5	5.2	4.7	3.6	23.6	42	32	32	35	30	16.0
Pontos 1, 5 e 9	0.1	1.3	0.7	0.7	1.1	-56.8	99	134	133	122	0	100.0

\*Ensaio adotado: V15XY

\*\*Ensaio adotado: VFR300

Tabela 8.12: Comparação de resultados para valores médios de velocidade, Vxy e ângulos α, medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 3 = veneziana, filtro e registro 60°. Vazão de referencia 300 L/s.

	Medições com Anem. Laser *				Med. Grade **		Medições com Anem. Laser				Med. Grade	
	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	V <sub>grade</sub> (m/s)	Diferença (%)	α (graus)	α (graus)	α (graus)	α (graus)	α <sub>sonda</sub> (graus)	Diferença (%)
Pontos 4, 8 e 12	4.0	3.0	3.5	3.5	5.5	-58.3	26	25	17	23	21	5.7
Pontos 3, 7 e 11	5.0	5.0	4.9	5.0	5.0	0.1	48	40	43	44	39	10.5
Pontos 2, 6 e 10	5.4	5.5	5.9	5.6	4.6	18.5	51	48	45	48	40	17.8
Pontos 1, 5 e 9	0.5	0.8	0.8	0.7	0.9	-31.2	126	188	189	168	0	100.0

\*Ensaio adotado: V6XY

\*\*Ensaio adotado: V350

Tabela 8.13: Comparação de resultados para valores médios de velocidade, Vxy e ângulos α, medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 1 = veneziana. Vazão de referencia: 370 L/s

	Medições com Anem. Laser *					Med. Grade**		Medições com Anem. Laser					Med. Grade		
	Vxy	Vxy	Vxy	Vxy	Vxy <sub>medio</sub>	V <sub>grade</sub>	Diferença	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	Diferença
	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(%)	(graus)	(graus)	(graus)	(graus)	(graus)	(graus)	(graus)	(%)
Pontos 4, 8 e 12	4.1	4.2	2.9	2.9	3.7	4.6	-21.7	20	28	21	23	19	14.6		
Pontos 3, 7 e 11	4.6	3.8	4.1	4.1	4.1	3.7	9.9	42	35	37	38	30	21.1		
Pontos 2, 6 e 10	6.2	6.0	7.8	7.8	6.7	4.9	26.9	42	37	42	40	37	7.4		
Pontos 1, 5 e 9	1.3	1.9	2.7	2.7	2.0	0.6	67.0	353	146	95	198	0	100.0		

\*Ensaio adotado: V12XY

\*\*Ensaio adotado: VF350

Tabela 8.14: Comparação de resultados para valores médios de velocidade, Vxy e ângulos  $\alpha$ , medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 2 = veneziana e filtro. Vazão de referencia: 370 L/s.

	Medições com Anem. Laser *					Med. Grade**		Medições com Anem. Laser					Med. Grade	
	Vxy	Vxy	Vxy	Vxy	Vxy <sub>medio</sub>	V <sub>grade</sub>	Diferença	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$	Diferença
	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(%)	(graus)	(graus)	(graus)	(graus)	(graus)	(graus)	(%)
Pontos 4, 8 e 12	3.3	3.6	2.7	2.7	3.2	4.0	-25.7	19	30	17	22	19	15.8	
Pontos 3, 7 e 11	4.8	3.7	3.8	3.8	4.1	3.4	15.9	42	35	36	38	27	27.3	
Pontos 2, 6 e 10	5.9	5.7	6.3	6.3	6.0	4.0	32.4	41	35	32	36	29	19.7	
Pontos 1, 5 e 9	0.3	1.5	1.2	1.2	1.0	0.8	24.9	17	129	87	78	0	100.0	

\*Ensaio adotado: V16XY

\*\*Ensaio adotado: VFR350

Tabela 8.15: Comparação de resultados para valores médios de velocidade, Vxy e ângulos  $\alpha$ , medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 3 = veneziana, filtro e registro 60°. Vazão de referencia: 370 L/s.

	Medições com Anem. Laser *				Med. Grade**		Medições com Anem. Laser				Med. Grade	
	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	Vxy <sub>médio</sub> (m/s)	V <sub>grade</sub> (m/s)	Diferença (%)	α (graus)	α (graus)	α (graus)	α <sub>médio</sub> (graus)	α <sub>grade</sub> (graus)	Diferença (%)
Pontos 4, 8 e 12	5.6	3.8	3.3	4.2	8.3	-95.8	26	24	21	24	21	8.8
Pontos 3, 7 e 11	6.5	6.7	6.5	6.6	7.2	-9.4	47	41	43	44	40	7.6
Pontos 2, 6 e 10	6.8	6.8	7.6	7.1	6.8	4.2	50	50	44	48	41	14.7
Pontos 1, 5 e 9	0.7	1.0	1.1	0.9	0.9	4.9	136	190	194	173	0	100.0

\*Ensaio adotado: V7XY  
\*\*Ensaio adotado: V500

Tabela 8.16: Comparação de resultados para valores médios de velocidade, Vxy e ângulos α, medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 1 = veneziana. Vazão de referência: 510 L/s.

	Medições com Anem. Laser *				Med. Grade**		Medições com Anem. Laser				Med. Grade	
	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	Vxy <sub>médio</sub> (m/s)	V <sub>grade</sub> (m/s)	Diferença (%)	α (graus)	α (graus)	α (graus)	α <sub>médio</sub> (graus)	α <sub>grade+L42</sub> (graus)	Diferença (%)
Pontos 4, 8 e 12	5.2	4.9	3.9	4.7	6.6	-41.4	19	25	19	21	19	10.0
Pontos 3, 7 e 11	6.1	4.7	5.4	5.4	5.7	-6.2	43	34	37	38	33	13.4
Pontos 2, 6 e 10	7.4	7.7	10.0	8.4	7.2	13.4	41	39	44	41	37	9.5
Pontos 1, 5 e 9	1.8	2.3	3.5	2.5	0.8	68.8	334	154	94	194	0	100.0

\*Ensaio adotado: V13XY  
\*\*Ensaio adotado: VF500

Tabela 8.17: Comparação de resultados para valores médios de velocidade, Vxy e ângulos α, medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 2 = veneziana e filtro. Vazão de referência: 510 L/s.



	Medições com Anem. Laser *				Med. Grade**		Medições com Anem. Laser				Med. Grade	
	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	Vxy (m/s)	Vxy <sub>médio</sub> (m/s)	V <sub>grade</sub> (m/s)	Diferença (%)	$\alpha$ (graus)	$\alpha$ (graus)	$\alpha$ (graus)	$\alpha$ (graus)	$\alpha_{grade}$ (graus)	Diferença (%)
Pontos 4, 8 e 12	4.3	1.7	3.5	3.1	6.4	-102.7	57	52	16	42	19	54.8
Pontos 3, 7 e 11	5.1	7.2	6.3	6.2	5.5	10.6	59	38	38	45	31	31.7
Pontos 2, 6 e 10	7.8	7.7	8.5	8.0	6.5	18.3	42	38	37	39	32	17.3
Pontos 1, 5 e 9	1.3	1.3	1.2	1.3	0.7	43.4	38	57	78	58	0	100.0

\*Ensaio adotado: V10XY

\*\*Ensaio adotado: VFR500

Tabela 8.18: Comparação de resultados para valores médios de velocidade, Vxy e ângulos  $\alpha$ , medidos com anemômetro laser e sondas da grade sensora. Configuração de ensaio: 3 = veneziana, filtro e registro 60°. Vazão de referencia: 510 L/s.

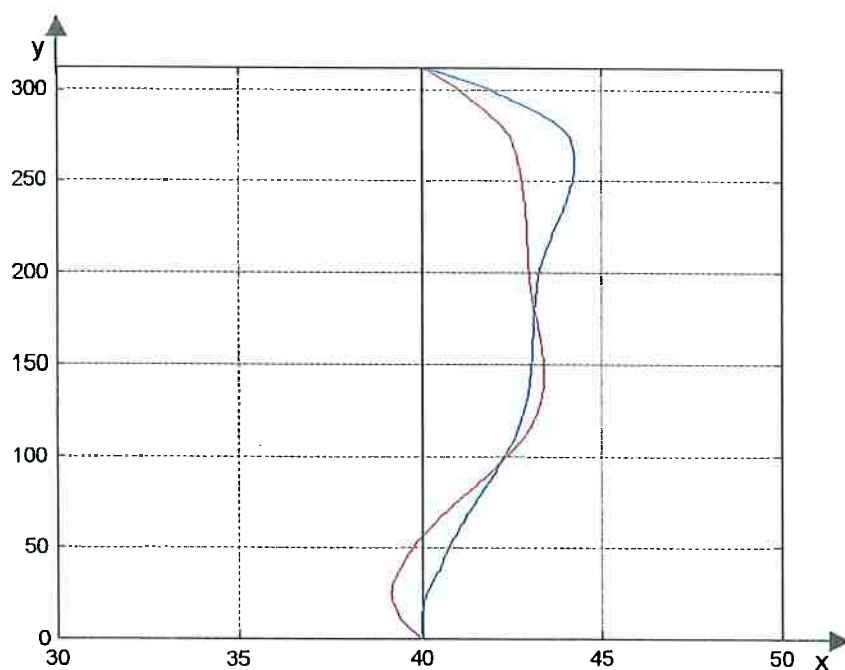


Figura 8.9 : Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 300$  L/s, configuração 1 = veneziana.

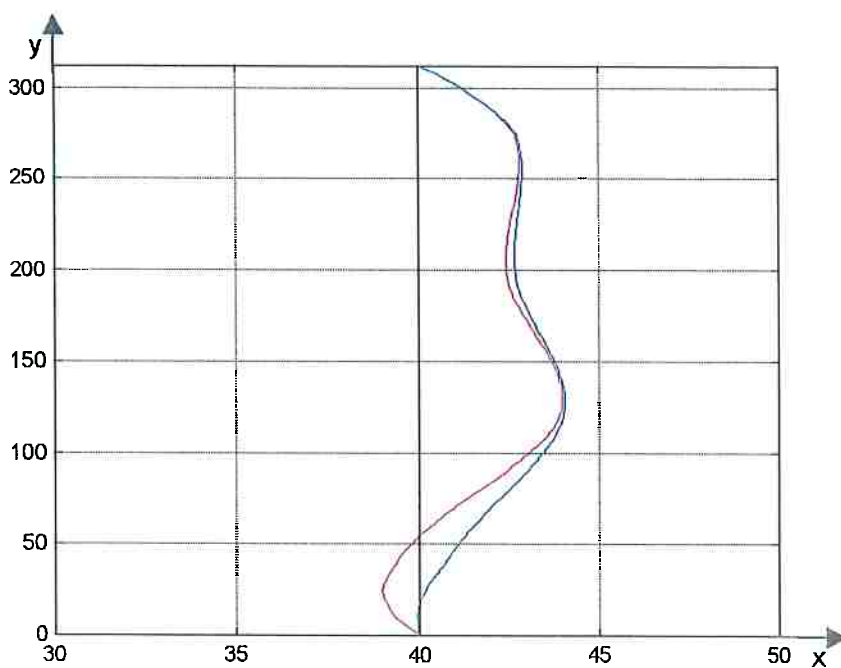


Figura 8.10: Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 300$  L/s, configuração 2 = veneziana e filtro.

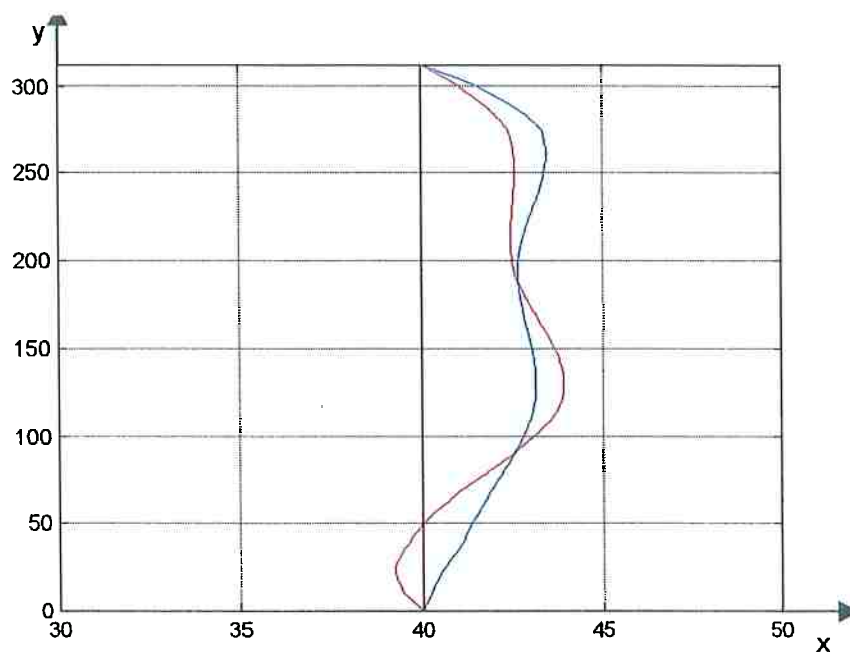


Figura 8.11: Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 300$  L/s, configuração 3 = veneziana, filtro e registro  $60^\circ$ .

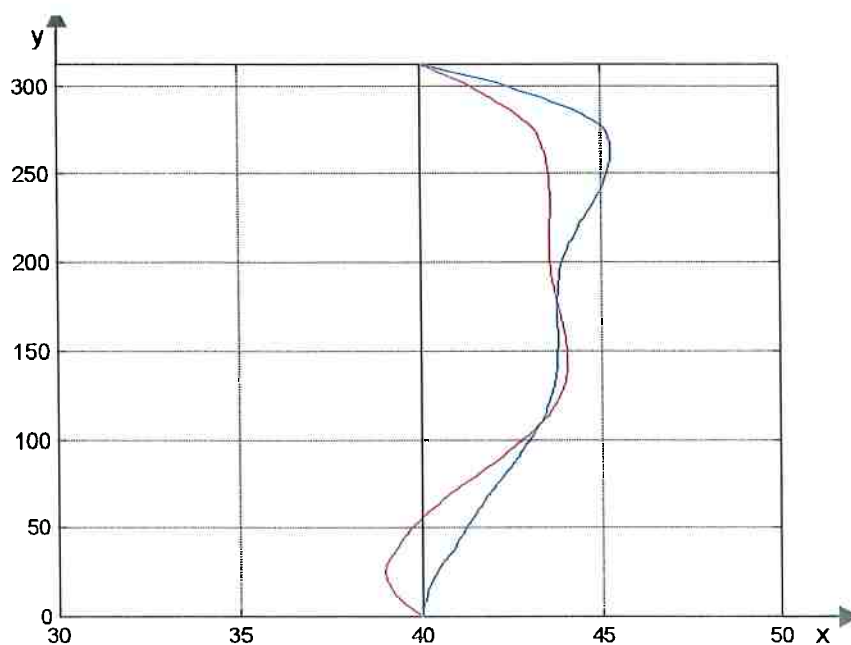


Figura 8.12: Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 370$  L/s, configuração 1 = veneziana.

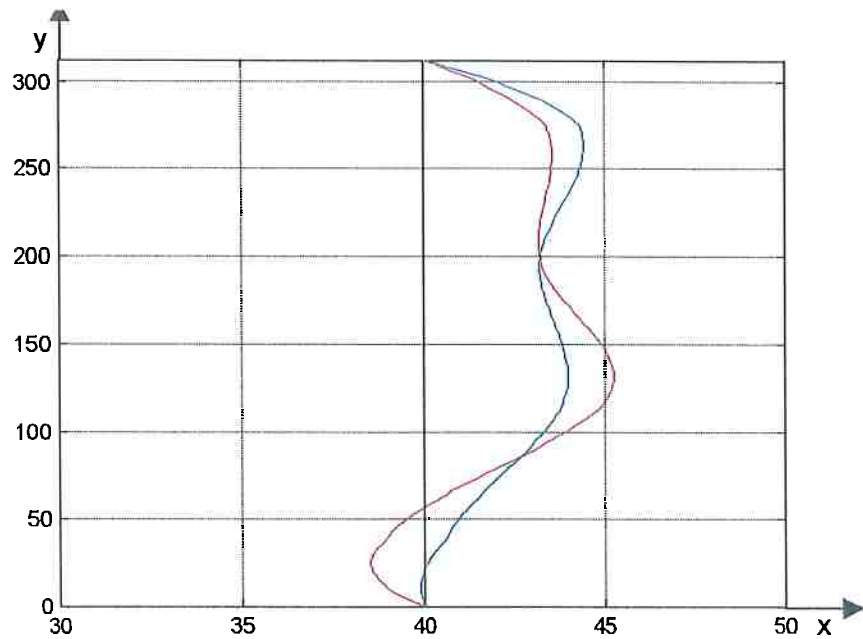


Figura 8.13: Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 370$  L/s, configuração 2 = veneziana e filtro.

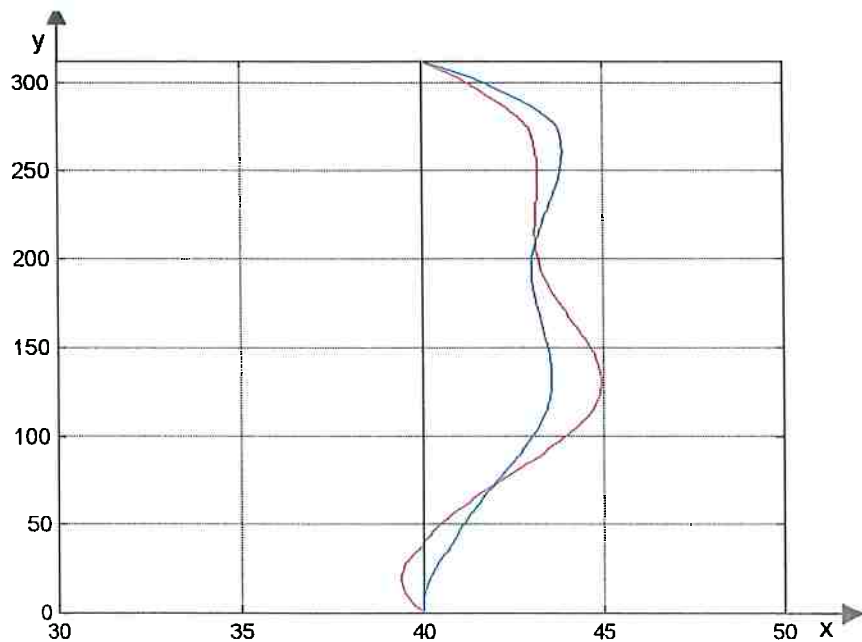


Figura 8.14: Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 370$  L/s, configuração 3 = veneziana, filtro e registro  $60^\circ$ .

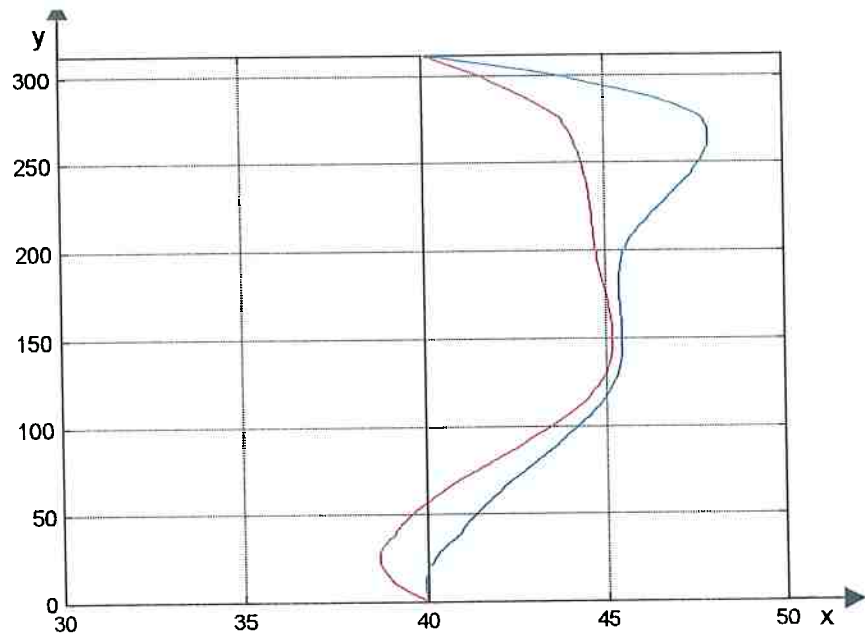


Figura 8.15: Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 510$  L/s, configuração 1 = veneziana.

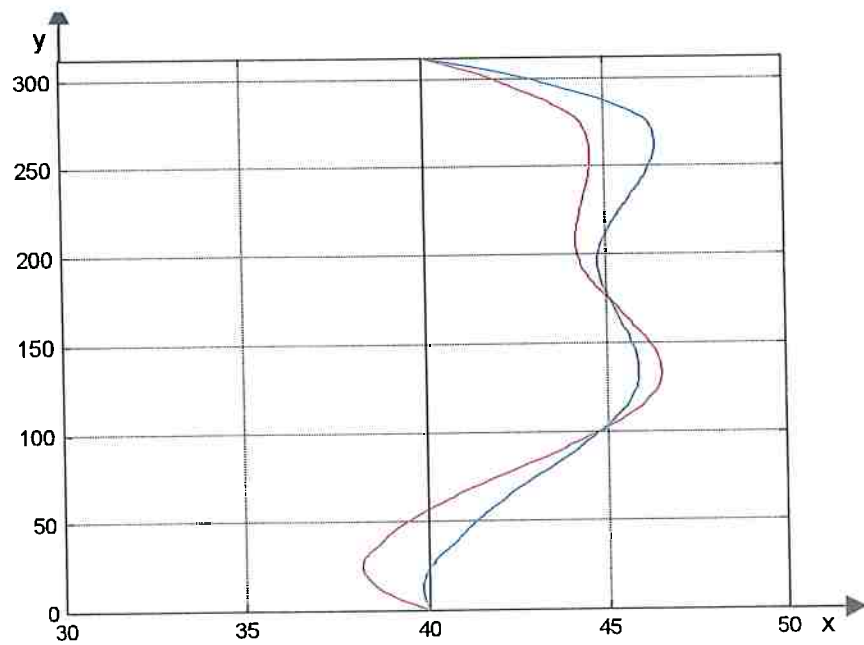


Figura 8.16: Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 510$  L/s, configuração 2 = veneziana e filtro.

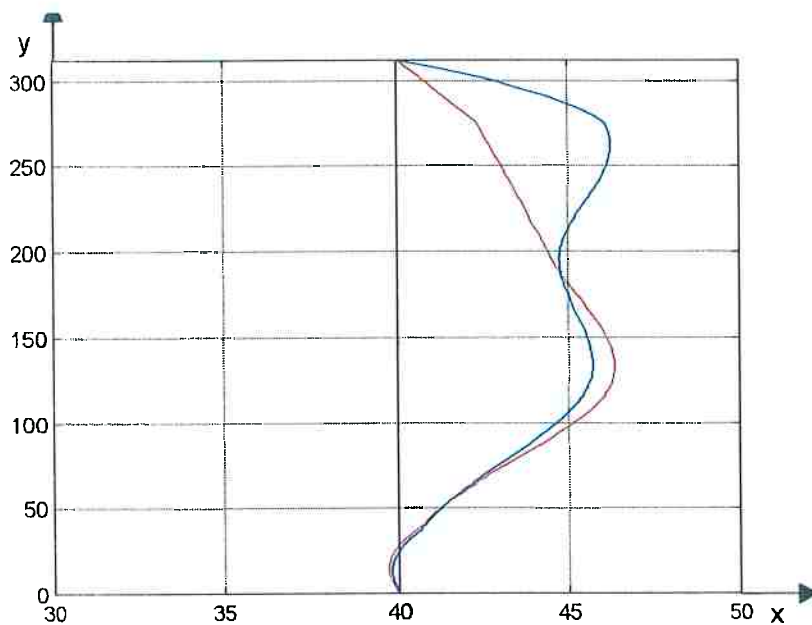


Figura 8.17: Perfis de velocidade  $V_{xy}$  para medições com anemômetro laser, em vermelho, e para grade sensora multidirecional, em azul.  $Q_{ref} = 510$  L/s, configuração 3 = veneziana, filtro e registro  $60^\circ$ .

## **9. ANÁLISE DE RESULTADOS E CONCLUSÕES**

### **9.1. Análise dos resultados**

A análise de resultados e conclusões estão organizadas conforme as três principais etapas identificadas nesta pesquisa:

- Caracterização do campo de velocidades em uma passagem curta e avaliação das condições de medição.
- Estudo de sondas cilíndricas multifuradas, proposta de um sensor multidirecional, e realização de sua calibração através do levantamento experimental do escoamento em torno de cilindros.
- Fabricação e teste de um protótipo de uma grade sensora multifurada e multidirecional, e avaliação de seu desempenho ao medir velocidades médias e vazão de ar em uma passagem curta instalada em um módulo experimental. Esta passagem simula a tomada de ar externo de um sistema de ar condicionado.

#### **9.1.1. Campo de velocidades**

Foram realizados ensaios para caracterizar o campo de velocidades numa seção transversal da passagem curta escolhida, aqui denominada seção de medição. Nesta, foi instalada posteriormente, uma grade sensora multifurada multidirecional.

O mapeamento do campo de velocidades numa seção intermediária de uma passagem curta com acessórios não pode ser encontrado na literatura aberta. O uso de técnicas convencionais para realizar este levantamento, tal

como medições com tubo de Pitot, anemômetros de fio quente ou a laser não são viáveis em aplicações reais. Os medidores que operam com a técnica de anemometria laser tem custo muito elevado, especialmente aqueles que oferecem recursos para medições instantâneas tridimensionais, e exigem caminhos ópticos e mesas especiais para posicionamento. Estes fatos, entre outros, podem justificar a ausência de resultados publicados para este tipo de estudo.

As medições com o anemômetro laser realizadas no Laboratório de Vazão do IPT, foram fundamentais para que resultados importantes fossem levantados. Neste caso seu uso se justifica a partir das necessidades de garantia da qualidade do ar interno existentes hoje, e de como os resultados deste desenvolvimento podem contribuir para isto.

Os estudos encontrados na literatura que analisam o comportamento de velocidades em contrações, e os efeitos de acessórios de ventilação sobre o escoamento, apresentam informações qualitativas, obtidos através de técnicas de visualização do escoamento (SMACNA, 1990). Os perfis de velocidade são desenhados nas seções de tubulações, e seus acessórios, na quase totalidade dos casos, com componentes em apenas uma direção. No presente estudo verificou-se que o escoamento é turbulento, com grandes perturbações, mas é possível avaliar valores médios para direções e velocidades. As figuras 3.22 a 3.27, mostram perfis médios dos vetores resultantes,  $V_{xy}$ , representados em planos  $xy$ , perpendiculares à seção de medição.

O resultado do mapeamento tridimensional das velocidades surpreendeu, apresentando boa uniformidade, quando foram visualizados os gráficos de perfis das componentes da velocidade, especialmente na direção  $x$ .



As componentes da velocidade  $V_x$  conforme pode ser visto nas figuras 3.8 a 3.21, definiram perfis com distribuição sem grandes variações, inclusive para as configurações onde há também registro e filtro. Este fato foi indicador da possibilidade do uso com sucesso de uma sonda cilíndrica multifurada com seu eixo principal paralelo à direção  $z$  para avaliação da velocidade média em uma região da seção. Observa-se, também, que nas três quartas partes superiores da seção de medição da passagem curta ocorre o fluxo de ar, pois, conforme já citado na análise elaborada no próprio capítulo 3, na região inferior da passagem, isto é, em um quarto do total da área, não há praticamente escoamento no sentido principal do fluxo.

As componentes da velocidade  $V_y$  possuem maior uniformidade para os pontos de medição da região central da seção de ensaio. Isto se explica, pois  $y$  é uma direção normal à do escoamento principal, e quanto mais próximo está o ponto de medição das paredes, as componentes  $V_y$  estão mais sujeitas às variações impostas pela presença das paredes.

Esta indicação dos efeitos da parede influenciando as velocidades é uma importante pista para a análise dos resultados comparativos dos ensaios da grade sensora com a placa de orifício. Estas observações sugerem que ocorrem separações perto das quatro paredes laterais da passagem curta, típicas de entradas com contrações abruptas.

Na visualização da distribuição de velocidade  $V_{xy}$ , nos planos  $xy$ , paralelos, verifica-se os efeitos da presença da veneziana ondulando o perfil que está no plano mais próximo à parede. Isto indica, também, a influência desta fronteira sobre o perfil de velocidades. Nos perfis  $V_{xy}$  da região mais central, esta influência é menos sensível. Os ângulos obtidos para a orientação

destes vetores  $V_{xy}$  confirmam a veneziana como condicionador de escoamento imprimindo aproximadamente uma direção ao fluxo de ar.

As componentes da velocidade na direção  $z$ , não assumiram valores representativos de escoamento. A intensidade de turbulência associada a esta direção foi muito alta, mas com valores médios muito baixos, o que confirma que os movimentos do fluido nesta orientação são aleatórios.

### **9.1.2. Sondas multifuradas multidirecionais**

Foi realizado um amplo estudo de sondas cilíndricas multifuradas, levando à proposta de um sensor multidirecional, que após a fabricação de sondas protótipo teve sua calibração realizada.

No projeto das sondas-protótipo e da grade foram feitas considerações analisando os parâmetros geométricos e dimensionais que se mostraram adequados quando da aplicação da grade sensora.

Alguns critérios adotados no projeto permitiram a obtenção de bons resultados. Dentre eles, pode-se destacar:

- A compatibilidade entre as áreas de passagem nas seções transversais ocupadas pela grade sensora e pela veneziana, evitou que houvesse maior distorção no campo de velocidades.
- A distribuição dos orifícios em posições de medição localizadas nos centros de “equi-áreas” foi adequada para este projeto de pesquisa e desenvolvimento, pois, é mais robusta que outros critérios de distribuição que supõe um perfil de velocidades com determinado comportamento. Esta distribuição em áreas iguais, também permite que a grade tenha maior possibilidade de aplicações.

A integração dos valores obtidos pela grade, que tem posições de medição distribuídas de modo “equi-áreas”, pode ser corrigida, se necessário, através de equações ou coeficientes para correção que podem ser aplicados no processo de cálculo da vazão, conforme está discutido no próximo subitem.

Os materiais e o processo de fabricação utilizados para o protótipo, tubos de acrílico preenchidos com resina poliéster, mostraram ser eficiente alternativa para fabricação de protótipos para estudos em laboratório. As características construtivas resultantes confirmam este fato, pois as sondas não apresentaram problemas de vazamento interno e permitiram o processo de furação com bom acabamento e posicionamento, conferidos óptica e mecanicamente. A qualidade de acabamento superficial foi compatível com os requisitos do desenvolvimento.

O uso de 4 câmaras internas substituiu, com vantagens, a tradicional solução que adota pequenos tubos capilares, fazendo a comunicação entre os orifícios sensores e o instrumento de medição. Esta solução é fundamental para a viabilização construtiva de sensores tipo tubo múltifuro, onde vários orifícios comunicam-se com uma mesma câmara.

O diâmetro de 1.0 mm dos orifícios frontais trouxe bons resultados, tanto no corpo de prova da sonda-cilíndrica usado nos ensaios de calibração, como no protótipo final da grade sensora. O orifício que mede a pressão de esteira com 1.6 mm, também operou adequadamente, como pode ser conferido com as medições com ângulos de  $180^\circ$ , representativos de escoamento reverso.

O auxílio da simulação numérica adotada foi limitado, porém relevante para a caracterização das posições angulares em que as pressões sobre o

cilindro tende a zero. Estes dados somados às referências da literatura sobre sondas direcionais, e a proposta de utilizar valores de diferenças de pressão (**DP**) ao invés de **P**, definiram o ângulo adotado para separar os orifícios frontais nas sondas sensoras, que foi de 50°. Esta escolha influenciou nos resultados e curvas obtidos para os coeficientes adimensionais **K $\alpha$**  e **K $v$** , que são empregados no cálculo do módulo e direção da velocidade média.

Os resultados experimentais obtidos na calibração do cilindro como sensor de direção e módulo de velocidade oferecem um completo banco de dados para estudos de interação escoamento-cilindro. A região de número de Reynolds estudada,  $2000 < Re_d < 10000$ , que possui reduzida quantidade de informação na literatura, foi bem coberta, possibilitando, inclusive a outros pesquisadores, estabelecer comparações em trabalhos numéricos ou experimentais.

Os coeficientes **K $\alpha$**  e **K $v$** , calculados a partir dos resultados obtidos nos estudos experimentais de distribuição de pressão sobre cilindros, tiveram um comportamento adequado, possibilitando excelentes ajustes através de polinômios, fato confirmado pelo coeficiente de correlação (**R<sup>2</sup>**), praticamente iguais a 1, onde  $K\alpha = 0.9804$  e  $Kv = 0.999$ .

A fixação do ângulo de 50° para separação dos orifícios frontais definiu o comportamento das curvas dos coeficientes **K $\alpha$**  e **K $v$** . E a análise da curva **K $\alpha$**  por sua vez, indicou o intervalo angular para a operação da sonda, que é de  $-70^\circ < \alpha < +70^\circ$  para a determinação do ângulo que define a direção da velocidade. Este intervalo mostrou-se compatível com os ângulos encontrados

nas lâminas que direcionam o fluxo de ar nos acessórios de lâminas fixas de sistemas de movimentação de ar, que em geral são menores que 45°.

No caso deste estudo, as direções das velocidades foram medidas adequadamente para uma veneziana com lâminas posicionadas a 30°. Os ângulos determinados através da composição das componentes das velocidades medidas com o anemômetro laser, tiveram resultados no intervalo entre 20° e 45°, o que confirmou a possibilidade de uso da grade sensora. Fato que é válido sem a consideração a região de fluxo reverso.

O sistema monitor de pressões (SMP) desenvolvido, é uma importante contribuição para a área de instrumentação aplicada à medição de baixas pressões. Possui 16 sensores que são monitorados simultaneamente, para uma faixa de pressões entre -125 Pa e +125 Pa, com uma resolução de 0.3 Pa. Esta região é crítica para medição de pressão, na qual os processos de calibração mostraram-se exigentes e cansativos.

Com o SMP foi viabilizada a integração dos sensores de baixa pressão em um sistema que se comunica com microcomputadores, facilitando tanto a monitoração, o tratamento dos dados, como também a integração dos resultados em sistemas de controle. O custo dos componentes (*hardware*), especificados, que é de aproximadamente US\$ 480,00 para um modelo com 16 sensores, traz para o projeto do SMP, um potencial de aplicação em diversas áreas, desde o ar condicionado e ventilação até laboratórios de pesquisa e desenvolvimento. Os programas de computador gerados para a operação do SMP tiveram bom desempenho, destacando-se o programa MONITORAP que, com suas funções de ajuste de zero e de avaliação de valores médios, e

também com as alternativas de variação no tempo entre amostras e no número delas, garantiu qualidade na aquisição e registro de dados.

### **9.1.3. Ensaio com grade sensora no módulo experimental**

O projeto, fabricação de componentes e montagem do módulo experimental para ensaios foi realizado para simular uma caixa de mistura de um sistema de condicionamento de ar.

As características do módulo experimental foram compatíveis com as faixas de vazões estabelecidas pela seleção dos acessórios para os testes. A instrumentação e os processos de calibração adotados forneceram resultados com incertezas da ordem de  $\pm 2\%$ . Esta faixa está dentro dos limites tolerados para medições de vazão em sistemas de condicionamento de ar que é da ordem de  $\pm 5\%$ , conforme ASHRAE (1997).

A câmara plenum, que simulou a caixa de mistura, acoplou-se perfeitamente a uma tubulação onde, uma placa de orifício cumpriu a exigência de ser um padrão de referência para os ensaios. Testes mostraram que a taxa de vazamento para depressões similares às provocadas nos ensaios, representam até 0.6% das vazões medidas nas mesmas condições. Desta forma, ficam comprovados que os procedimentos de fabricação e montagem desta câmara foram eficientes, o suficiente, para qualificá-la como câmara de testes para ensaios de vazão.

A fabricação de um protótipo de uma grade sensora com 4 sondas foi feito com soluções especiais, que atenderam plenamente à fase de desenvolvimento. As sondas foram montadas em um quadro de alumínio, com liberdade individual para ajustes, fixadas através de parafusos, permitindo

ajustes finos no seu posicionamento. Um sistema de entrada na passagem curta, possibilitava através de uma abertura lateral na parede da mesma, o posicionamento da grade na seção de medição. Também tornava prática a sua montagem e desmontagem, assim como a conexão dos terminais de pressão, possibilitando a verificação permanente das ligações realizadas.

O posicionamento das sondas cilíndricas na grade obedeceu recomendações apresentada por BERMAN e WADCOOK apud SALTARA (1999), que afirma que a relação entre a distância entre dois cilindros e o diâmetro dos mesmos deve ser maior que 5, para que não haja influência mútua das perturbações provocadas por ambos. No nosso protótipo a relação entre esta distância e o diâmetro é de  $(78/15) = 5.2$ , o que atende este requisito.

O uso de um mesmo medidor de vazão tipo coifa, para estabelecer as condições de operação dos aparatos de ensaio, tanto no módulo experimental da USP, como nos ensaios com medição a laser no IPT, facilitaram o processo de se obter valores de vazão próximos, favorecendo a comparação de resultados.

Os ensaios do protótipo da grade sensora multidirecional, realizados no módulo experimental, foram analisados, considerando dois tipos de resultados, os vetores velocidades médias medidas em cada sonda que compõe a grade e a vazão obtida pela integração destas velocidades na área de passagem do ar.

Os valores do módulo da velocidade média e do ângulo deste vetor em coordenadas polares medidos com a grade, foram comparados com os resultados obtidos com anemômetro laser, conforme apresentado nas tabelas 8.10 a 8.18. Essas tabelas foram organizadas para três valores de vazão

intermediárias dentro da faixa toda,  $Q_{ref} = 300 \text{ L/s}$ ,  $Q_{ref} = 370 \text{ L/s}$  e  $Q_{ref} = 510 \text{ L/s}$ . Dessas tabelas e dos gráficos das figuras 8.9 a 8.17 que representam, em planos  $xy$ , os perfis de velocidades  $V_{xy}$  obtidos com as sondas da grade e com o laser, pode-se fazer a seguinte análise:

- Na região das sondas B e C, ocorre a maior proximidade de resultados de velocidade, fato bem visualizado nos gráficos comparativos dos perfis.
- Na região da sonda A, as diferenças entre os valores do módulo da velocidade foi mais expressiva, com valores cuja média esteve em torno de 50%. Quanto aos ângulos da direção do escoamento os valores estiveram mais próximos, e a média das diferenças oscilou em torno de 15%.
- Na região da sonda D, não há fluxo com direção e sentido do escoamento principal. O medidor laser identificou escoamento reverso. A sonda da grade não está habilitada para esta medição, inclusive, porque sua contribuição para totalizar a vazão é discutível. Assim, a comparação de resultados dos vetores velocidade, em módulo e ângulo, fica prejudicada.

Na análise comparativa entre medições com laser e com grade feita acima, há alguns fatores que devem ser levados em consideração.

O primeiro deles chama a atenção para o fato de que as medições realizadas com anemômetro laser na seção de testes, foram feitas sem a presença da grade sensora. A seção estava livre, conforme pode ser visualizado na foto b) da figura 3.6. Todavia os padrões do perfil de velocidade alteram-se com inclusão da grade na passagem curta. Logo, seria incorreto



concluir que as velocidades medidas nos mesmos pontos, com dois processos, deveriam ser exatamente iguais.

Outro aspecto é que as vazões de referência comparadas, são próximas, sendo que existem pequenas diferenças entre si, como, por exemplo, nos valores das tabelas 8.13 a 8.15, no ensaio com a vazão de referência a 370 L/s e no módulo experimental com grade para 350 L/s.

Feitas estas considerações, chama-se a atenção para a proximidade entre os valores de ângulos que caracterizam a direção do escoamento obtida pela grade sensora. Diferenças na determinação da direção, excluída a região da sonda D, oscilaram 3° e 6°, indicando ser um ótimo resultado.

Nos ensaios de medição de vazão, verificou-se que a grade sensora tem comportamento distinto para cada configuração de acessórios instalados.

Para a configuração 1, ou seja, quando havia apenas a veneziana instalada, os resultados comparativos entre a vazão medida com grade e aquela que foi avaliada com a placa de orifício, estiveram próximos, entre as quais a diferença média esteve em torno de 6%. A curva que reúne estes resultados está apresentada na figura 8.2 e, quando ajustada, teve comportamento linear, com coeficiente de correlação ( $R^2=0.9959$ ) que confirma um bom comportamento para a grade protótipo nestas condições. Convém observar também, que todos os valores calculados para vazão através da grade, são menores que os medidos com a placa.

Para a configuração 2, na qual foi instalado adicionalmente à veneziana, um filtro, os resultados calculados com a grade sensora ficaram defasados em aproximadamente 11% em relação à placa. O ajuste dos pontos

no gráfico da figura 8.3 foi excepcionalmente linear, com um coeficiente de correlação  $R^2=0,9983$ .

Nas configurações com os três acessórios, ou seja, incluindo-se um registro entre a grade sensora e o filtro, foram feitos ensaios para 4 posições angulares que definem a abertura deste registro,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ . Considerando globalmente todos estes resultados, as diferenças de vazão entre a placa de orifício e a grade sensora, aproxima-se a um valor médio de 16 %.

As curvas obtidas e apresentadas individualmente, para cada ângulo de abertura do registro, nas figuras 8.4 a 8.7, ajustam-se por retas com coeficientes de regressão  $R^2 \cong 0,99$  a menos da curva para abertura  $30^\circ$ , na qual  $R^2 \cong 0,97$ . Reunindo os 40 resultados em um único gráfico, obtem-se a figura 8.8, que confirma o comportamento linear da grade testada, com  $R^2=0,9838$ .

A análise do total de resultados conduziu a uma reavaliação da proposta de equação adotada para integrar as velocidades na área de medição. Havia sido adotada, até então, uma somatória simples de vazões associadas à cada uma das quatro sub-áreas, que por definição do projeto, eram idênticas.

Considerando as condições de perturbação do perfil de velocidades, provocadas principalmente pela re-orientação da direção do escoamento pela veneziana e pela influência das paredes, e os efeitos decorrentes da separação da camada limite nestas fronteiras, foram avaliadas outras equações.

Nestes novos procedimentos de cálculo, a equação de integração das velocidades na área, passam a ter coeficientes para ponderar estes efeitos.

Três propostas dentre as testadas indicaram ser adequadas para as configurações de acessórios usadas. As equações são as seguintes:

$$Q_m = \left( \frac{3}{2} * V_A + V_B + V_C + \frac{V_d}{2} \right) * \rho * \frac{S_{Pgrade}}{4} \quad (9.1)$$

$$Q_m = \left( \frac{3}{2} * V_A + V_B + V_C + V_D \right) * \rho * \frac{S_{Pgrade}}{4} \quad (9.2)$$

$$Q_m = \left( \frac{3}{2} * V_A + \frac{5}{4} * V_B + V_C + \frac{V_d}{4} \right) * \rho * \frac{S_{Pgrade}}{4} \quad (9.3)$$

Cada uma destas equações foi incorporada na planilha programada RFINAL e os resultados foram gerados utilizando os dez conjuntos de dados que haviam sido medidos para cada configuração do módulo experimental.

Para a configuração 1, apenas veneziana, os melhores resultados foram obtidos com a equação (9.3), conforme pode ser visto na tabela 9.1. A média das diferenças entre as vazões determinadas com a grade e com a placa de orifício esteve em torno de 2.8%. Considerando-se que as incertezas associadas aos resultados de vazão medidos com a placa no nosso módulo, são de  $\pm 2\%$ , e que as incertezas associadas aos resultados da grade são de  $\pm 3.5\%$ , conclui-se que a ponderação proposta pela equação (9.3) ofereceu ótimos resultados.

Os valores de vazão foram bem ajustados por uma reta, cuja equação junto com o gráfico na figura 9.1. O coeficiente de correlação,  $R^2 = 0.9971$ , confirmou o bom ajuste.

Ensaio	$Q_{ref}$ (L/s)	$Q_{m\_placa}$ (kg/s)	+/- inc	$Q_{m\_grade}$ (kg/s)	+/- inc
1	200	0.206	0.003	0.200	0.007
2	250	0.241	0.004	0.254	0.008
3	300	0.284	0.004	0.285	0.010
4	350	0.344	0.005	0.354	0.012
5	400	0.374	0.006	0.381	0.013
6	450	0.429	0.007	0.436	0.015
7	500	0.489	0.007	0.516	0.017
8	550	0.537	0.008	0.563	0.019
9	600	0.592	0.009	0.609	0.021
10	640	0.632	0.010	0.639	0.022

Legenda:

$Q_{ref}$  = Vazão de referência (medidor tipo coifa)

$Q_{m\_placa}$  = Vazão em massa na placa de orifício

$Q_{m\_grade}$  = Vazão em massa na grade sensora multidirecional

+/- inc = incerteza combinada da variável

Tabela 9.1: Resumo de resultados comparativos entre a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 1- veneziana. Nova equação (9.3) adotada para o cálculo da vazão.

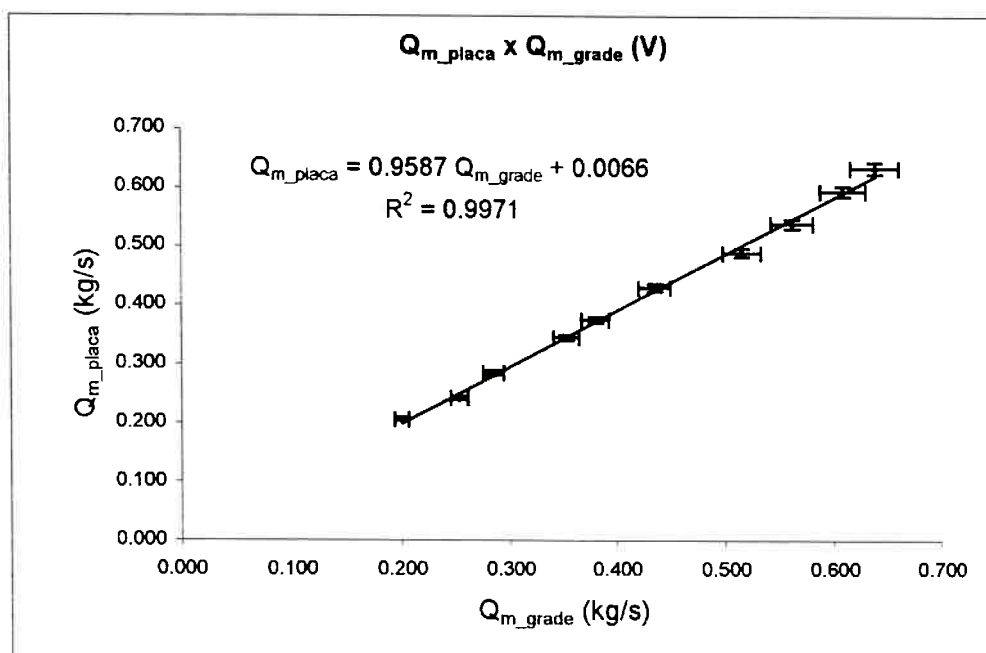


Figura 9.1: Gráfico dos valores da tabela 9.1. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 1- veneziana. Nova equação (9.3) para o cálculo da vazão

Para configuração 2, veneziana e filtro, a equação (9.1) mostrou-se adequada, oferecendo resultados entre o padrão de referência e a grade, muito próximos, consideradas as incertezas associadas aos resultados de medição. A média das diferenças resultou em 1.5%.

Comparando-se, em termos percentuais, a média das diferenças das vazões para a adoção da equação (9.1), que foi de 1.5%, com a determinada com a equação (6.25), na qual não havia ponderação, que foi de aproximadamente 11%, constata-se a capacidade de adequação que possui a ponderação da equação (9.1).

Na tabela 9.2 e na figura 9.2 estão os resultados deste ajuste para cada uma das dez vazões ensaiadas.

Ensaio	$Q_{ref}$	$Q_{m\_placa}$	+/- inc	$Q_{m\_grade}$	+/- inc
	(L/s)	(kg/s)		(kg/s)	
1	200	0.203	0.003	0.210	0.007
2	250	0.243	0.004	0.246	0.008
3	300	0.291	0.004	0.297	0.010
4	350	0.331	0.005	0.334	0.011
5	400	0.375	0.006	0.387	0.013
6	450	0.436	0.007	0.439	0.015
7	500	0.481	0.007	0.491	0.016
8	550	0.541	0.008	0.552	0.018
9	600	0.597	0.009	0.599	0.020
10	640	0.634	0.010	0.632	0.022

Legenda:

$Q_{ref}$  = Vazão de referência (medidor tipo coifa)

$Q_{m\_placa}$  = Vazão em massa na placa de orifício

$Q_{m\_grade}$  = Vazão em massa na grade sensora multidirecional

+/- inc = incerteza combinada da variável

Tabela 9.2: Resumo de resultados comparativos entre a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 2- veneziana e filtro. Nova equação (9.1) adotada para o cálculo da vazão

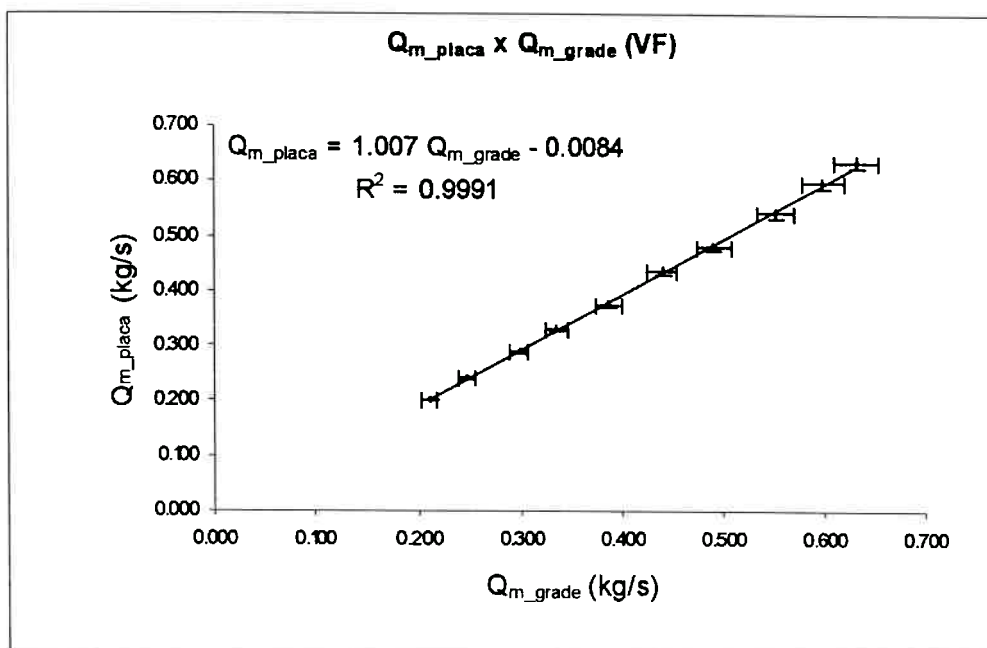


Figura 9.2: Gráfico dos valores da tabela 9.2. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 2-veneziana e filtro. Nova equação (9.1) para o cálculo da vazão

Para as configurações com registro, consideradas as várias posições relativas às aberturas, os resultados em termos de vazão para a grade tiveram um tratamento melhor quando aplicou-se a equação (9.2). Na tabela 9.3 estão os 40 resultados de todos os ensaios com estas configurações, 3, 4, 5, e 6. Na figura 9.3 estão ajustados todos estes resultados por uma reta, e o coeficiente de correlação  $R^2 = 0.987$ , indica esta reta ser um bom ajuste. A média das diferenças entre a vazão da grade e a vazão da placa de orifício foi de 3.2%, valor pequeno considerando as incertezas dos resultados e variedade de condições de escoamento impostas pelas posições do registro.

Configuração	Ensaio	$Q_{ref}$	$Q_{m\_placa}$	+/- inc	$Q_{m\_grade}$	+/- inc
		(L/s)	(kg/s)		(kg/s)	
3	1	200	0.204	0.003	0.181	0.006
3	2	250	0.246	0.004	0.251	0.008
3	3	300	0.285	0.004	0.288	0.009
3	4	350	0.329	0.005	0.334	0.010
3	5	400	0.367	0.006	0.367	0.012
3	6	450	0.428	0.007	0.420	0.013
3	7	500	0.491	0.007	0.484	0.016
3	8	550	0.544	0.008	0.544	0.017
3	9	600	0.588	0.009	0.574	0.019
3	10	640	0.633	0.010	0.613	0.020
4	1	200	0.204	0.003	0.194	0.006
4	2	250	0.241	0.004	0.255	0.008
4	3	300	0.288	0.004	0.298	0.009
4	4	350	0.332	0.005	0.343	0.011
4	5	400	0.373	0.006	0.376	0.012
4	6	450	0.426	0.007	0.424	0.013
4	7	500	0.493	0.008	0.489	0.015
4	8	550	0.538	0.008	0.543	0.017
4	9	600	0.588	0.009	0.568	0.018
4	10	640	0.630	0.010	0.566	0.018
5	1	200	0.198	0.003	0.198	0.006
5	2	250	0.240	0.004	0.240	0.008
5	3	300	0.289	0.004	0.278	0.009
5	4	350	0.332	0.005	0.306	0.010
5	5	400	0.373	0.006	0.352	0.011
5	6	450	0.423	0.006	0.384	0.012
5	7	500	0.490	0.007	0.463	0.015
5	8	550	0.538	0.008	0.516	0.016
5	9	600	0.593	0.009	0.572	0.018
5	10	640	0.629	0.010	0.615	0.020
6	1	200	0.206	0.003	0.204	0.007
6	2	250	0.242	0.004	0.237	0.008
6	3	300	0.287	0.004	0.297	0.010
6	4	350	0.328	0.005	0.322	0.011
6	5	400	0.371	0.006	0.374	0.012
6	6	450	0.435	0.007	0.453	0.015
6	7	500	0.484	0.007	0.504	0.017
6	8	550	0.540	0.008	0.542	0.018
6	9	600	0.597	0.009	0.575	0.018
6	10	640	0.635	0.010	0.648	0.022

Legenda:

$Q_{ref}$  = Vazão de referência (medidor tipo coifa)

$Q_{m\_placa}$  = Vazão em massa na placa de orifício

$Q_{m\_grade}$  = Vazão em massa na grade sensora multidirecional

+/- inc = incerteza combinada da variável

Tabela 9.3: Resumo de resultados comparativos entre a grade sensora e a placa de orifício em termos de vazão em massa. Configuração de ensaios: 3, 4, 5 e 6- veneziana, filtro e registro com ângulos de 60°, 30°, 45° e 90°. Nova equação (9.2) adotada para o cálculo da vazão

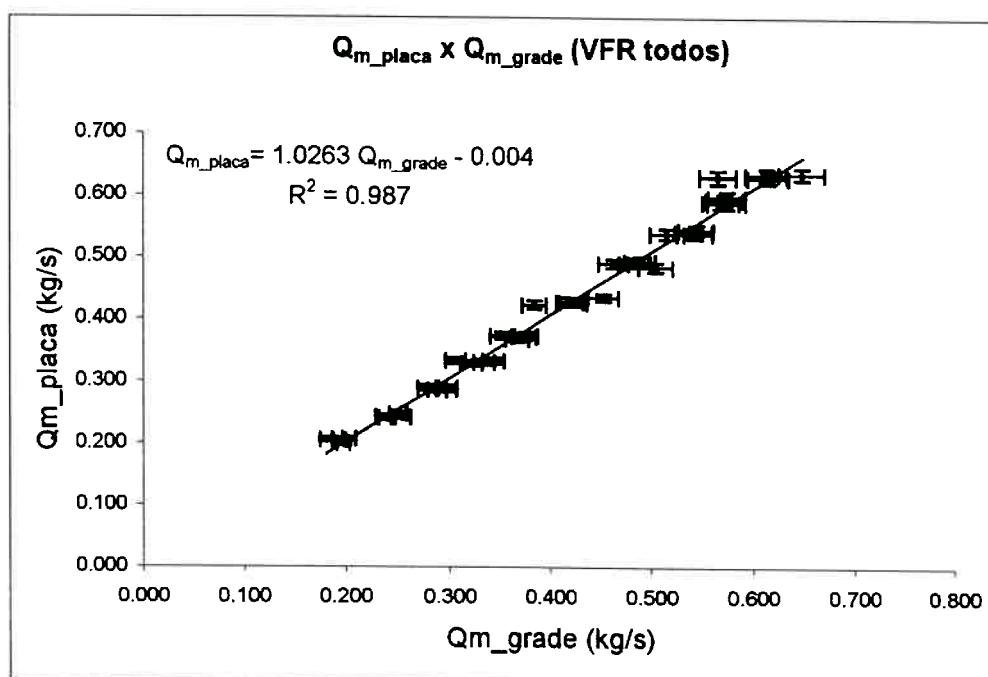


Figura 9.3: Gráfico dos valores da tabela 9.3. Representação das incertezas dos resultados, da equação de ajuste linear obtida, e seu coeficiente de correlação. Configuração de ensaios: 2, 3, 4, 5 e 6 – veneziana, filtro e registro. Nova equação (9.2) para o cálculo da vazão

Assim, constata-se que a equação (9.2) possui importante capacidade de ponderação das velocidades médias para o cálculo da vazão em quatro configurações diferentes, nas quais a movimentação das lâminas do registro poderiam perturbar o escoamento de modo impossibilitar a medição da velocidade média em cada sub-área, fato que decididamente não ocorreu. Os valores de vazão calculados através da equação (6.25) tiveram uma média para as diferenças de vazão de 16%, que foi reduzida para 3.2% com a aplicação da equação (9.2). Pode-se, assim, afirmar que o sistema de medição de vazão proposto poderá participar da monitoração da vazão integrada a um sistema de controle mais geral, oferecendo respostas compatíveis, inclusive acompanhando as variações de vazão impostas através de atuadores nos registros.



## 9.2. Conclusões

Os resultados do estudo do escoamento turbulento em passagens curtas com acessórios possibilitaram a caracterização do campo de velocidades medido tridimensionalmente e a respectiva intensidade de turbulência. A seguir destacam-se algumas das conclusões relacionadas com esta parte do trabalho:

- Os perfis de velocidades das componentes em  $x$  e em  $y$ , são uniformes e indicados para que a partir destes possam ser medida a velocidade média através de uma sonda de pressão. Esta avaliação foi feita a partir do critério da AMCA 203 (1990), quando medindo vários pontos para determinar um perfil em uma seção transversal do escoamento, está estabelecido que, se mais de 75% das pressões dinâmicas estiverem com valores maiores que 10% da pressão dinâmica máxima, o perfil é satisfatório, podendo ser também classificado como bom ou ideal, para situações de maior uniformidade. Os perfis em  $x$  e  $y$ , estão em sua maior parte, na classe de bom, ou acima dela.
- Os perfis de velocidade  $V_{xy}$  apresentados em um plano próximo à parede, mostram forte influência da veneziana e da parede da passagem curta sobre o escoamento nesta região, isto foi visto nos perfis levantados em 36 pontos em meia seção.
- As intensidades de turbulência foram altas mas não inviabilizaram metodologia de medições com sondas de pressão.
- Na seção de medição, as componentes da velocidade na direção adotada como  $z$  são desprezíveis.

- A aplicação do tubo multifuro foi então viabilizada, posicionando seu eixo principal na direção do eixo z.
- Um banco de resultados sobre o comportamento das velocidades em escoamentos que atravessam acessórios típicos, está publicado. A abrangência de aplicações está além do campo de tratamento de ar pois uso de venezianas é muito aplicado em outras áreas, como por exemplo, em edificações.

A solução proposta de adotar uma sonda multifurada que também fosse multidirecional, exigiu simulação numérica e calibração específica. Destes resultados pode-se concluir que:

- o método numérico utilizado apresentou bons resultados para um determinada região de velocidades (próximas à 5 m/s) e de ângulos (menores que  $70^\circ$ ) em torno do cilindro.
- O conjunto de resultados do ensaio de calibração em túnel de vento capacitou a sonda a medir posições angulares relacionadas ao escoamento. Estes ensaios foram realizados com cuidados especiais no posicionamento da sonda e na medição de pressões, especialmente para baixas velocidades. Eles tiveram seu êxito confirmado pelo comportamento das curvas dos resultados e pela aplicação dos mesmos.
- Está disponível um importante banco de resultados sobre a interação entre o escoamento e o corpos cilíndricos no intervalo de Reynolds  $2000 < Re_d < 10000$ , no qual o número de publicações é restrito. Este pode ser empregado em estudos de desenvolvimento experimental, como também, para avaliações de simulações numérica.

Em relação aos cilindros sensores e à grade multidirecional, conclui-se que a fabricação é possível a partir do processo proposto, que pode ser adotada em aplicações de trabalhos de desenvolvimento, e que um sistema de injeção de plástico conformando cilindros com câmaras internas é indicado para aplicação comercial.

Ao final dos ensaios de medição de velocidade, de vazão e procedimentos de cálculo verificou-se que a grade sensora multidirecional foi desenvolvida com sucesso e possui capacitação juntamente com o sistema monitor de pressões, de identificar as direções de vetores velocidade média e sua magnitude.

Os resultados dos ensaios de vazão, comparativos à uma placa de orifício, mostraram que a grade sensora multidirecional possui comportamento linear, pois suas curvas tem altos coeficientes de correlação qualificando as regressões.

Os adimensionais  $K_\alpha$  e  $K_v$ , definidos na modelagem semi-empírica da sonda, permitiram que o modelo ensaiado nos testes de calibração fosse representativo. Os resultados de velocidade e ângulo calculados através destes, estiveram dentro do esperado, confirmando a escolha feita.

Verificou-se também que para cada uma das configurações de acessórios instalados deve-se adotar uma equação de ponderação das velocidades nas áreas de modo que seja possível determinar a vazão com exatidão. Três equações foram determinadas, (9.1), (9.2) e (9.3), e quando aplicadas, os resultados de vazão foram excelentes, considerando a faixa de tolerância para sistemas de condicionamento de ar que, conforme já apresentado, é  $\pm 5\%$ . As médias das diferenças entre valores de vazão

medidos com a placa e com a grade foram 2,8%, 1,6% e 3,2% respectivamente às configurações 1, 2 e para o conjunto de configurações (3, 4, 5 e 6).

A constatação da influência de efeitos de parede no escoamento, separação da camada limite nas proximidades onde está posicionada a seção de medição, indicam que o perfil de velocidades na situação em que a grade está instalada possui deformações específicas que afetam o cálculo da vazão. Assim na equação para o cálculo da vazão, as velocidades, principalmente das regiões mais próximas da parede, foram corrigidas com fatores adequados. Nota-se também que a presença do registro com lâminas em direções perpendiculares às da veneziana auxiliou, colaborando para uniformizar o escoamento, ao contrário do que se esperava, ou seja que este induziria perturbações indesejáveis.

Os critérios para definição de parâmetros de projeto para a grade sensora que foram discutidos com detalhe, foram referendados e podem orientar o dimensionamento de outras grades para aplicações específicas.

O Sistema Monitor de Pressões integrou-se perfeitamente com a grade sensora, tendo faixas de medições e resolução compatíveis com as pressões encontradas nos ensaios. Associado ao programa MONITORAP respondeu bem, possibilitando resultados muito satisfatórios na medição com a grade sensora. Outras aplicações estão sendo identificadas para o SMP, equipamento sem similar no Brasil, como monitoração de DP em laboratórios e salas de processo pressurizadas, da área farmacêutica ou de alimentos, onde pretende-se evitar contaminação.

Assim este estudo, também, viabilizou uma alternativa para a medição de vazão com equipamento flexível e "inteligente", que pode ser integrado a um

sistema de controle informatizado de qualquer porte através do sistema monitor de pressões. Em instalações de ar condicionado, especialmente em edificações com sistema de automação predial, ele viabiliza, modo simples e prático, a monitoração em tempo real da vazão de ar externo, auxiliando a garantia de condições de QAI, além de poder favorecer a economia de energia.

Diversos trabalhos podem ser realizados em continuidade a este estudo. Um exemplo é o desenvolvimento de um modelo simplificado para a grade e para o sistema SMP, que possa ser instalado de modo dedicado em uma aplicação específica, eventualmente com menor número de sondas e de sensores.

Tratando-se de um sistema de medição de vazão sem similar nos mercados nacional e internacional, estão sendo tomadas as providencias para tramitação do registro de patente a que faz jus.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AABC, Associated Air Balance Council. **National standards for total system balance**. Washington, 1982.
- ABRAVA, Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. **Recomendação Normativa da Abrava, Renabrava II**. São Paulo, 1999.
- ABNT, Associação Brasileira De Normas Técnicas, **Medidor de vazão de fluidos - Classificação - NBR 10396**. Rio de Janeiro, 1988.
- \_\_\_\_\_. **Medidor de vazão de fluidos - Terminologia - NBR 10977**. Rio de Janeiro, 1989.
- \_\_\_\_\_. **Instalações centrais de ar condicionado para conforto - Parâmetros básicos de projeto - NBR 6401**. Rio de Janeiro, 1980.
- ACHENBACH, 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.
- ALBERNETHY, R. B.; BENEDICT, R. P.; DOWDELL, R. B. ASME Measurement Uncertainty. **Journal of Fluid Mechanics**. v.107, p.161-164, Jun. 1985.
- ALEXANDRE, C. S. A qualidade do Ar Interior (IAQ) sob uma visão brasileira in **VI Congresso Brasileiro de Refrigeração, Ventilação e Condicionamento de Ar**. São Paulo, 1999.
- \_\_\_\_\_. **Qualidade do Ar Interior**. Boletim Técnico Trox. São Paulo, 1998.
- ALLEN, C. M.; HOOPER, L. J. Piezometer investigation. **Transactions of the ASME, HYD**, v.54, n.1, 1932.
- AMCA, Air Movement And Control Association, INC.,. **Fan Application Manuals**. Illinois, 1990.
- ASHRAE. American Society Of Heating, Refrigerating And Air Conditioning Engineers,. **Handbook of fundamentals**. New York, ASHRAE, 1989, 1993, 1997.
- \_\_\_\_\_. **ANSI/ASHRAE 62-1989: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. Atlanta, GA, 1989, 1999.
- ASME, American Society Of Mechanical Engineers; BEAN, H. S., ed. **Fluid meters, their theory and application**. 6.ed. New York, 1971.
- \_\_\_\_\_. **Measurement uncertainly - Instruments and apparatus - ANSI/ASME PTC 19.1**. New York, 1985.

- AVERY, G. Updating the VAV outside air economizer controls. **ASHRAE Journal**. v.31, n.4, p.14-16, April 1989.
- 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.
- 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.
- BOLLIGER JR, R.; MARIANI, A. L. C. **Programa Smacna de educação continuada em tratamento de ar**. Apostilas. São Paulo, Smacna Brasil, 6 vol., 1997.
- BRADSHAW, P. **Experimental fluid mechanics**. Oxford, Pergamon Press, 1964.
- BSI, 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, 1983.
- BRITTON, C.; MESNARD, D. **A performance summary of round-and-diamond-shaped averaging Pitot-type primaries**. Measurement and Control, v.15, Sept. 1982.
- BRYER D.W., PANKHURST, R.C. **Pressure-probe methods for determining win speed and flow direction**. National Physical Laboratory, London: Her Majesty's Stationery Office, 1971.
- 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.
- 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.

- 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.
- DREES, K.H., WENGER, J.D. and JANU, G. Ventilation airflow measurement for ASHRAE Standard 62-1989. **ASHRAE Journal.** v.34, n.10, p.40-45, October 1992.
- 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 from Pitot tube measurement. **Engineering.** v.145, p.616-617, 3 Jun. 1938.
- FARIA, H. Viabilidade técnico-econômica de sistemas de ar condicionado. in **VII Convenção da SMACNA - Chapter Brasil,** São Paulo, 1998.
- 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.
- 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.
- 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.
- HITTLE, D.C.. Controlling variable-volume systems. **ASHRAE Journal suplement: Pratical guide to Building Controls.** Sept. 1997.
- HOLMAN, J.P.; AJDA, W.J. **Experimental methods for engineers.** 5.ed. New York, John wiley & Sons, 1989.
- HOWARD III, E.. Indoor Air Quality in VI **Congresso Brasileiro de Refrigeração, Ventilação e Condicionamento de Ar.** São Paulo, 1999.
- HUBBARD, C.W. Investigation of errors of Pitot tubes. **Transactions of the ASME.** Aug. 1939.
- 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, e atualização de 1998



- \_\_\_\_\_. **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
- \_\_\_\_\_. **Methods of measurement of fluid flow - evaluation of uncertainty - ISO 5168.** 1990.
- KETTLER, J. P. Measuring and controlling outdoor airflow, in **IAQ Applications.** ASHRAE, Atlanta. v.1, n.1, winter, 2000.
- \_\_\_\_\_. Controlling minimum ventilation volume in VAV systems. **ASHRAE Journal.** v.40, n.5, p.45-50, April 1998.
- 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)
- LEE, J.C. , ASH, J.E. **A three-dimensional spherical Pitot probe.** Transaction of the A.S.M.E., USA, 78, 3, pp. 603-8. (April, 1956)
- LEVENHAGEN, J.I. Control systems to comply with ASHRAE Standard 62-1989. **ASHRAE Journal.** v.34, n.9, p.40-44, September 1992.
- LU, X.; DALTON, C.; ZHANG, J.. Application of large eddy simulation to flow past a circular cylinder. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering.** v.119, p.219-225, 1997.
- MARIANI, A. L. C. A Portaria 3.523 de 1998 do Ministério da Saúde e os sistemas de condicionamento de ar in **VI Congresso Brasileiro de Refrigeração, Ventilação e Condicionamento de Ar.** São Paulo, 1999.
- MARIANI, A. L. C. and BOLLIGER JR., R. Parameters analysis for indoor air quality achievement on tall building air conditioning systems - the impact of the Brazilian Ministry of health regulation. In **3rd. International Conference on high technology buildings.** São Paulo, October, 1999.
- MARIANI, A. L. C.; PIMENTA, M. M. Evolução do medidor de vazão instantânea tubo multifuros. In: Encontro Nacional de Ciências Térmicas, V, **Anais.** São Paulo, dez. 1994. p. 245-248.
- \_\_\_\_\_. **Desenvolvimento experimental de medidores de vazão tubo multifuro.** Dissertação de mestrado. EPUSP, São Paulo, 1995.
- MENEGUINI, J.R.. **Numerical simulation of bluff body flow control using a discrete vortex method.** PhD thesis, Imperial College of Science, Technology & Medicine, London, 1993.

- MILLER, R. W. **Flow measurement engineering handbook**. 2.ed. New York, McGraw Hill, 1989.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria 3.523 de 28 de agosto de 1998** in Diário Oficial da União, Brasília, 31 de agosto de 1998.
- MIT, GAS TURBINE LABORATORY. **Aerodynamic measurements**. Boston, The MIT Press, 1963.
- MUMMA, S. A. and WONG, Y. M. Analytical evolution of outdoor air-flow rate variations vs. supply airflow rate variation in variable air volume systems when the outdoor air damper position is fixed. **ASHRAE Transactions**. v.96, n.1 p.1197, 1990.
- NAGUEISHI, M. N. e MARIANI, A. L. C. Projeto e Fabricação de um Psicrômetro de Aspiração, in: XII Congresso de Iniciação Científica e Tecnologia em Engenharia, Anais. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1993.
- 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.
- NOWACK, C.F.R. **Improved calibration method for a five-hole spherical Pitot probe**. In: Journal of Physics E, Scientific Instruments, Séries 2, 3, 1, p.21-26 (January, 1970).
- OWER, E.; PANKHURST, R. C. **The measurement of air flow**. 4.ed. Oxford, Pergamon Press, 1966.
- PEREIRA, M. T. Normalização de medidores de vazão. In: Simpósio Brasileiro de Medição de Vazão, 1, São Paulo, 1989. **Anais**. São Paulo, 1989. p.155-159.
- \_\_\_\_\_. **Investigação experimental sobre escoamentos transicionais**. Tese de doutorado. EPUSP, São Paulo, 1997.
- PHELPS, V.A., TROECH, A.W., HACKETT, J.P. **Full scale wake and boudary layer instrumentation feasibility study**. In: Ocean Engng. Pergamon Press Ltda. Great Britain, Vol. 7, p.281-304.
- PLACHE, K. O. Annubar Averaging Applied to Flow Measurement. In: Symposium on Flow, Its Measurement and Control in Science and Industry, 1. **Proceedings**. Pittsburgh, 1974. p.497-500.
- PRESTON, J. H. The three-quarter radius Pitot tube flow meter. **The Engineer**. p.400-402, 27 Oct. 1950.
- 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.
- 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 circular cylinder at very high Reynolds number. **Journal of Fluid Mechanics**. v.10, p.345-356, 1961.
- SALTARA, F. **Simulação numérica do escoamento ao redor de cilindros**. Dissertação de doutorado. EPUSP, São Paulo, 1999
- SCHULZE, W. M.; ASHBY JR., G.C.; ERWIN, J.R.. National advisory committee for aeronautics. **NACA TN 2830**. 1952.
- SCHLICHTING, H. **Boundary-layer theory**. 7.ed. New York, McGraw Hill, 1976
- SIQUEIRA, C.R. **Simulação numérica do escoamento ao redor de cilindros: aplicação a problemas bi e tridimensionais**. Dissertação de doutorado. EPUSP, São Paulo, 1999.
- SHERWOOD, T. K.; SKAPERDAS, G. T. A simplified Pitot Tube Transverse. **Mechanical Engineering**. New York, p.22-23, Jan. 1939.
- SMACNA, Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association. **HVAC Systems - Testing, adjusting and balancing**. Chantilly, Virginia, SMACNA, 1993.
- \_\_\_\_\_. **HVAC Duct Design**. Chantilly, VA, 1990.
- \_\_\_\_\_. **HVAC Systems - Retrofit of building Energy Systems and Processes**. Chantilly, Virginia, SMACNA, 1995
- \_\_\_\_\_. **Energy, Systems, Analysis and Management**. Chantilly, Virginia, SMACNA, 1997.
- \_\_\_\_\_. **Indoor Air Quality: A System approach**. Chantilly, VA, 1998.
- SMITH, R. B. Importance of flow transmitter selection for return fan control in VAV systems. **ASHRAE Transactions**. v.96, n.1 p.1218-1223, 1990.
- SPIVAK, J.A. Development of a dynamic total pressure probe for use in incompressible flows. **ISA Transaction**, v.21, n.2, 1982.
- TAVOULARIS, S.; SZYMCZAK, M. Displacement effect of square-ended pitot tubes in shear flows. **Exp. Fluids**. v.7, n.1, p.33-37, 1989.
- TAIRA N. M., PEREIRA, M.T. Construção de um túnel de vento para aferição de medidores de velocidade. In: **2º Simpósio brasileiro de medição de vazão**. São Paulo, 1995.

- 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.
- TRIGO, F.C., PEREIRA, M.T., TAIRA, N.M. **Tubo de Pitot de cinco orifícios**. In: Anais do I Simpósio Brasileiro de Medição de Vazão. IPT, p. 225-236 17 (Outubro, 1989).
- TROX DO BRASIL, Tomada de ar, série VDF. **Folheto nº 3-006**. São Paulo. 1998a.
- TROX DO BRASIL, Registros, Venezianas exteriores, série JV, AWG, AWK. **Folheto nº C3-001**. São Paulo. 1998b.
- TROPICAL ARTEFATOS DE METAL. TAE/VHT, veneziana para ar externo. **Catálogo de produtos**. São Paulo, 1998.
- VENNARD, J. K.; STREET, R.L.. **Elementos de mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro, Guanabara dois, 1978.
- WHITE, F. **Fluid mechanics**. Tokyo, McGraw Hill Kogakusha, 1979.
- \_\_\_\_\_. **Viscous flow**. New York, McGraw Hill, 1980.
- WRIGHT, M. A.. The evaluation of a simplified form of presentation for five-hole spherical and hemispherical pitometer calibration data. **Journal of Physics Scientific Instruments**.. May, 1970, p. 356-362.
- 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**

## **RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DO CAMPO DE VELOCIDADES NA PASSAGEM CURTA**

### **MEDIÇÕES COM ANEMÔMETRO LASER**

## AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

Vazão referência =310 L/s  
Apenas veneziana  
arquivos: V5-XY

Vazão referência =290 L/s  
Veneziana + filtro  
arquivos:V11-XY

Vazão referência =290 L/s  
Veneziana + registro 60° + filtro  
arquivos:V15-XY

ponto	Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %
1	-0.2	171.6	0.4	65.9
2	2.9	25.8	3.6	19.0
3	2.9	21.2	3.0	17.6
4	3.0	30.8	1.5	74.3
5	-0.6	29.4	-0.1	209.0
6	3.1	25.8	3.5	18.8
7	3.1	23.5	2.7	18.7
8	2.2	16.9	1.1	48.8
9	-0.6	24.8	-0.1	110.2
10	3.4	21.4	3.5	21.0
11	3.0	18.9	2.7	18.8
12	2.1	26.6	0.8	62.5

Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %
1.0	402.3	-0.2	543.9
3.5	27.7	3.0	35.4
2.6	29.9	2.4	26.2
3.1	29.2	1.1	87.0
-1.1	119.4	0.6	149.2
3.7	23.7	2.6	27.4
2.3	21.8	1.7	33.0
2.8	18.6	1.4	47.0
-0.3	417.2	1.9	44.9
4.4	18.7	3.9	22.8
2.5	18.5	1.7	28.8
2.0	21.3	0.7	86.3

Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %
0.0	5233.5	0.1	783.2
3.3	29.7	2.9	37.1
2.7	29.1	2.6	25.3
2.5	41.7	0.9	116.0
-0.9	100.1	1.0	63.1
3.8	25.3	2.4	32.8
2.5	28.1	1.7	28.3
2.5	21.4	1.4	47.0
-0.5	176.9	0.5	136.5
4.4	22.7	2.8	32.4
2.4	23.1	1.7	27.3
2.1	23.3	0.6	93.5

médias

2.0	36.4	1.9	57.0
-----	------	-----	------

médias sem os pto 1,5 e 9

2.9	23.5	2.5	33.3
-----	------	-----	------

médias

2.2	95.7	1.7	94.3
-----	------	-----	------

médias sem os pto 1,5 e 9

3.0	23.3	2.1	43.8
-----	------	-----	------

médias

2.1	479.6	1.5	118.5
-----	-------	-----	-------

médias sem os pto 1,5 e 9

2.9	27.2	1.9	48.9
-----	------	-----	------

ponto	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)
1	0.5	90.2	112.9
2	4.6	21.9	51.3
3	4.2	19.4	46.6
4	3.4	43.1	26.5
5	0.6	43.8	188.8
6	4.6	22.2	48.2
7	4.1	21.5	41.9
8	2.5	26.0	25.5
9	0.7	33.4	192.2
10	4.9	21.2	45.7
11	4.0	18.9	41.4
12	2.3	33.4	20.9

médias

3.0	32.9
-----	------

médias sem pto 1,5 e 9

3.8	25.3
-----	------

ponto	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)
1	1.1	410.0	347.5
2	4.6	31.1	40.2
3	3.6	28.3	42.5
4	3.3	40.8	20.3
5	1.3	127.1	151.0
6	4.5	25.0	35.4
7	2.9	26.1	35.5
8	3.1	26.9	26.7
9	1.9	80.6	99.3
10	5.9	20.6	41.4
11	3.0	22.4	35.3
12	2.1	35.7	20.0

médias

3.1	72.9
-----	------

médias sem pto 1,5 e 9

3.7	28.5
-----	------

ponto	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)
1	0.1	1195.0	99.5
2	4.4	33.2	41.9
3	3.7	27.4	43.7
4	2.7	56.5	20.7
5	1.3	82.9	133.8
6	4.5	27.6	32.1
7	3.0	28.2	33.6
8	2.8	29.4	28.8
9	0.7	156.4	132.6
10	5.2	25.8	32.1
11	3.0	24.6	35.9
12	2.2	34.8	16.7

médias

2.8	143.5
-----	-------

médias sem pto 1,5 e 9

3.5	31.9
-----	------

### Legenda:

Vx: velocidade na direção x

Vy: velocidade na direção y

Vxy: velocidade resultante no plano xy

Turb: Turbulência associada a Vx ou Vy

Turbxy: Turbulência associada a Vxy

Tabela A.1: Resultados da medição do campo de velocidades com anemômetro laser.  
Plano xy - vazões de referência: 290 L/s e 310 L/s.

## AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

Vazão referência = 370 L/s  
Apenas veneziana  
arquivos: V6-XY

Vazão referência = 370 L/s  
Veneziana + filtro  
arquivos: V12-XY

Vazão referência = 380 L/s  
Veneziana + registro 60° + filtro  
arquivos: V16-XY

ponto	Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %		ponto	Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %		ponto	Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %							
1	-0.3	158.1	0.4	101.8		1	1.3	124.7	-0.2	954.1		1	0.3	501.9	0.1	1383.2							
2	3.4	31.1	4.2	20.8		2	4.6	30.1	4.2	33.9		2	4.5	25.6	3.9	36.8							
3	3.3	23.6	3.7	18.7		3	3.4	28.3	3.1	26.9		3	3.6	28.3	3.2	26.0							
4	3.6	27.6	1.8	74.5		4	3.9	29.7	1.4	104.3		4	3.1	43.3	1.1	147.4							
5	-0.8	25.5	-0.1	226.8		5	-1.6	109.0	1.0	112.3		5	-1.0	119.6	1.2	65.1							
6	3.7	25.5	4.1	19.3		6	4.8	20.2	3.6	28.6		6	4.7	24.9	3.2	31.1							
7	3.8	24.3	3.2	20.8		7	3.1	21.6	2.2	33.1		7	3.0	24.5	2.1	30.7							
8	2.7	19.3	1.3	44.7		8	3.7	19.3	2.0	48.5		8	3.1	20.7	1.8	48.6							
9	-0.8	30.0	-0.1	160.8		9	-0.2	733.8	2.7	48.3		9	0.1	1242.9	1.2	64.7							
10	4.1	21.4	4.2	21.9		10	5.8	19.4	5.2	22.9		10	5.3	22.0	3.4	34.6							
11	3.6	20.5	3.3	18.3		11	3.2	19.3	2.5	28.7		11	3.1	21.7	2.2	25.6							
12	3.3	18.3	1.0	55.7		12	2.7	21.4	1.0	74.2		12	2.6	24.2	0.8	91.9							
<b>médias</b>						<b>médias</b>						<b>médias</b>											
2.5		35.4		2.2		65.3		2.9		98.1		2.4		126.3		2.7		175.0		2.0		165.5	
<b>médias sem os pto 1,5 e 9</b>						<b>médias sem os pto 1,5 e 9</b>						<b>médias sem os pto 1,5 e 9</b>											
3.5		23.5		3.0		32.7		3.9		23.3		2.8		44.6		3.7		26.1		2.4		52.5	
ponto	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)		ponto	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)		ponto	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)										
1	0.5	124.3	125.8		1	1.3	174.3	362.7		1	0.3	640.2	17.2										
2	5.4	25.4	50.9		2	6.2	31.9	42.1		2	5.9	30.9	40.8										
3	5.0	21.1	48.0		3	4.6	27.7	42.1		3	4.8	27.3	41.6										
4	4.0	41.3	26.3		4	4.1	44.8	19.7		4	3.3	63.9	19.4										
5	0.8	39.8	188.1		5	1.9	110.0	146.4		5	1.5	90.8	129.1										
6	5.5	22.2	48.3		6	6.0	23.6	37.0		6	5.7	27.1	34.6										
7	5.0	22.9	40.3		7	3.8	26.0	35.4		7	3.7	26.7	35.1										
8	3.0	25.8	25.0		8	4.2	28.4	27.8		8	3.6	30.3	30.2										
9	0.8	40.3	189.5		9	2.7	80.3	95.1		9	1.2	95.3	86.7										
10	5.9	21.7	45.4		10	7.8	21.0	41.8		10	6.3	26.2	32.3										
11	4.9	19.5	42.9		11	4.1	23.2	37.3		11	3.8	23.2	36.2										
12	3.5	23.7	16.5		12	2.9	33.0	20.8		12	2.7	34.8	16.5										
<b>médias</b>					<b>médias</b>					<b>médias</b>													
3.7		35.7		4.1		52.0		3.6		93.1													
<b>médias sem pto 1,5 e 9</b>					<b>médias sem pto 1,5 e 9</b>					<b>médias sem pto 1,5 e 9</b>													
4.7		24.8		4.9		28.9		4.4		32.3													

**Legenda:**

Vx: velocidade na direção x

Vy: velocidade na direção y

Vxy: velocidade resultante no plano xy

Turb: Turbulência associada a Vx ou Vy

Turbxy: Turbulência associada a Vxy

Tabela A.2: Resultados da medição do campo de velocidades com anemômetro laser.  
Plano xy - vazões de referência: 370 L/s e 380 L/s.

### AValiação DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

Vazão referência = 510 L/s  
Apenas veneziana  
arquivos: V7-XY

Vazão referência = 510 L/s  
Veneziana + filtro  
arquivos: V13-XY

Vazão referência = 510 L/s  
Veneziana + registro 60° + filtro  
arquivos: V10-XY

ponto	Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %
1	-0.5	118.0	0.5	120.1
2	4.4	32.0	5.2	23.1
3	4.4	25.3	4.7	19.1
4	5.1	24.1	2.4	65.4
5	-1.0	24.9	-0.2	-152.2
6	4.4	28.4	5.2	20.9
7	5.1	24.2	4.4	20.6
8	3.4	17.3	1.5	46.2
9	-1.0	32.1	-0.2	-123.1
10	5.5	21.2	5.3	22.2
11	4.8	20.4	4.4	18.9
12	3.1	24.4	1.2	72.5

médias

3.1	32.7	2.9	12.8
-----	------	-----	------

médias sem os pto 1,5 e 9

4.5	24.1	3.8	34.3
-----	------	-----	------

Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %
1.6	139.1	-0.8	256.8
5.6	29.9	4.9	36.5
4.5	25.8	4.2	26.2
4.9	32.1	1.7	118.0
-2.1	108.5	1.0	153.2
6.0	19.7	4.8	29.2
3.9	23.3	2.6	33.4
4.5	19.6	2.1	53.9
-0.2	1013.1	3.5	47.8
7.2	18.5	6.9	22.4
4.3	18.3	3.3	29.0
3.7	21.6	1.3	79.2

médias

3.7	122.5	3.0	73.8
-----	-------	-----	------

médias sem os pto 1,5 e 9

4.9	23.2	3.5	47.6
-----	------	-----	------

Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %
1.0	362.3	0.8	187.6
5.8	35.0	5.2	29.4
2.6	151.9	4.4	24.7
2.3	170.3	3.6	80.8
0.7	638.7	1.1	67.3
6.1	21.6	4.7	29.7
5.7	33.0	4.4	25.7
1.0	460.3	1.3	56.5
0.3	418.1	1.2	64.2
6.8	17.0	5.2	31.5
4.9	20.1	3.8	26.0
3.3	24.2	0.9	93.3

médias

3.4	196.0	3.1	59.7
-----	-------	-----	------

médias sem os pto 1,5 e 9

4.3	103.7	3.7	44.2
-----	-------	-----	------

ponto	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)
1	0.7	119.0	136.1
2	6.8	27.1	50.1
3	6.5	22.2	46.9
4	5.6	35.7	25.7
5	1.0	36.4	189.9
6	6.8	24.3	50.2
7	6.7	22.7	40.8
8	3.8	24.4	23.7
9	1.1	42.5	193.6
10	7.6	21.7	43.9
11	6.5	19.7	42.8
12	3.3	34.7	21.2

médias

4.7	35.9
-----	------

médias sem pto 1,5 e 9

6.0	25.8
-----	------

ponto	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)
1	1.8	168.8	333.7
2	7.4	32.9	41.1
3	6.1	26.0	43.1
4	5.2	49.5	19.3
5	2.3	118.5	153.9
6	7.7	23.9	38.9
7	4.7	27.0	34.4
8	4.9	28.9	25.1
9	3.5	78.8	93.6
10	10.0	20.4	43.9
11	5.4	22.8	37.4
12	3.9	32.7	18.8

médias

5.2	52.5
-----	------

médias sem pto 1,5 e 9

6.2	29.4
-----	------

ponto	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)
1	1.3	306.9	38.5
2	7.8	32.6	41.8
3	5.1	80.8	59.1
4	4.3	114.4	57.4
5	1.3	354.1	56.8
6	7.7	24.9	37.8
7	7.2	30.5	38.0
8	1.7	288.3	51.9
9	1.2	109.3	77.6
10	8.5	23.4	37.2
11	6.3	22.5	37.8
12	3.5	34.3	15.7

médias

4.7	118.5
-----	-------

médias sem pto 1,5 e 9

5.8	72.4
-----	------

#### Legenda:

Vx: velocidade na direção x

Vy: velocidade na direção y

Vxy: velocidade resultante no plano xy

Turb: Turbulência associada a Vx ou Vy

Turbxy: Turbulência associada a Vxy

Tabela A.3: Resultados da medição do campo de velocidades com anemômetro laser.  
Plano xy - vazão de referência: 510 L/s



## AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

Vazão referência = 640 L/s  
Apenas veneziana  
arquivos: V8-XY

Vazão referência = 640 L/s  
Veneziana + filtro  
arquivos: V14-XY

Vazão referência = 640 L/s  
Veneziana + registro 60° + filtro  
arquivos: V18-XY

ponto	Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %
1	-0.7	106.6	0.5	117.7
2	5.6	28.5	6.5	23.8
3	5.0	24.9	5.6	18.5
4	5.5	31.8	2.8	72.0
5	-1.2	43.1	-0.2	149.7
6	5.7	27.4	6.5	19.9
7	6.2	23.3	5.5	18.7
8	4.3	21.2	1.8	49.2
9	-0.3	86.2	-1.0	39.0
10	6.9	23.4	7.1	18.2
11	5.4	22.2	5.3	22.2
12	4.2	21.3	1.4	70.6

médias			
3.9	38.3	3.5	51.6

médias sem os pto 1,5 e 9			
5.4	24.9	4.7	34.8

ponto	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)
1	0.9	111.0	141.5
2	8.6	25.9	49.1
3	7.5	21.5	48.3
4	6.2	43.2	27.0
5	1.2	51.5	191.3
6	8.7	23.4	49.1
7	8.4	21.4	41.6
8	4.7	27.1	22.5
9	1.1	45.1	252.9
10	9.9	20.9	45.9
11	7.5	22.2	44.4
12	4.4	30.1	18.4

médias			
5.8	36.9		

médias sem pto 1,5 e 9			
7.3	26.2		

médias			
4.5	246.0	3.7	67.6

médias sem os pto 1,5 e 9			
6.0	23.5	4.5	46.5

ponto	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)
1	3.1	118.3	330.0
2	8.8	35.2	43.8
3	7.7	27.2	43.3
4	6.2	49.0	20.9
5	2.7	134.5	151.9
6	9.4	25.1	40.9
7	6.3	25.2	34.6
8	5.3	32.9	23.5
9	4.1	81.2	88.6
10	12.4	19.1	45.0
11	6.4	23.5	38.5
12	5.6	32.5	22.5

médias			
6.5	50.3		

médias sem pto 1,5 e 9			
7.6	30.0		

médias			
3.8	93.6	3.3	86.8

médias sem os pto 1,5 e 9			
5.3	27.8	3.9	50.8

ponto	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)
1	0.8	443.2	41.6
2	8.4	35.6	42.2
3	7.9	26.1	41.5
4	4.6	71.5	25.6
5	2.8	84.3	129.4
6	8.1	28.6	36.3
7	5.9	27.4	35.0
8	4.6	37.1	26.4
9	1.8	122.0	107.1
10	8.8	25.9	41.4
11	6.2	28.0	40.3
12	5.3	35.3	25.8

médias			
5.4	80.4		

médias sem pto 1,5 e 9			
6.6	35.0		

### Legenda:

Vx: velocidade na direção x

Vy: velocidade na direção y

Vxy: velocidade resultante no plano xy

Turb: Turbulência associada a Vx ou Vy

Turbxy: Turbulência associada a Vxy

Tabela A.4: Resultados da medição do campo de velocidades com anemômetro laser.  
Plano xy - vazão de referência: 640 L/s

## AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

Vazão referência = 760 L/s  
Apenas veneziana  
arquivos: V9-XY

Vazão referência = 760 L/s  
Veneziana + filtro  
arquivos: V20-XY

Vazão referência = 760 L/s  
Veneziana + registro 60° + filtro  
arquivos: V19-XY

ponto	Vx	Turb.	Vy	Turb.
	(m/s)	%	(m/s)	%
1	-1.0	75.9	0.5	131.3
2	6.0	29.3	7.4	23.0
3	6.1	23.8	6.4	21.0
4	7.2	24.3	3.6	66.3
5	-1.2	34.0	-0.1	352.2
6	6.2	27.9	7.5	18.4
7	7.5	20.1	6.5	20.7
8	5.1	25.4	2.0	51.7
9	-1.5	24.5	-0.3	123.3
10	7.6	22.4	8.2	16.1
11	6.4	25.1	6.2	25.9
12	5.1	23.0	2.0	67.3

médias			
4.5	29.6	4.2	76.4

médias sem os pto 1,5 e 9			
6.4	24.6	5.5	34.5

ponto	Vxy	Turbxy	ângulo
	(m/s)	%	(graus)
1	1.1	89.3	154.1
2	9.6	25.6	51.0
3	8.9	22.4	46.6
4	8.1	36.5	26.2
5	1.3	48.6	185.5
6	9.7	22.7	50.8
7	10.0	20.3	40.8
8	5.5	30.4	21.8
9	1.5	33.0	190.6
10	11.2	19.2	47.2
11	8.9	25.5	44.1
12	5.4	32.5	21.3

médias			
6.8	33.8		

médias sem pto 1,5 e 9			
8.6	26.1		

médias			
5.0	729.8	4.6	58.9

médias sem os pto 1,5 e 9			
7.4	28.3	5.9	45.6

ponto	Vxy	Turbxy	ângulo
	(m/s)	%	(graus)
1	3.4	118.9	269.3
2	10.9	42.2	43.6
3	9.7	30.3	43.8
4	6.6	66.6	23.7
5	4.3	87.0	158.2
6	11.6	26.6	41.3
7	8.1	26.2	39.1
8	6.0	37.1	25.8
9	4.6	82.8	115.4
10	15.7	18.2	46.5
11	9.7	22.7	40.1
12	7.2	27.6	22.5

médias			
8.2	48.9		

médias sem pto 1,5 e 9			
9.5	33.1		

médias			
4.4	-55.6	4.1	58.2

médias sem os pto 1,5 e 9			
5.9	27.7	4.0	54.9

ponto	Vxy	Turbxy	ângulo
	(m/s)	%	(graus)
1	3.1	135.3	94.3
2	6.2	54.0	34.4
3	9.0	26.3	41.1
4	5.0	73.6	25.1
5	7.0	44.4	113.2
6	8.3	31.4	33.0
7	7.1	30.5	41.0
8	5.1	38.4	27.4
9	4.5	73.7	50.1
10	9.8	21.7	35.6
11	7.9	24.8	40.8
12	5.8	26.3	22.0

médias			
6.6	48.4		

médias sem pto 1,5 e 9			
7.1	36.3		

**Legenda:**

Vx: velocidade na direção x

Vy: velocidade na direção y

Vxy: velocidade resultante no plano xy

Turb: Turbulência associada a Vx ou Vy

Turbxy: Turbulência associada a Vxy

**Tabela A.5:** Resultados da medição do campo de velocidades com anemômetro laser.  
Plano xy - vazão de referência: 760 L/s

## AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

### Direção Z

Vazão referência =290 L/s  
Veneziana + filtro  
arquivos:V11-Z

Vazão referência =290 L/s  
Veneziana + registro 60° + filtro  
arquivos:V15-Z

ponto	Vz (m/s)	Turb. %
1	0.0	1497.6
2	0.6	150.4
3	0.2	307.2
4	0.7	70.6
5	0.0	4768.1
6	0.7	340.1
7	0.3	174.8
8	-0.1	841.6
9	-1.4	84.0
10	0.5	168.7
11	0.3	223.8
12	0.1	471.8

médias

0.2	758.2
-----	-------

médias sem os pto. 1, 5 e 9

0.4	305.4
-----	-------

ponto	Vz (m/s)	Turb. %
1	0.0	1497.6
2	0.3	323.1
3	0.2	366.0
4	0.7	80.1
5	-1.1	80.5
6	0.0	5961.9
7	0.4	158.3
8	0.0	1549.2
9	-0.6	120.6
10	0.4	247.4
11	0.4	154.4
12	0.1	582.6

médias

0.1	926.8
-----	-------

médias sem os pto. 1, 5 e 9

0.3	1047.0
-----	--------

**Legenda:**

Vz: velocidade na direção z

Turb: Turbulência associada a Vz

**Tabela A.6:** Resultados da medição do campo de velocidades com anemômetro laser.  
Direção z - vazão de referência:290 L/s

## AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

### Direção Z

Vazão referência = 370 L/s

Apenas veneziana  
arquivos: V6-Z

ponto	Vz (m/s)	Turb. %
1	0.1	258.1
2	-0.5	167.4
3	0.4	188.3
4	0.7	88.3
5	0.0	11116.4
6	-0.1	1409.0
7	0.3	202.7
8	-0.1	1315.1
9	0.0	2579.5
10	0.5	227.4
11	0.2	325.7
12	0.1	756.1

médias

0.1	1552.8
-----	--------

médias sem os pto 1,5 e 9

0.2	520.0
-----	-------

Vazão referência = 370 L/s

Veneziana + filtro  
arquivos:V12-Z

ponto	Vz (m/s)	Turb. %
1	0.1	368.6
2	0.7	156.4
3	0.3	278.2
4	0.9	78.6
5	0.1	1174.1
6	0.9	407.6
7	0.4	199.1
8	0.0	5411.0
9	-2.0	84.1
10	0.8	157.5
11	0.4	187.2
12	0.1	502.0

médias

0.2	750.4
-----	-------

médias sem os pto 1,5 e 9

0.5	819.7
-----	-------

Vazão referência = 380 L/s

Veneziana + registro 60° + filtro  
arquivos:V16-Z

ponto	Vz (m/s)	Turb. %
1	-0.2	666.8
2	0.7	170.1
3	0.5	196.2
4	1.0	73.8
5	-0.8	224.4
6	0.5	57.0
7	0.1	56.4
8	0.1	57.9
9	0.6	59.0
10	0.6	218.4
11	0.4	213.0
12	0.2	370.1

médias

0.3	196.9
-----	-------

médias sem os pto 1,5 e 9

0.5	157.0
-----	-------

#### Legenda:

**Vz:** velocidade na direção z

**Turb:** Turbulência associada a Vz

Tabela A.7: Resultados da medição do campo de velocidades com anemômetro laser.

Direção z - vazões de referência: 370 L/s e 380 L/s

## AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

### Direção Z

Vazão referência = 510 L/s  
Apenas veneziana  
arquivos: V7-Z

Vazão referência = 510 L/s  
Veneziana + filtro  
arquivos: V13-Z

Vazão referência = 510 L/s  
Veneziana + registro 60° + filtro  
arquivos: V17-Z

ponto	Vz (m/s)	Turb. %
1	0.0	5856.3
2	-0.6	194.5
3	0.5	197.3
4	1.0	90.3
5	-0.3	649.7
6	-0.2	1015.7
7	0.4	229.1
8	0.0	3858.7
9	0.0	1373.3
10	0.4	305.4
11	0.3	251.1
12	0.1	809.9

médias	
0.1	1236.0
médias sem os pto 1,5 e 9	
0.2	772.5

ponto	Vz (m/s)	Turb. %
1	0.3	481.5
2	0.9	176.1
3	0.4	298.0
4	1.2	76.7
5	0.1	1197.3
6	1.1	317.6
7	0.5	239.0
8	0.1	1827.3
9	-2.9	73.4
10	1.3	109.6
11	0.6	174.5
12	0.4	243.9

médias	
0.3	434.6
médias sem os pto 1,5 e 9	
0.7	384.7

ponto	Vz (m/s)	Turb. %
1	0.1	1604.2
2	0.4	422.6
3	0.7	166.8
4	0.7	201.6
5	-1.4	72.1
6	0.5	245.9
7	0.7	164.4
8	0.1	667.2
9	0.0	10918.8
10	0.5	250.2
11	0.4	258.0
12	0.3	277.2

médias	
0.3	1270.7
médias sem os pto 1,5 e 9	
0.5	294.9

**Legenda:**

Vz: velocidade na direção z

Turb: Turbulência associada a Vz

**Tabela A.8:** Resultados da medição do campo de velocidades com anemômetro laser.  
Direção z - vazão de referência: 510 L/s

## AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

### Direção Z

Vazão referência = 640 L/s  
Apenas veneziana  
arquivos: V8-Z

ponto	Vz (m/s)	Turb. %
1	0.0	660.3
2	-0.8	168.2
3	0.5	242.4
4	1.1	96.1
5	0.0	4288.2
6	0.2	911.7
7	0.6	175.1
8	0.0	5170.9
9	0.0	2734.8
10	0.0	2904.3
11	0.2	354.7
12	0.5	215.5

médias

0.2	1493.5
-----	--------

médias sem os pto 1,5 e 9

0.3	1137.6
-----	--------

Vazão referência = 640 L/s  
Veneziana + filtro  
arquivos: V14-Z

ponto	Vz (m/s)	Turb. %
1	0.0	4453.6
2	1.1	187.4
3	0.5	322.3
4	1.4	87.5
5	0.6	388.9
6	1.1	347.0
7	1.0	148.2
8	0.4	371.6
9	-3.2	80.9
10	1.9	86.4
11	0.9	174.2
12	0.6	254.8

médias

0.5	575.2
-----	-------

médias sem os pto 1,5 e 9

1.0	219.9
-----	-------

Vazão referência = 640 L/s  
Veneziana + registro 60° + filtro  
arquivos: V18-Z

ponto	Vz (m/s)	Turb. %
1	0.1	2369.8
2	0.7	245.1
3	0.8	178.0
4	0.1	1561.6
5	0.0	-984.1
6	0.7	206.3
7	1.0	124.3
8	0.2	457.8
9	-1.2	-163.2
10	0.4	340.8
11	0.6	243.2
12	0.4	364.4

médias

0.3	412.0
-----	-------

médias sem os pto 1,5 e 9

0.5	413.5
-----	-------

#### Legenda:

Vz: velocidade na direção z

Turb: Turbulência associada a Vz

Tabela A.9: Resultados da medição do campo de velocidades com anemômetro laser.  
Direção z - vazão de referência: 640 L/s

## AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

### Direção Z

Vazão referência = 760 L/s  
 Veneziana + registro 60° + filtro  
 arquivos:V19-Z

ponto	Vz (m/s)	Turb. %
1	0.2	895.8
2	0.8	207.7
3	0.8	193.4
4	1.1	118.1
5	-0.3	-376.4
6	0.4	396.4
7	0.8	196.8
8	0.2	709.1
9	-0.5	-376.9
10	0.5	348.9
11	0.3	550.7
12	0.5	304.7

médias

0.4	264.0
-----	-------

médias sem os pto 1,5 e 9

0.6	336.2
-----	-------

**Legenda:**

**Vz:** velocidade na direção z

**Turb:** Turbulência associada a Vz

**Tabela A.10:** Resultados da medição do campo de velocidades com anemômetro laser.  
 Direção z - vazão de referência: 760 L/s

## AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

Vazão referência = 380 L/s

Apenas veneziana

arquivos: V21-XY

Ponto	Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)
1	-0.1	348.8	0.2	226.2	0.2	274.7	126.9
2	-0.1	615.5	0.5	65.5	0.5	114.7	99.1
3	2.2	62.3	1.5	59.6	2.6	61.4	34.2
4	2.2	55.6	3.8	30.6	4.4	38.2	60.5
5	1.7	75.2	3.5	30.2	3.9	42.5	64.2
6	1.5	82.8	3.7	28.9	4.0	41.3	67.6
7	2.6	29.8	4.3	17.6	5.0	21.4	59.4
8	2.9	27.9	3.8	19.6	4.8	23.0	52.7
9	3.0	29.1	3.4	20.8	4.6	24.8	48.6
10	3.6	21.7	2.8	24.3	4.6	22.8	38.2
11	3.4	29.5	2.3	33.5	4.1	30.8	33.8
12	4.8	16.4	0.1	700.2	4.8	24.5	1.5
13	-0.4	64.5	0.1	491.7	0.4	159.7	162.8
14	-0.8	40.5	-0.2	165.3	0.8	53.1	192.3
15	3.8	40.9	2.4	46.2	4.5	42.5	32.6
16	4.4	22.8	3.9	21.1	5.8	22.0	41.5
17	4.0	22.5	4.2	19.7	5.8	21.1	46.2
18	4.3	23.9	3.5	24.1	5.5	24.0	39.8
19	4.0	21.0	3.4	21.1	5.3	21.0	40.9
20	4.0	22.0	2.9	21.1	5.0	21.7	36.3
21	3.6	20.3	3.1	20.9	4.7	20.6	40.4
22	3.5	20.2	2.6	26.8	4.4	22.8	36.9
23	2.9	18.4	1.9	37.1	3.5	25.8	34.2
24	4.2	17.0	0.8	102.5	4.3	26.0	11.3
25	-0.4	69.8	-0.1	186.6	0.4	89.4	198.4
26	-0.9	21.9	-0.3	72.2	0.9	29.0	196.3
27	2.2	69.1	1.0	91.7	2.4	73.5	24.6
28	3.7	24.6	4.1	20.6	5.5	22.5	47.5
29	3.8	22.6	4.6	18.0	5.9	20.0	50.3
30	3.8	26.4	3.4	21.6	5.1	24.4	41.9
31	3.3	26.6	3.0	23.8	4.4	25.4	41.8
32	3.7	20.8	2.9	19.0	4.7	20.1	38.1
33	3.7	16.5	2.8	21.0	4.6	18.2	37.2
34	3.3	16.0	2.2	27.9	4.0	20.6	34.5
35	2.6	23.4	1.4	49.8	3.0	31.3	28.3
36	4.3	16.4	0.6	138.7	4.3	24.2	7.5
Média	2.7	57.9	2.3	81.8	3.9	43.9	
Méd parc.	3.4	30.7	2.8	57.9	4.5	28.6	

**Legenda:**

**Vx:** velocidade na direção x

**Turb:** Turbulência associada a Vx ou Vy

**Vy:** velocidade na direção y

**Turbxy:** Turbulência associada a Vxy

**Vxy:** velocidade resultante no plano xy

**Méd parc.:** média dos valores sem os pontos 1,2,13,14,25 e 26.

**Tabela A.11:** Resultados da medição do campo de velocidades em 36 pontos, com anemômetro laser  
Plano xy, configuração 1, vazão de referência: 380 L/s



## AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

Vazão referência = 640 L/s

Apenas veneziana  
arquivos: V22-XY

Ponto	Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)
1	0.5	141.9	0.4	127.5	0.7	136.2	40.1
2	-0.2	481.8	0.1	487.1	0.2	483.1	150.9
3	0.3	317.2	1.8	72.2	1.8	93.1	78.9
4	1.3	286.4	6.0	30.0	6.2	69.0	77.4
5	3.4	53.7	5.1	34.0	6.1	40.9	56.7
6	2.3	87.8	4.9	38.5	5.4	51.1	64.8
7	0.5	256.5	6.4	20.2	6.4	29.4	85.2
8	4.7	26.0	5.7	19.4	7.4	22.3	50.5
9	4.9	24.1	5.2	20.2	7.2	22.2	46.4
10	5.2	27.1	4.3	24.7	6.7	26.1	40.0
11	6.5	17.6	3.5	34.7	7.4	22.6	28.3
12	6.3	28.8	-0.1	1816.8	6.3	36.7	359.3
13	-0.8	55.2	-0.1	1148.4	0.8	106.6	184.7
14	-1.2	29.7	0.0	1236.1	1.2	48.5	178.1
15	4.8	59.8	4.1	45.1	6.3	54.2	40.3
16	6.2	28.9	6.1	20.3	8.7	25.0	44.9
17	5.6	24.8	6.0	19.7	8.2	22.2	46.9
18	5.5	30.6	5.5	22.2	7.8	26.7	45.1
19	6.3	24.0	5.4	21.6	8.2	23.0	40.5
20	5.5	26.8	4.9	21.1	7.3	24.5	41.6
21	6.0	24.1	4.9	22.1	7.8	23.3	39.0
22	5.8	22.0	4.1	26.5	7.1	23.6	35.7
23	5.3	17.8	3.1	36.6	6.1	24.0	30.3
24	6.7	19.7	1.4	95.7	6.8	27.3	11.6
25	-0.5	88.1	-0.3	175.3	0.6	111.8	206.6
26	-1.2	37.3	-0.2	150.4	1.2	47.2	191.6
27	3.8	70.7	3.5	51.1	5.1	62.5	42.5
28	6.1	22.7	7.3	18.6	9.5	20.4	50.0
29	5.5	21.8	6.7	19.7	8.7	20.6	50.4
30	4.9	22.1	5.6	18.8	7.5	20.3	49.0
31	4.8	22.4	5.2	18.9	7.0	20.6	47.2
32	4.5	20.9	4.5	20.3	6.4	20.6	44.8
33	5.0	24.2	4.5	22.6	6.7	23.5	42.2
34	5.5	17.8	3.8	27.3	6.7	21.4	34.8
35	5.0	18.6	2.6	44.7	5.6	26.3	27.3
36	7.2	14.1	0.8	133.4	7.2	21.0	6.8
Média	3.9	69.3	3.7	170.6	5.8	52.2	
Méd parc.	4.8	55.3	4.4	93.9	6.9	31.5	

### Legenda:

Vx: velocidade na direção x

Turb: Turbulência associada a Vx ou Vy

Vy: velocidade na direção y

Turbxy: Turbulência associada a Vxy

Vxy: velocidade resultante no plano xy

Méd parc.: média dos valores sem os pontos 1,2,13,14,25 e 26.

**Tabela A.12:** Resultados da medição do campo de velocidades em 36 pontos, com anemômetro laser.  
Plano xy, configuração 1, vazão de referência: 640 L/s

## AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

Vazão referência = 380 L/s

Veneziana + filtro  
arquivos: V23-XY

Ponto	Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)
1	-2.8	47.9	-0.8	167.5	3.0	66.3	196.7
2	1.3	113.3	-0.5	211.4	1.4	131.7	338.0
3	0.1	273.9	3.2	40.1	3.2	41.9	87.5
4	3.8	36.7	4.3	34.4	5.7	35.4	48.1
5	2.5	113.5	4.5	26.0	5.1	58.9	61.4
6	0.2	286.1	3.1	29.0	3.1	33.7	86.5
7	0.2	310.7	2.3	41.4	2.3	48.8	85.3
8	3.3	47.3	3.6	23.0	4.9	36.1	47.7
9	1.0	435.5	3.1	26.5	3.2	130.8	72.9
10	3.9	31.0	2.7	32.8	4.7	31.6	34.2
11	4.5	18.1	2.0	42.7	4.9	24.0	24.1
12	4.4	27.4	0.0	24153.7	4.4	35.6	0.0
13	-1.0	157.0	1.8	70.2	2.1	98.7	119.6
14	0.9	177.0	2.2	60.3	2.4	87.1	67.9
15	4.7	43.9	4.3	28.8	6.4	37.9	42.0
16	5.5	25.3	4.6	26.2	7.2	25.7	39.6
17	5.2	22.9	4.0	28.7	6.5	25.2	37.1
18	5.3	22.7	3.9	27.5	6.6	24.5	36.0
19	4.7	22.4	3.4	28.1	5.8	24.5	35.6
20	4.3	24.8	3.1	26.6	5.3	25.4	35.4
21	4.2	22.2	3.1	27.9	5.2	24.3	36.4
22	3.9	22.7	2.6	29.6	4.7	25.1	34.3
23	3.5	19.3	1.9	44.5	4.0	26.9	27.9
24	4.6	20.4	0.9	106.2	4.6	28.9	11.3
25	-2.9	40.2	1.1	86.5	3.1	48.4	159.4
26	-0.8	206.8	1.8	64.9	1.9	101.4	113.4
27	3.3	76.8	2.7	52.7	4.3	68.3	39.0
28	5.3	29.1	5.0	23.5	7.3	26.6	43.2
29	5.5	21.4	4.9	23.6	7.4	22.4	41.4
30	4.9	27.7	4.1	25.2	6.4	26.7	39.9
31	3.8	28.3	2.9	28.8	4.8	28.5	37.6
32	4.2	21.3	2.9	24.9	5.1	22.5	34.2
33	4.3	17.3	2.8	25.8	5.1	20.2	32.6
34	3.7	17.9	2.0	35.4	4.2	23.2	28.9
35	2.8	22.6	1.3	60.3	3.1	33.0	25.5
36	5.0	14.1	0.5	175.9	5.1	22.6	5.8
Média	3.0	79.0	2.6	721.1	4.6	43.7	
Méd parc.	3.8	70.1	3.0	843.3	5.0	34.6	

### Legenda:

Vx: velocidade na direção x

Turb: Turbulência associada a Vx ou Vy

Vy: velocidade na direção y

Turbxy: Turbulência associada a Vxy

Vxy: velocidade resultante no plano xy

Méd parc.: média dos valores sem os pontos 1,2,13,14,25 e 26.

**Tabela A.13:** Resultados da medição do campo de velocidades em 36 pontos, com anemômetro laser.  
Plano xy, configuração 2, vazão de referência: 380 L/s

## AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

Vazão referência = 640 L/s

Veneziana + filtro

arquivos: V24-XY

Ponto	Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)
1	-3.2	67.0	-2.2	139.0	3.9	97.0	215.2
2	0.8	212.4	-1.1	300.2	1.4	272.8	306.0
3	5.2	66.9	5.9	61.5	7.9	63.9	48.6
4	0.2	398.9	8.0	38.8	8.0	39.5	88.9
5	8.0	72.1	6.5	41.2	10.3	61.5	39.4
6	-1.0	993.5	4.9	66.5	5.0	211.3	101.7
7	0.2	355.7	3.3	100.9	3.3	102.2	87.4
8	4.8	50.0	0.0	4381714.8	4.8	4964.2	0.1
9	3.1	91.4	4.2	88.3	5.2	89.4	53.1
10	6.2	21.2	4.4	78.3	7.6	48.6	35.4
11	6.3	20.2	3.0	121.6	7.0	55.5	25.5
12	4.7	32.5	-0.1	3193.2	4.7	70.6	358.9
13	-2.2	121.0	1.4	194.8	2.6	145.4	148.2
14	1.2	208.7	1.8	161.7	2.1	177.3	56.6
15	8.8	33.9	6.4	52.4	10.9	41.2	36.0
16	8.9	24.9	7.6	36.9	11.8	30.5	40.5
17	8.5	25.9	6.6	43.6	10.8	33.6	37.9
18	9.1	18.6	6.4	47.7	11.1	31.5	35.4
19	8.6	19.2	5.8	46.8	10.4	30.8	34.3
20	8.1	17.0	5.5	54.4	9.8	33.8	34.5
21	6.6	23.3	4.5	66.7	8.0	42.2	34.3
22	6.8	21.8	4.3	68.6	8.1	41.2	32.6
23	5.1	20.8	2.9	99.1	5.8	52.5	29.8
24	7.6	20.1	1.3	200.8	7.7	39.7	9.8
25	-4.9	35.8	1.8	195.9	5.2	74.2	160.3
26	-1.1	236.4	3.3	106.7	3.4	125.8	108.5
27	3.3	91.5	4.4	69.9	5.5	78.4	53.2
28	7.3	35.7	8.4	37.5	11.1	36.7	49.0
29	8.2	23.4	7.5	43.7	11.1	34.2	42.7
30	8.3	22.0	6.3	43.5	10.4	31.6	37.1
31	6.9	27.0	5.1	56.3	8.6	40.0	36.7
32	5.8	26.1	4.3	76.0	7.2	49.8	36.4
33	5.6	27.6	4.3	67.6	7.0	46.7	37.7
34	6.0	24.5	4.2	61.6	7.3	40.6	34.9
35	5.5	21.4	3.2	74.1	6.4	41.3	29.9
36	7.3	15.9	1.0	128.7	7.4	22.8	7.4
Média	4.7	97.9	4.0	121888.3	7.2	205.5	
Méd parc.	6.0	88.1	4.7	146229.4	8.0	216.9	

**Legenda:**

Vx: velocidade na direção x

Turb: Turbulência associada a Vx ou Vy

Vy: velocidade na direção y

Turbxy: Turbulência associada a Vxy

Vxy: velocidade resultante no plano xy

Méd parc.: média dos valores sem os pontos 1,2,13,14,25 e 26.

**Tabela A.14:** Resultados da medição do campo de velocidades em 36 pontos, com anemômetro las-Plano xy, configuração 2, vazão de referência: 640 L/s

## AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

Vazão referência = 380 L/s

Veneziana + filtro + registro 60°

arquivos: V25-XY

Ponto	Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)
1	-0.9	138.7	-1.4	96.1	1.6	109.9	237.8
2	1.7	96.6	-1.1	115.6	2.0	102.5	327.2
3	1.2	175.3	3.9	37.7	4.0	62.6	73.0
4	0.2	216.0	4.5	30.3	4.5	31.5	87.7
5	3.6	81.4	4.1	32.5	5.4	58.8	48.9
6	0.4	315.5	3.2	27.8	3.2	51.7	82.0
7	2.3	70.4	2.3	40.6	3.3	57.5	44.9
8	0.6	210.9	3.8	24.2	3.8	42.4	80.5
9	2.4	98.1	3.4	27.1	4.1	60.6	55.0
10	4.6	22.5	2.8	30.5	5.4	25.0	31.6
11	1.3	342.8	1.7	69.0	2.1	219.3	51.7
12	4.2	30.4	-0.3	395.4	4.3	39.1	356.4
13	-1.6	57.5	0.4	197.6	1.6	72.7	166.5
14	-2.2	48.8	1.1	89.2	2.4	59.6	152.8
15	5.2	47.3	4.1	42.3	6.7	45.5	38.1
16	5.9	23.6	4.3	27.7	7.3	25.1	36.1
17	5.0	24.2	3.4	33.8	6.0	27.7	34.7
18	5.3	21.4	3.7	33.7	6.5	26.2	35.4
19	4.8	23.1	3.4	28.2	5.8	24.9	35.5
20	4.5	23.4	3.2	27.3	5.5	24.8	35.6
21	4.3	23.8	3.1	28.3	5.3	25.5	35.9
22	4.0	24.0	2.6	34.8	4.8	27.7	33.4
23	3.4	20.3	1.9	45.1	3.9	28.0	28.5
24	4.4	21.2	0.8	118.4	4.5	29.8	10.3
25	-1.1	87.7	1.0	81.4	1.5	85.0	139.4
26	-0.2	409.6	1.7	58.0	1.7	81.9	98.3
27	3.0	61.8	2.5	41.5	3.9	54.3	40.1
28	5.7	22.5	4.4	25.8	7.2	23.8	37.6
29	5.0	23.0	3.4	31.6	6.0	26.1	34.8
30	5.1	22.3	3.8	28.2	6.4	24.5	36.6
31	3.9	29.0	2.9	32.8	4.9	30.4	36.5
32	4.3	21.9	3.1	24.9	5.3	23.0	35.4
33	4.3	16.9	2.8	29.6	5.1	21.4	32.8
34	3.7	18.0	2.0	32.9	4.2	22.4	29.0
35	2.8	21.6	1.3	62.2	3.1	32.8	25.0
36	4.9	15.2	0.5	195.2	5.0	23.5	5.3
Média	2.9	80.7	2.5	63.3	4.4	48.0	
Méd parc.	3.7	68.9	2.9	54.7	4.9	40.5	

**Legenda:**

Vx: velocidade na direção x

Turb: Turbulência associada a Vx ou Vy

Vy: velocidade na direção y

Turbxy: Turbulência associada a Vxy

Vxy: velocidade resultante no plano xy

Méd parc.: média dos valores sem os pontos 1,2,13,14,25 e 26.

**Tabela A.15:** Resultados da medição do campo de velocidades em 36 pontos, com anemômetro laser.  
Plano xy, configuração 3, vazão de referência: 380 L/s

## AVALIAÇÃO DE VELOCIDADES DO AR EM PASSAGEM CURTA

Vazão referência = 640 L/s

Veneziana + filtro + registro 60°

arquivos: V26-XY

Ponto	Vx (m/s)	Turb. %	Vy (m/s)	Turb. %	Vxy (m/s)	Turbxy %	ângulo (graus)
1	-1.9	117.3	-3.2	72.8	3.7	86.5	239.5
2	3.9	68.0	-2.9	76.7	4.9	71.2	323.6
3	7.5	70.1	3.7	84.7	8.3	73.2	26.3
4	9.0	45.4	3.6	57.6	9.7	47.3	21.8
5	5.1	71.8	3.5	56.2	6.2	67.2	34.5
6	1.4	185.4	2.0	80.6	2.5	125.6	54.7
7	5.6	34.9	2.0	81.4	5.9	42.5	19.2
8	6.4	24.8	3.5	42.0	7.3	29.7	28.8
9	6.8	22.9	2.8	55.3	7.4	29.9	22.3
10	7.8	26.3	4.8	33.2	9.1	28.4	31.7
11	7.3	36.1	2.6	66.6	7.7	40.9	20.0
12	8.1	25.9	-0.3	447.0	8.1	32.2	357.5
13	-2.8	64.5	0.6	294.9	2.9	87.0	168.2
14	-2.2	93.6	3.2	49.2	3.9	66.6	124.3
15	7.1	55.5	6.0	37.9	9.3	49.0	39.9
16	9.2	24.5	7.3	25.3	11.8	24.8	38.5
17	8.4	24.5	5.3	38.1	9.9	28.9	31.9
18	8.9	20.8	6.1	33.5	10.8	25.6	34.5
19	8.0	23.3	5.6	25.5	9.8	24.1	34.9
20	7.4	22.0	5.3	26.5	9.1	23.6	35.5
21	6.8	24.0	4.6	32.1	8.2	26.8	34.2
22	7.2	22.7	4.4	33.6	8.4	26.1	31.2
23	5.5	22.4	2.8	54.1	6.1	31.5	26.8
24	7.2	21.0	1.2	121.2	7.3	28.9	9.6
25	-1.9	90.0	1.3	138.3	2.3	108.3	145.2
26	0.4	426.1	2.6	67.8	2.6	90.4	81.9
27	4.6	51.7	4.4	38.6	6.3	46.0	43.3
28	8.9	20.3	6.6	22.6	11.1	21.2	36.7
29	8.9	23.7	6.4	24.2	10.9	23.9	36.0
30	7.6	22.8	6.0	23.9	9.7	23.2	38.3
31	6.4	29.1	5.1	29.2	8.2	29.1	38.3
32	5.7	29.9	4.7	30.0	7.4	29.9	39.6
33	4.4	124.5	4.9	33.9	6.6	87.6	47.6
34	6.5	23.9	4.5	33.1	7.9	27.2	34.7
35	6.2	21.6	3.3	49.6	7.0	30.1	28.1
36	7.5	15.9	0.9	143.9	7.5	22.9	6.6
Média	5.6	56.3	3.5	71.1	7.4	46.0	
Méd parc.	6.9	38.9	4.1	62.1	8.2	38.2	

### Legenda:

Vx: velocidade na direção x

Turb: Turbulência ass; Turb: Turbulência associada a Vx ou Vy

Vy: velocidade na direção y

Turbxy: Turbulência ε; Turbxy: Turbulência associada a Vxy

Vxy: velocidade resultante no plano xy

Méd parc.: média dos valores sem os pontos 1,2,13,14,25 e 26.

**Tabela A.16:** Resultados da medição do campo de velocidades em 36 pontos, com anemômetro laser. Plano xy, configuração 3, vazão de referência: 640 L/s

## **ANEXO B**

### **RESULTADOS DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DO ESCOAMENTO EM TORNO DO CILINDRO**

**Resultados e comparações de simulação numérica**

v = 5 m/s

Nº de nós = 72

teta	Nº de vórtices				Diferença			
	2000		1000		P (Pa)	Cp	P (%)	Cp(%)
	P (Pa)	Cp	P (Pa)	Cp				
0	13.6	1.00	13.6	1.00	0.0	0.00	0.3	0.3
5	13.4	0.98	13.3	0.98	0.1	0.01	0.5	0.5
10	12.6	0.92	12.6	0.93	0.1	0.00	0.5	0.5
15	11.5	0.84	11.4	0.84	0.1	0.01	0.8	0.7
20	9.8	0.72	9.6	0.70	0.3	0.02	2.7	2.7
25	7.7	0.56	7.5	0.55	0.1	0.01	1.9	1.9
30	5.2	0.38	5.1	0.38	0.1	0.00	1.2	1.2
35	2.8	0.21	2.6	0.19	0.2	0.02	9.0	9.0
40	0.2	0.02	0.1	0.01	0.2	0.01	225.9	225.9
45	-2.5	-0.18	-2.7	-0.20	0.2	0.02	9.0	9.0
50	-5.1	-0.37	-5.4	-0.40	0.3	0.02	6.1	6.1
55	-7.8	-0.57	-8.4	-0.62	0.6	0.05	7.4	7.4
60	-10.2	-0.75	-10.9	-0.80	0.7	0.05	6.2	6.3
65	-12.5	-0.92	-13.1	-0.96	0.6	0.04	4.5	4.5
70	-14.3	-1.05	-14.9	-1.10	0.7	0.05	4.5	4.6
75	-15.3	-1.12	-16.0	-1.17	0.7	0.05	4.2	4.2
80	-15.5	-1.14	-16.6	-1.22	1.2	0.09	6.9	7.0
85	-15.3	-1.13	-16.3	-1.20	1.0	0.07	5.9	5.9
90	-14.6	-1.07	-15.8	-1.16	1.3	0.09	8.1	8.1
95	-13.8	-1.01	-15.2	-1.11	1.4	0.10	9.0	9.1
100	-13.1	-0.96	-14.4	-1.06	1.3	0.09	8.9	8.9
105	-12.8	-0.94	-13.9	-1.02	1.1	0.08	7.7	7.7
110	-12.7	-0.93	-13.8	-1.01	1.1	0.08	8.0	8.0
115	-12.7	-0.93	-13.7	-1.01	1.1	0.08	7.7	7.7
120	-12.6	-0.93	-13.6	-1.00	1.0	0.08	7.5	7.6
125	-12.4	-0.91	-13.5	-0.99	1.1	0.08	8.1	8.1
130	-12.4	-0.91	-13.4	-0.98	1.0	0.07	7.4	7.4
135	-12.5	-0.92	-13.5	-0.99	1.0	0.07	7.1	7.0
140	-12.7	-0.94	-13.7	-1.00	0.9	0.07	6.8	6.8
145	-12.9	-0.95	-13.9	-1.02	1.0	0.07	7.1	7.1
150	-13.1	-0.96	-14.1	-1.04	1.0	0.07	7.0	6.9
155	-13.4	-0.98	-14.4	-1.06	1.0	0.07	7.0	7.1
160	-13.7	-1.00	-14.8	-1.09	1.1	0.08	7.5	7.6
165	-13.7	-1.01	-15.3	-1.12	1.5	0.11	10.0	10.0
170	-13.9	-1.02	-15.7	-1.15	1.8	0.13	11.5	11.6
175	-13.9	-1.02	-15.9	-1.16	1.9	0.14	12.1	12.1

**Legenda:**

teta: ângulo relativo à determinação da pressão

P: pressão na superfície do cilindro

Cp: coeficiente de pressão

Tabela B.1: Resultados da simulação numérica - comparação entre diferentes números de vórtices (continua).

teta	Nº de vórtices				Diferença			
	2000		1000		P (Pa)	Cp	P (%)	Cp(%)
	P (Pa)	Cp	P (Pa)	Cp				
180	-13.8	-1.02	-15.8	-1.16	2.0	0.15	12.6	12.7
185	-13.8	-1.02	-15.8	-1.16	2.0	0.14	12.3	12.3
190	-13.9	-1.02	-15.6	-1.15	1.7	0.13	11.0	11.1
195	-13.8	-1.01	-15.2	-1.12	1.4	0.10	9.3	9.3
200	-13.6	-1.00	-14.8	-1.08	1.2	0.08	7.9	7.8
205	-13.4	-0.98	-14.5	-1.07	1.2	0.09	8.0	8.0
210	-13.1	-0.96	-14.3	-1.05	1.2	0.09	8.4	8.4
215	-12.9	-0.95	-14.1	-1.04	1.2	0.09	8.5	8.5
220	-12.9	-0.94	-14.1	-1.04	1.2	0.09	8.7	8.8
225	-12.7	-0.93	-13.8	-1.01	1.1	0.08	8.1	8.1
230	-12.6	-0.93	-13.7	-1.00	1.1	0.08	7.8	7.8
235	-12.7	-0.93	-13.7	-1.01	1.0	0.08	7.4	7.5
240	-12.7	-0.93	-13.8	-1.01	1.1	0.08	7.8	7.8
245	-12.8	-0.94	-13.8	-1.01	1.0	0.07	7.1	7.1
250	-12.7	-0.93	-14.0	-1.03	1.3	0.09	9.1	9.0
255	-12.9	-0.95	-14.2	-1.04	1.3	0.09	8.8	8.8
260	-13.2	-0.97	-14.7	-1.08	1.5	0.11	10.4	10.4
265	-13.9	-1.02	-15.5	-1.14	1.6	0.12	10.1	10.1
270	-14.5	-1.07	-16.3	-1.20	1.8	0.13	11.0	11.0
275	-15.4	-1.13	-17.0	-1.25	1.5	0.11	9.0	9.0
280	-15.7	-1.15	-17.0	-1.25	1.3	0.10	7.8	7.8
285	-15.2	-1.11	-16.5	-1.21	1.3	0.10	8.1	8.2
290	-14.1	-1.04	-15.3	-1.12	1.1	0.08	7.4	7.3
295	-12.7	-0.93	-13.6	-1.00	0.9	0.07	6.7	6.6
300	-10.5	-0.77	-11.1	-0.82	0.6	0.04	5.3	5.3
305	-7.9	-0.58	-8.3	-0.61	0.5	0.03	5.6	5.6
310	-5.2	-0.38	-5.7	-0.42	0.5	0.04	8.9	8.9
315	-2.5	-0.18	-2.7	-0.20	0.2	0.01	7.3	7.3
320	0.2	0.01	-0.1	-0.01	0.3	0.02	296.8	296.8
325	2.7	0.20	2.6	0.19	0.2	0.01	5.8	5.8
330	5.1	0.38	5.1	0.37	0.0	0.00	0.4	0.4
335	7.6	0.56	7.4	0.55	0.1	0.01	1.6	1.6
340	9.8	0.72	9.5	0.70	0.2	0.02	2.5	2.5
345	11.4	0.84	11.4	0.84	0.0	0.00	0.2	0.2
350	12.6	0.92	12.6	0.92	0.0	0.00	0.2	0.2
355	13.3	0.98	13.3	0.98	0.1	0.00	0.5	0.4

**Legenda:**

teta: ângulo relativo à determinação da pressão

P: pressão na superfície do cilindro

Cp: coeficiente de pressão

Tabela B.1: Resultados da simulação numérica - comparação entre diferentes números de vórtices.



**Resultados e comparações de simulação numérica**

v = 5 m/s

Nº de nós = 72

teta	Nº de vórtices				Diferença			
	2000		3000		P (Pa)	Cp	P (%)	Cp(%)
	P (Pa)	Cp	P (Pa)	Cp				
0	13.6	1.00	13.6	1.00	0.0	0.00	0.0	0.0
5	13.4	0.98	13.4	0.98	0.0	0.00	0.0	0.0
10	12.6	0.92	12.6	0.93	0.0	0.00	0.1	0.1
15	11.5	0.84	11.5	0.84	0.0	0.00	0.1	0.1
20	9.8	0.72	9.9	0.73	0.1	0.00	0.6	0.6
25	7.7	0.56	7.8	0.57	0.1	0.01	1.4	1.4
30	5.2	0.38	5.3	0.39	0.2	0.01	3.1	3.1
35	2.8	0.21	3.1	0.23	0.3	0.02	8.3	8.3
40	0.2	0.02	0.5	0.04	0.3	0.02	53.4	53.4
45	-2.5	-0.18	-2.0	-0.15	0.4	0.03	21.8	21.9
50	-5.1	-0.37	-4.7	-0.34	0.4	0.03	9.4	9.5
55	-7.8	-0.57	-7.4	-0.54	0.5	0.03	6.3	6.3
60	-10.2	-0.75	-9.6	-0.70	0.7	0.05	6.8	6.8
65	-12.5	-0.92	-11.6	-0.85	0.9	0.06	7.4	7.5
70	-14.3	-1.05	-13.1	-0.96	1.1	0.08	8.7	8.7
75	-15.3	-1.12	-14.0	-1.03	1.3	0.10	9.3	9.3
80	-15.5	-1.14	-14.1	-1.04	1.4	0.10	9.7	9.6
85	-15.3	-1.13	-13.6	-1.00	1.7	0.13	12.5	12.6
90	-14.6	-1.07	-12.8	-0.94	1.7	0.13	13.6	13.6
95	-13.8	-1.01	-12.2	-0.90	1.6	0.11	12.7	12.7
100	-13.1	-0.96	-11.7	-0.86	1.4	0.10	12.0	12.0
105	-12.8	-0.94	-11.5	-0.84	1.4	0.10	12.0	12.0
110	-12.7	-0.93	-11.3	-0.83	1.4	0.10	12.1	12.1
115	-12.7	-0.93	-11.3	-0.83	1.4	0.10	12.2	12.2
120	-12.6	-0.93	-11.3	-0.83	1.3	0.10	11.6	11.5
125	-12.4	-0.91	-11.3	-0.83	1.2	0.09	10.3	10.3
130	-12.4	-0.91	-11.2	-0.83	1.2	0.09	10.4	10.4
135	-12.5	-0.92	-11.5	-0.85	1.0	0.07	8.5	8.6
140	-12.7	-0.94	-11.6	-0.85	1.2	0.09	10.1	10.1
145	-12.9	-0.95	-11.7	-0.86	1.2	0.09	10.4	10.4
150	-13.1	-0.96	-11.8	-0.87	1.3	0.10	11.1	11.1
155	-13.4	-0.98	-12.1	-0.89	1.2	0.09	10.1	10.1
160	-13.7	-1.00	-12.4	-0.91	1.3	0.09	10.1	10.0
165	-13.7	-1.01	-12.6	-0.93	1.1	0.08	8.8	8.7
170	-13.9	-1.02	-12.7	-0.94	1.1	0.08	8.8	8.7
175	-13.9	-1.02	-12.8	-0.94	1.1	0.08	8.7	8.7

**Legenda:**

teta: ângulo relativo à determinação da pressão

P: pressão na superfície do cilindro

Cp: coeficiente de pressão

Tabela B.2: Resultados da simulação numérica - comparação entre diferentes números de vórtices (continua).

teta	Nº de vórtices				Diferença			
	2000		3000		P (Pa)	Cp	P (%)	Cp(%)
	P (Pa)	Cp	P (Pa)	Cp				
180	-13.8	-1.02	-12.6	-0.93	1.2	0.09	9.7	9.7
185	-13.8	-1.02	-12.6	-0.93	1.2	0.09	9.7	9.7
190	-13.9	-1.02	-12.6	-0.93	1.3	0.09	10.1	10.1
195	-13.8	-1.01	-12.6	-0.92	1.2	0.09	9.8	9.8
200	-13.6	-1.00	-12.4	-0.91	1.2	0.09	9.3	9.3
205	-13.4	-0.98	-12.2	-0.89	1.2	0.09	9.7	9.7
210	-13.1	-0.96	-11.9	-0.87	1.2	0.08	9.7	9.7
215	-12.9	-0.95	-11.8	-0.87	1.1	0.08	9.4	9.4
220	-12.9	-0.94	-11.7	-0.86	1.1	0.08	9.5	9.5
225	-12.7	-0.93	-11.6	-0.85	1.0	0.08	9.0	9.0
230	-12.6	-0.93	-11.5	-0.85	1.1	0.08	9.6	9.6
235	-12.7	-0.93	-11.4	-0.84	1.3	0.09	11.2	11.2
240	-12.7	-0.93	-11.5	-0.85	1.2	0.09	10.2	10.3
245	-12.8	-0.94	-11.7	-0.86	1.1	0.08	9.1	9.1
250	-12.7	-0.93	-11.6	-0.85	1.1	0.08	9.4	9.4
255	-12.9	-0.95	-11.7	-0.86	1.2	0.09	10.4	10.4
260	-13.2	-0.97	-11.9	-0.87	1.4	0.10	11.5	11.5
265	-13.9	-1.02	-12.4	-0.91	1.5	0.11	11.8	11.8
270	-14.5	-1.07	-13.0	-0.95	1.5	0.11	11.8	11.8
275	-15.4	-1.13	-13.8	-1.01	1.7	0.12	12.1	12.2
280	-15.7	-1.15	-14.2	-1.05	1.5	0.11	10.2	10.1
285	-15.2	-1.11	-14.1	-1.03	1.1	0.08	7.9	7.8
290	-14.1	-1.04	-13.0	-0.96	1.1	0.08	8.5	8.5
295	-12.7	-0.93	-11.8	-0.87	0.9	0.07	7.8	7.8
300	-10.5	-0.77	-9.8	-0.72	0.7	0.05	7.5	7.5
305	-7.9	-0.58	-7.3	-0.54	0.6	0.04	8.0	8.0
310	-5.2	-0.38	-4.8	-0.35	0.5	0.03	9.5	9.5
315	-2.5	-0.18	-2.1	-0.15	0.4	0.03	18.6	18.6
320	0.2	0.01	0.6	0.04	0.4	0.03	66.7	66.7
325	2.7	0.20	3.0	0.22	0.2	0.02	8.1	8.2
330	5.1	0.38	5.3	0.39	0.2	0.01	3.6	3.6
335	7.6	0.56	7.8	0.57	0.2	0.02	2.7	2.7
340	9.8	0.72	9.9	0.73	0.2	0.01	1.8	1.8
345	11.4	0.84	11.5	0.84	0.1	0.01	0.9	0.8
350	12.6	0.92	12.6	0.92	0.0	0.00	0.1	0.1
355	13.3	0.98	13.4	0.98	0.0	0.00	0.1	0.2

**Legenda:**

**teta:** ângulo relativo à determinação da pressão

**P:** pressão na superfície do cilindro

**Cp:** coeficiente de pressão

Tabela B.2: Resultados da simulação numérica - comparação entre diferentes números de vórtices.

**Resultados e comparações de simulação numérica** $v = 5 \text{ m/s}$ 

Nº de nós = 72

teta	Nº de vórtices				Diferença			
	3000		4000		P (Pa)	Cp	P (%)	Cp(%)
	P (Pa)	Cp	P (Pa)	Cp				
0	13.6	1.00	13.6	1.00	0.0	0.00	0.1	0.0
5	13.4	0.98	13.3	0.98	0.0	0.00	0.1	0.1
10	12.6	0.93	12.6	0.92	0.0	0.00	0.2	0.3
15	11.5	0.84	11.4	0.84	0.1	0.00	0.4	0.4
20	9.9	0.73	9.8	0.72	0.1	0.00	0.7	0.6
25	7.8	0.57	7.7	0.56	0.1	0.01	1.4	1.4
30	5.3	0.39	5.2	0.38	0.1	0.01	2.5	2.5
35	3.1	0.23	2.9	0.21	0.2	0.01	6.2	6.2
40	0.5	0.04	0.4	0.03	0.2	0.01	48.2	48.2
45	-2.0	-0.15	-2.4	-0.17	0.3	0.02	14.0	14.1
50	-4.7	-0.34	-5.0	-0.37	0.4	0.03	7.6	7.6
55	-7.4	-0.54	-7.8	-0.57	0.4	0.03	5.0	5.0
60	-9.6	-0.70	-10.3	-0.76	0.7	0.05	7.2	7.2
65	-11.6	-0.85	-12.4	-0.91	0.8	0.06	6.1	6.1
70	-13.1	-0.96	-13.8	-1.01	0.7	0.05	4.9	4.9
75	-14.0	-1.03	-14.7	-1.08	0.7	0.06	5.0	5.1
80	-14.1	-1.04	-15.1	-1.11	1.0	0.07	6.6	6.5
85	-13.6	-1.00	-14.6	-1.07	0.9	0.07	6.4	6.4
90	-12.8	-0.94	-14.0	-1.03	1.2	0.09	8.7	8.7
95	-12.2	-0.90	-13.3	-0.97	1.0	0.08	7.7	7.7
100	-11.7	-0.86	-12.8	-0.94	1.1	0.08	8.3	8.3
105	-11.5	-0.84	-12.4	-0.91	0.9	0.07	7.6	7.5
110	-11.3	-0.83	-12.2	-0.89	0.8	0.06	6.9	6.9
115	-11.3	-0.83	-12.1	-0.89	0.8	0.06	6.5	6.4
120	-11.3	-0.83	-12.0	-0.88	0.7	0.05	5.7	5.7
125	-11.3	-0.83	-12.0	-0.88	0.7	0.05	5.9	5.9
130	-11.2	-0.83	-12.0	-0.88	0.8	0.06	6.4	6.4
135	-11.5	-0.85	-12.0	-0.88	0.5	0.04	4.2	4.2
140	-11.6	-0.85	-12.2	-0.90	0.6	0.05	5.2	5.2
145	-11.7	-0.86	-12.3	-0.91	0.7	0.05	5.3	5.3
150	-11.8	-0.87	-12.5	-0.92	0.7	0.05	5.5	5.5
155	-12.1	-0.89	-12.7	-0.93	0.5	0.04	4.1	4.1
160	-12.4	-0.91	-12.9	-0.95	0.5	0.04	4.0	4.0
165	-12.6	-0.93	-13.2	-0.97	0.5	0.04	4.2	4.1
170	-12.7	-0.94	-13.1	-0.96	0.4	0.03	3.0	3.1
175	-12.8	-0.94	-13.1	-0.96	0.3	0.02	2.1	2.1

**Legenda:****teta:** ângulo relativo à determinação da pressão**P:** pressão na superfície do cilindro**Cp:** coeficiente de pressão

Tabela B.3: Resultados da simulação numérica - comparação entre diferentes números de vórtices (continua).

teta	Nº de vórtices				Diferença			
	3000		4000		P (Pa)	Cp	P (%)	Cp(%)
	P (Pa)	Cp	P (Pa)	Cp				
180	-12.6	-0.93	-13.1	-0.96	0.5	0.03	3.5	3.6
185	-12.6	-0.93	-13.2	-0.97	0.5	0.04	4.0	4.0
190	-12.6	-0.93	-13.2	-0.97	0.6	0.04	4.3	4.3
195	-12.6	-0.92	-13.1	-0.96	0.5	0.04	4.1	4.1
200	-12.4	-0.91	-12.9	-0.95	0.5	0.03	3.6	3.6
205	-12.2	-0.89	-12.5	-0.92	0.4	0.03	3.0	2.9
210	-11.9	-0.87	-12.3	-0.90	0.4	0.03	3.0	3.0
215	-11.8	-0.87	-12.1	-0.89	0.2	0.02	1.9	1.9
220	-11.7	-0.86	-11.9	-0.88	0.2	0.02	1.7	1.7
225	-11.6	-0.85	-11.9	-0.87	0.2	0.02	2.0	2.0
230	-11.5	-0.85	-11.6	-0.85	0.1	0.01	0.9	0.9
235	-11.4	-0.84	-11.6	-0.85	0.2	0.01	1.6	1.6
240	-11.5	-0.85	-11.9	-0.87	0.3	0.02	2.7	2.7
245	-11.7	-0.86	-11.8	-0.87	0.1	0.01	1.1	1.1
250	-11.6	-0.85	-11.9	-0.87	0.3	0.02	2.2	2.2
255	-11.7	-0.86	-11.9	-0.88	0.2	0.02	2.0	2.0
260	-11.9	-0.87	-12.2	-0.90	0.4	0.03	2.9	3.0
265	-12.4	-0.91	-12.6	-0.93	0.2	0.01	1.6	1.6
270	-13.0	-0.95	-13.4	-0.98	0.4	0.03	3.0	3.0
275	-13.8	-1.01	-14.1	-1.03	0.3	0.02	2.2	2.2
280	-14.2	-1.05	-14.4	-1.06	0.2	0.01	1.3	1.2
285	-14.1	-1.03	-14.4	-1.06	0.4	0.03	2.6	2.6
290	-13.0	-0.96	-13.4	-0.98	0.4	0.03	2.6	2.6
295	-11.8	-0.87	-12.0	-0.88	0.2	0.01	1.7	1.6
300	-9.8	-0.72	-9.8	-0.72	0.0	0.00	0.4	0.4
305	-7.3	-0.54	-7.4	-0.54	0.1	0.01	1.5	1.5
310	-4.8	-0.35	-4.9	-0.36	0.2	0.01	3.2	3.1
315	-2.1	-0.15	-2.1	-0.16	0.0	0.00	0.4	0.5
320	0.6	0.04	0.6	0.04	0.0	0.00	3.4	3.4
325	3.0	0.22	3.0	0.22	0.0	0.00	0.6	0.6
330	5.3	0.39	5.4	0.39	0.1	0.00	1.2	1.2
335	7.8	0.57	7.8	0.57	0.0	0.00	0.3	0.3
340	9.9	0.73	10.0	0.73	0.0	0.00	0.5	0.5
345	11.5	0.84	11.5	0.85	0.0	0.00	0.1	0.2
350	12.6	0.92	12.6	0.93	0.0	0.00	0.4	0.3
355	13.4	0.98	13.4	0.98	0.0	0.00	0.1	0.2

**Legenda:**

teta: ângulo relativo à determinação da pressão

P: pressão na superfície do cilindro

Cp: coeficiente de pressão

Tabela B.3: Resultados da simulação numérica - comparação entre diferentes números de vórtices.

**Resultados e comparações de simulação numérica**

v = 5 m/s

Nº de nós = 72

teta	Nº de vórtices				Diferença			
	4000		5000		P (Pa)	Cp	P (%)	Cp(%)
	P (Pa)	Cp	P (Pa)	Cp				
0	13.6	1.00	13.6	1.00	0.0	0.00	0.0	0.0
5	13.3	0.98	13.3	0.98	0.0	0.00	0.2	0.1
10	12.6	0.92	12.5	0.92	0.0	0.00	0.2	0.2
15	11.4	0.84	11.4	0.84	0.0	0.00	0.0	0.0
20	9.8	0.72	9.9	0.72	0.0	0.00	0.1	0.1
25	7.7	0.56	7.7	0.56	0.0	0.00	0.0	0.1
30	5.2	0.38	5.2	0.38	0.0	0.00	0.5	0.4
35	2.9	0.21	2.9	0.21	0.0	0.00	0.3	0.4
40	0.4	0.03	0.5	0.04	0.1	0.01	26.2	26.2
45	-2.4	-0.17	-2.3	-0.17	0.0	0.00	0.9	0.9
50	-5.0	-0.37	-4.9	-0.36	0.1	0.01	2.9	2.9
55	-7.8	-0.57	-7.8	-0.57	0.0	0.00	0.1	0.1
60	-10.3	-0.76	-10.3	-0.76	0.0	0.00	0.4	0.3
65	-12.4	-0.91	-12.3	-0.90	0.1	0.01	0.7	0.7
70	-13.8	-1.01	-13.7	-1.01	0.1	0.00	0.5	0.4
75	-14.7	-1.08	-14.6	-1.07	0.2	0.01	1.1	1.2
80	-15.1	-1.11	-15.0	-1.10	0.1	0.01	0.7	0.6
85	-14.6	-1.07	-14.5	-1.06	0.1	0.01	0.7	0.7
90	-14.0	-1.03	-13.7	-1.01	0.4	0.03	2.6	2.6
95	-13.3	-0.97	-12.9	-0.95	0.4	0.03	3.0	3.0
100	-12.8	-0.94	-12.4	-0.91	0.3	0.03	2.7	2.8
105	-12.4	-0.91	-12.1	-0.89	0.3	0.02	2.6	2.6
110	-12.2	-0.89	-11.9	-0.87	0.3	0.02	2.4	2.3
115	-12.1	-0.89	-12.0	-0.88	0.1	0.01	1.1	1.0
120	-12.0	-0.88	-11.9	-0.87	0.1	0.01	0.7	0.7
125	-12.0	-0.88	-11.7	-0.86	0.2	0.02	2.0	2.0
130	-12.0	-0.88	-11.8	-0.87	0.2	0.01	1.4	1.4
135	-12.0	-0.88	-12.0	-0.88	0.1	0.01	0.8	0.8
140	-12.2	-0.90	-12.0	-0.88	0.2	0.01	1.4	1.4
145	-12.3	-0.91	-12.1	-0.89	0.2	0.02	1.6	1.7
150	-12.5	-0.92	-12.3	-0.90	0.2	0.01	1.5	1.6
155	-12.7	-0.93	-12.5	-0.92	0.2	0.01	1.3	1.3
160	-12.9	-0.95	-12.9	-0.95	0.0	0.00	0.4	0.4
165	-13.2	-0.97	-13.1	-0.96	0.1	0.01	0.7	0.7
170	-13.1	-0.96	-13.2	-0.97	0.1	0.01	0.8	0.7
175	-13.1	-0.96	-13.1	-0.96	0.0	0.00	0.2	0.2

**Legenda:**

teta: ângulo relativo à determinação da pressão

P: pressão na superfície do cilindro

Cp: coeficiente de pressão

Tabela B.4: Resultados da simulação numérica - comparação entre diferentes números de vórtices (continua).

teta	N° de vórtices				Diferença			
	4000		5000		P (Pa)	Cp	P (%)	Cp(%)
	P (Pa)	Cp	P (Pa)	Cp				
180	-13.1	-0.96	-13.0	-0.95	0.1	0.01	0.6	0.6
185	-13.2	-0.97	-12.9	-0.95	0.2	0.02	1.8	1.8
190	-13.2	-0.97	-12.8	-0.94	0.4	0.03	3.1	3.1
195	-13.1	-0.96	-12.5	-0.92	0.6	0.04	4.6	4.5
200	-12.9	-0.95	-12.3	-0.91	0.6	0.04	4.7	4.7
205	-12.5	-0.92	-12.0	-0.88	0.5	0.04	4.6	4.6
210	-12.3	-0.90	-11.8	-0.87	0.5	0.03	3.9	3.9
215	-12.1	-0.89	-11.6	-0.85	0.5	0.03	3.9	3.9
220	-11.9	-0.88	-11.5	-0.85	0.4	0.03	3.6	3.5
225	-11.9	-0.87	-11.4	-0.84	0.5	0.03	4.0	4.0
230	-11.6	-0.85	-11.2	-0.83	0.4	0.03	3.3	3.3
235	-11.6	-0.85	-11.2	-0.82	0.4	0.03	4.0	4.0
240	-11.9	-0.87	-11.4	-0.84	0.4	0.03	3.9	3.8
245	-11.8	-0.87	-11.4	-0.84	0.4	0.03	3.5	3.5
250	-11.9	-0.87	-11.4	-0.84	0.5	0.04	4.4	4.4
255	-11.9	-0.88	-11.5	-0.85	0.4	0.03	3.5	3.5
260	-12.2	-0.90	-11.8	-0.87	0.4	0.03	3.4	3.4
265	-12.6	-0.93	-12.3	-0.90	0.3	0.02	2.4	2.5
270	-13.4	-0.98	-12.9	-0.95	0.5	0.04	4.0	4.0
275	-14.1	-1.03	-13.7	-1.01	0.4	0.03	2.9	2.9
280	-14.4	-1.06	-14.1	-1.03	0.3	0.03	2.3	2.4
285	-14.4	-1.06	-14.0	-1.03	0.5	0.04	3.4	3.5
290	-13.4	-0.98	-13.2	-0.97	0.2	0.02	1.6	1.6
295	-12.0	-0.88	-11.5	-0.84	0.5	0.04	4.4	4.3
300	-9.8	-0.72	-9.6	-0.70	0.3	0.02	3.0	3.0
305	-7.4	-0.54	-7.1	-0.52	0.3	0.02	4.0	4.0
310	-4.9	-0.36	-4.8	-0.35	0.2	0.01	3.4	3.4
315	-2.1	-0.16	-2.0	-0.14	0.1	0.01	7.5	7.5
320	0.6	0.04	0.6	0.05	0.1	0.01	11.0	11.0
325	3.0	0.22	3.1	0.23	0.1	0.01	2.3	2.3
330	5.4	0.39	5.4	0.40	0.1	0.00	1.1	1.1
335	7.8	0.57	7.8	0.58	0.0	0.00	0.5	0.5
340	10.0	0.73	10.0	0.73	0.0	0.00	0.2	0.2
345	11.5	0.85	11.6	0.85	0.0	0.00	0.3	0.3
350	12.6	0.93	12.6	0.93	0.0	0.00	0.2	0.2
355	13.4	0.98	13.4	0.98	0.0	0.00	0.0	0.1

**Legenda:**

**teta:** ângulo relativo à determinação da pressão

**P:** pressão na superfície do cilindro

**Cp:** coeficiente de pressão

Tabela B.4: Resultados da simulação numérica - comparação entre diferentes números de vórtices.

### Simulação Numérica

#### Parâmetros de entrada:

Velocidade = 2 m/s

$r = 0,0075$  m

$\rho = 1,098$  kg/m<sup>3</sup>

$\mu = 1,82E-5$  Pa.s

Intervalo de tempo = 0,000375 s

Número de intervalos = 1000

Número de vórtices = 2000

Número de nós = 72

Número de Reynolds =  $1,81E+3$

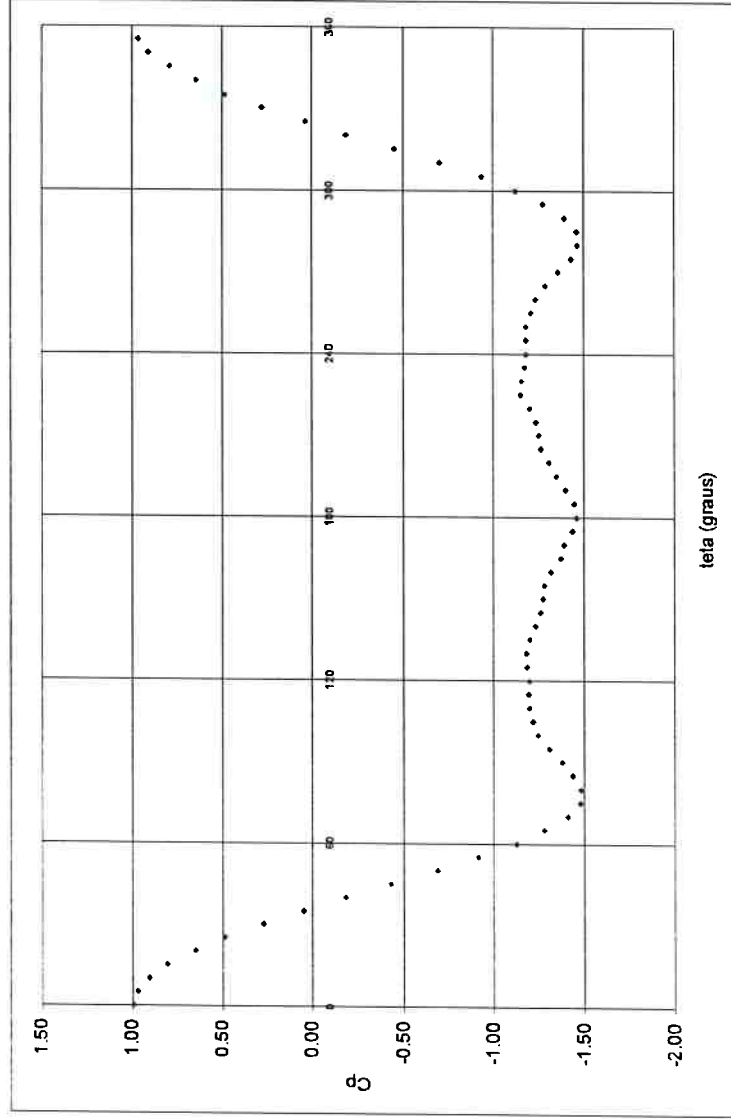


Figura B.1: Gráfico de  $C_p \times \theta$ , resultado de simulação numérica para  $V=2$  m/s,  $Nnós=72$

### Simulação Numérica

#### Parâmetros de entrada:

Velocidade = 2 m/s

$r = 0,0075$  m

$\rho = 1,098$  kg/m<sup>3</sup>

$\mu = 1.82E-5$  Pa.s

Intervalo de tempo = 0,000375 s

Número de intervalos = 1000

Número de vórtices = 2000

Número de nós = 288

Número de Reynolds = 1.81E+3

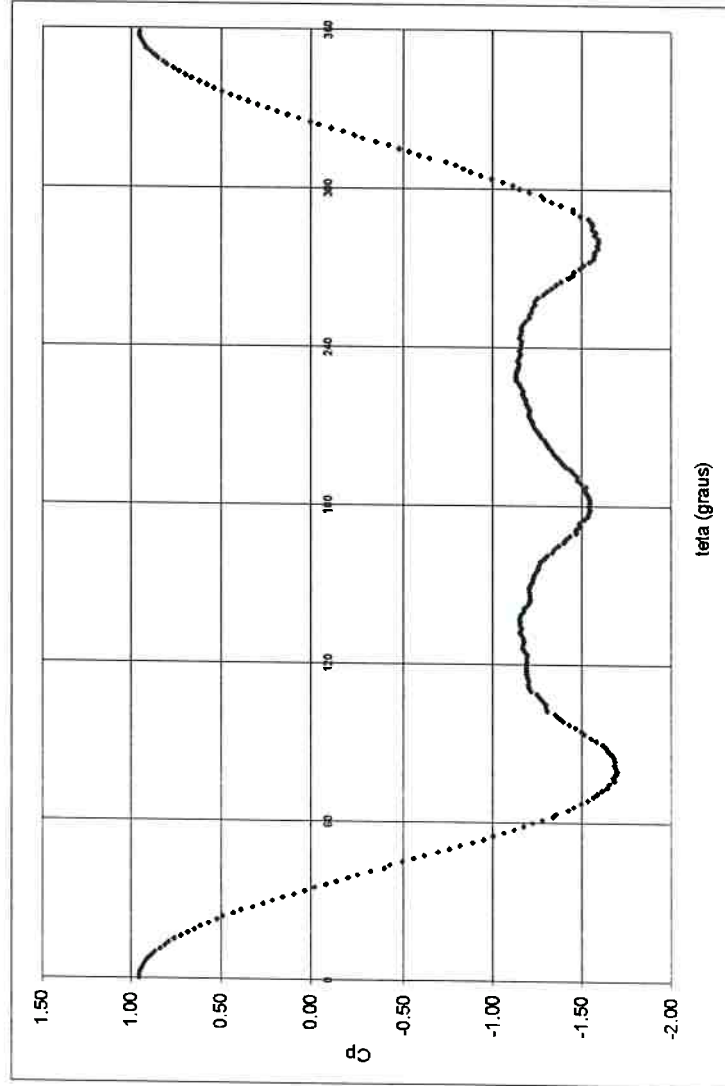


Figura B.2: Gráfico de  $C_p \times \theta$ , resultado de simulação numérica para  $V=2$  m/s,  $N_{\text{nós}}=288$



### Simulação Numérica

#### Parâmetros de entrada:

Velocidade = 5 m/s

$r = 0,0075$  m

$\rho = 1,089$  kg/m<sup>3</sup>

$\mu = 1.83E-5$  Pa.s

Intervalo de tempo = 0,0003 s

Número de intervalos = 1000

Número de vórtices = 2000

Número de nós = 72

Número de Reynolds = 4.46E+3

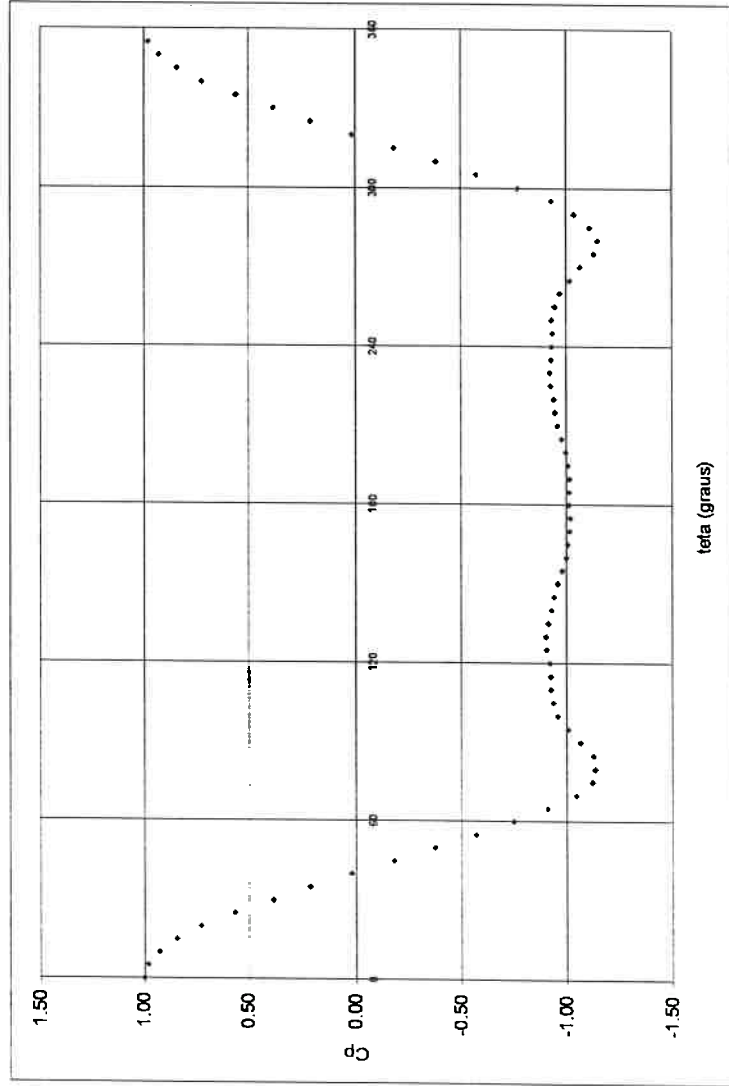


Figura B.3: Gráfico de Cp x  $\theta$ , resultado de simulação numérica para V=5 m/s, Nnós=72

### Simulação Numérica

#### Parâmetros de entrada:

Velocidade = 5 m/s

$r = 0,0075$  m

$\rho = 1,089$  kg/m<sup>3</sup>

$\mu = 1.83E-5$  Pa.s

Intervalo de tempo = 0,0003 s

Número de intervalos = 1000

Número de vórtices = 2000

Número de nós = 144

Número de Reynolds = 4.46E+3

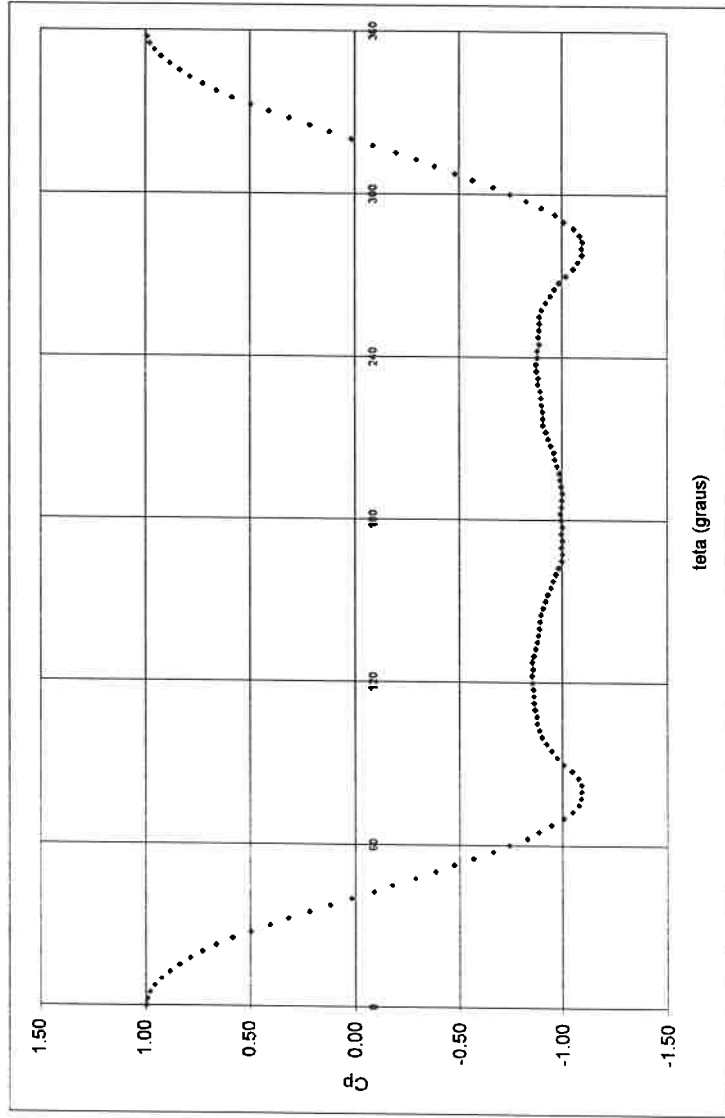


Figura B.4: Gráfico de  $C_p \times \theta$ , resultado de simulação numérica para  $V=5$  m/s,  $N_{nós}=144$

### Simulação Numérica

#### Parâmetros de entrada:

Velocidade = 5 m/s

$r = 0,0075$  m

$\rho = 1,089$  kg/m<sup>3</sup>

$\mu = 1.83E-5$  Pa.s

Intervalo de tempo = 0,0003 s

Número de intervalos = 1000

Número de vórtices = 2000

Número de nós = 288

Número de Reynolds = 4.46E+3

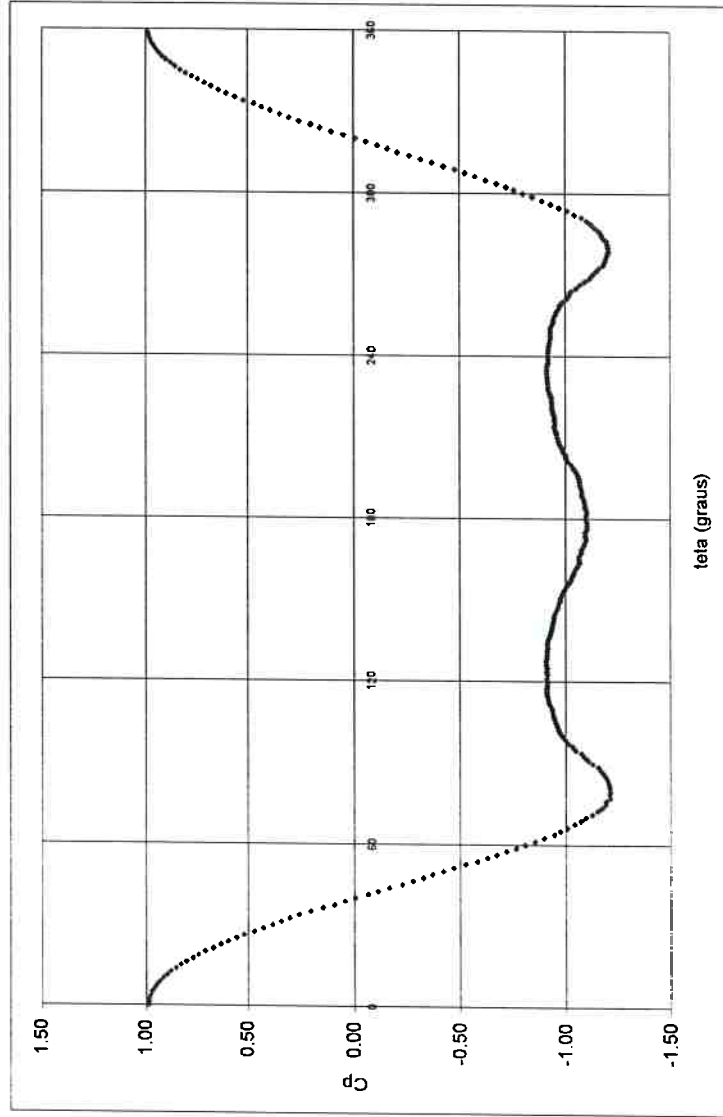


Figura B.5: Gráfico de  $C_p \times \theta$ , resultado de simulação numérica para  $V=5$  m/s,  $Nnós=288$

### Simulação Numérica

#### Parâmetros de entrada

Velocidade = 5 m/s

$r = 0,0075$  m

$\rho = 1,089$  kg/m<sup>3</sup>

$\mu = 1.83E-5$  Pa.s

Intervalo de tempo = 0,0003 s

Número de intervalos = 1000

Número de vórtices = 2000

Número de nós = 360

Número de Reynolds = 4.46E+3

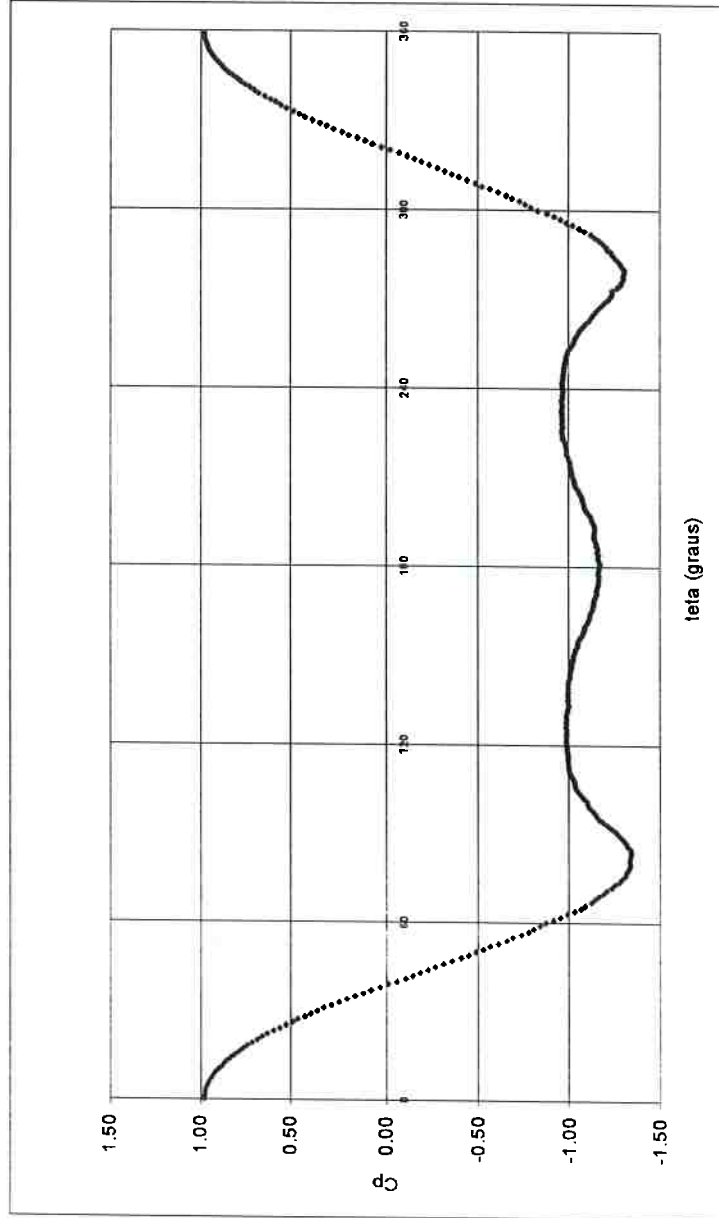


Figura B.6: Gráfico de  $C_p \times \theta$ , resultado de simulação numérica para  $V=5$  m/s,  $Nnós=360$

### Simulação Numérica

#### Parâmetros de entrada:

Velocidade = 10 m/s

$r = 0,0075$  m

$\rho = 1,093$  kg/m<sup>3</sup>

$\mu = 1.83E-5$  Pa.s

Intervalo de tempo = 0,000015 s

Número de intervalos = 1000

Número de vórtices = 2000

Número de nós = 144

Número de Reynolds = 8.96E+3

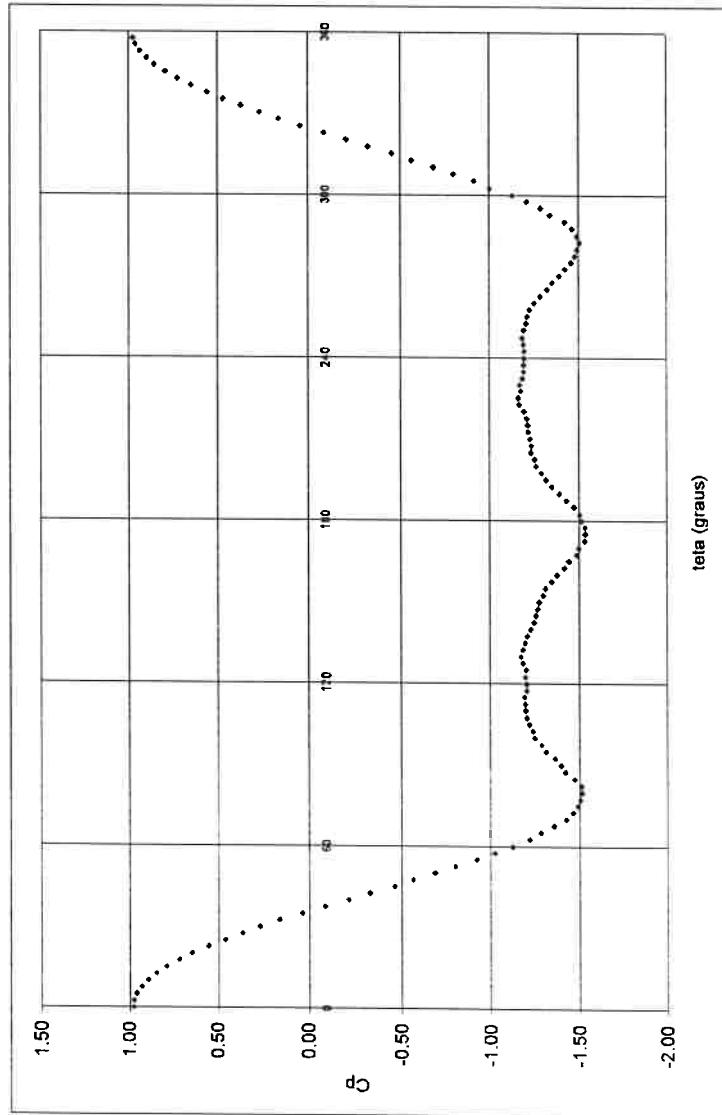


Figura B.7: Gráfico de  $C_p \times \theta$ , resultado de simulação numérica para  $V=10$ m/s,  $N_{nós}=144$

### Simulação Numérica

#### Parâmetros de entrada:

Velocidade = 10 m/s

$r = 0,0075$  m

$\rho = 1,093$  kg/m<sup>3</sup>

$\mu = 1,83E-5$  Pa.s

Intervalo de tempo = 0,000015 s

Número de intervalos = 1000

Número de vórtices = 2000

Número de nós = 72

Número de Reynolds = 8.96E+3

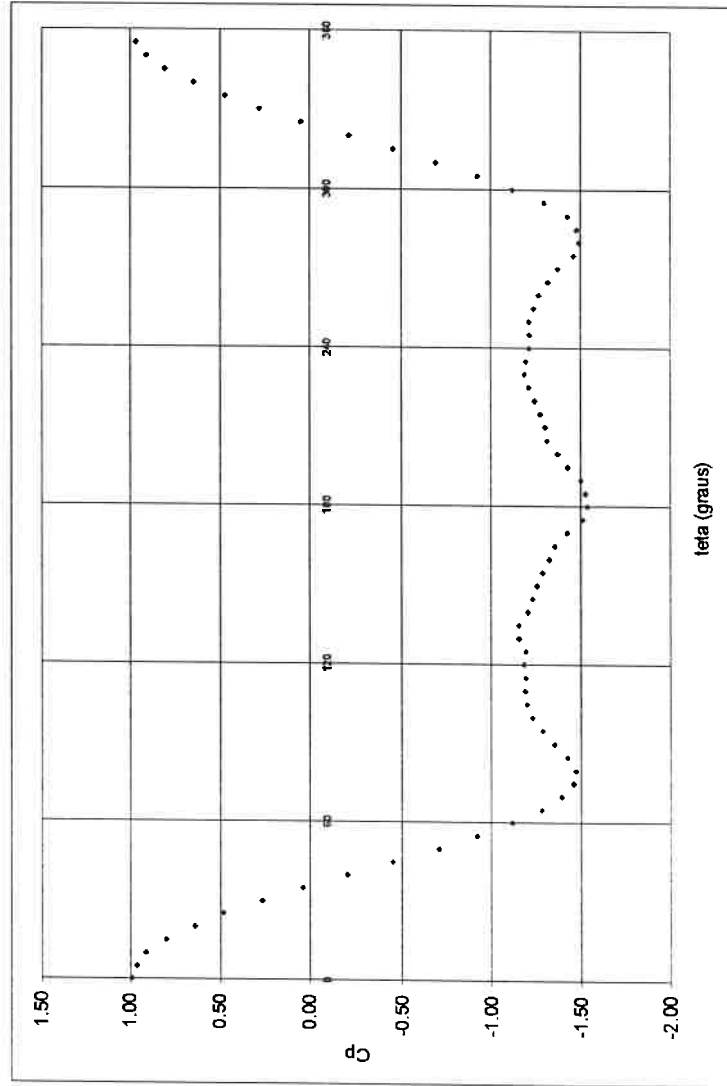


Figura B.8: Gráfico de  $C_p \times \theta$ , resultado de simulação numérica para  $V=10$  m/s,  $N_{nós}=72$

### Comparação de resultados de simulação numérica e ensaios experimentais

$v = 2\text{m/s}$

teta (graus)	Psim (Pa)	Pexp (Pa)	Psim - Pexp	
			(Pa)	(%)
0	2.2	2.0	0.1	7.3
5	2.1	2.0	0.1	4.6
10	2.0	2.0	0.0	1.9
15	1.8	1.8	-0.1	3.6
20	1.4	1.4	0.0	1.2
25	1.1	1.2	-0.1	11.1
30	0.6	0.9	-0.3	30.8
35	0.1	0.4	-0.3	72.8
40	-0.4	0.0	-0.4	1330.7
45	-1.0	-0.6	-0.3	54.0
50	-1.5	-1.0	-0.5	50.3
55	-2.0	-1.4	-0.6	44.0
60	-2.5	-1.6	-0.8	50.5
65	-2.8	-2.0	-0.8	41.5
70	-3.1	-2.1	-1.0	48.6
75	-3.3	-2.1	-1.2	55.7
80	-3.3	-2.0	-1.3	63.8
85	-3.2	-1.6	-1.5	91.9
90	-3.0	-1.5	-1.5	102.3
95	-2.9	-1.5	-1.4	91.1
100	-2.7	-1.5	-1.3	87.8
105	-2.7	-1.4	-1.3	97.1
110	-2.6	-1.3	-1.4	110.0
115	-2.6	-1.2	-1.4	118.1
120	-2.6	-1.4	-1.2	88.6
125	-2.6	-1.2	-1.4	110.1
130	-2.6	-1.3	-1.3	94.4
135	-2.6	-1.3	-1.3	99.4
140	-2.7	-1.4	-1.3	91.1
145	-2.8	-1.4	-1.4	104.0
150	-2.8	-1.3	-1.6	123.8
155	-2.8	-1.2	-1.6	135.5
160	-2.9	-1.2	-1.7	133.8
165	-3.0	-1.4	-1.6	110.3
170	-3.1	-1.3	-1.7	129.6
175	-3.2	-1.3	-1.8	137.3
180	-3.2	-1.3	-1.9	141.4

**Legenda:**

**Psim:** pressão obtida na simulação numérica

**Pexp:** pressão obtida nos ensaios experimentais

Tabela B.5: Comparação de resultados da simulação numérica e ensaios experimentais para valores de distribuição de pressão sobre o cilindro,  $V = 2\text{ m/s}$

### Comparação de resultados de simulação numérica e ensaios experimentais

$v = 5\text{ m/s}$

teta (graus)	Psim. Num. (Pa)	Pexp (Pa)	DP	
			(Pa)	(%)
0	13.6	13.9	-0.3	2.0
5	13.4	13.6	-0.2	1.7
10	12.6	13.0	-0.4	3.0
15	11.5	11.6	-0.2	1.4
20	9.8	9.8	0.1	1.0
25	7.7	7.7	0.0	0.0
30	5.2	5.0	0.2	3.6
35	2.8	2.1	0.8	37.1
40	0.2	-0.7	0.9	136.4
45	-2.5	-3.7	1.2	32.7
50	-5.1	-6.6	1.5	22.7
55	-7.8	-9.1	1.2	13.6
60	-10.2	-11.0	0.7	6.6
65	-12.5	-12.3	-0.2	1.7
70	-14.3	-12.8	-1.5	11.4
75	-15.3	-12.2	-3.0	24.8
80	-15.5	-11.3	-4.2	37.4
85	-15.3	-9.9	-5.4	54.3
90	-14.6	-9.3	-5.2	55.9
95	-13.8	-8.8	-4.9	56.1
100	-13.1	-9.1	-4.0	44.4
105	-12.8	-9.1	-3.8	41.7
110	-12.7	-8.9	-3.8	42.2
115	-12.7	-9.0	-3.7	41.7
120	-12.6	-8.9	-3.7	41.3
125	-12.4	-8.8	-3.6	40.5
130	-12.4	-8.8	-3.6	40.6
135	-12.5	-8.9	-3.6	40.8
140	-12.7	-8.8	-4.0	45.4
145	-12.9	-8.3	-4.6	55.6
150	-13.1	-8.7	-4.4	50.1
155	-13.4	-8.7	-4.7	53.4
160	-13.7	-8.2	-5.4	65.9
165	-13.7	-8.2	-5.5	66.9
170	-13.9	-8.3	-5.6	67.0
175	-13.9	-8.1	-5.8	71.1
180	-13.8	-8.2	-5.7	69.3

**Legenda:**

**Psim:** pressão obtida na simulação numérica

**Pexp:** pressão obtida nos ensaios experimentais

Tabela B.6: Comparação de resultados da simulação numérica e ensaios experimentais para valores de distribuição de pressão sobre o cilindro,  $V = 5\text{ m/s}$



### Comparação de resultados de simulação numérica e ensaios experimentais

$v = 10\text{m/s}$

teta (graus)	Psim. Num. (Pa)	Pexp (Pa)	DP	
			(Pa)	(%)
0	54.3	53.2	1.1	2.0
5	52.7	52.3	0.3	0.6
10	50.0	50.5	-0.6	1.1
15	43.7	45.6	-1.9	4.2
20	35.0	39.0	-4.0	10.1
25	26.4	30.4	-4.0	13.2
30	14.3	20.3	-5.9	29.2
35	2.0	9.1	-7.1	77.9
40	-11.1	-2.8	-8.3	297.5
45	-24.8	-14.5	-10.3	71.1
50	-38.8	-25.8	-12.9	50.0
55	-50.4	-36.5	-13.9	38.0
60	-61.3	-45.0	-16.3	36.3
65	-70.2	-51.3	-18.8	36.7
70	-76.2	-52.3	-23.9	45.8
75	-79.9	-52.5	-27.4	52.1
80	-80.5	-46.1	-34.4	74.6
85	-78.0	-41.7	-36.3	87.2
90	-74.1	-39.2	-35.0	89.3
95	-70.5	-37.1	-33.4	90.1
100	-67.4	-35.4	-32.0	90.2
105	-65.7	-37.0	-28.7	77.7
110	-65.2	-38.2	-27.0	70.5
115	-65.4	-37.9	-27.5	72.6
120	-64.9	-37.5	-27.4	73.0
125	-65.3	-37.2	-28.1	75.5
130	-63.2	-35.9	-27.2	75.8
135	-63.2	-35.7	-27.5	77.0
140	-66.0	-33.9	-32.2	94.9
145	-67.4	-34.3	-33.2	96.8
150	-68.9	-34.8	-34.1	97.9
155	-70.5	-34.3	-36.2	105.5
160	-72.6	-34.5	-38.1	110.5
165	-74.3	-33.2	-41.1	123.8
170	-78.0	-32.8	-45.1	137.4
175	-82.9	-32.6	-50.4	154.7
180	-84.4	-31.0	-53.4	172.3

**Legenda:**

**Psim:** pressão obtida na simulação numérica

**Pexp:** pressão obtida nos ensaios experimentais

Tabela B.7: Comparação de resultados da simulação numérica e ensaios experimentais para valores de distribuição de pressão sobre o cilindro,  $V = 10\text{ m/s}$

## ANEXO C

### RESULTADOS DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS DO ESCOAMENTO EM TORNO DE CILINDRO

#### Legenda para todas as tabelas:

$P_{atm}$ : pressão atmosférica

$\omega$ : umidade absoluta do ar

$\rho$ : massa específica do ar

$\Delta P_{pitot}$ : diferença de pressão no tubo de Pitot

**Velocidade:** velocidade na seção de testes no túnel de vento

$\Delta P_{2-E}$ : diferença de pressão entre os pontos 2 e E

**Posição do tubo:** ângulo que está o orifício 2 do cilindro

**Pesteira:** pressão no orifício de esteira do cilindro (E)

$P_2$ : pressão no orifício 2 do cilindro

$\mu$ : viscosidade dinâmica do ar

**Re:** número de Reynolds em função do diâmetro do cilindro (d)

## ENSAIO DE CALIBRAÇÃO DE CILINDROS COMO SENSOR DE VELOCIDADE

Hora : 19:30                      Equipe : Mariani e J. Fran                      Comprimento (mm) : 300  
 Protótipo nº : 4                      Diâmetro externo (mm) : 15                      Sentido de Rotação : HORÁRIO  
 Tomadas de pressão de estagnação : 4 (1mm)  
 Tomadas de pressão de esteira : 4 (1,6mm)

### CÁLCULOS E RESULTADOS

v = 2. m/s

Medida	P <sub>atm</sub> ( Pa )	ω (kg/kg)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	ΔP <sub>pitot</sub> ( Pa )	Velocidade ( m/s )	ΔP <sub>z-z</sub> ( Pa )	Posição do tubo	P <sub>esteira</sub> ( Pa )	P <sub>z</sub> ( Pa )	μ ( Pa.s )	Re
1	93970	0.00864	1.099	2.2	2.00	3.5	0	-1.5	2.0	1.82E-05	1813
2	93978	0.00858	1.099	2.2	2.00	3.5	5	-1.5	2.0	1.82E-05	1812
3	93984	0.00869	1.098	2.2	2.00	3.5	10	-1.5	2.0	1.82E-05	1812
4	93984	0.00869	1.098	2.2	2.00	3.3	15	-1.5	1.8	1.82E-05	1812
5	93983	0.00869	1.098	2.2	2.00	2.9	20	-1.5	1.4	1.82E-05	1812
6	93980	0.00869	1.098	2.2	2.00	2.7	25	-1.5	1.2	1.82E-05	1812
7	93980	0.00869	1.098	2.2	2.00	2.4	30	-1.5	0.9	1.82E-05	1812
8	93979	0.00869	1.098	2.2	2.00	1.9	35	-1.5	0.4	1.82E-05	1812
9	93975	0.00869	1.098	2.2	2.00	1.5	40	-1.5	0.0	1.82E-05	1812
10	93974	0.00869	1.098	2.2	2.00	1.2	42	-1.5	-0.3	1.82E-05	1812
11	93975	0.00869	1.098	2.2	2.00	0.9	45	-1.5	-0.6	1.82E-05	1812

Tabela C.1: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes v= 2m/s (continua)

Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{z,z}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estera}$ ( Pa )	$P_z$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
12	93976	1.098	2.2	2.00	0.5	50	-1.5	-1.0	1.82E-05	1812
13	93979	1.098	2.2	2.00	0.1	55	-1.5	-1.4	1.82E-05	1812
14	93976	1.098	2.2	2.00	-0.1	60	-1.5	-1.6	1.82E-05	1812
15	93998	1.099	2.2	2.00	-0.5	65	-1.5	-2.0	1.82E-05	1812
16	93999	1.099	2.2	2.00	-0.6	70	-1.5	-2.1	1.82E-05	1812
17	93999	1.098	2.2	2.00	-0.6	75	-1.5	-2.1	1.82E-05	1811
18	93999	1.098	2.2	2.00	-0.5	80	-1.5	-2.0	1.82E-05	1811
19	93998	1.098	2.2	2.00	-0.1	85	-1.5	-1.6	1.82E-05	1811
20	93999	1.098	2.2	2.00	0.0	90	-1.5	-1.5	1.82E-05	1811
21	93999	1.098	2.2	2.00	0.2	95	-1.8	-1.5	1.82E-05	1811
22	93996	1.098	2.2	2.00	0.5	100	-2.0	-1.5	1.82E-05	1811
23	93982	1.098	2.2	2.00	0.6	105	-2.0	-1.4	1.82E-05	1811
24	93980	1.098	2.2	2.00	0.5	110	-1.8	-1.3	1.82E-05	1811
25	93984	1.098	2.2	2.00	0.4	115	-1.6	-1.2	1.82E-05	1811

Tabela C.1: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes  $v=2\text{m/s}$  (continua)

Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\omega$ (kg/kg)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{2-E}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estera}$ ( Pa )	$P_2$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
26	93987	0.00875	1.098	2.2	2.00	0.0	120	-1.4	-1.4	1.82E-05	1811
27	93990	0.00875	1.098	2.2	2.00	-0.2	125	-1.0	-1.2	1.82E-05	1811
28	93992	0.00875	1.098	2.2	2.00	-0.6	130	-0.8	-1.3	1.82E-05	1811
29	93999	0.00875	1.098	2.2	2.00	-1.1	135	-0.3	-1.3	1.82E-05	1811
30	94000	0.00875	1.098	2.2	2.00	-1.5	140	0.1	-1.4	1.82E-05	1811
31	94002	0.00875	1.098	2.2	2.00	-2.0	145	0.6	-1.4	1.82E-05	1811
32	94000	0.00875	1.098	2.2	2.00	-2.4	150	1.1	-1.3	1.82E-05	1811
33	93996	0.00875	1.098	2.2	2.00	-2.7	155	1.5	-1.2	1.82E-05	1811
34	93995	0.00875	1.098	2.2	2.00	-3.0	160	1.8	-1.2	1.82E-05	1811
35	93995	0.00875	1.098	2.2	2.00	-3.2	165	1.8	-1.4	1.82E-05	1811
36	93996	0.00875	1.098	2.2	2.00	-3.3	170	2.0	-1.3	1.82E-05	1811
37	93998	0.00875	1.098	2.2	2.00	-3.4	175	2.1	-1.3	1.82E-05	1811
38	94000	0.00875	1.098	2.2	2.00	-3.4	180	2.1	-1.3	1.82E-05	1811

Tabela C.1 : Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes  $v=2\text{m/s}$

## ENSAIO DE CALIBRAÇÃO DE CILINDROS COMO SENSOR DE VELOCIDADE

Hora : 22:00      Equipe : Mariani e J. Fran  
 Protótipo nº : 4      Diâmetro externo (mm) : 15      Comprimento (mm) : 300  
 Tomadas de pressão de estagnação : 4 (1mm)      Sentido de Rotação : HORÁRIO  
 Tomadas de pressão de esteira : 4 (1.6mm)

### CÁLCULOS E RESULTADOS

v = 3 m/s

Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\phi$ (kg/kg)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{2-z}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{esteira}$ ( Pa )	$P_2$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
1	94011	0.00869	1.098	4.9	2.99	8.2	0	-2.9	5.3	1.82E-05	2699
2	94011	0.00869	1.098	4.9	2.99	8.2	5	-2.9	5.3	1.82E-05	2699
3	94010	0.00869	1.098	4.9	2.99	8.1	10	-2.9	5.2	1.82E-05	2699
4	94011	0.00875	1.098	4.9	2.99	7.7	15	-2.9	4.8	1.82E-05	2699
5	94008	0.00869	1.098	4.9	2.99	7.1	20	-2.9	4.2	1.82E-05	2699
6	94008	0.00875	1.098	4.9	2.99	6.3	25	-3.0	3.3	1.82E-05	2699
7	94010	0.00875	1.098	4.9	2.99	5.4	30	-3.0	2.4	1.82E-05	2699
8	94007	0.00881	1.098	4.9	2.99	4.4	35	-3.0	1.4	1.82E-05	2699
9	94008	0.00875	1.098	4.9	2.99	3.3	40	-3.0	0.3	1.82E-05	2699
10	94010	0.00875	1.098	4.9	2.99	2.4	45	-3.0	-0.6	1.82E-05	2699
11	94011	0.00875	1.098	4.9	2.99	1.2	50	-3.0	-1.8	1.82E-05	2699

Tabela C.2: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes v = 3 m/s (continua)

Medida	$P_{stat}$ ( Pa )	$\omega$ (kg/kg)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{z,z}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{static}$ ( Pa )	$P_z$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
12	94011	0.00875	1.098	4.9	2.99	0.4	55	-3.0	-2.6	1.82E-05	2699
13	94012	0.00875	1.098	4.9	2.99	-0.4	60	-3.0	-3.4	1.82E-05	2699
14	94014	0.00875	1.098	4.9	2.99	-1.0	65	-3.0	-4.0	1.82E-05	2699
15	94016	0.00881	1.098	4.9	2.99	-1.2	70	-3.0	-4.2	1.82E-05	2699
16	94016	0.00881	1.098	4.9	2.99	-1.2	75	-3.0	-4.2	1.82E-05	2699
17	94016	0.00881	1.098	4.9	2.99	-0.9	80	-3.0	-3.9	1.82E-05	2699
18	94014	0.00875	1.098	4.9	2.99	-0.4	85	-3.1	-3.5	1.82E-05	2699
19	94015	0.00881	1.098	4.9	2.99	0.0	90	-3.4	-3.4	1.82E-05	2699
20	94018	0.00881	1.098	4.9	2.99	0.6	95	-3.6	-3.0	1.82E-05	2699
21	94023	0.00881	1.098	4.9	2.99	1.2	100	-4.0	-2.8	1.82E-05	2699
22	94027	0.00887	1.098	4.9	2.99	1.4	105	-3.6	-2.2	1.82E-05	2699
23	94028	0.00881	1.098	4.9	2.99	1.2	110	-3.9	-2.7	1.82E-05	2699
24	94031	0.00887	1.098	4.9	2.99	0.7	115	-3.5	-2.8	1.82E-05	2699

Tabela C.2: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes  $v = 3$  m/s (continua)

Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\omega$ (kg/kg)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{2,E}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estera}$ ( Pa )	$P_2$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
25	94037	0.00887	1.098	4.9	2.99	0.2	120	-2.9	-2.7	1.82E-05	2699
26	94039	0.00875	1.098	4.9	2.99	-0.6	125	-2.0	-2.6	1.82E-05	2699
27	94039	0.00881	1.098	4.9	2.99	-1.6	130	-1.1	-2.7	1.82E-05	2699
28	94039	0.00875	1.098	4.9	2.99	-2.5	135	0.0	-2.5	1.82E-05	2699
29	94037	0.00887	1.098	4.9	2.99	-3.5	140	0.9	-2.7	1.82E-05	2699
30	94037	0.00881	1.098	4.9	2.99	-4.5	145	1.9	-2.6	1.82E-05	2698
31	94037	0.00881	1.098	4.9	2.99	-5.4	150	2.8	-2.6	1.82E-05	2698
32	94044	0.00886	1.098	4.9	2.99	-6.3	155	3.5	-2.8	1.82E-05	2698
33	94053	0.00886	1.098	4.9	2.99	-7.0	160	4.3	-2.7	1.82E-05	2698
34	94053	0.0088	1.098	4.9	2.99	-7.5	165	4.9	-2.6	1.82E-05	2698
35	94053	0.00886	1.098	4.9	2.99	-7.8	170	5.0	-2.8	1.82E-05	2698
36	94053	0.00886	1.098	4.9	2.99	-7.9	175	5.1	-2.8	1.82E-05	2698
37	94055	0.00875	1.098	4.9	2.99	-7.9	180	5.2	-2.8	1.82E-05	2699

Tabela C.2: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes  $v = 3$  m/s



## ENSAIO DE CALIBRAÇÃO DE CILINDROS COMO SENSOR DE VELOCIDADE

Hora : 23:30

Equipe : Mariani e J. Fran

Protótipo n° : 4

Diâmetro externo (mm) : 15

Comprimento (mm) : 300

Tomadas de pressão de estagnação : 4 (1mm)

Sentido de Rotação : HORÁRIO

Tomadas de pressão de esteira : 4 (1.6mm)

### CÁLCULOS E RESULTADOS

v = 4 m/s

Medida	$P_{s,tm}$ ( Pa )	$\omega$ (kg/kg)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{1,2}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{esteira}$ ( Pa )	$P_2$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
1	94037	0.00887	1.098	8.8	4.01	14.7	0	-5.9	8.8	1.82E-05	3620
2	94032	0.00887	1.098	8.8	4.01	14.7	5	-5.9	8.8	1.82E-05	3620
3	94033	0.00881	1.098	8.8	4.01	14.5	10	-5.9	8.6	1.82E-05	3620
4	94032	0.00881	1.098	8.8	4.01	13.7	15	-5.9	7.8	1.82E-05	3620
5	94037	0.00881	1.098	8.8	4.01	12.7	20	-5.9	6.8	1.82E-05	3620
6	94037	0.00881	1.098	8.8	4.01	11.3	25	-5.9	5.4	1.82E-05	3620
7	94036	0.00881	1.098	8.8	4.01	9.7	30	-5.9	3.8	1.82E-05	3620
8	94036	0.00887	1.098	8.8	4.01	7.8	35	-6.0	1.8	1.82E-05	3620
9	94039	0.00881	1.098	8.8	4.01	5.9	40	-6.0	-0.1	1.82E-05	3620
10	94039	0.00881	1.097	8.8	4.01	4.0	45	-6.0	-2.0	1.82E-05	3618
11	94040	0.00875	1.098	8.8	4.01	2.4	50	-6.0	-3.6	1.82E-05	3619

Tabela C.3: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes v = 4 m/s (continua)

Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\omega$ (kg/kg)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pítot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{2,R}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estera}$ ( Pa )	$P_2$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
12	94041	0.00875	1.098	8.8	4.01	0.4	55	-5.9	-5.5	1.82E-05	3619
13	94036	0.00881	1.097	8.8	4.01	-1.0	60	-6.0	-7.0	1.82E-05	3618
14	94037	0.00887	1.097	8.8	4.01	-2.0	65	-6.0	-8.0	1.82E-05	3618
15	94037	0.00893	1.097	8.8	4.01	-2.4	70	-6.0	-8.4	1.82E-05	3618
16	94036	0.00893	1.097	8.8	4.01	-2.1	75	-6.0	-8.1	1.82E-05	3618
17	94037	0.00887	1.097	8.8	4.01	-1.6	80	-6.0	-7.6	1.82E-05	3618
18	94033	0.00893	1.097	8.8	4.01	-0.7	85	-6.0	-6.7	1.82E-05	3618
19	94027	0.00881	1.097	8.8	4.01	0.0	90	-6.4	-6.4	1.82E-05	3618
20	94026	0.00893	1.097	8.8	4.01	0.9	95	-6.9	-6.0	1.82E-05	3618
21	94024	0.00893	1.097	8.8	4.01	1.9	100	-7.5	-5.6	1.82E-05	3618
22	94028	0.00887	1.097	8.8	4.01	2.4	105	-7.8	-5.4	1.82E-05	3618
23	94026	0.00881	1.097	8.8	4.01	2.1	110	-7.4	-5.3	1.82E-05	3618
24	94024	0.00881	1.097	8.8	4.01	1.2	115	-6.6	-5.4	1.82E-05	3618

Tabela C.3: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes  $v = 4$  m/s (continua)

Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\omega$ ( kg/kg )	$\rho$ ( kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{2-E}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estera}$ ( Pa )	$P_2$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
25	94023	0.00893	1.097	8.8	4.01	0.1	120	-5.5	-5.4	1.82E-05	3618
26	94023	0.00893	1.097	8.8	4.01	-1.2	125	-4.1	-5.3	1.82E-05	3618
27	94022	0.00887	1.097	8.8	4.01	-2.8	130	-2.5	-5.3	1.82E-05	3618
28	94023	0.00887	1.097	8.8	4.01	-4.7	135	-0.8	-5.4	1.82E-05	3618
29	94027	0.00887	1.097	8.8	4.01	-6.3	140	1.2	-5.2	1.82E-05	3618
30	94028	0.00881	1.098	8.8	4.01	-7.9	145	2.6	-5.3	1.82E-05	3620
31	94031	0.00893	1.097	8.8	4.01	-9.8	150	4.5	-5.3	1.82E-05	3618
32	94032	0.00887	1.097	8.8	4.01	-11.2	155	5.9	-5.3	1.82E-05	3618
33	94029	0.00887	1.097	8.8	4.01	-12.5	160	7.3	-5.3	1.82E-05	3618
34	94029	0.00887	1.097	8.8	4.01	-13.3	165	8.1	-5.2	1.82E-05	3618
35	94027	0.00881	1.097	8.8	4.01	-14.0	170	8.8	-5.2	1.82E-05	3618
36	94026	0.00887	1.097	8.8	4.01	-14.2	175	9.0	-5.2	1.82E-05	3618
37	94024	0.00893	1.097	8.8	4.01	-14.2	180	9.0	-5.2	1.82E-05	3618

Tabela C.3: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes  $v = 4$  m/s

## ENSAIO DE CALIBRAÇÃO DE CILINDROS COMO SENSOR DE VELOCIDADE

Hora : 23:30

Equipe : Mariani e J. Fran

Protótipo nº : 4

Diâmetro externo (mm) : 15

Comprimento (mm) : 300

Tomadas de pressão de estagnação : 4 (1mm)

Sentido de Rotação : HORÁRIO

Tomadas de pressão de esteira : 4 (1,6mm)

### CÁLCULOS E RESULTADOS

v = 5 m/s

Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade (m/s)	$\Delta P_{2-z}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estagn}$ ( Pa )	$P_z$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
1	93634	1.089	13.7	5.02	23.0	0	-9.0	14.0	1.83E-05	4491
2	93631	1.089	13.7	5.02	22.8	5	-9.0	13.8	1.83E-05	4491
3	93643	1.089	13.7	5.02	22.5	10	-9.1	13.4	1.83E-05	4491
4	93643	1.089	13.7	5.02	21.1	15	-9.0	12.1	1.83E-05	4491
5	93656	1.090	13.7	5.02	19.4	20	-9.0	10.4	1.83E-05	4492
6	93643	1.089	13.7	5.02	17.4	25	-9.0	8.4	1.83E-05	4492
7	93643	1.089	13.7	5.02	15.0	30	-9.1	5.9	1.83E-05	4492
8	93643	1.089	13.7	5.02	12.0	35	-9.1	2.9	1.83E-05	4492
9	93643	1.089	13.7	5.02	9.6	40	-9.3	0.3	1.83E-05	4491
10	93643	1.089	13.7	5.02	6.6	45	-9.3	-2.6	1.83E-05	4492
11	93643	1.089	13.7	5.02	3.3	50	-9.0	-5.7	1.83E-05	4492

Tabela C.4: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes v = 5 m/s (continua)

Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\omega$ (kg/kg)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{z,z}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{cancha}$ ( Pa )	$P_z$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
12	93630	0.01005	1.089	13.7	5.02	0.9	55	-9.1	-8.2	1.83E-05	4491
13	93630	0.01005	1.089	13.7	5.02	-1.2	60	-9.0	-10.2	1.83E-05	4491
14	93630	0.00998	1.089	13.7	5.02	-2.6	65	-9.0	-11.6	1.83E-05	4491
15	93630	0.00991	1.089	13.7	5.02	-3.2	70	-9.0	-12.2	1.83E-05	4491
16	93617	0.00998	1.089	13.7	5.02	-2.7	75	-9.1	-11.8	1.83E-05	4491
17	93617	0.00991	1.089	13.7	5.02	-1.8	80	-9.3	-11.1	1.83E-05	4491
18	93617	0.00998	1.089	13.7	5.02	-0.5	85	-9.3	-9.8	1.83E-05	4491
19	93617	0.00998	1.089	13.7	5.02	0.4	90	-9.5	-9.1	1.83E-05	4491
20	93603	0.00992	1.089	13.7	5.02	1.4	95	-10.3	-8.9	1.83E-05	4491
21	93590	0.01005	1.089	13.7	5.02	2.8	100	-11.5	-8.7	1.83E-05	4490
22	93590	0.00992	1.089	13.7	5.02	3.4	105	-12.1	-8.7	1.83E-05	4490
23	93590	0.00979	1.089	13.7	5.02	2.9	110	-11.5	-8.6	1.83E-05	4491
24	93590	0.00985	1.089	13.7	5.02	1.7	115	-10.5	-8.8	1.83E-05	4491

Tabela C.4: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.  
Velocidades na seção de testes  $v = 5$  m/s (continua)

Medida	P <sub>atm</sub> (Pa)	φ (kg/kg)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	ΔP <sub>pilot</sub> (Pa)	Velocidade (m/s)	ΔP <sub>z-x</sub> (Pa)	Posição do tubo	P <sub>estaca</sub> (Pa)	F <sub>z</sub> (Pa)	μ (Pa.s)	Re
25	93590	0.00998	1.088	13.7	5.02	0.1	120	-8.9	-8.8	1.83E-05	4488
26	93590	0.01005	1.088	13.7	5.02	-2.0	125	-6.6	-8.6	1.83E-05	4488
27	93590	0.00985	1.089	13.7	5.02	-4.6	130	-4.1	-8.7	1.83E-05	4489
28	93590	0.00992	1.088	13.7	5.02	-7.5	135	-1.3	-8.7	1.83E-05	4489
29	93590	0.00998	1.088	13.7	5.02	-10.5	140	1.6	-9.0	1.83E-05	4488
30	93590	0.00985	1.089	13.7	5.02	-13.2	145	4.3	-8.9	1.83E-05	4489
31	93577	0.00972	1.089	13.7	5.02	-15.7	150	6.7	-9.0	1.83E-05	4489
32	93577	0.00972	1.089	13.7	5.02	-18.1	155	9.1	-9.0	1.83E-05	4489
33	93577	0.00998	1.088	13.7	5.02	-20.0	160	11.3	-8.8	1.83E-05	4488
34	93577	0.00998	1.088	13.8	5.04	-21.5	165	12.6	-8.9	1.83E-05	4504
35	93577	0.00992	1.088	13.8	5.04	-22.0	170	13.5	-8.5	1.83E-05	4504
36	93577	0.00985	1.088	13.8	5.04	-22.1	175	13.8	-8.3	1.83E-05	4504
37	93577	0.00985	1.088	13.8	5.04	-22.2	180	13.9	-8.3	1.83E-05	4504

Tabela C.4: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.  
Velocidades na seção de testes v = 5 m/s (continua)



Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\omega$ (kg/kg)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{z,z}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estaca}$ ( Pa )	$P_z$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
11	93461	0.01082	1.086	13.8	5.05	1.5	260	-10.5	-9.0	1.83E-05	4500
12	93463	0.01075	1.086	13.8	5.05	3.0	250	-11.8	-8.7	1.83E-05	4500
13	93463	0.01082	1.086	13.8	5.05	1.2	240	-10.0	-8.8	1.83E-05	4500
14	93462	0.01082	1.086	13.8	5.05	-2.8	230	-5.8	-8.5	1.83E-05	4500
15	93461	0.01082	1.086	13.8	5.05	-7.9	220	-0.5	-8.4	1.83E-05	4500
16	93463	0.01082	1.086	13.8	5.05	-13.7	210	5.0	-8.7	1.83E-05	4500
17	93471	0.0109	1.086	13.8	5.05	-18.6	200	9.4	-9.2	1.83E-05	4500
18	93479	0.01082	1.086	13.8	5.05	-21.1	190	12.6	-8.5	1.83E-05	4501
19	93482	0.01082	1.086	13.8	5.05	-21.9	180	13.8	-8.2	1.83E-05	4501

Tabela C.4: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes  $v = 5$  m/s



## ENSAIO DE CALIBRAÇÃO DE CILINDROS COMO SENSOR DE VELOCIDADE

Hora : 10:30

Equipe : Mariani e Tiago

Protótipo nº : 4

Diâmetro externo (mm) : 15

Comprimento (mm) : 300

Tomadas de pressão de estagnação : 4 (1mm)

Sentido de Rotação : HORÁRIO

Tomadas de pressão de esteira : 4 (1,6mm)

### CÁLCULOS E RESULTADOS

v = 6 m/s

Medida	$P_{\text{stagn}} (Pa)$	$\rho (kg/m^3)$	$\rho (kg/m^3)$	$\Delta P_{\text{pilot}} (Pa)$	Velocidade (m/s)	$\Delta P_{2r} (Pa)$	Posição do tubo	$P_{\text{esteira}} (Pa)$	$P_2 (Pa)$	$\mu (Pa.s)$	Re
1	93996	0.009613	1.094	19.6	5.99	33.3	0	-13.4	20.0	1.83E-05	5382
2	93975	0.00968	1.093	19.6	5.99	32.9	5	-13.1	19.8	1.83E-05	5377
3	93975	0.00968	1.093	19.8	6.02	32.1	10	-13.1	19.0	1.83E-05	5404
4	93976	0.00968	1.093	19.8	6.02	30.9	15	-13.4	17.5	1.83E-05	5401
5	93972	0.009552	1.093	19.8	6.02	28.4	20	-13.4	15.0	1.83E-05	5402
6	93972	0.00968	1.093	19.9	6.04	25.5	25	-13.4	12.1	1.83E-05	5415
7	93967	0.009681	1.093	19.8	6.02	21.8	30	-13.5	8.3	1.83E-05	5401
8	93964	0.009681	1.093	19.8	6.02	17.9	35	-13.5	4.4	1.83E-05	5401
9	93960	0.009681	1.092	19.8	6.02	13.7	40	-13.6	0.1	1.83E-05	5399
10	93959	0.009681	1.092	19.8	6.02	9.6	45	-13.9	-4.3	1.83E-05	5399
11	93959	0.009681	1.092	19.8	6.02	5.6	50	-13.9	-8.3	1.83E-05	5399

Tabela C.5: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes v = 6 m/s (continua)

Medida	$P_{atm}$ ( $P_a$ )	$\omega$ ( $\mu g/kg$ )	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$\Delta P_{pitot}$ ( $P_a$ )	Velocidade ( $m/s$ )	$\Delta P_{z,E}$ ( $P_a$ )	Posição do tubo	$P_{escira}$ ( $P_a$ )	$P_z$ ( $P_a$ )	$\mu$ ( $P_{a,1}$ )	Re
12	93958	0.009682	1.092	19.8	6.02	1.7	55	-13.9	-12.2	1.83E-05	5399
13	93947	0.009747	1.092	19.6	5.99	-1.7	60	-13.8	-15.5	1.83E-05	5369
14	93940	0.009748	1.092	19.8	6.02	-3.9	65	-13.8	-17.7	1.83E-05	5395
15	93936	0.009684	1.091	19.8	6.03	-4.9	70	-13.6	-18.5	1.83E-05	5393
16	93936	0.009749	1.091	19.8	6.03	-4.7	75	-13.6	-18.3	1.83E-05	5393
17	93936	0.009749	1.091	19.8	6.03	-3.0	80	-13.6	-16.6	1.83E-05	5393
18	93936	0.009619	1.091	19.8	6.02	-1.2	85	-13.6	-14.8	1.83E-05	5394
19	93932	0.009749	1.091	19.8	6.03	0.1	90	-13.8	-13.7	1.83E-05	5393
20	93930	0.009749	1.091	19.8	6.03	1.5	95	-14.6	-13.1	1.83E-05	5393
21	93926	0.00975	1.091	19.8	6.03	3.9	100	-16.4	-12.5	1.83E-05	5393
22	93923	0.00975	1.091	19.8	6.03	5.6	105	-17.0	-11.4	1.83E-05	5393
23	93920	0.00975	1.091	19.8	6.03	4.4	110	-16.9	-12.5	1.83E-05	5393
24	93920	0.00975	1.091	19.8	6.03	2.9	115	-15.3	-12.3	1.83E-05	5393

Tabela C.5: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.  
Velocidades na seção de testes  $v = 6$  m/s (continua)

Medida	$P_{aim}$ ( Pa )	$\omega$ (kg/kg)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{2,r}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estufa}$ ( Pa )	$P_2$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
25	93919	0.00975	1.091	19.8	6.03	0.6	120	-12.8	-12.2	1.83E-05	5393
26	93918	0.009816	1.091	19.8	6.03	-2.5	125	-9.8	-12.2	1.83E-05	5390
27	93915	0.009816	1.091	19.8	6.03	-6.3	130	-6.0	-12.3	1.83E-05	5390
28	93911	0.009751	1.091	19.8	6.03	-10.3	135	-2.0	-12.3	1.83E-05	5390
29	93908	0.009752	1.091	19.8	6.03	-14.2	140	2.0	-12.2	1.83E-05	5390
30	93907	0.009817	1.090	19.8	6.03	-17.9	145	5.9	-12.0	1.83E-05	5390
31	93903	0.009752	1.090	19.8	6.03	-21.3	150	9.3	-12.1	1.83E-05	5390
32	93894	0.00956	1.091	19.8	6.03	-24.8	155	12.8	-12.0	1.83E-05	5390
33	93891	0.009624	1.091	19.8	6.03	-27.4	160	15.4	-12.0	1.83E-05	5390
34	93888	0.009689	1.090	19.8	6.03	-29.3	165	17.4	-11.9	1.83E-05	5387
35	93884	0.009689	1.090	19.8	6.03	-30.8	170	18.6	-12.2	1.83E-05	5387
36	93879	0.00969	1.090	19.8	6.03	-31.3	175	19.1	-12.2	1.83E-05	5387
37	93876	0.009755	1.090	19.8	6.03	-30.8	180	19.1	-11.7	1.83E-05	5387

Tabela C.5: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes  $v = 6$  m/s (continua)



Medida	$P_{amb}$ ( Pa )	$\omega$ ( kg/kg )	$\rho$ ( kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{s,s}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estaca}$ ( Pa )	$P_z$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
12	93764	0.0099	1.085	27.0	7.05	2.2	55	-18.9	-16.7	1.83E-05	6259
13	93760	0.00995	1.085	27.0	7.05	-2.0	60	-18.9	-20.9	1.83E-05	6259
14	93763	0.01003	1.085	27.0	7.05	-5.0	65	-18.9	-23.9	1.83E-05	6258
15	93763	0.0101	1.085	27.0	7.05	-6.3	70	-18.9	-25.2	1.83E-05	6255
16	93763	0.0101	1.085	27.0	7.05	-5.9	75	-18.9	-24.8	1.83E-05	6255
17	93763	0.0101	1.085	27.0	7.05	-3.7	80	-18.5	-22.2	1.83E-05	6255
18	93770	0.01044	1.084	27.0	7.05	-1.5	85	-18.8	-20.2	1.83E-05	6254
19	93772	0.01044	1.084	27.0	7.05	0.4	90	-19.1	-18.7	1.83E-05	6257
20	93775	0.01044	1.085	27.0	7.05	1.9	95	-19.9	-18.0	1.83E-05	6257
21	93778	0.01051	1.084	27.0	7.05	4.9	100	-22.4	-17.5	1.83E-05	6257
22	93779	0.01051	1.084	27.0	7.05	7.3	105	-23.3	-16.0	1.83E-05	6257
23	93780	0.01044	1.085	27.0	7.05	6.3	110	-23.3	-17.0	1.83E-05	6257
24	93780	0.01044	1.085	27.0	7.05	3.8	115	-20.8	-16.9	1.83E-05	6257

Tabela C.6: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.  
Velocidades na seção de testes  $v = 7$  m/s (continua)

Medida	$P_{\text{amb}}$ ( Pa )	$\omega$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{\text{pitot}}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{2-x}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{\text{estagn}}$ ( Pa )	$P_z$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
25	93782	0.01058	1.084	27.0	7.05	0.4	120	-17.4	-17.0	1.83E-05	6256
26	93784	0.01051	1.085	27.0	7.05	-3.5	125	-13.3	-16.8	1.83E-05	6257
27	93784	0.01058	1.084	27.0	7.05	-8.4	130	-8.1	-16.5	1.83E-05	6256
28	93790	0.01057	1.084	27.0	7.05	-14.0	135	-2.8	-16.7	1.83E-05	6254
29	93794	0.01043	1.084	27.0	7.05	-19.4	140	2.3	-17.1	1.83E-05	6255
30	93798	0.0105	1.084	27.0	7.05	-24.4	145	7.5	-16.9	1.83E-05	6255
31	93800	0.0105	1.084	27.0	7.05	-29.3	150	12.5	-16.8	1.83E-05	6255
32	93800	0.01043	1.084	27.0	7.05	-33.7	155	17.0	-16.7	1.83E-05	6255
33	93800	0.01043	1.084	27.0	7.05	-37.5	160	20.8	-16.8	1.83E-05	6255
34	93802	0.01037	1.085	27.0	7.05	-40.1	165	23.4	-16.7	1.83E-05	6255
35	93806	0.0105	1.084	27.0	7.05	-41.8	170	25.1	-16.7	1.83E-05	6255
36	93806	0.01043	1.085	27.0	7.05	-42.7	175	26.0	-16.7	1.83E-05	6255
37	93822	0.01057	1.084	27.0	7.05	-42.1	180	26.0	-16.1	1.83E-05	6255

Tabela C.6: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.  
Velocidades na seção de testes  $v = 7$  m/s

## ENSAIO DE CALIBRAÇÃO DE CILINDROS COMO SENSOR DE VELOCIDADE

Hora : 23:30      Equipe : Mariani e J. Fran  
 Protótipo nº : 4      Diâmetro externo (mm) : 15      Comprimento (mm) : 300  
 Tomadas de pressão de estagnação : 4 (1mm)      Sentido de Rotação : HORÁRIO  
 Tomadas de pressão de esteira : 4 (1.6mm)

### CÁLCULOS E RESULTADOS

v = 8 m/s

Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\omega$ ( $1/s^2$ )	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{z,z}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estagn}$ ( Pa )	$P_z$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
1	93503	0.011036	1.085	35.3	8.07	58.6	0	-23.9	34.7	1.83E-05	7185
2	93503	0.01082	1.085	35.5	8.09	58.0	5	-23.6	34.4	1.83E-05	7206
3	93503	0.010892	1.085	35.5	8.09	56.4	10	-23.5	32.9	1.83E-05	7206
4	93502	0.010892	1.085	35.3	8.07	53.3	15	-23.6	29.7	1.83E-05	7186
5	93499	0.011037	1.085	35.1	8.04	49.0	20	-23.5	25.5	1.83E-05	7165
6	93497	0.011037	1.085	35.1	8.04	43.6	25	-23.5	20.1	1.83E-05	7165
7	93494	0.011037	1.085	35.1	8.04	37.5	30	-23.8	13.8	1.83E-05	7165
8	93495	0.011037	1.085	35.1	8.04	30.6	35	-23.9	6.7	1.83E-05	7165
9	93495	0.010892	1.085	35.1	8.04	23.3	40	-23.8	-0.5	1.83E-05	7165
10	93495	0.011037	1.085	35.1	8.04	15.5	45	-23.8	-8.2	1.83E-05	7165
11	93495	0.011037	1.085	35.1	8.04	8.4	50	-23.6	-15.2	1.83E-05	7165

Tabela C.7: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes v = 8 m/s (continua)

Medita	$P_{\text{atm}}$ ( Pa )	$\omega$ ( $\text{kg}/\text{kg}$ )	$\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\Delta P_{\text{pitot}}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{2,1}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{\text{estrem}}$ ( Pa )	$P_2$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
12	93497	0.010964	1.085	35.2	8.06	2.3	55	-23.7	-21.3	1.83E-05	7175
13	93497	0.010892	1.085	35.2	8.05	-2.8	60	-23.6	-26.4	1.83E-05	7176
14	93495	0.010892	1.085	35.2	8.05	-6.5	65	-23.8	-30.2	1.83E-05	7175
15	93494	0.010893	1.085	35.2	8.05	-8.1	70	-23.8	-31.8	1.83E-05	7175
16	93494	0.010965	1.085	35.2	8.06	-7.1	75	-23.7	-30.8	1.83E-05	7175
17	93495	0.011037	1.085	35.1	8.04	-4.2	80	-23.3	-27.4	1.83E-05	7165
18	93497	0.011037	1.085	35.1	8.04	-1.2	85	-23.3	-24.5	1.83E-05	7165
19	93498	0.011037	1.085	35.1	8.04	0.6	90	-24.0	-23.4	1.83E-05	7165
20	93499	0.011037	1.085	35.1	8.04	2.1	95	-25.0	-22.9	1.83E-05	7165
21	93501	0.011036	1.085	35.1	8.04	5.3	100	-27.0	-21.7	1.83E-05	7165
22	93498	0.011037	1.085	35.1	8.04	8.1	105	-31.3	-23.2	1.83E-05	7165
23	93494	0.010679	1.086	35.1	8.04	7.6	110	-29.9	-22.3	1.83E-05	7167
24	93493	0.010679	1.086	35.1	8.04	4.7	115	-27.0	-22.3	1.83E-05	7167

Tabela C.7: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em tunel de vento.  
Velocidades na seção de testes  $v = 8$  m/s (continua)



Medida	$P_{\text{atm}}$ (Pa)	$\omega$ ( $\text{rad/s}$ )	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\Delta P_{\text{pito}}$ (Pa)	Velocidade ( $\text{m/s}$ )	$\Delta P_{x,z}$ (Pa)	Posição do tubo	$P_{\text{estera}}$ (Pa)	$P_z$ (Pa)	$\mu$ (Pa.s)	Re
25	93489	0.01075	1.085	35.2	8.05	0.0	120	-22.8	-22.8	1.83E-05	7176
26	93487	0.01075	1.085	35.2	8.05	-5.1	125	-17.6	-22.7	1.83E-05	7176
27	93473	0.010895	1.085	35.1	8.04	-11.7	130	-11.3	-22.9	1.83E-05	7165
28	93471	0.010752	1.085	35.2	8.05	-18.9	135	-4.0	-22.9	1.83E-05	7175
29	93467	0.010968	1.085	35.2	8.06	-25.7	140	3.0	-22.7	1.83E-05	7174
30	93469	0.010968	1.085	35.2	8.06	-32.9	145	10.1	-22.8	1.83E-05	7174
31	93469	0.010968	1.085	35.2	8.06	-39.2	150	16.8	-22.5	1.83E-05	7174
32	93469	0.01104	1.085	35.2	8.06	-45.0	155	22.9	-22.1	1.83E-05	7174
33	93474	0.010967	1.085	35.2	8.06	-49.6	160	27.9	-21.8	1.83E-05	7174
34	93474	0.01104	1.085	35.3	8.07	-52.9	165	31.4	-21.5	1.83E-05	7184
35	93474	0.010967	1.085	35.3	8.07	-55.2	170	33.7	-21.4	1.83E-05	7184
36	93470	0.010968	1.085	35.3	8.07	-55.8	175	34.4	-21.4	1.83E-05	7184
37	93465	0.011041	1.085	35.3	8.07	-55.5	180	34.6	-20.9	1.83E-05	7183

Tabela C.7: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.  
Velocidades na seção de testes  $v = 8 \text{ m/s}$  (contínua)

## ENSAIO DE CALIBRAÇÃO DE CILINDROS COMO SENSOR DE VELOCIDADE

Hora : 23:30      Equipe : Mariani e J. Fran      Comprimento (mm) : 300  
 Protótipo nº : 4      Diâmetro externo (mm) : 15      Sentido de Rotação : ANTI-HORÁRIO  
 Tomadas de pressão de estagnação : 4 (1mm)  
 Tomadas de pressão de esteira : 4 (1,6mm)

### CÁLCULOS E RESULTADOS

v = 8 m/s

Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\omega$ ( kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$ ( kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{2x}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estira}$ ( Pa )	$P_2$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
1	93449	0.011043	1.084	35.1	8.05	57.9	360=0	-23.6	34.3	1.83E-05	7163
2	93442	0.011044	1.084	35.1	8.05	55.7	350	-23.8	31.9	1.83E-05	7163
3	93437	0.010899	1.085	35.2	8.06	48.5	340	-23.8	24.7	1.83E-05	7173
4	93435	0.011044	1.084	35.2	8.06	36.8	330	-24.3	12.5	1.83E-05	7172
5	93430	0.010972	1.084	35.2	8.06	22.5	320	-24.6	-2.1	1.83E-05	7172
6	93425	0.010973	1.084	35.1	8.05	7.7	310	-24.6	-16.9	1.83E-05	7162
7	93419	0.010974	1.084	35.2	8.06	-3.5	300	-24.1	-27.6	1.83E-05	7172
8	93421	0.010901	1.084	35.2	8.06	-8.2	290	-24.1	-32.3	1.83E-05	7173
9	93422	0.010901	1.084	35.1	8.05	-3.9	280	-23.4	-27.3	1.83E-05	7163
10	93422	0.010973	1.084	35.3	8.07	0.0	270	-23.6	-23.6	1.83E-05	7182

Tabela C.7: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes v = 8 m/s (continua)

Medida	$P_{stat}$ ( Pa )	$\omega$ ( rad/s )	$\rho$ ( kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{stat}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{t,t}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estator}$ ( Pa )	$P_t$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
11	93418	0.010974	1.084	35.1	8.05	2.1	260	-24.6	-22.5	1.83E-05	7162
12	93414	0.010974	1.084	35.1	8.05	7.4	250	-29.8	-22.5	1.83E-05	7162
13	93411	0.010975	1.084	35.2	8.06	3.2	240	-25.3	-22.1	1.83E-05	7172
14	93407	0.010903	1.084	35.2	8.06	-7.4	230	-16.0	-23.4	1.83E-05	7172
15	93406	0.010903	1.084	35.2	8.06	-20.8	220	-1.8	-22.6	1.83E-05	7172
16	93350	0.01091	1.084	35.3	8.07	-34.8	210	12.8	-22.1	1.83E-05	7180
17	93351	0.01091	1.084	35.3	8.07	-46.5	200	24.8	-21.8	1.83E-05	7180
18	93347	0.010767	1.084	35.3	8.07	-53.4	190	32.4	-21.1	1.83E-05	7180
19	93346	0.010767	1.084	35.3	8.07	-55.4	180	34.3	-21.1	1.83E-05	7180

Tabela C.7: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.  
Velocidades na seção de testes  $v = 8$  m/s

## ENSAIO DE CALIBRAÇÃO DE CILINDROS COMO SENSOR DE VELOCIDADE

Hora : 10:00      Equipe : Mariani e Tiago  
 Protótipo nº : 4      Diâmetro externo (mm) : 15      Comprimento (mm) : 300  
 Tomadas de pressão de estagnação : 4 (1mm)      Sentido de Rotação : HORÁRIO  
 Tomadas de pressão de esteira : 4 (1.6mm)

### CÁLCULOS E RESULTADOS

v = 9 m/s

Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	P (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{z.e}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{esteira}$ ( Pa )	$P_z$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
1	94010	0.009741	1.095	44.6	9.03	74.5	0	-30.6	43.9	1.83E-05	8125
2	94008	0.009676	1.096	44.6	9.02	74.4	5	-30.3	44.2	1.82E-05	8132
3	94007	0.009676	1.095	44.6	9.03	72.1	10	-30.4	41.7	1.83E-05	8125
4	94003	0.009677	1.095	44.6	9.03	69.1	15	-30.8	38.4	1.83E-05	8125
5	93999	0.009742	1.095	44.6	9.03	63.6	20	-31.1	32.5	1.83E-05	8125
6	93998	0.009549	1.095	44.6	9.03	57.2	25	-31.5	25.7	1.83E-05	8126
7	93998	0.009549	1.095	44.6	9.03	49.0	30	-31.5	17.5	1.83E-05	8122
8	93990	0.009678	1.095	44.6	9.03	40.1	35	-31.8	8.4	1.83E-05	8121
9	93991	0.009614	1.095	44.6	9.03	30.3	40	-31.8	-1.4	1.83E-05	8122
10	93978	0.009615	1.094	44.6	9.03	20.8	45	-32.0	-11.2	1.83E-05	8118
11	93971	0.009552	1.094	44.6	9.03	11.9	50	-32.0	-20.1	1.83E-05	8118

Tabela C8: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.  
 Velocidades na seção de testes v = 9 m/s (continua)

Medida	$P_{m1}$ ( Pa )	$\omega$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{pico1}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{2-3}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estatis}$ ( Pa )	$P_2$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
12	93964	0.009425	1.094	44.6	9.03	3.2	55	-32.0	-28.8	1.83E-05	8118
13	93966	0.009425	1.094	44.6	9.03	-3.5	60	-32.3	-35.7	1.83E-05	8118
14	93962	0.009489	1.094	44.6	9.03	-8.3	65	-32.0	-40.3	1.83E-05	8118
15	93954	0.009553	1.094	44.6	9.03	-10.5	70	-32.0	-42.5	1.83E-05	8113
16	93946	0.009427	1.094	44.6	9.03	-9.6	75	-31.9	-41.5	1.83E-05	8114
17	93946	0.009427	1.094	44.6	9.03	-5.5	80	-31.1	-36.6	1.83E-05	8114
18	93943	0.009365	1.094	44.6	9.03	-1.7	85	-31.0	-32.7	1.83E-05	8114
19	93942	0.009365	1.094	44.6	9.03	0.6	90	-31.3	-30.7	1.83E-05	8114
20	93923	0.009367	1.094	44.6	9.03	2.8	95	-32.5	-29.7	1.83E-05	8113
21	93920	0.009367	1.093	44.6	9.04	6.9	100	-36.0	-29.1	1.83E-05	8110
22	93920	0.009304	1.093	44.6	9.03	11.2	105	-38.8	-27.6	1.83E-05	8110
23	93919	0.009305	1.093	44.6	9.03	9.7	110	-38.5	-28.7	1.83E-05	8110
24	93915	0.009305	1.093	44.6	9.03	6.0	115	-35.0	-29.0	1.83E-05	8110

Tabca C8: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.  
Velocidades na seção de testes  $v = 9$  m/s (continua)

Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\omega$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$AP_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$AP_{2x}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estrem}$ ( Pa )	$P_2$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
25	93914	0.009305	1.093	44.6	9.03	0.4	120	-29.1	-28.7	1.83E-05	8110
26	93910	0.009431	1.093	44.6	9.04	-6.4	125	-22.0	-28.4	1.83E-05	8109
27	93903	0.009306	1.093	44.6	9.04	-14.2	130	-14.3	-28.5	1.83E-05	8109
28	93903	0.009306	1.093	44.6	9.04	-23.4	135	-5.4	-28.8	1.83E-05	8109
29	93898	0.009244	1.093	44.6	9.04	-31.9	140	3.4	-28.5	1.83E-05	8109
30	93894	0.009245	1.093	44.6	9.04	-40.7	145	12.5	-28.2	1.83E-05	8109
31	93894	0.009245	1.093	44.6	9.04	-49.3	150	21.0	-28.3	1.83E-05	8106
32	93891	0.009245	1.093	44.6	9.04	-56.8	155	28.3	-28.5	1.83E-05	8106
33	93883	0.009308	1.093	44.6	9.04	-62.7	160	34.3	-28.4	1.83E-05	8105
34	93879	0.009309	1.092	44.6	9.04	-67.2	165	39.0	-28.2	1.83E-05	8105
35	93878	0.009309	1.092	44.6	9.04	-69.4	170	41.6	-27.8	1.83E-05	8105
36	93874	0.009247	1.092	44.6	9.04	-69.6	175	42.8	-26.9	1.83E-05	8105
37	93870	0.009247	1.092	44.6	9.04	-69.0	180	42.8	-26.3	1.83E-05	8105

Tabela C8: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes  $v = 9$  m/s

## ENSAIO DE CALIBRAÇÃO DE CILINDROS COMO SENSOR DE VELOCIDADE

Hora : 17:30

Equipe : Mariani

Protótipo nº: 4

Diâmetro externo (mm) : 15

Comprimento (mm) : 300

Tomadas de pressão de estagnação : 4 (1mm)

Sentido de Rotação : HORÁRIO

Tomadas de pressão de esteira : 4 (1,6mm)

### CÁLCULOS E RESULTADOS

$v = 10 \text{ m/s}$

Medida	$P_{tm}$ ( Pa )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{tota}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{t,x}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estera}$ ( Pa )	$P_t$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
1	93720	0.00896	1.095	54.9	10.02	91.0	0	-37.8	53.2	1.82E-05	9021
2	93728	0.00896	1.094	54.9	10.02	90.3	5	-38.0	52.3	1.82E-05	9018
3	93734	0.00895	1.094	54.9	10.02	88.5	10	-38.0	50.5	1.82E-05	9014
4	93748	0.00895	1.094	54.9	10.02	83.8	15	-38.2	45.6	1.82E-05	9011
5	93771	0.00895	1.094	54.9	10.02	77.7	20	-38.7	39.0	1.82E-05	9012
6	93770	0.00895	1.094	54.7	10.00	69.6	25	-39.2	30.4	1.82E-05	8996
7	93774	0.00901	1.094	54.7	10.00	59.6	30	-39.3	20.3	1.82E-05	8996
8	93794	0.00901	1.094	54.7	10.00	48.8	35	-39.7	9.1	1.83E-05	8993
9	93803	0.00901	1.094	54.9	10.02	37.2	40	-40.0	-2.8	1.83E-05	9009
10	93812	0.00901	1.094	54.7	10.00	25.7	45	-40.2	-14.5	1.83E-05	8994
11	93824	0.00901	1.094	54.7	10.00	14.6	50	-40.5	-25.8	1.83E-05	8994

Tabcla C.9: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes  $v = 10 \text{ m/s}$  (continua)

Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$P$ (kg/m <sup>2</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{s,x}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estaca}$ ( Pa )	$P_3$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
12	93834	0,00901	1,094	54,7	10,00	4,2	55	-40,7	-36,5	1,83E-05	8995
13	93848	0,009	1,094	54,9	10,02	-4,0	60	-40,9	-45,0	1,83E-05	9008
14	93847	0,009	1,094	54,9	10,02	-10,1	65	-41,3	-51,3	1,83E-05	9008
15	93856	0,009	1,094	54,7	10,00	-11,0	70	-41,3	-52,3	1,83E-05	8992
16	93858	0,009	1,094	54,7	10,00	-11,3	75	-41,3	-52,5	1,83E-05	8992
17	93856	0,00894	1,094	54,7	10,00	-6,4	80	-39,8	-46,1	1,83E-05	8992
18	93856	0,00894	1,094	54,9	10,02	-2,1	85	-39,6	-41,7	1,83E-05	9008
19	93856	0,009	1,094	54,9	10,02	0,7	90	-39,9	-39,2	1,83E-05	9008
20	93858	0,009	1,094	54,9	10,02	3,7	95	-40,8	-37,1	1,83E-05	9008
21	93860	0,009	1,094	54,7	10,00	8,3	100	-43,8	-35,4	1,83E-05	8992
22	93862	0,009	1,094	54,9	10,02	12,7	105	-49,8	-37,0	1,83E-05	9008
23	93860	0,009	1,094	54,9	10,02	11,0	110	-49,3	-38,2	1,83E-05	9008
24	93860	0,009	1,094	54,7	10,00	6,4	115	-44,3	-37,9	1,83E-05	8992

Tabela C.9: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes  $v = 10$  m/s (continua)



Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\rho$ ( kg/m <sup>3</sup> )	$P$ ( kg/m <sup>2</sup> )	$\Delta P_{pitot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{z,x}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estaca}$ ( Pa )	$P_3$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
25	93871	0,009	1,094	54,7	10,00	-0,5	120	-37,0	-37,5	1,83E-05	8993
26	93880	0,009	1,094	54,7	10,00	-9,0	125	-28,3	-37,2	1,83E-05	8993
27	93879	0,00906	1,094	54,7	10,00	-18,0	130	-17,9	-35,9	1,83E-05	8989
28	93876	0,009	1,094	54,7	10,00	-28,4	135	-7,3	-35,7	1,83E-05	8989
29	93870	0,009	1,094	54,7	10,00	-39,1	140	5,3	-33,9	1,83E-05	8989
30	93866	0,00906	1,094	54,9	10,02	-50,3	145	16,0	-34,3	1,83E-05	9004
31	93862	0,00906	1,094	54,7	10,00	-61,0	150	26,3	-34,8	1,83E-05	8988
32	93856	0,009	1,094	54,7	10,00	-69,5	155	35,3	-34,3	1,83E-05	8988
33	93856	0,009	1,094	54,9	10,02	-77,5	160	43,0	-34,5	1,83E-05	9004
34	93855	0,009	1,094	54,7	10,00	-81,8	165	48,6	-33,2	1,83E-05	8988
35	93863	0,00912	1,094	54,7	10,00	-84,7	170	51,9	-32,8	1,83E-05	8987
36	93862	0,009	1,094	54,7	10,00	-85,8	175	53,3	-32,6	1,83E-05	8988
37	93860	0,00912	1,094	54,7	10,00	-84,2	180	53,3	-31,0	1,83E-05	8987

Tabela C.9: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes  $v = 10$  m/s (continua)

**ENSAIO DE CALIBRAÇÃO DE CILINDROS COMO SENSOR DE VELOCIDADE**

Hora : 21:30 Equipe : Mariani e J.Fran  
 Protótipo nº : 4 Diâmetro externo (mm) : 15  
 Tomadas de pressão de estagnação : 4 (1mm)  
 Tomadas de pressão de esteira : 4 (1,6mm)

Comprimento (mm) : 300  
 Sentido de Rotação : ANTI-HORÁRIO

**CÁLCULOS E RESULTADOS**

v = 10 m/s

Medida	$P_{atm}$ ( Pa )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta P_{Pto1}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{rx}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{estera}$ ( Pa )	$P_1$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
1	93862	0.00906	1.094	54.7	10.00	90.5	360=0	-37.5	53.0	1.83E-05	8988
2	93859	0.00906	1.094	54.4	9.98	87.8	350	-38.3	49.5	1.83E-05	8964
3	93863	0.00906	1.094	54.7	10.00	78.2	340	-40.3	38.0	1.83E-05	8988
4	93875	0.00906	1.094	54.4	9.98	59.1	330	-40.8	18.3	1.83E-05	8964
5	93874	0.00906	1.094	54.7	10.00	36.5	320	-41.3	-4.7	1.83E-05	8988
6	93871	0.009	1.094	54.7	10.00	13.5	310	-42.0	-28.5	1.83E-05	8989
7	93872	0.009	1.094	54.4	9.97	-4.9	300	-41.8	-46.7	1.83E-05	8965
8	93879	0.00906	1.094	54.9	10.02	-12.7	290	-41.6	-54.3	1.83E-05	9005
9	93880	0.00906	1.094	54.9	10.02	-6.3	280	-40.3	-46.5	1.83E-05	9001
10	93882	0.00906	1.094	54.9	10.02	0.2	270	-38.9	-38.7	1.83E-05	9001

Tabela C.9: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes v = 10 m/s (continua)

Medida	$P_{em}$ ( Pa )	$\omega$ ( $\mu\text{g/ms}$ )	$P$ ( $\mu\text{g/ms}$ )	$\Delta P_{pilot}$ ( Pa )	Velocidade ( m/s )	$\Delta P_{2x}$ ( Pa )	Posição do tubo	$P_{entrada}$ ( Pa )	$P_2$ ( Pa )	$\mu$ ( Pa.s )	Re
11	93884	0.00906	1.094	54.9	10.02	3.3	260	-41.1	-37.8	1.83E-05	9001
12	93880	0.00906	1.094	54.9	10.02	11.3	250	-49.3	-38.0	1.83E-05	9001
13	93879	0.00906	1.094	54.9	10.02	4.4	240	-41.3	-36.8	1.83E-05	9001
14	93882	0.00906	1.094	54.9	10.02	-11.5	230	-24.5	-36.0	1.83E-05	9001
15	93880	0.00906	1.094	54.9	10.02	-31.8	220	-3.3	-35.0	1.83E-05	9001
16	93882	0.00906	1.094	54.9	10.02	-52.9	210	18.9	-34.0	1.83E-05	9001
17	93879	0.00906	1.094	54.9	10.02	-70.4	200	37.8	-32.6	1.83E-05	9001
18	93879	0.00906	1.094	54.9	10.02	-83.4	190	49.6	-33.8	1.83E-05	9001
19	93878	0.00906	1.094	54.7	10.00	-85.8	180	53.0	-32.8	1.83E-05	8985

Tabela C.9: Resultados de ensaios para levantamento de pressões sobre o protótipo cilíndrico em túnel de vento.

Velocidades na seção de testes  $v = 10$  m/s

**Distribuição de pressões em cilindro**  
 Protótipo 4 :  $d = 15 \text{ mm}$

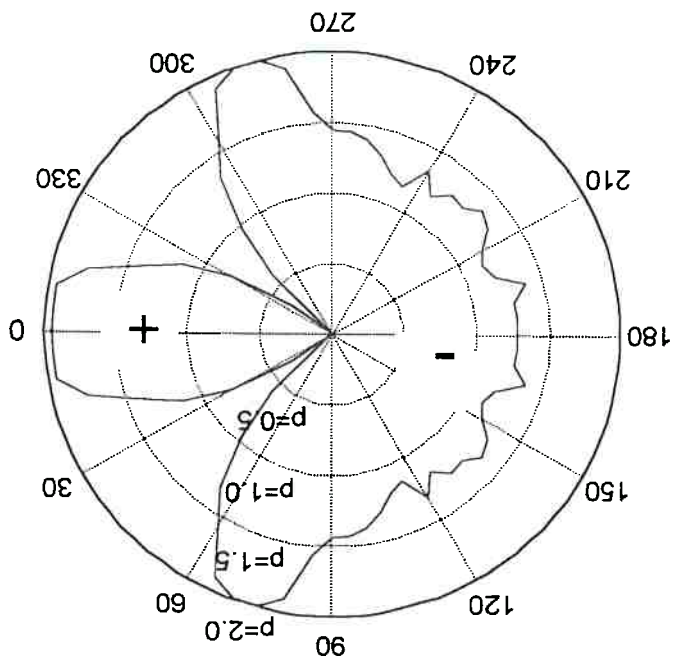


Figura C.1: Pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 2 m/s

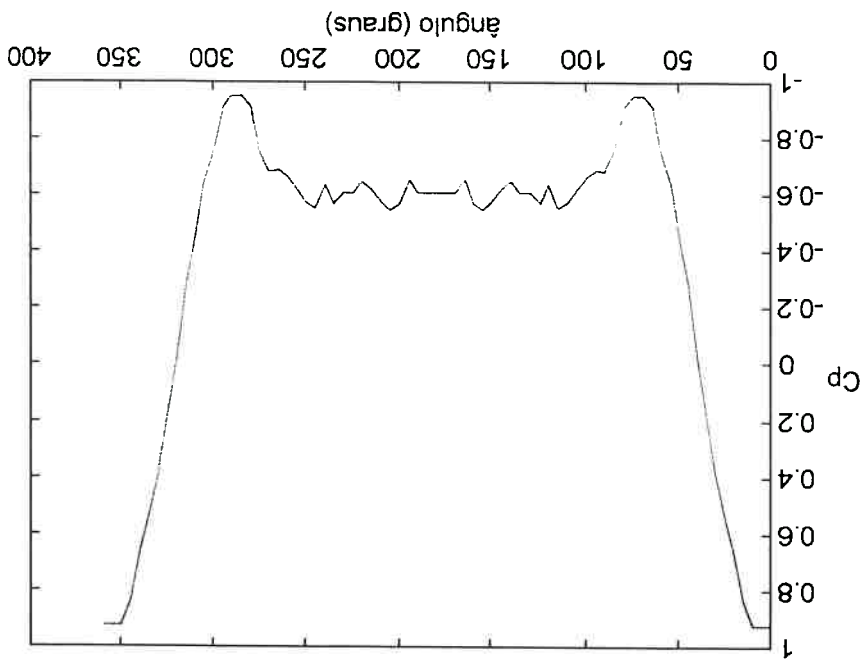


Figura C.2:  $C_p$  x ângulo (graus) ; Velocidade de 2 m/s

**Distribuição de pressões em cilindro**  
 Protótipo 4 : d=15 mm

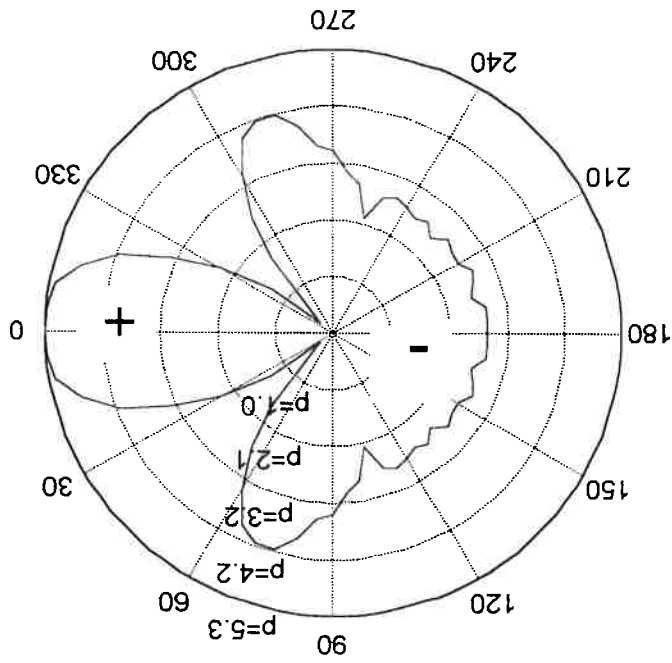


Figura C.3: Pressão (Pa) x ângulo (graus) : Velocidade de 3 m/s

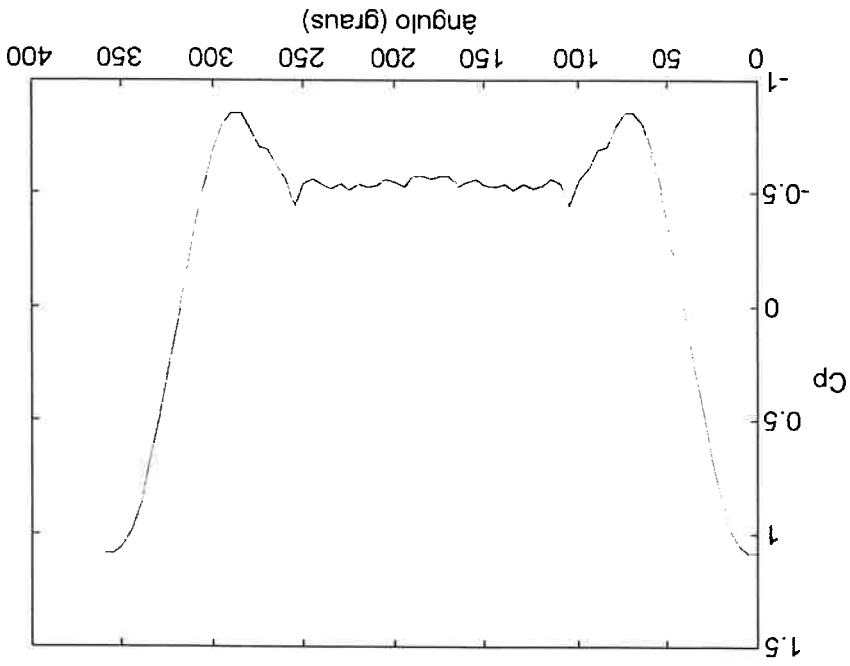


Figura C.4: Cp x ângulo (graus) : Velocidade de 3 m/s

**Distribuição de pressões em cilindro**  
 Protótipo 4 ;  $d=15\text{ mm}$

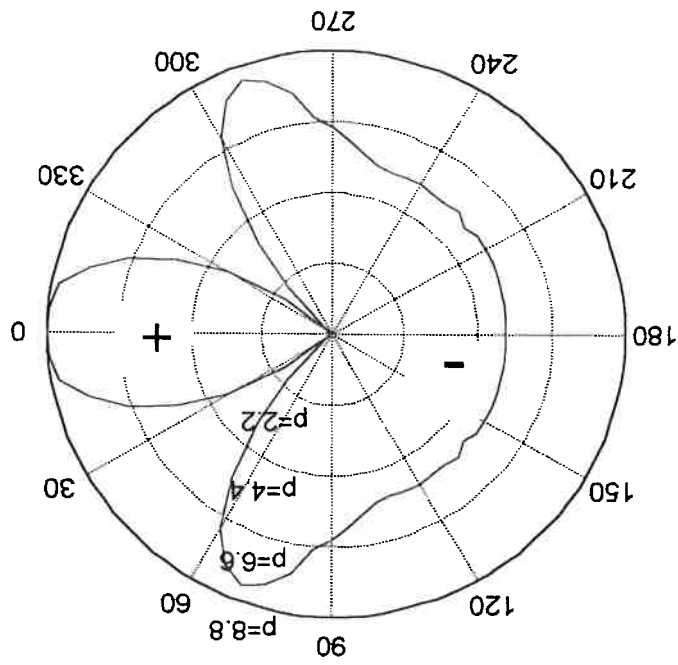


Figura C.5: Pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 4 m/s

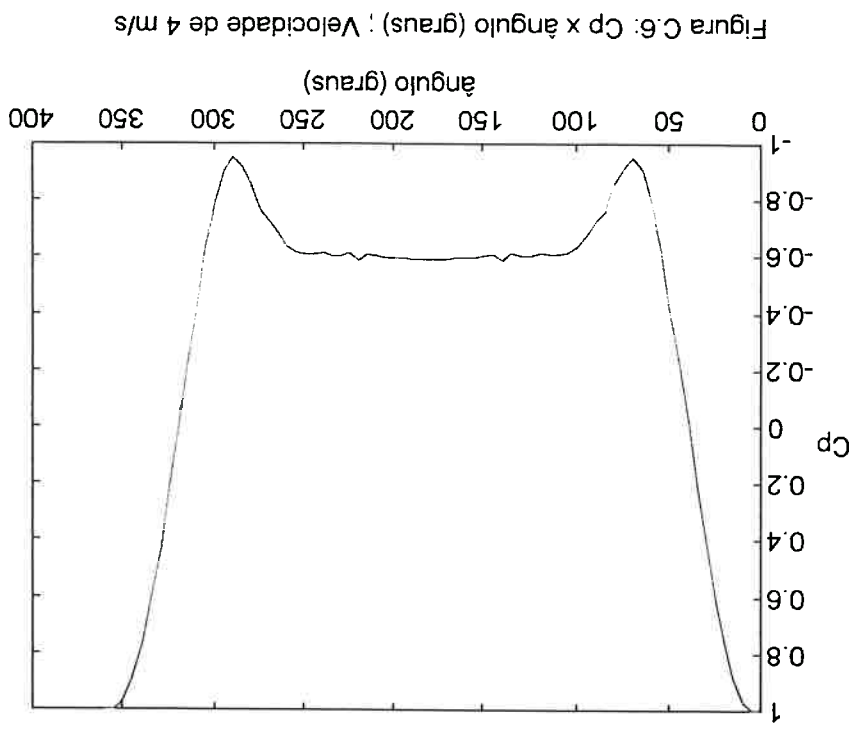


Figura C.6:  $C_p$  x ângulo (graus) ; Velocidade de 4 m/s

**Distribuição de pressões em cilindro**  
 Protótipo 4 ;  $d=15\text{ mm}$

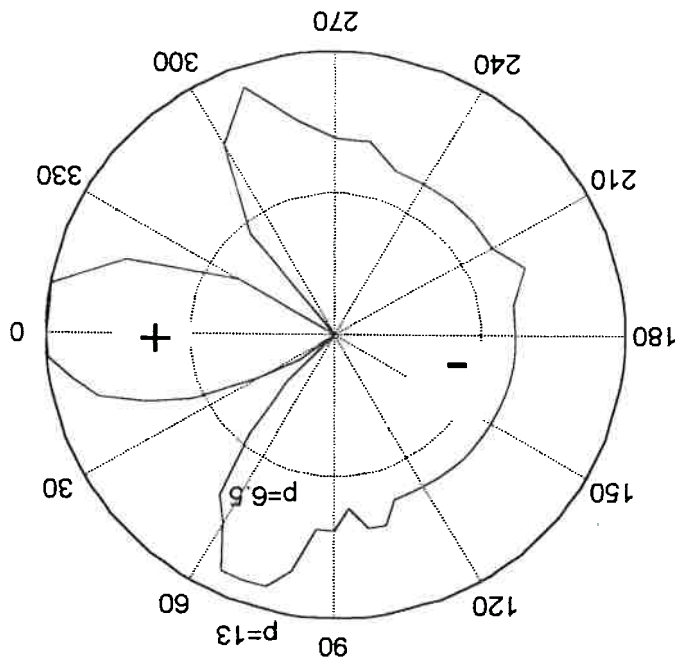


Figura C.7: Pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 5 m/s

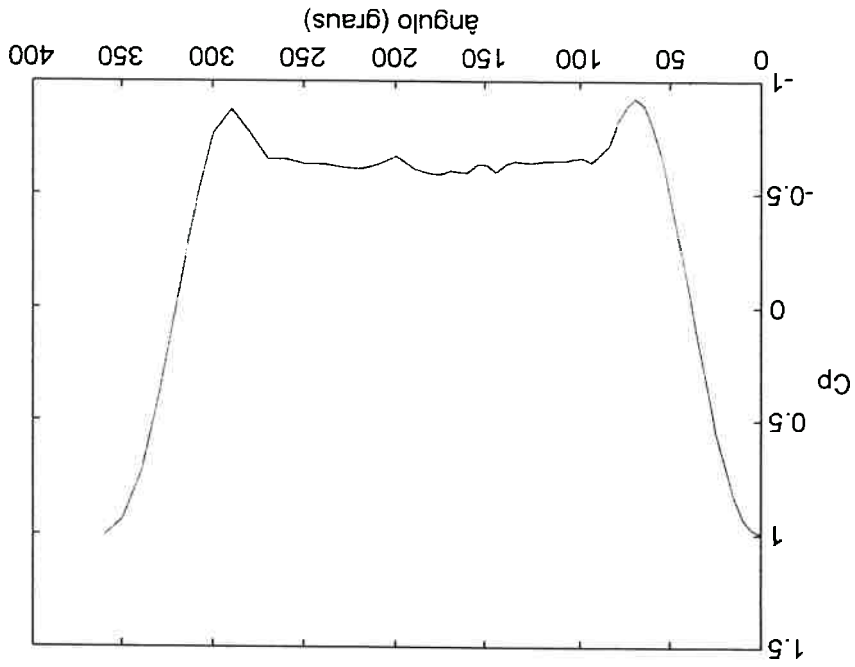


Figura C.8 : Cp x ângulo (graus) ; Velocidade de 5 m/s

**Distribuição de pressões em cilindro**  
Protótipo 4 ;  $d=15\text{ mm}$

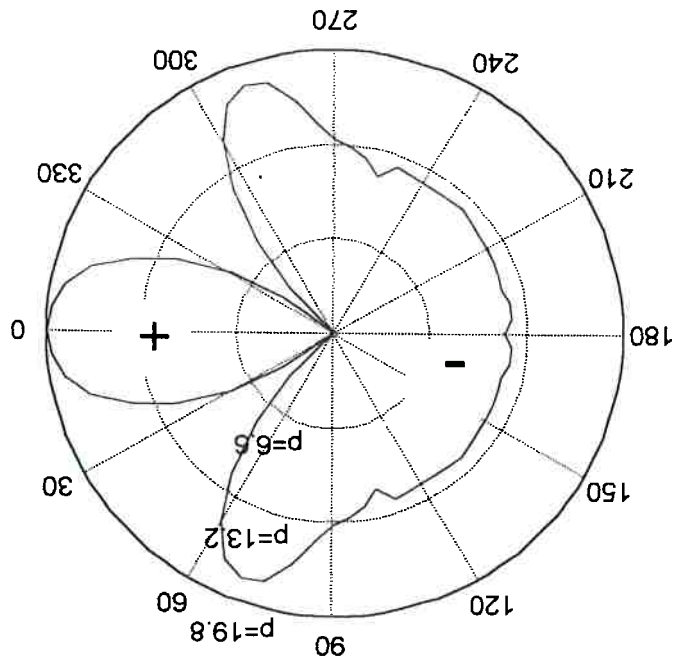


Figura C.9: Pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 6 m/s

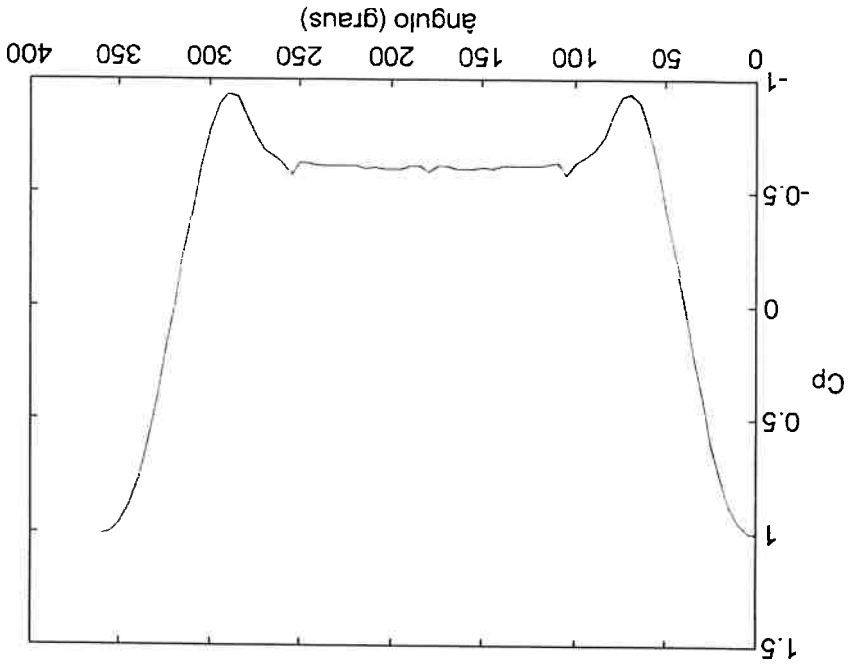


Figura C.10:  $C_p$  x ângulo (graus) ; Velocidade de 6 m/s



**Distribuição de pressões em cilindro**  
 Protótipo 4 ;  $d=15\text{ mm}$

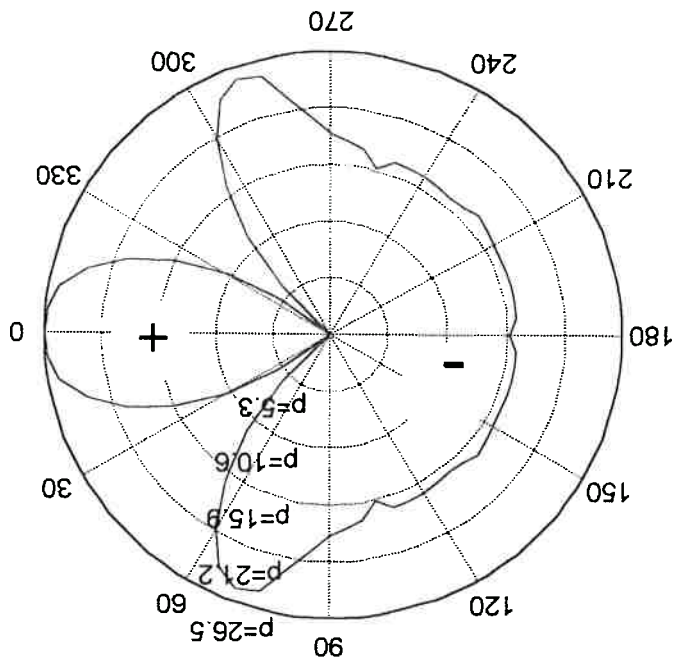


Figura C.11 : Pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 7 m/s

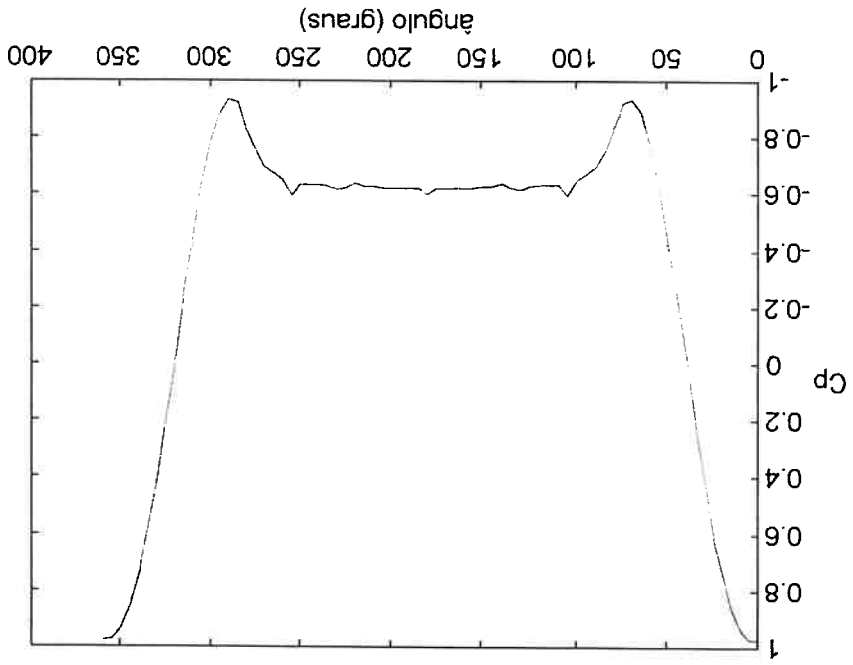


Figura C.12: Cp x ângulo (graus) ; Velocidade de 7 m/s

**Distribuição de pressões em cilindro**  
 Protótipo 4 ;  $d=15\text{ mm}$

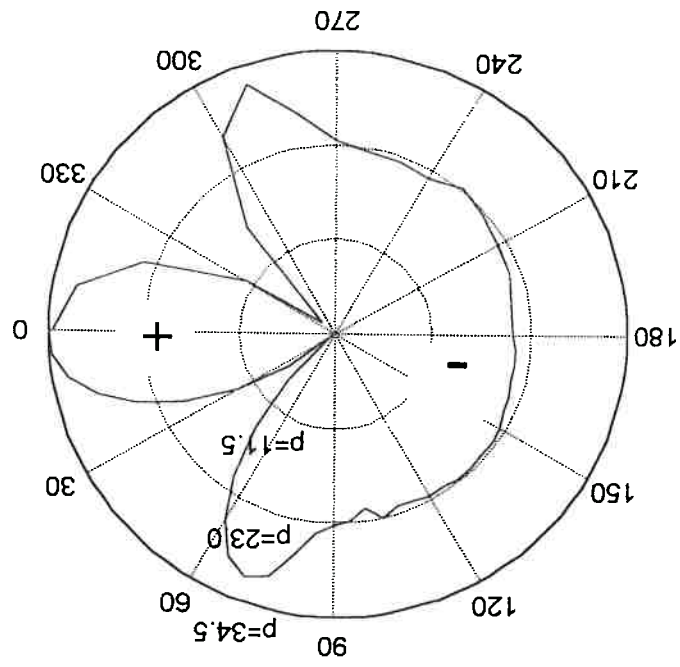


Figura C.13 : Pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 8 m/s

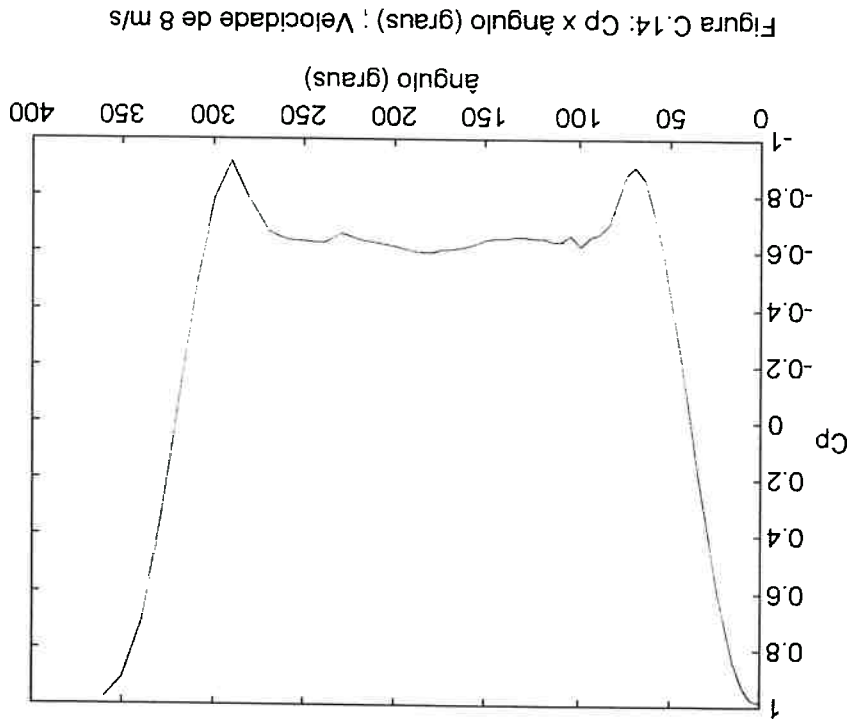


Figura C.14: Cp x ângulo (graus) ; Velocidade de 8 m/s

**Distribuição de pressões em cilindro**  
 Protótipo 4 ;  $d=15\text{ mm}$

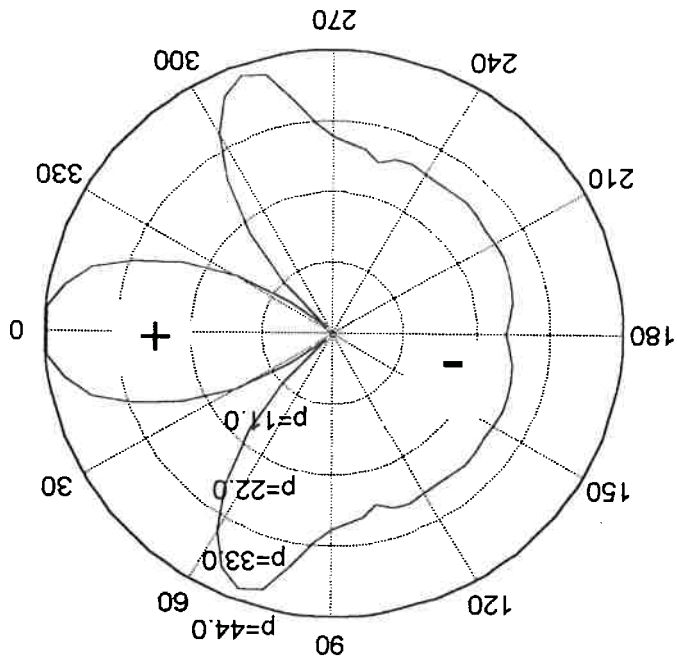


Figura C.15: Pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 9 m/s

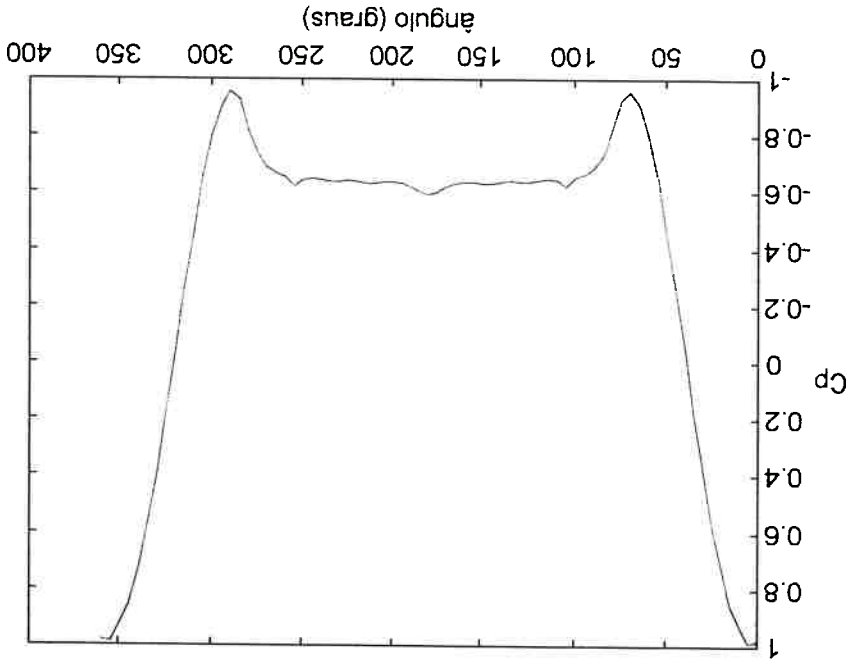


Figura C.16: Cp x ângulo (graus) ; Velocidade de 9 m/s

**Distribuição de pressões em cilindro**  
 Protótipo 4 ; d=15 mm

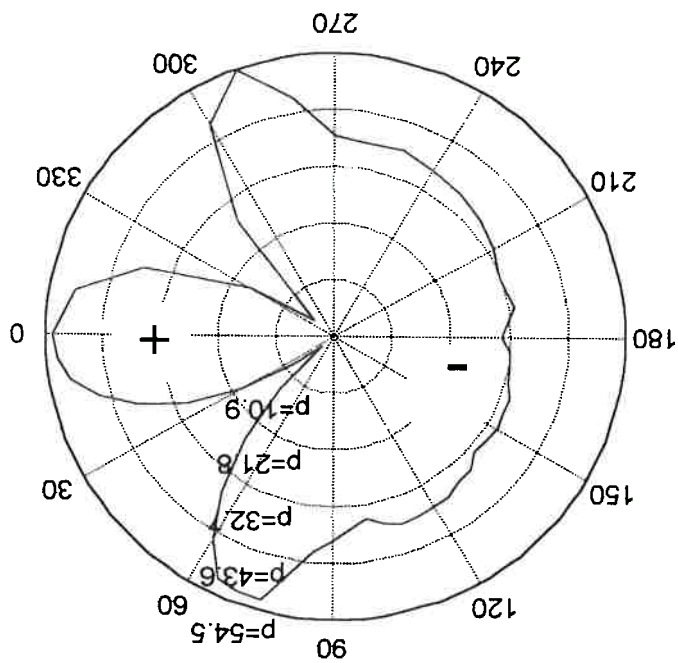


Figura C.17: Pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 10 m/s

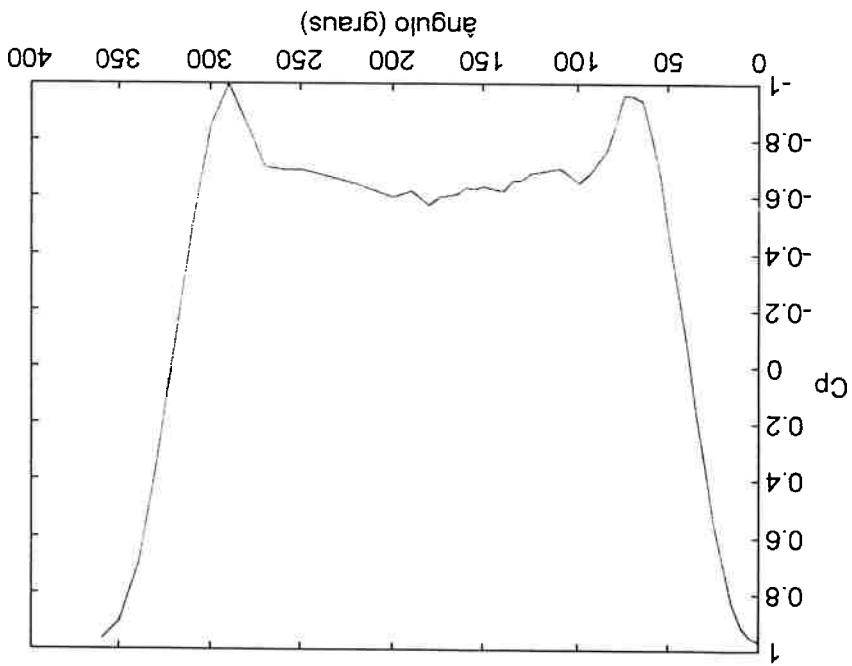


Figura C.18: Cp x ângulo (graus) ; Velocidade de 10 m/s

**Representação da diferença de pressão sobre cilindro Protótipo 4 :  $d=15\text{ mm}$**

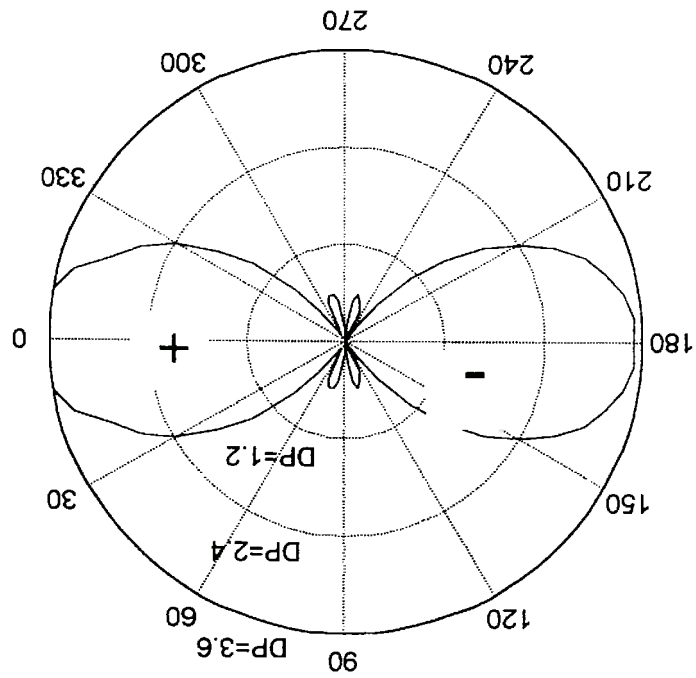


Figura C.19 : Diferença de pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 2 m/s

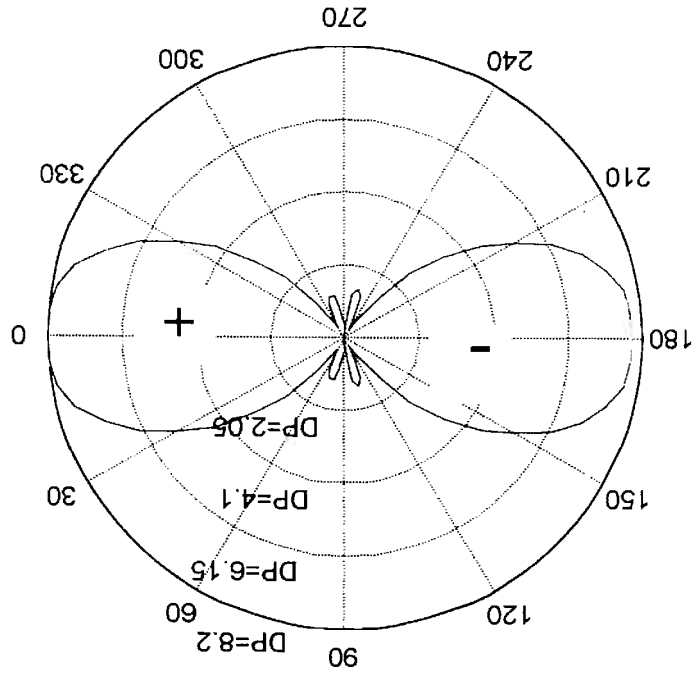


Figura C.20: Diferença de pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 3 m/s

**Representação da diferença de pressão sobre cilindro**  
 Protótipo 4 :  $d = 15 \text{ mm}$

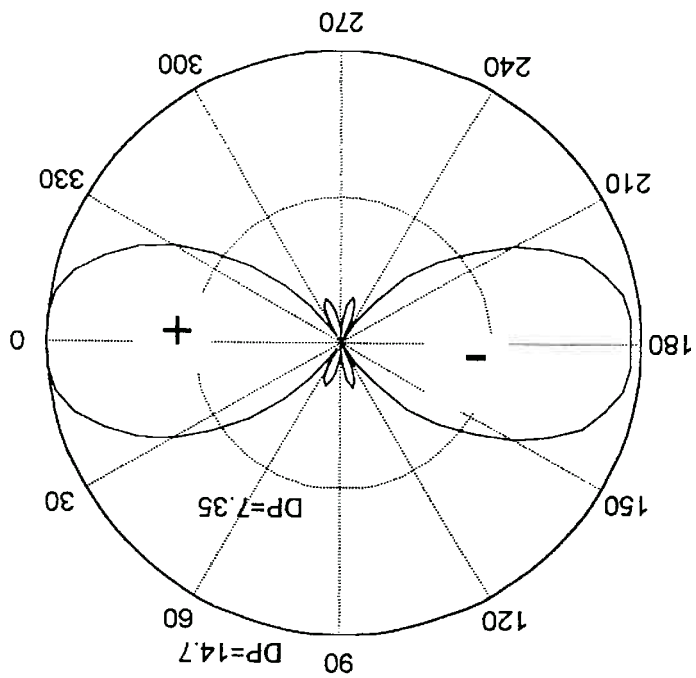


Figura C.21 : Diferença de pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 4 m/s

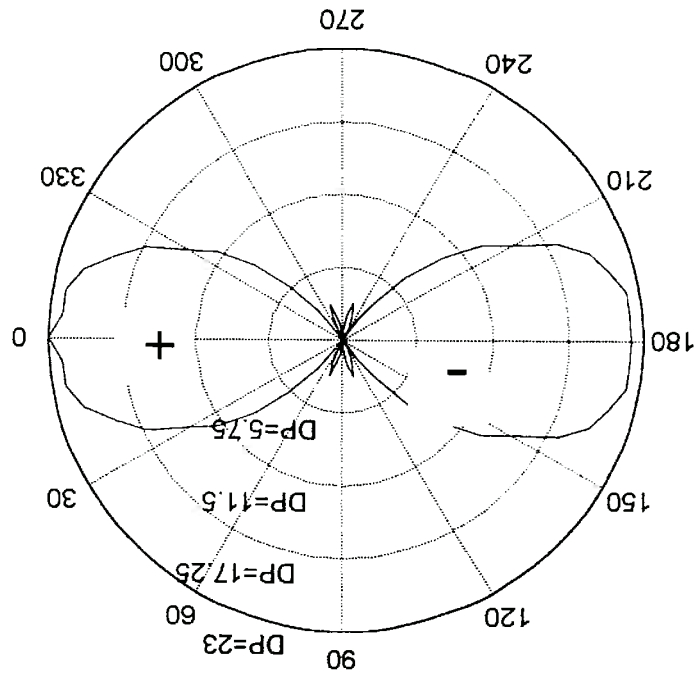


Figura C.22 : Diferença de pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 5 m/s

**Representação da diferença de pressão sobre cilindro**  
**Protótipo 4 ;  $d=15\text{ mm}$**

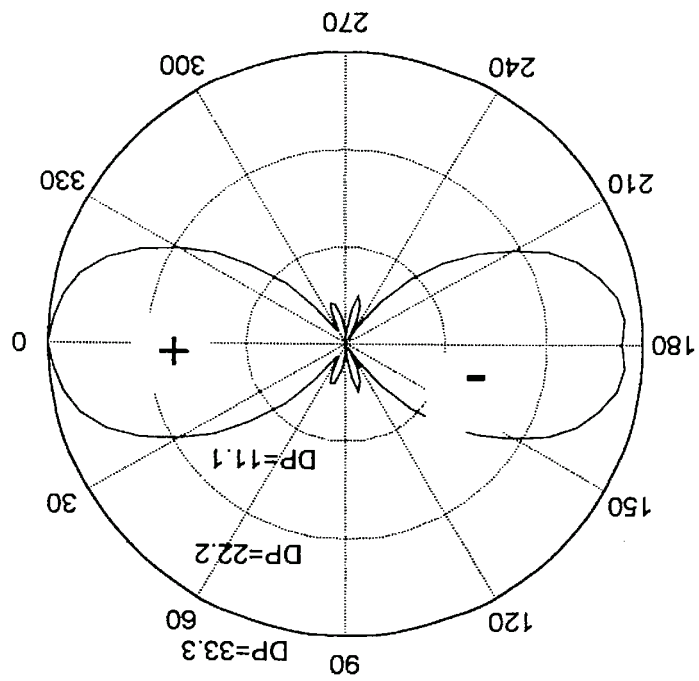


Figura C.23: Diferença de pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 6 m/s

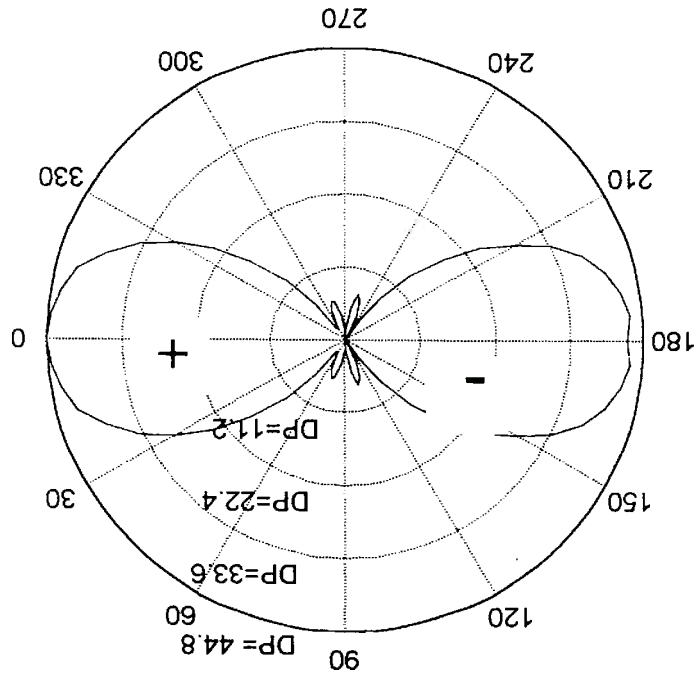


Figura C.24: Diferença de pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 7 m/s

**Representação da diferença de pressão sobre cilindro**

Protótipo 4 ;  $d=15\text{ mm}$

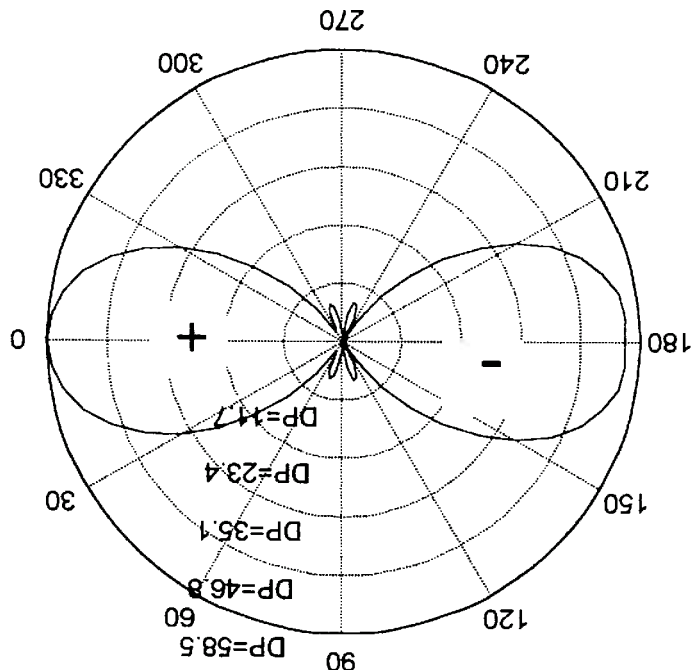


Figura C.25: Diferença de pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 8 m/s

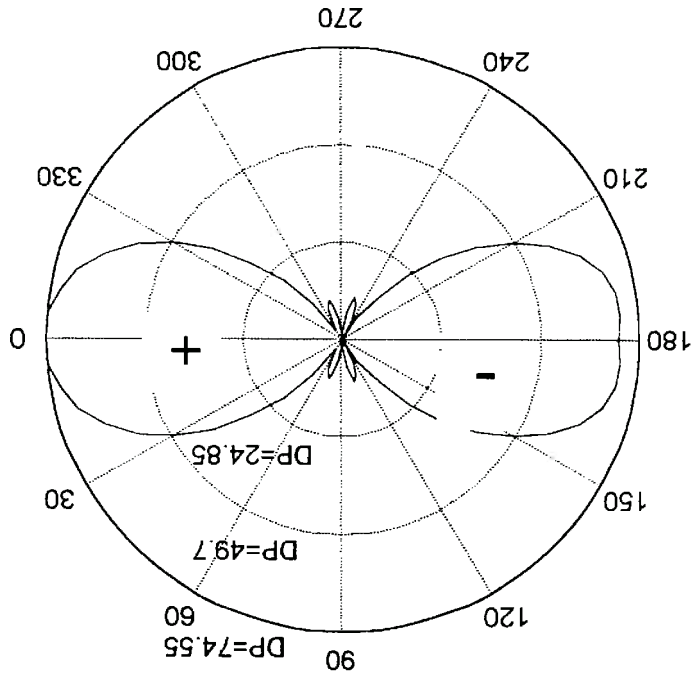


Figura C.26: Diferença de pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 9 m/s



**Representação da diferença de pressão sobre cilindro**  
Protótipo 4 :  $d=15\text{ mm}$

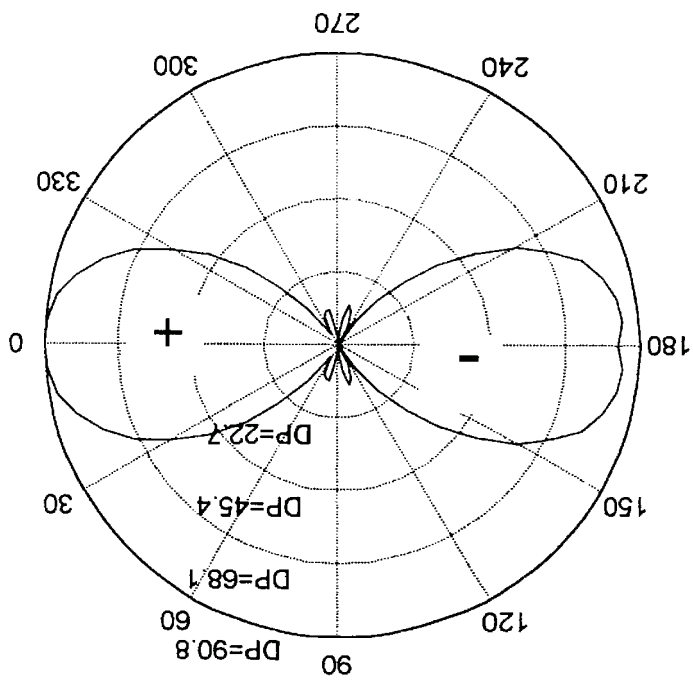


Figura C.27: Diferença de pressão (Pa) x ângulo (graus) ; Velocidade de 10 m/s

## **ANEXO D**

**SISTEMA MONITOR DE PRESSÕES -  
CURVAS DE CALIBRAÇÃO DE SENSORES E  
DESENHOS DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM**

Figura D.1 : Gráficos dos resultados da calibração dos sensores 1 e 2, com equação de ajuste linear

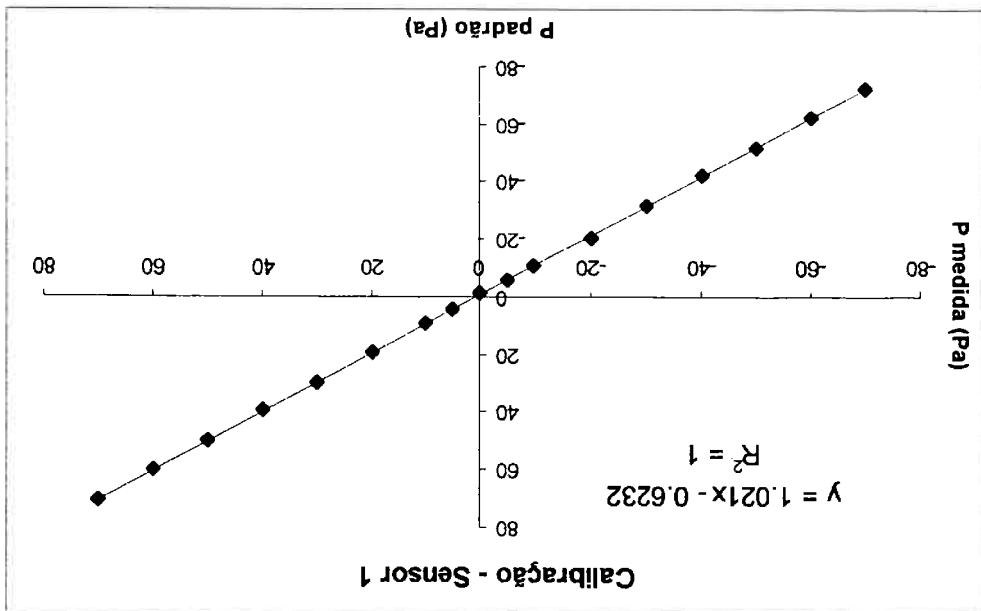
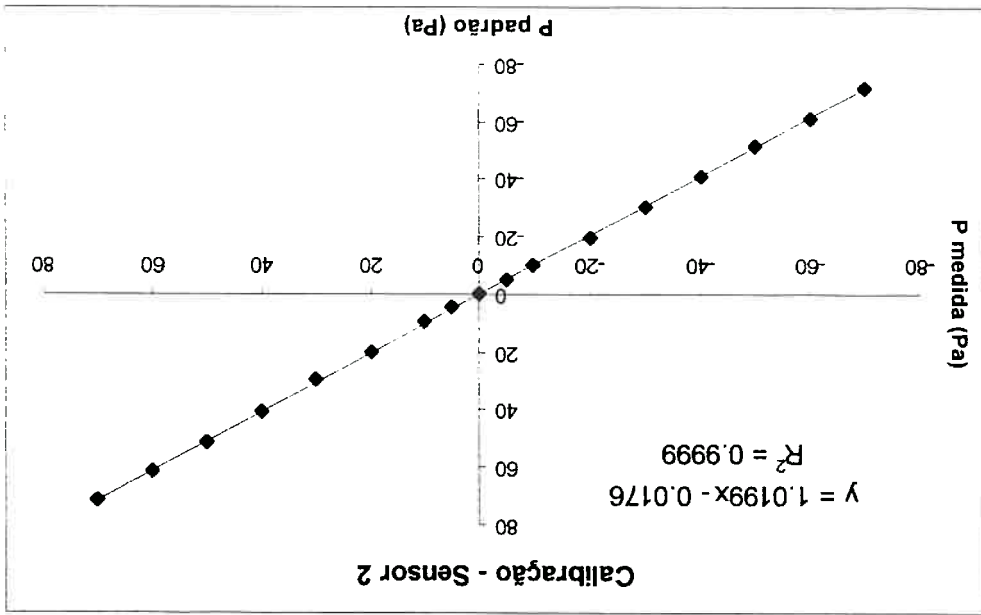


Figura D.2 : Gráficos dos resultados da calibração dos sensores 3 e 4, com equação de ajuste linear

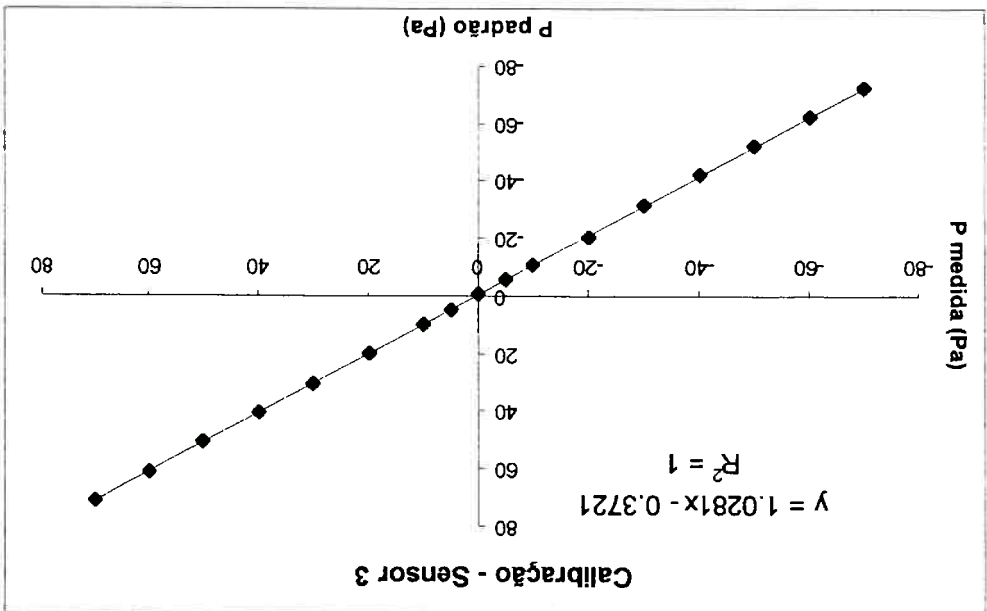
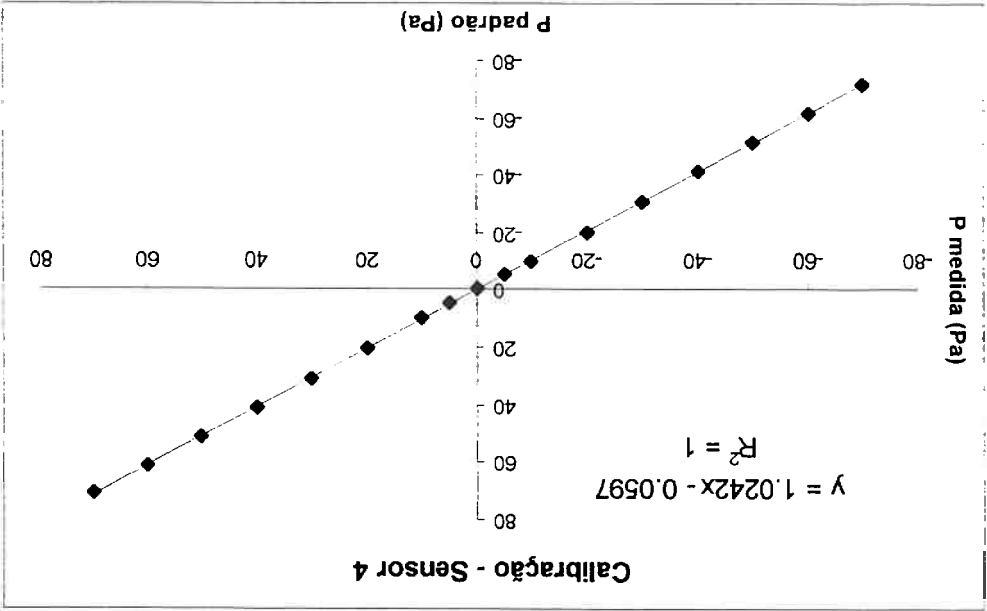


Figura D.3 : Gráficos dos resultados da calibração dos sensores 5 e 6, com equação de ajuste linear

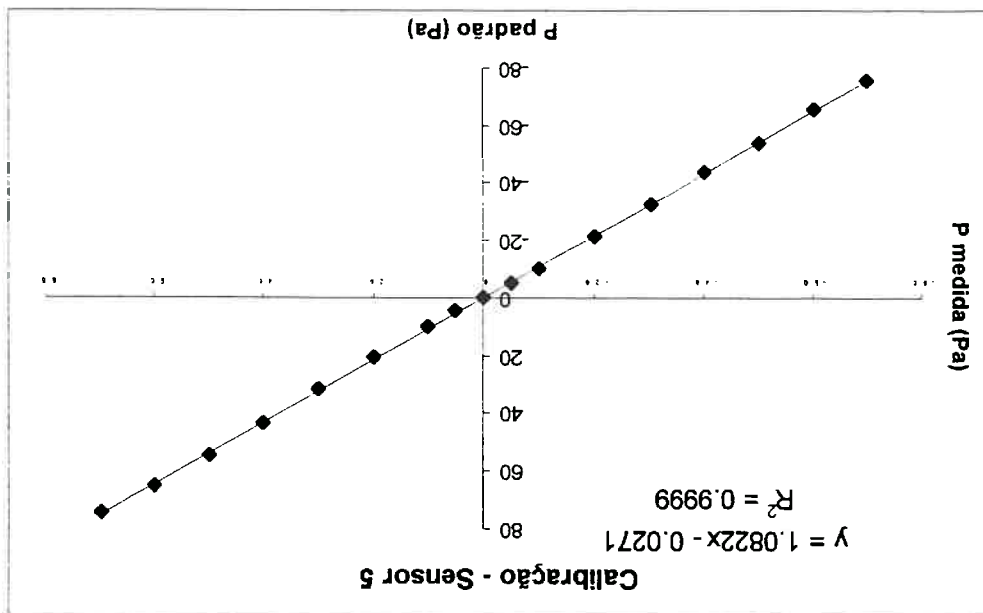
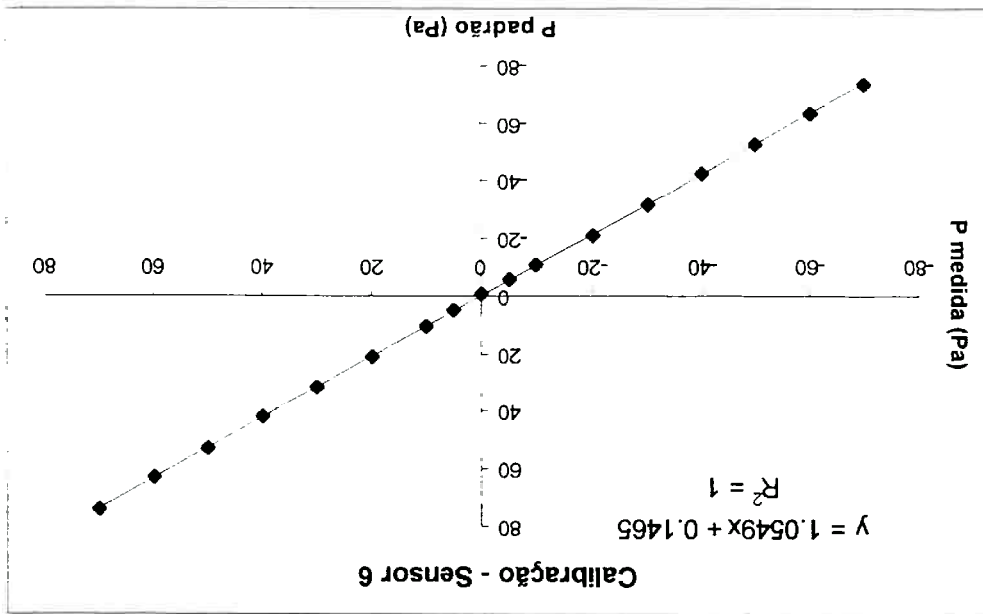


Figura D.4 : Gráficos dos resultados da calibração dos sensores 7 e 8, com equação de ajuste linear

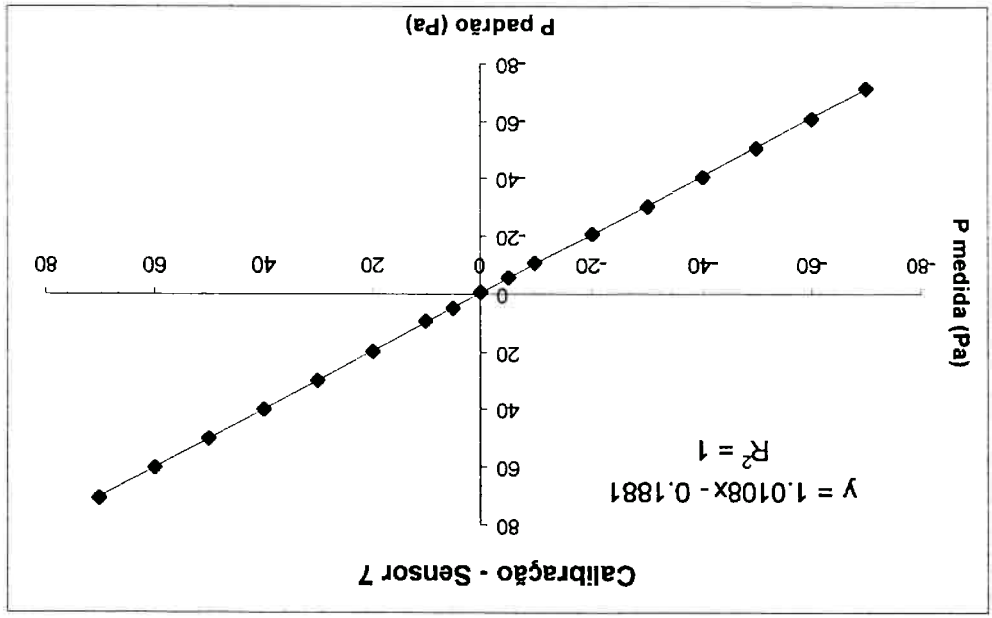
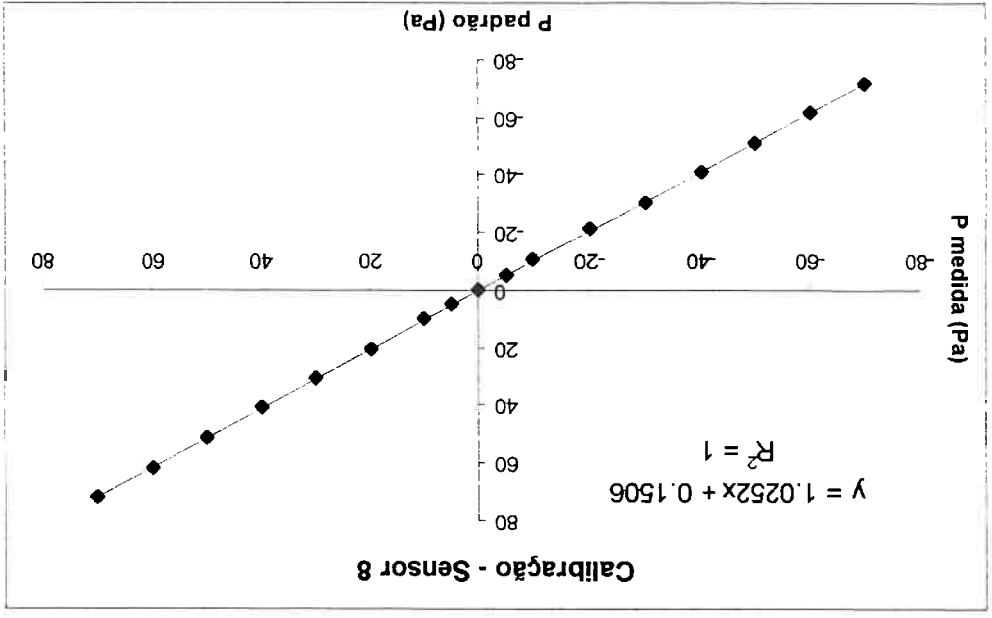


Figura D.5 : Gráficos dos resultados da calibração dos sensores 9 e 10, com equação de ajuste linear

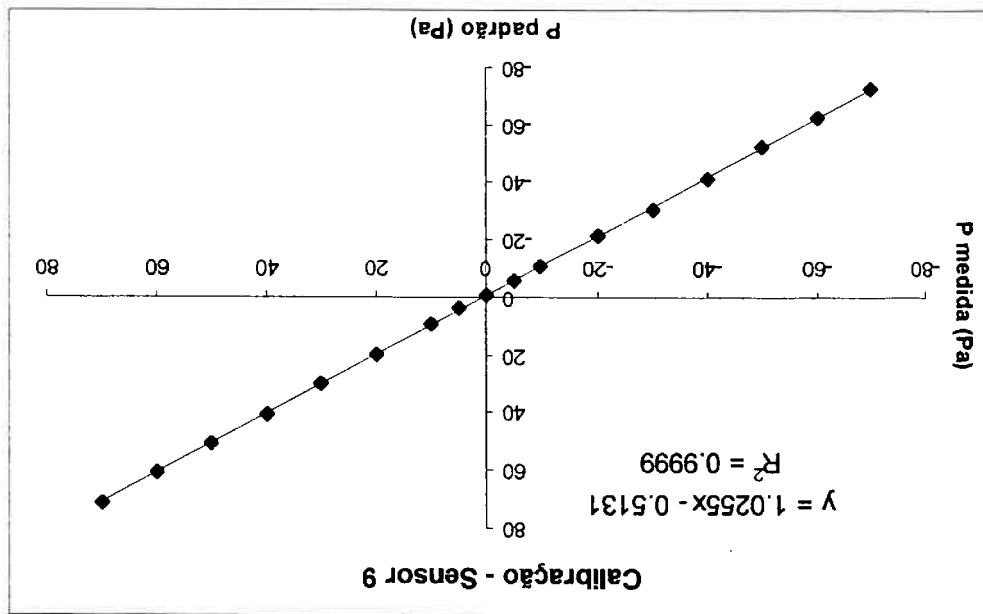
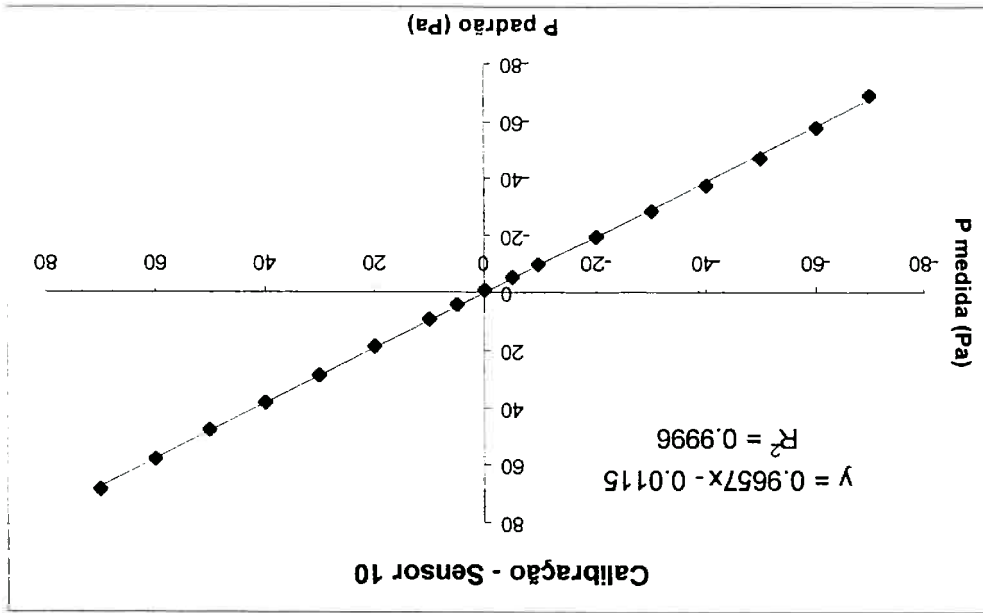
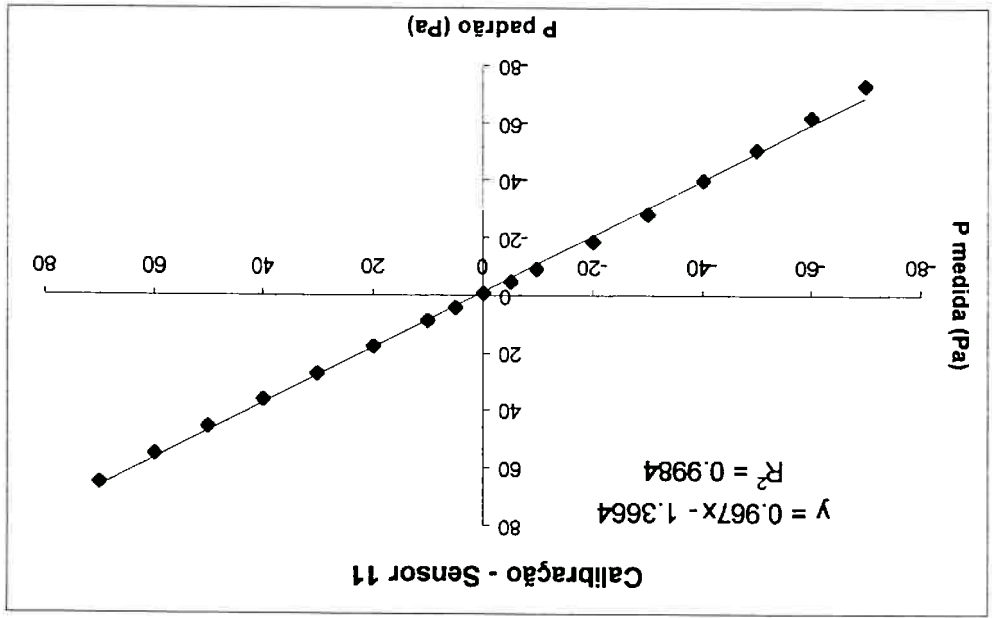
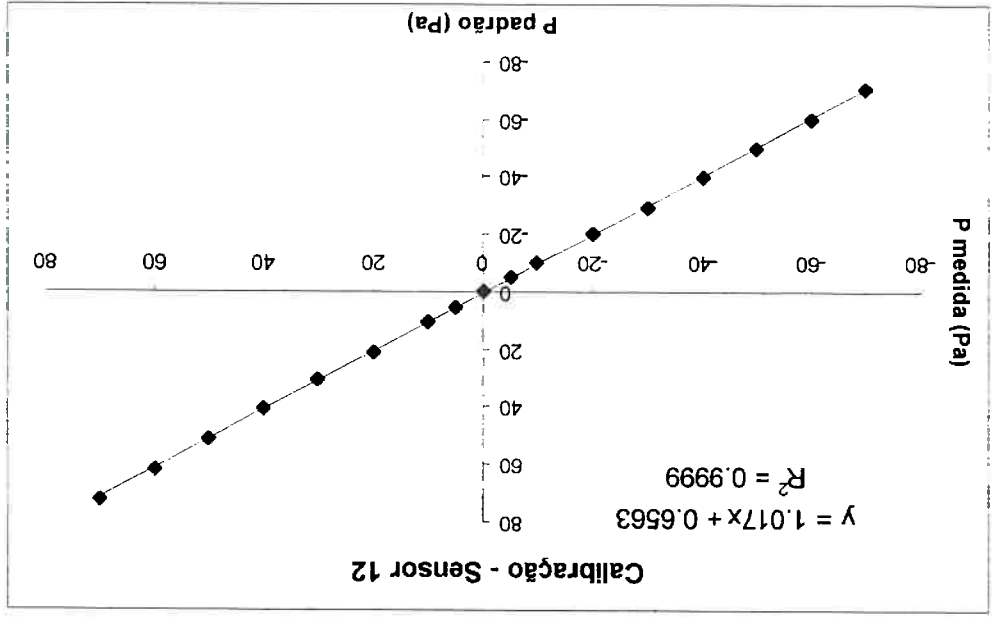
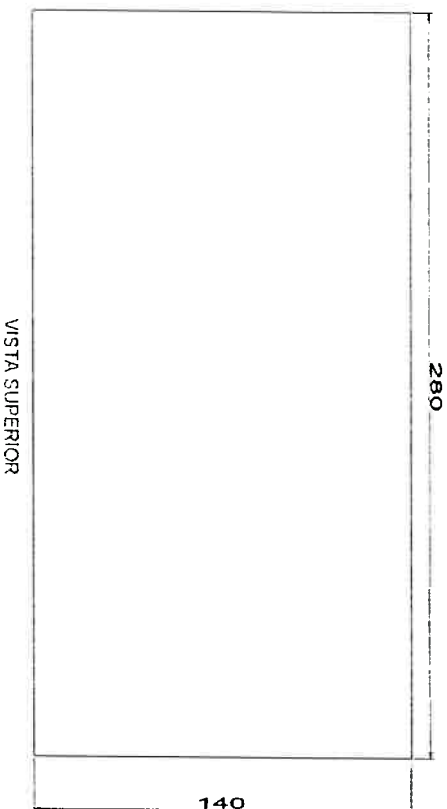
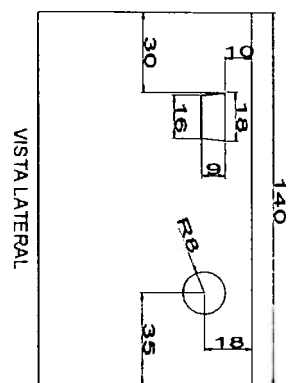
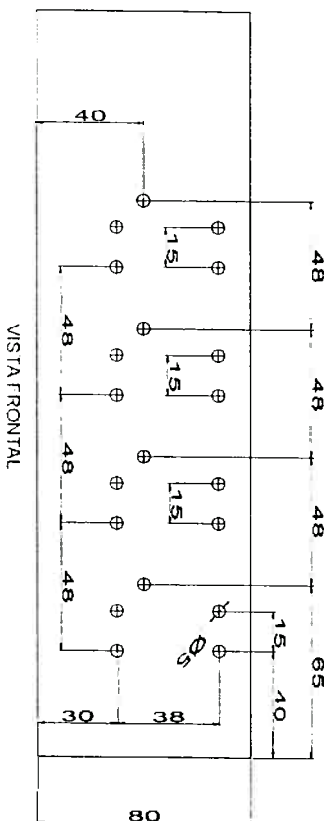


Figura D.6 : Gráficos dos resultados da calibração dos sensores 11 e 12, com equação de ajuste linear







**Observações :**

1. Todos os furos indicados na vista frontal possuem diâmetro 5 mm
2. As furações serão executadas somente em um dos lados e em uma face frontal, as outras não terão furos ou recortes
3. Medidas em mm
4. Material : chapa de aço e=1mm pintado

**Figura D.7: Desenhos da caixa do sistema monitor de pressões**

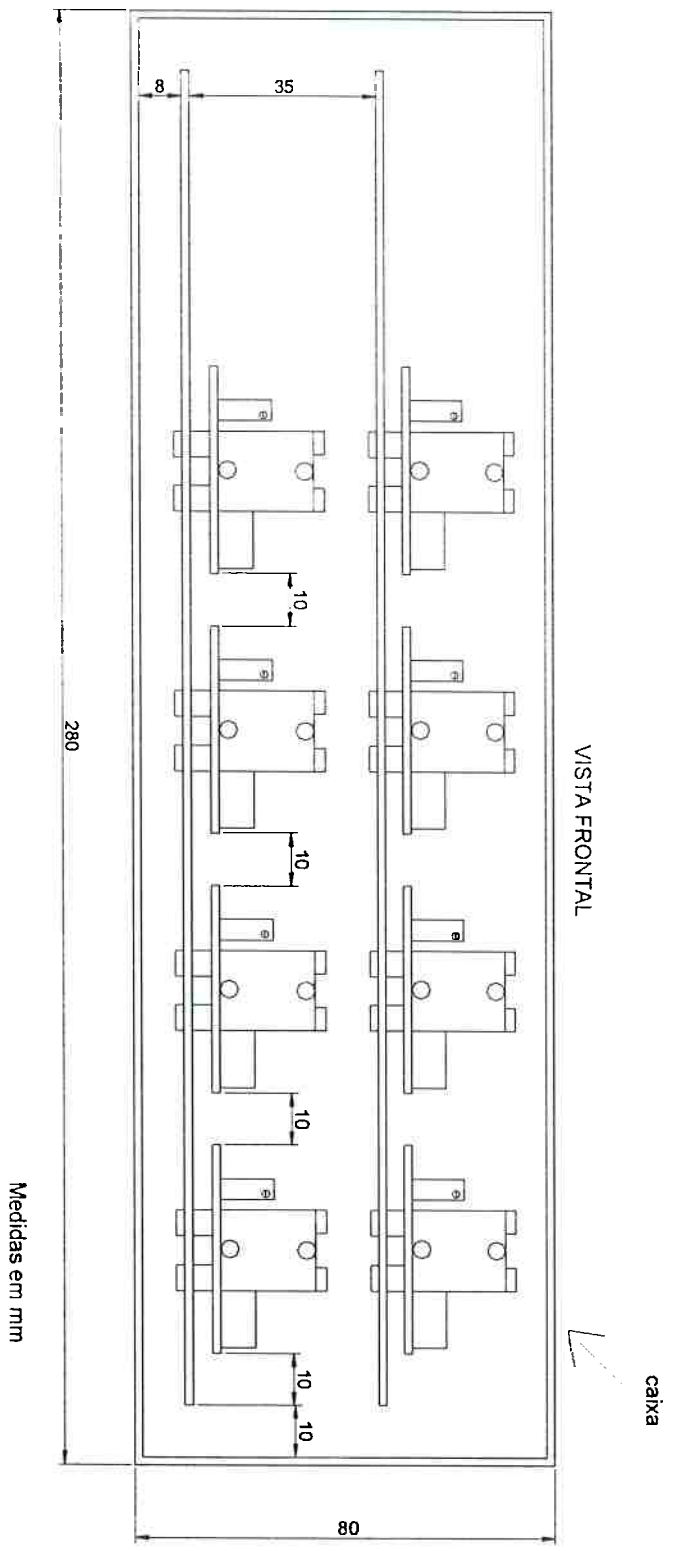


Figura D.8: Vista frontal do posicionamento dos sensores na caixa e nas placas de circuito impresso.

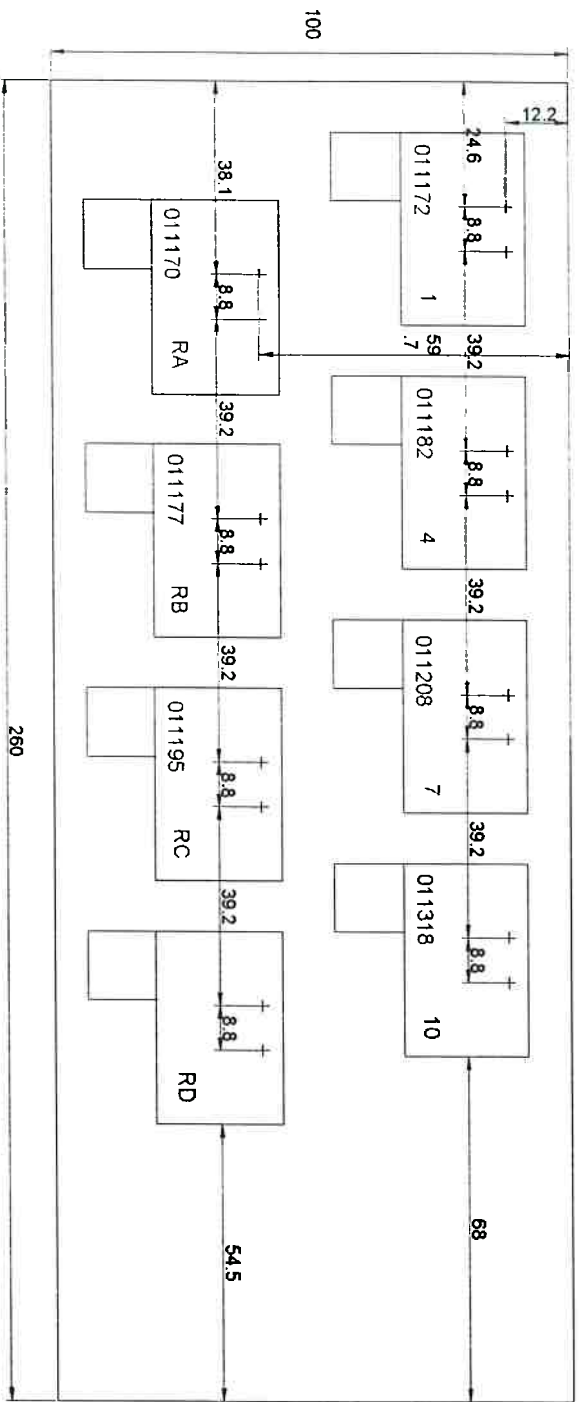


Figura D.9: Desenho das disposição dos sensores de pressão na placa de circuito impresso. Cada sensor está identificado pelo seu número de série e pelo número do terminal de saída onde será conectado.

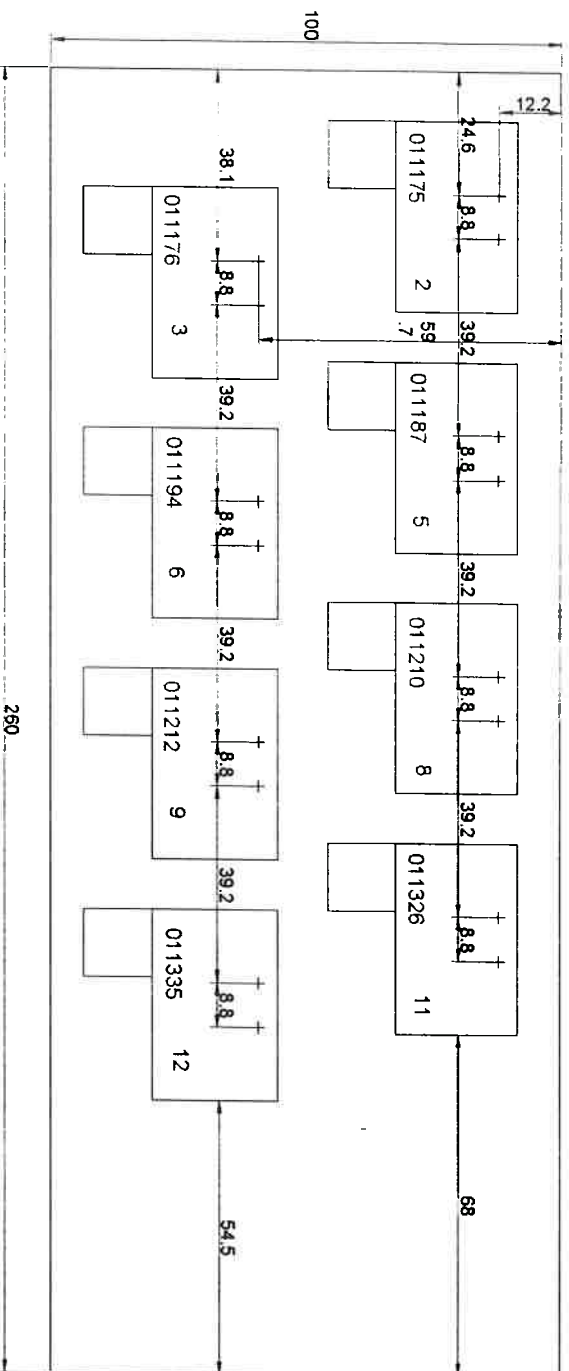
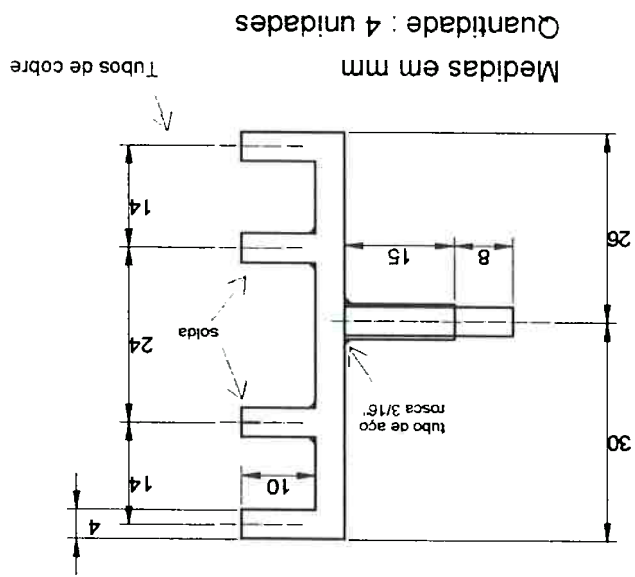


Figura D.10: Desenho da disposição dos sensores de pressão na placa de circuito impresso. Cada sensor está identificado pelo seu número de série e pelo número do terminal de saída onde será conectado

TERMINAIS PARA PRESSÃO NEGATIVA



TERMINAIS PARA PRESSÃO POSITIVA

Fabricados com barra com rosca de 3/16"

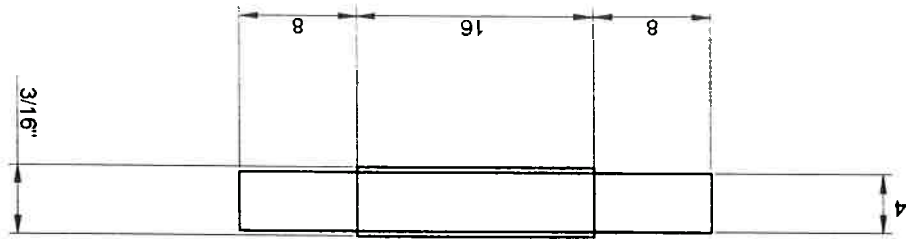


Figura D.11: Desenhos dos terminais de tomada de pressão

**RESULTADOS DE ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE  
VELOCIDADES E DE VAZÃO COM GRADE SENSORA  
MULTIDIRECIONAL E COM PLACA DE ORIFÍCIO**

**ANEXO E**

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 200 L/s

Configuração de Ensaio: 1 = veneziana

	(DP1-DP3) (Pa)	+/- inc	K <sub>α</sub>	+/- inc	α (graus)	+/- inc	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	+/- inc	K <sub>v</sub>	+/- inc	v (m/s)	+/- inc	v cos α (m/s)	+/- inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/- inc	Q <sub>m</sub> (kg/s)	+/- inc
Sonda A	-5.0	0.1	-0.478	0.019	-17	1	1.08	0.03	0.5032	0.020	2.96	0.06	2.83	0.06	0.0532	0.002	0.0684	0.002
Sonda B	-8.1	0.2	0.418	0.017	-35	1	1.08	0.03	-0.8146	0.033	2.77	0.08	2.28	0.07	0.0508	0.002	0.0551	0.002
Sonda C	-9.0	0.3	0.739	0.030	-44	2	1.08	0.03	-1.5812	0.063	2.79	0.08	1.99	0.08	0.0445	0.002	0.0482	0.002
Sonda D	-0.5	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.81	0.02	0.81	0.02	0.0181	0.000	0.0196	0.001

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0.1912	0.007
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0.206	0.003
Diferença (%)		-7.0 %

**Legenda:**

K<sub>α</sub> é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

K<sub>v</sub> é dado por K<sub>v1</sub> ou K<sub>v3</sub> ou ainda K<sub>v2</sub> em função de α

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E. 1: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 1, Q<sub>ref</sub> = 200 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 250 L/s

Configuração de Ensaio: 1 = veneziana

	(DP1-DP3) (Pa)	+/- inc	K $\alpha$	+/- inc	$\alpha$ (graus)	+/- inc	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	+/- inc	Kv	+/- inc	v (m/s)	+/- inc	v <sup>2</sup> cos $\alpha$ (m/s)	+/- inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/- inc	Q <sub>m</sub> (kg/s)	+/- inc
Sonda A	-8,6	0,2	-0,175	0,007	-22	1	1,09	0,03	0,1832	0,007	3,89	0,08	3,62	0,07	0,0808	0,002	0,0861	0,002
Sonda B	-13,1	0,4	0,444	0,018	-35	1	1,09	0,03	-0,8714	0,035	3,50	0,10	2,86	0,09	0,0638	0,002	0,0695	0,003
Sonda C	-10,6	0,3	0,554	0,022	-39	2	1,09	0,03	-1,1232	0,045	3,11	0,09	2,43	0,09	0,0542	0,002	0,0591	0,002
Sonda D	-0,9	0,0	0,000	0,000	0	0	1,09	0,03	1,2673	0,000	0,82	0,02	0,82	0,02	0,0182	0,000	0,0199	0,001

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv1 ou Kv3 ou ainda Kv2 em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0,2366	0,008
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0,241	0,004
Diferença (%):	-1,9 %	

Tabela E.2: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 1, Qref = 250 L/s



**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 300 L/s

Configuração de Ensaio: 1 = veneziana

	(DP1-DP3) +/- inc		K $\alpha$	K $\alpha$ +/- inc		$\alpha$	+/- inc		p	p +/- inc		Kv	Kv +/- inc		v	v +/- inc		v cos $\alpha$	+/- inc		Q	+/- inc		Qm	+/- inc		
	(Pa)			(graus)			(kg/m <sup>3</sup> )			(m/s)			(m/s)			(m <sup>3</sup> /s)			(kg/s)								
Sonda A	-11.5	0.3	-0.210	0.008	-21	1	1.09	0.03	0.03	0.2258	0.009	4.43	0.09	4.14	0.08	0.0923	0.003	0.1006	0.003								
Sonda B	-18.1	0.5	0.527	0.021	-38	2	1.09	0.03	0.03	-1.0581	0.042	4.06	0.11	3.21	0.11	0.0717	0.003	0.0782	0.003								
Sonda C	-14.6	0.4	0.600	0.024	-40	2	1.09	0.03	0.03	-1.2321	0.049	3.61	0.10	2.77	0.10	0.0618	0.003	0.0674	0.003								
Sonda D	0.4	0.0	0.000	0.000	0	0	1.09	0.03	0.03	1.4160	0.000	0.48	0.01	0.48	0.01	0.0106	0.000	0.0116	0.000								

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>1</sub> ou Kv<sub>2</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0.2578	0.009
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0.284	0.004
Diferença (%):	-9.3 %	

Tabela E.3: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 1, Qref = 300 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 350 L/s

Configuração de Ensaio: 1 = veneziana

	(DP1-DP3) +/- inc	Ka	+/- inc	$\alpha$	+/- inc	$\rho$	+/- inc	Kv	+/- inc	v	+/- inc	$v \cdot \cos \alpha$	+/- inc	Q	+/- inc	Qm	+/- inc	
	(Pa)			(graus)		(kg/m <sup>3</sup> )				(m/s)		(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)		
Sonda A	-17.7	0.5	-0.186	0.007	-21	1	1.09	0.03	0.1966	0.008	5.54	0.11	5.16	0.11	0.1153	0.003	0.1256	0.003
Sonda B	-27.3	0.8	0.574	0.023	-39	2	1.09	0.03	-1.1688	0.047	4.96	0.14	3.84	0.14	0.0858	0.003	0.0935	0.004
Sonda C	-23.1	0.7	0.589	0.024	-40	2	1.09	0.03	-1.2044	0.048	4.56	0.13	3.51	0.13	0.0784	0.003	0.0854	0.003
Sonda D	-0.1	0.0	0.000	0.000	0	0	1.09	0.03	1.4160	0.000	0.92	0.02	0.92	0.02	0.0205	0.001	0.0224	0.001

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m,grade</sub> = 0.3269	0.011
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m,placa</sub> = 0.344	0.005
Diferença (%):		-5.0 %

**Legenda:**

Ka é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv1 ou Kv3 ou ainda Kv2 em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.4: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 1, Qref = 350 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 400 L/s

Configuração de Ensaio: 1 = veneziana

	(DP1-DP3) +/- inc		K $\alpha$	+/- inc		$\alpha$	+/- inc		$\rho$	+/- inc		Kv	+/- inc		v	+/- inc		v $\cos \alpha$	+/- inc		Q	+/- inc		Qm	+/- inc		
	(Pa)			(graus)			(kg/m3)			(m/s)			(m/s)			(m <sup>3</sup> /s)			(kg/s)								
Sonda A	-19.9	0.6	-0.275	0.014	-20	1	1.09	0.03	0.3013	0.012	5.77	0.11	5.43	0.11	0.1212	0.003	0.1321	0.004									
Sonda B	-32.0	0.9	0.575	0.023	-39	2	1.09	0.03	-1.1709	0.047	5.37	0.15	4.16	0.15	0.0929	0.004	0.1013	0.004									
Sonda C	-32.3	0.9	0.641	0.026	-41	2	1.09	0.03	-1.3328	0.053	5.34	0.15	4.02	0.15	0.0896	0.004	0.0977	0.004									
Sonda D	-0.2	0.0	0.000	0.000	0	0	1.09	0.03	1.4160	0.000	1.23	0.02	1.23	0.02	0.0275	0.001	0.0300	0.001									

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv1 ou Kv3 ou ainda Kv2 em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.3611	0.013
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.374	0.006
Diferença (%):		-3.6 %

Tabela E.5: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 1, Qref = 400 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 450 L/s

Configuração de Ensaio: 1 = veneziana

	(DP1-DP3) +/- inc		K $\alpha$	K $\alpha$ +/- inc		$\alpha$ +/- inc		$\rho$ +/- inc		Kv	v +/- inc		Vcos $\alpha$ +/- inc		Q +/- inc		Qm +/- inc	
	(Pa)			(graus)		(kg/m3)		(m/s)			(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)			
Sonda A	-27.3	0.8	-0.227	0.009	-21	1	1.09	0.03	0.2464	0.010	6.80	0.13	6.36	0.13	0.1420	0.004	0.1548	0.004
Sonda B	-43.1	1.2	0.626	0.025	-41	2	1.09	0.03	-1.2945	0.052	6.18	0.17	4.68	0.17	0.1045	0.004	0.1139	0.005
Sonda C	-37.7	1.1	0.589	0.024	-40	2	1.09	0.03	-1.2058	0.048	5.81	0.16	4.48	0.16	0.0999	0.004	0.1089	0.004
Sonda D	-0.2	0.0	0.000	0.000	0	0	1.09	0.03	1.4160	0.000	1.18	0.02	1.18	0.02	0.0264	0.001	0.0288	0.001

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.4064	0.014
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.429	0.007
Diferença (%):		-5.3 %

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>1</sub> ou Kv<sub>3</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.6: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 1, Qref = 450 L/s

RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL

Vazão referência = 500 L/s

Configuração de Ensaio: 1 = veneziana

	(DP1-DP3) +/- Inc		Ka	+/- Inc		$\alpha$	+/- Inc		$\rho$	+/- Inc		Kv	+/- Inc		v	+/- Inc		$v \cos \alpha$	+/- Inc		Q	+/- Inc		Qm	+/- Inc	
	(Pa)			(graus)			(kg/m3)			(m/s)			(m/s)			(m³/s)			(kg/s)							
Sonda A	-39.4	1.1	-0.177	0.007	-21	1	1.09	0.03	0.1857	0.007	8.31	0.16	7.73	0.16	0.1725	0.005	0.1881	0.005								
Sonda B	-57.7	1.6	0.608	0.024	-40	2	1.09	0.03	-1.2509	0.050	7.17	0.20	5.48	0.20	0.1223	0.005	0.1333	0.006								
Sonda C	-52.0	1.5	0.634	0.025	-41	2	1.09	0.03	-1.3149	0.053	6.78	0.19	5.12	0.19	0.1143	0.005	0.1246	0.005								
Sonda D	-0.9	0.0	0.000	0.000	0	0	1.09	0.03	1.4160	0.000	0.88	0.02	0.88	0.02	0.0195	0.001	0.0213	0.001								

Legenda:

Ka é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m,grade</sub> = 0.4672	0.017
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m,placa</sub> = 0.489	0.007
Diferença (%):	-4.4 %	

Tabela E.7: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 1, Qref = 500 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 550 L/s

Configuração de Ensaio: 1 = veneziana

	(DP1-DP3) +/- inc		K $\alpha$	K $\alpha$ +/- inc		$\alpha$	+/- inc		$\rho$	+/- inc		Kv	+/- inc		v	+/- inc		v $\cos \alpha$	+/- inc		Q	+/- inc		Qm	+/- inc			
	(Pa)			(graus)	(kg/m <sup>3</sup> )		(m/s)	(m/s)		(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)															
Sonda A	-48.2	1.4	-0.218	0.009	-21	1	1.09	0.03	0.2353	0.009	9.05	0.18	8.46	0.17	0.1888	0.005	0.2058	0.006										
Sonda B	-70.7	2.0	0.631	0.025	-41	2	1.09	0.03	-1.3059	0.052	7.91	0.22	5.98	0.22	0.1335	0.006	0.1455	0.006										
Sonda C	-61.6	1.7	0.619	0.025	-41	2	1.09	0.03	-1.2795	0.051	7.40	0.21	5.62	0.21	0.1254	0.005	0.1367	0.006										
Sonda D	-0.5	0.0	0.000	0.000	0	0	1.09	0.03	1.2673	0.000	0.62	0.01	0.62	0.01	0.0139	0.000	0.0152	0.000										

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0.5031	0.018
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0.537	0.008
Diferença (%):	-6.3 %	

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv1 ou Kv3 ou ainda Kv, em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.8: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 1, Qref = 550 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 600 L/s

Configuração de Ensaio: 1 = veneziana

	(DP1-DP3) (Pa)	+/- inc	K $\alpha$	+/- inc	$\alpha$ (graus)	+/- inc	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	+/- inc	Kv	+/- inc	v (m/s)	+/- inc	v <sup>2</sup> cos $\alpha$ (m/s)	+/- inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/- inc	Q <sub>m</sub> (kg/s)	+/- inc
Sonda A	-57.4	1.6	-0.249	0.010	-20	1	1.09	0.03	0.2714	0.011	9.83	0.19	9.22	0.19	0.2058	0.006	0.2243	0.006
Sonda B	-85.6	2.4	0.664	0.027	-42	2	1.09	0.03	-1.3905	0.056	8.66	0.24	6.44	0.25	0.1437	0.006	0.1567	0.007
Sonda C	-79.8	2.3	0.677	0.027	-42	2	1.09	0.03	-1.4230	0.057	8.34	0.23	6.16	0.24	0.1375	0.006	0.1499	0.006
Sonda D	0.1	0.0	0.000	0.000	0	0	1.09	0.03	1.4160	0.000	0.30	0.01	0.30	0.01	0.0066	0.000	0.0072	0.000

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>1</sub> ou Kv<sub>3</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.5382	0.020
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.592	0.009
Diferença (%)	-9.2 %	

Tabela E.9: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 1, Q<sub>ref</sub> = 600 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referencia = 640 L/s

Configuração de Ensaio: 1 = veneziana

	(DP1-DP3) +/- Inc	K $\alpha$	+/- Inc	$\alpha$	+/- Inc	p	+/- Inc	Kv	+/- Inc	v	+/- Inc	v $\cos \alpha$	+/- Inc	Q	+/- Inc	Qm	+/- Inc	
																		(Pa)
Sonda A	-62.5	1.8	-0.263	0.011	-20	1	1.09	0.03	0.2873	0.011	10.24	0.20	9.62	0.20	0.2148	0.006	0.2341	0.006
Sonda B	-94.6	2.7	0.679	0.027	-42	2	1.09	0.03	-1.4281	0.057	9.09	0.26	6.70	0.26	0.1496	0.006	0.1631	0.007
Sonda C	-87.1	2.5	0.707	0.028	-43	2	1.09	0.03	-1.4980	0.060	8.68	0.24	6.31	0.25	0.1408	0.006	0.1535	0.007
Sonda D	4.8	0.1	-1.020	0.041	55	2	1.09	0.03	-2.3421	0.094	1.97	0.06	1.13	0.07	0.0253	0.002	0.0276	0.002

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>1</sub> ou Kv<sub>3</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.5783	0.022
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.632	0.010
Diferença (%):		-8.4 %

Tabela E.10: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 1, Qref = 640 L/s



**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 200 L/s

Configuração de Ensaio: 2 = veneziana + filtro

	(DP1-DP3) +/- Inc	Ka	+/- Inc	$\alpha$	+/- Inc	$\rho$	+/- Inc	Kv	+/- Inc	V	+/- Inc	V <sup>2</sup> cos $\alpha$	+/- Inc	Q	+/- Inc	Qm	+/- Inc	
																		(Pa)
Sonda A	-4.4	0.1	-0.495	0.020	-17	1	1.08	0.03	0.5181	0.021	2.78	0.06	2.66	0.05	0.0594	0.002	0.0642	0.002
Sonda B	-4.8	0.1	0.176	0.007	-29	1	1.08	0.03	-0.3426	0.014	2.14	0.05	1.88	0.06	0.0419	0.001	0.0452	0.002
Sonda C	-9.3	0.3	0.486	0.019	-37	1	1.08	0.03	-0.9646	0.039	2.94	0.08	2.36	0.08	0.0527	0.002	0.0569	0.002
Sonda D	-1.4	0.0	0.427	0.017	-35	1	1.08	0.03	-0.8353	0.033	1.17	0.03	0.96	0.03	0.0214	0.001	0.0231	0.001

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.1894	0.006
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.203	0.003
Diferença (%):		-6.8 %

Tabela E. 11: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 2, Qref = 200 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 250 L/s

Configuração de Ensaio: 2 = veneziana + filtro

	(DP1-DP3) (Pa)	+/- inc	K <sub>α</sub>	+/- inc	α (graus)	+/- inc	p (kg/m <sup>3</sup> )	+/- inc	Kv	+/- inc	v (m/s)	+/- inc	v*cos α (m/s)	+/- inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/- inc	Q <sub>m</sub> (kg/s)	+/- inc
Sonda A	-6,8	0,2	-0,344	0,014	-19	1	1,08	0,03	0,3750	0,015	3,39	0,07	3,21	0,07	0,0716	0,002	0,0773	0,002
Sonda B	-6,7	0,2	0,206	0,008	-29	1	1,08	0,03	-0,3963	0,016	2,54	0,07	2,21	0,07	0,0494	0,002	0,0533	0,002
Sonda C	-13,5	0,4	0,548	0,022	-38	2	1,08	0,03	-1,1026	0,044	3,52	0,10	2,76	0,10	0,0617	0,002	0,0666	0,003
Sonda D	-1,1	0,0	0,329	0,013	-32	1	1,08	0,03	-0,6306	0,025	1,01	0,03	0,85	0,03	0,0190	0,001	0,0206	0,001

**Legenda:**

K<sub>α</sub> é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv1 ou Kv3 ou ainda Kv2 em função de α

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m,grade</sub> = 0,2178	0,007
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m,placa</sub> = 0,243	0,004
Diferença (%):	-10,3 %	

Tabela E. 12: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 2, Qref = 250 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 300 L/s

Configuração de Ensaio: 2 = veneziana + filtro

(DP1-DP3)	+/- inc	Ka	+/- inc	$\alpha$	+/- inc	$\rho$	+/- inc	Kv	+/- inc	v	+/- inc	$v \cos \alpha$	+/- inc	Q	+/- inc	Qm	+/- inc	
(Pa)				(graus)		(kg/m <sup>3</sup> )				(m/s)		(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)		
Sonda A	-9.8	0.3	-0.296	0.012	-20	1	1.08	0.03	0.3244	0.013	4.08	0.08	3.84	0.08	0.0857	0.002	0.0926	0.003
Sonda B	-10.1	0.3	0.257	0.010	-30	1	1.08	0.03	-0.4898	0.020	3.14	0.09	2.71	0.08	0.0604	0.002	0.0652	0.002
Sonda C	-19.9	0.6	0.505	0.020	-37	1	1.08	0.03	-1.0078	0.040	4.29	0.12	3.43	0.12	0.0765	0.003	0.0826	0.003
Sonda D	-0.4	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.86	0.02	0.86	0.02	0.0192	0.001	0.0208	0.001

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.2612	0.009
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.291	0.004
Diferença (%):		-10.1 %

**Legenda:**

Ka é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E. 13: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 2, Qref = 300 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 350 L/s

Configuração de Ensaio: 2 = veneziana + filtro

(DP1-DP3)	+/- Inc	K <sub>α</sub>	+/- Inc	α	+/- Inc	ρ	+/- Inc	K <sub>v</sub>	+/- Inc	v	+/- Inc	v <sup>2</sup> cos α	+/- Inc	Q	+/- Inc	Q <sub>m</sub>	+/- Inc	
(Pa)				(graus)		(kg/m <sup>3</sup> )				(m/s)		(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)		
Sonda A	-12.3	0.3	-0.300	0.012	-19	1	1.08	0.03	0.3282	0.013	4.55	0.09	4.29	0.09	0.0958	0.003	0.1034	0.003
Sonda B	-14.3	0.4	0.245	0.010	-30	1	1.08	0.03	-0.4668	0.019	3.73	0.11	3.23	0.10	0.0720	0.003	0.0778	0.003
Sonda C	-25.8	0.7	0.513	0.021	-37	1	1.08	0.03	-1.0277	0.041	4.88	0.14	3.88	0.13	0.0866	0.003	0.0936	0.004
Sonda D	-0.6	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.2673	0.000	0.65	0.01	0.65	0.01	0.0145	0.000	0.0156	0.000

**Legenda:**

K<sub>α</sub> é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

K<sub>v</sub> é dado por K<sub>v1</sub> ou K<sub>v2</sub> ou ainda K<sub>v2</sub> em função de α

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.2904	0.010
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.331	0.005
Diferença (%):	-12.4 %	

Tabela E. 14: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 2, Q<sub>ref</sub> = 350 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 400 L/s

Configuração de Ensaio: 2 = veneziana + filtro

	(DP1-DP3)		K $\alpha$	+/- Inc		$\alpha$	+/- Inc		$\rho$	+/- Inc		Kv	+/- Inc		v	+/- Inc		V $\cos \alpha$	+/- Inc		Q	+/- Inc		Qm	+/- Inc	
	(Pa)	+/- Inc		(graus)	(kg/m <sup>3</sup> )		(m/s)	(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)															
Sonda A	-15,2	0,4	-0,351	0,014	-19	1	1,08	0,03	0,3827	0,015	5,09	0,10	4,82	0,10	0,1076	0,003	0,1162	0,003								
Sonda B	-19,1	0,5	0,288	0,012	-31	1	1,08	0,03	-0,5492	0,022	4,30	0,12	3,68	0,11	0,0821	0,003	0,0887	0,003								
Sonda C	-33,0	0,9	0,470	0,019	-36	1	1,08	0,03	-0,9286	0,037	5,56	0,16	4,49	0,15	0,1003	0,004	0,1083	0,004								
Sonda D	-0,6	0,0	0,000	0,000	0	0	1,08	0,03	1,4160	0,000	1,29	0,03	1,29	0,03	0,0288	0,001	0,0311	0,001								

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0,3443	0,011
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0,375	0,006
Diferença (%):	-8,1 %	

Tabela E.15: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 2, Qref = 400 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 450 L/s

Configuração de Ensaio: 2 = veneziana + filtro

	(DP1-DP3) (Pa)	+/- Inc	K <sub>α</sub>	+/- Inc	α	+/- Inc	ρ	+/- Inc	K <sub>v</sub>	+/- Inc	v	+/- Inc	v cos α	+/- Inc	Q	+/- Inc	Q <sub>m</sub>	+/- Inc
Sonda A	-20.9	0.6	-0.300	0.012	-19	1	1.08	0.03	0.3286	0.013	5.95	0.12	5.61	0.11	0.1251	0.003	0.1351	0.004
Sonda B	-26.3	0.7	0.310	0.012	-32	1	1.08	0.03	-0.5930	0.024	5.05	0.14	4.29	0.13	0.0958	0.003	0.1034	0.004
Sonda C	-45.7	1.3	0.509	0.020	-37	1	1.08	0.03	-1.0179	0.041	6.51	0.18	5.18	0.18	0.1157	0.005	0.1249	0.005
Sonda D	-0.5	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.68	0.01	0.68	0.01	0.0151	0.000	0.0163	0.000

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m,grade</sub> = 0.3799	0.013
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m,placa</sub> = 0.436	0.007
Diferença (%)	-13.0 %	

**Legenda:**

K<sub>α</sub> é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

K<sub>v</sub> é dado por K<sub>v1</sub> ou K<sub>v2</sub> em função de α

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E. 16: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 2, Qref = 450 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 500 L/s

Configuração de Ensaio: 2 = Veneziana + filtro

(DP1-DP3)	+/- Inc	K $\alpha$	+/- inc	$\alpha$	+/- inc	$\rho$	+/- inc	Kv	+/- inc	v	+/- inc	v <sup>2</sup> cos $\alpha$	+/- inc	Q	+/- inc	Qm	+/- inc	
(Pa)				(graus)		(kg/m <sup>3</sup> )				(m/s)		(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)		
Sonda A	-26.0	0.7	-0.333	0.013	-19	1	1.08	0.03	0.3641	0.015	6.64	0.13	6.28	0.13	0.1401	0.004	0.1513	0.004
Sonda B	-34.2	1.0	0.362	0.014	-33	1	1.08	0.03	-0.6982	0.028	5.73	0.16	4.80	0.15	0.1071	0.004	0.1156	0.004
Sonda C	-56.7	1.6	0.515	0.021	-37	1	1.08	0.03	-1.0313	0.041	7.24	0.20	5.75	0.20	0.1284	0.005	0.1387	0.005
Sonda D	-0.9	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.2673	0.000	0.79	0.02	0.79	0.02	0.0176	0.000	0.0190	0.001

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv21 ou Kv2a ou ainda Kv2 em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.4247	0.014
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.481	0.007
Diferença (%):	-11.7 %	

Tabela E.17: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 2, Qref = 500 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 550 L/s

Configuração de Ensaio: 2 = veneziana + filtro

	(DP1-DP3) (Pa)	+/- Inc	Ka	+/- Inc	$\alpha$ (graus)	+/- Inc	p (kg/m <sup>3</sup> )	+/- Inc	Kv	+/- Inc	v (m/s)	+/- Inc	v*cos $\alpha$ (m/s)	+/- Inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/- Inc	Qm (kg/s)	+/- Inc
Sonda A	-34.0	1.0	-0.307	0.012	-19	1	1.08	0.03	0.3364	0.013	7.59	0.15	7.16	0.15	0.1598	0.004	0.1726	0.005
Sonda B	-44.9	1.3	0.415	0.017	-35	1	1.08	0.03	-0.8083	0.032	6.53	0.18	5.38	0.18	0.1200	0.005	0.1296	0.005
Sonda C	-75.4	2.1	0.547	0.022	-38	2	1.08	0.03	-1.1062	0.044	8.31	0.23	6.52	0.23	0.1455	0.006	0.1571	0.006
Sonda D	-0.4	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.2673	0.000	0.52	0.01	0.52	0.01	0.0117	0.000	0.0126	0.000

**Legenda:**

Ka é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv1, ou Kv2 ou Kv3 em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.4719	0.016
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.541	0.008
Diferença (%):	-12.7 %	

Tabela E. 18: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 2, Qref = 550 L/s



**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 600 L/s

Configuração de Ensaio: 2 = veneziana + filtro

	(DP1-DP3) (Pa)	+/-inc	K <sub>α</sub>	+/-inc	α (graus)	+/-inc	P (kg/m <sup>3</sup> )	+/-inc	K <sub>v</sub>	+/-inc	V (m/s)	+/-inc	V <sup>2</sup> cos α (m/s)	+/-inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/-inc	Q <sub>m</sub> (kg/s)	+/-inc
Sonda A	-39,6	1,1	-0,386	0,015	-18	1	1,08	0,03	0,4178	0,017	8,23	0,16	7,82	0,16	0,1746	0,005	0,1886	0,005
Sonda B	-53,6	1,5	0,454	0,018	-36	1	1,08	0,03	-0,8941	0,036	7,10	0,20	5,77	0,19	0,1288	0,005	0,1391	0,005
Sonda C	-89,4	2,5	0,599	0,024	-40	2	1,08	0,03	-1,2294	0,049	8,98	0,25	6,89	0,25	0,1537	0,006	0,1660	0,007
Sonda D	1,3	0,0	-0,427	0,017	35	1	1,08	0,03	-0,8357	0,033	1,09	0,03	0,90	0,03	0,0200	0,001	0,0216	0,001

**Legenda:**

K<sub>α</sub> é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

K<sub>v</sub> é dado por K<sub>v21</sub> ou K<sub>v23</sub> ou ainda K<sub>v2</sub> em função de α

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0,5154	0,018
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0,597	0,009
Diferença (%):	-13,6 %	

Tabela E. 19: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 2, Q<sub>ref</sub> = 600 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 640 L/s

Configuração de Ensaio: 2 = veneziana + filtro

	(DP1-DP3) (Pa)	+/- Inc	Ka	+/- Inc	$\alpha$ (graus)	+/- Inc	p (kg/m <sup>3</sup> )	+/- Inc	Kv	+/- Inc	v (m/s)	+/- Inc	v*cos $\alpha$ (m/s)	+/- Inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/- Inc	Qm (kg/s)	+/- Inc
Sonda A	-42.5	1.2	-0.435	0.017	-17	1	1.08	0.03	0.4641	0.019	8.59	0.17	8.19	0.17	0.1829	0.005	0.1975	0.005
Sonda B	-59.6	1.7	0.463	0.019	-36	1	1.08	0.03	-0.9136	0.037	7.48	0.21	6.06	0.20	0.1352	0.005	0.1460	0.005
Sonda C	-100.5	2.8	0.619	0.025	-41	2	1.08	0.03	-1.2788	0.051	9.49	0.27	7.21	0.27	0.1610	0.007	0.1739	0.007
Sonda D	4.5	0.1	-0.859	0.034	49	2	1.08	0.03	-1.9014	0.076	1.94	0.05	1.28	0.06	0.0285	0.001	0.0308	0.002

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.5483	0.020
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.634	0.010
Diferença (%):	-13.6 %	

**Legenda:**

Ka é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.20: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 2, Qref = 640 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 200 L/s

Configuração de Ensaio: 3 = veneziana + filtro + registro 800

	(DP1-DP3) +/- Inc (Pa)	K <sub>α</sub>	+/- Inc	α (graus)	+/- Inc	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	+/- Inc	K <sub>v</sub>	+/- Inc	V (m/s)	+/- Inc	V <sup>2</sup> cos α (m/s)	+/- Inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/- Inc	Q <sub>m</sub> (kg/s)	+/- Inc	
Sonda A	-2.6	0.1	-0.825	0.033	-13	1	1.08	0.03	0.7522	0.030	2.31	0.05	2.25	0.04	0.0503	0.001	0.0543	0.001
Sonda B	-5.1	0.1	0.047	0.002	-26	1	1.08	0.03	-0.1283	0.005	1.86	0.05	1.68	0.05	0.0374	0.001	0.0404	0.001
Sonda C	-6.0	0.2	0.093	0.004	-27	1	1.08	0.03	-0.2019	0.008	2.27	0.06	2.02	0.06	0.0452	0.002	0.0488	0.002
Sonda D	-0.2	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.2673	0.000	0.43	0.01	0.43	0.01	0.0096	0.000	0.0104	0.000

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0.1539	0.005
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0.204	0.003
Diferença (%):	-24.7 %	

**Legenda:**

K<sub>α</sub> é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

K<sub>v</sub> é dado por K<sub>v1</sub> ou K<sub>v2</sub> ou ainda K<sub>v3</sub> em função de α

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.21: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 3, Q<sub>ref</sub> = 200 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 250 L/s

Configuração de Ensaio: 3 = veneziana + filtro + registro 600

	(DP1-DP3) (Pa)	+/-inc	Ka	+/-inc	$\alpha$ (graus)	+/-inc	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	+/-inc	Kv	+/-inc	v (m/s)	+/-inc	v*cos $\alpha$ (m/s)	+/-inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/-inc	Qm (kg/s)	+/-inc
Sonda A	-4.6	0.1	-0.672	0.027	-15	1	1.08	0.03	0.6554	0.026	2.96	0.06	2.87	0.06	0.0640	0.002	0.0692	0.002
Sonda B	-6.7	0.2	-0.032	0.001	-24	1	1.08	0.03	1.2673	0.051	3.07	0.09	2.80	0.08	0.0625	0.002	0.0675	0.002
Sonda C	-10.1	0.3	0.221	0.009	-30	1	1.08	0.03	-0.4238	0.017	3.13	0.09	2.72	0.08	0.0608	0.002	0.0657	0.002
Sonda D	-0.5	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.2673	0.000	0.57	0.01	0.57	0.01	0.0128	0.000	0.0138	0.000

**Legenda:**

Ka é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv1 ou Kv2 ou ainda Kv3 em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0.2161	0.007
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0.246	0.004
Diferença (%):	-12.3 %	

Tabela E.22: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 3, Qref = 250 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 300 L/s

Configuração de Ensaio: 3 = veneziana + filtro + registro 60o

	(DP1-DP3) +/- Inc	K $\alpha$ +/- Inc	$\alpha$ +/- Inc	$\rho$ +/- Inc	Kv +/- Inc	v +/- Inc	v*cos $\alpha$ +/- Inc	Q +/- Inc	Qm +/- Inc									
	(Pa)		(graus)	(kg/m <sup>3</sup> )		(m/s)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)									
Sonda A	-7.1	0.2	-0.456	0.018	-17	1	1.08	0.03	0.4839	0.019	3.53	0.07	3.37	0.07	0.0753	0.002	0.0813	0.002
Sonda B	-9.6	0.3	0.158	0.006	-28	1	1.08	0.03	-0.3102	0.012	3.01	0.08	2.65	0.08	0.0592	0.002	0.0640	0.002
Sonda C	-13.3	0.4	0.224	0.009	-30	1	1.08	0.03	-0.4292	0.017	3.58	0.10	3.11	0.10	0.0694	0.002	0.0750	0.003
Sonda D	-0.8	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	1.10	0.02	1.10	0.02	0.0247	0.001	0.0266	0.001

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv1 ou Kv3 ou ainda Kv2 em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0.2469	0.008
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0.285	0.004
Diferença (%)	-13.4 %	

Tabela E.23: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 3, Qref = 300 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 350 L/s

Configuração de Ensaio: 3 = veneziana + filtro + registro 600

	(DP1-DP3) (Pa)	+/- Inc	Ka	+/- Inc	$\alpha$ (graus)	+/- Inc	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	+/- Inc	Kv	+/- Inc	v (m/s)	+/- Inc	v*cos $\alpha$ (m/s)	+/- Inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/- Inc	Qm (kg/s)	+/- Inc
Sonda A	-9.6	0.3	-0.357	0.014	-19	1	1.08	0.03	0.3888	0.016	4.05	0.08	3.84	0.08	0.0856	0.002	0.0925	0.003
Sonda B	-13.0	0.4	0.124	0.005	-27	1	1.08	0.03	-0.2520	0.010	3.43	0.10	3.05	0.09	0.0680	0.002	0.0735	0.003
Sonda C	-17.0	0.5	0.188	0.008	-29	1	1.08	0.03	-0.3626	0.015	4.04	0.11	3.54	0.11	0.0790	0.003	0.0853	0.003
Sonda D	-0.3	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.76	0.02	0.76	0.02	0.0169	0.000	0.0183	0.000

**Legenda:**

Ka é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv1 ou Kv3 ou ainda Kv2 em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0.2695	0.009
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0.329	0.005
Diferença (%):	-18.2 %	

Tabela E.24: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 3, Qref = 350 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 400 L/s

Configuração de Ensaio: 3 = veneziana + filtro + registro 600

	(DP1-DP3) (Pa)	+/- inc	Ka	+/- inc	$\alpha$ (graus)	+/- inc	p (kg/m <sup>3</sup> )	+/- inc	Kv	+/- inc	v (m/s)	+/- inc	v*cos $\alpha$ (m/s)	+/- inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/- inc	Qm (kg/s)	+/- inc
Sonda A	-13.1	0.4	-0.289	0.012	-20	1	1.08	0.03	0.3170	0.013	4.70	0.09	4.42	0.09	0.0987	0.003	0.1066	0.003
Sonda B	-15.6	0.4	0.090	0.004	-27	1	1.08	0.03	-0.1963	0.008	3.64	0.10	3.25	0.10	0.0726	0.003	0.0784	0.003
Sonda C	-22.3	0.6	0.183	0.007	-29	1	1.08	0.03	-0.3538	0.014	4.61	0.13	4.05	0.12	0.0903	0.003	0.0975	0.003
Sonda D	-0.5	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	1.29	0.03	1.29	0.03	0.0288	0.001	0.0311	0.001

**Legenda:**

Ka é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv1 ou Kv3 ou ainda Kv2 em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0.3137	0.010
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0.367	0.006
Diferença (%):	-14.6 %	

Tabela E.25: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 3, Qref = 400 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 450 L/s

Configuração de Ensaio: 3 = veneziana + filtro + registro 600

	(DP1-DP3) +/- Inc		K $\alpha$ +/- Inc		$\alpha$ +/- Inc		p +/- Inc		Kv +/- Inc		V +/- Inc		V <sup>2</sup> cos $\alpha$ +/- Inc		Q +/- Inc		Q <sub>m</sub> +/- Inc	
	(Pa)				(graus)		(kg/m <sup>3</sup> )				(m/s)		(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)	
Sonda A	-16,9	0,5	-0,406	0,016	-18	1	1,08	0,03	0,4365	0,017	5,40	0,11	5,14	0,10	0,1147	0,003	0,1239	0,003
Sonda B	-23,0	0,6	0,203	0,008	-29	1	1,08	0,03	-0,3896	0,016	4,70	0,13	4,11	0,12	0,0917	0,003	0,0990	0,004
Sonda C	-31,8	0,9	0,270	0,011	-31	1	1,08	0,03	-0,5155	0,021	5,55	0,16	4,77	0,15	0,1065	0,004	0,1150	0,004
Sonda D	0,0	0,0	0,000	0,000	0	0	1,08	0,03	1,4160	0,000	0,84	0,02	0,84	0,02	0,0187	0,001	0,0202	0,001

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0,3581	0,012
Vazao placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0,428	0,007
Diferença (%):	-16,3 %	

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.26: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 3, Qref = 450 L/s



**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 500 L/s

Configuração de Ensaio: 3 = veneziana + filtro + registro 60o

	(DP1-DP3) +/- inc (Pa)	K $\alpha$ +/- inc	$\alpha$ +/- inc (graus)	P +/- inc (kg/m <sup>3</sup> )	KV +/- inc	v +/- inc (m/s)	v*cos $\alpha$ +/- inc (m/s)	Q +/- inc (m <sup>3</sup> /s)	Qm +/- inc (kg/s)									
Sonda A	-24.0	0.7	-0.342	0.014	-19	1	1.08	0.03	0.3727	0.015	6.38	0.13	6.04	0.12	0.1348	0.004	0.1456	0.004
Sonda B	-31.4	0.9	0.266	0.011	-31	1	1.08	0.03	-0.5065	0.020	5.52	0.16	4.75	0.15	0.1060	0.004	0.1145	0.004
Sonda C	-44.3	1.3	0.326	0.013	-32	1	1.08	0.03	-0.6252	0.025	6.54	0.18	5.54	0.17	0.1236	0.005	0.1335	0.005
Sonda D	0.8	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.73	0.01	0.73	0.01	0.0163	0.000	0.0176	0.000

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.4112	0.014
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.491	0.007
Diferença (%):		-16.3 %

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

KV é dado por KV<sub>1</sub> ou KV<sub>2</sub> ou KV<sub>3</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.27: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 3, Qref = 500 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 590 L/s

Configuração de Ensaio: 3 = veneziana + filtro + registro 600

	(DP1-DP3) +/- Inc		K $\alpha$	+/- Inc		$\alpha$	+/- Inc		$\rho$	+/- Inc		Kv	+/- Inc		v	+/- Inc		v $\cos \alpha$	+/- Inc		Q	+/- Inc		Qm	+/- Inc	
	(Pa)				(graus)			(kg/m <sup>3</sup> )					(m/s)			(m/s)			(m <sup>3</sup> /s)			(kg/s)				
Sonda A	-30.3	0.9	-0.384	0.015	-18	1	1.08	0.03	0.4159	0.017	7.20	0.14	6.84	0.14	0.1526	0.004	0.1648	0.005								
Sonda B	-39.5	1.1	0.349	0.014	-33	1	1.08	0.03	-0.6714	0.027	6.17	0.17	5.18	0.16	0.1157	0.004	0.1249	0.005								
Sonda C	-52.5	1.5	0.315	0.013	-32	1	1.08	0.03	-0.6029	0.024	7.13	0.20	6.05	0.19	0.1351	0.005	0.1459	0.005								
Sonda D	0.4	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	1.09	0.02	1.09	0.02	0.0243	0.001	0.0263	0.001								

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.4619	0.015
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.544	0.008
Diferença (%):	-15.1 %	

Tabela E.28: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 3, Q<sub>ref</sub> = 550 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 600 L/s

Configuração de Ensaio: 3 = veneziana + filtro + registro 800

	(DP1-DP3) (Pa)	+/- inc	Ka	+/- inc	$\alpha$ (graus)	+/- inc	p (kg/m <sup>3</sup> )	+/- inc	Kv	+/- inc	v (m/s)	+/- inc	v*cos $\alpha$ (m/s)	+/- inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/- inc	Qm (kg/s)	+/- inc
Sonda A	-34,5	1,0	-0,450	0,018	-17	1	1,08	0,03	0,4779	0,019	7,76	0,15	7,41	0,15	0,1654	0,005	0,1786	0,005
Sonda B	-46,8	1,3	0,377	0,015	-34	1	1,08	0,03	-0,7288	0,029	6,70	0,19	5,58	0,18	0,1246	0,005	0,1346	0,005
Sonda C	-63,0	1,8	0,340	0,014	-33	1	1,08	0,03	-0,6534	0,026	7,80	0,22	6,57	0,21	0,1466	0,005	0,1584	0,006
Sonda D	0,4	0,0	0,000	0,000	0	0	1,08	0,03	1,4160	0,000	1,11	0,02	1,11	0,02	0,0247	0,001	0,0267	0,001

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0,4982	0,016
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0,588	0,009
Diferença (%):	-15,2 %	

**Legenda:**  
 Ka é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)  
 Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$   
 Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio  
 +/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.29: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 3, Qref = 600 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 640 L/s

Configuração de Ensaio: 3 = veneziana + filtro + registro 600

	(DP1-DP3)		K <sub>α</sub>	+/- Inc	α	+/- Inc	ρ	+/- Inc	K <sub>v</sub>	+/- Inc	v	+/- Inc	v cos α	+/- Inc	Q	+/- Inc	Q <sub>m</sub>	+/- Inc
	(Pa)	(Pa)																
Sonda A	-38,6	1,1	-0,443	0,018	-17	1	1,08	0,03	0,4716	0,019	8,20	0,16	7,82	0,16	0,1746	0,005	0,1886	0,005
Sonda B	-54,4	1,5	0,388	0,016	-34	1	1,08	0,03	-0,7526	0,030	7,21	0,20	5,99	0,19	0,1337	0,005	0,1444	0,005
Sonda C	-72,7	2,1	0,370	0,015	-33	1	1,08	0,03	-0,7147	0,029	8,35	0,24	6,98	0,22	0,1557	0,006	0,1682	0,006
Sonda D	4,6	0,1	-0,691	0,028	43	2	1,08	0,03	-1,4588	0,058	2,01	0,06	1,47	0,06	0,0329	0,001	0,0355	0,002

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0,5367	0,018
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0,633	0,010
Diferença (%):	-15,2 %	

**Legenda:**

K<sub>α</sub> é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

K<sub>v</sub> é dado por K<sub>v1</sub> ou K<sub>v2</sub> ou ainda K<sub>v3</sub> em função de α

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.30: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 3, Q<sub>ref</sub> = 640 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 200 L/s

Configuração de Ensaio: 4 = veneziana + filtro + registro 30o

	(DP1-DP3) (Pa)	+/- inc	Ka	+/- inc	$\alpha$ (graus)	+/- inc	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	+/- inc	Kv	+/- inc	v (m/s)	+/- inc	v <sup>2</sup> cos $\alpha$ (m/s)	+/- inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/- inc	Qm (kg/s)	+/- inc
Sonda A	-3.8	0.1	-0.417	0.017	-18	1	1.08	0.03	0.4470	0.018	2.57	0.05	2.45	0.05	0.0547	0.002	0.0591	0.002
Sonda B	-2.6	0.1	-0.461	0.018	-17	1	1.08	0.03	0.4880	0.020	2.13	0.06	2.04	0.06	0.0455	0.002	0.0492	0.002
Sonda C	-4.9	0.1	0.026	0.001	-25	1	1.08	0.03	-0.0953	0.004	1.57	0.04	1.42	0.04	0.0317	0.001	0.0342	0.001
Sonda D	1.3	0.0	-0.400	0.016	34	1	1.08	0.03	-0.7769	0.031	1.11	0.03	0.92	0.03	0.0206	0.001	0.0222	0.001

**Legenda:**

Ka é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv1 ou Kv2 ou ainda Kv3 em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0.1646	0.005
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0.204	0.003
Diferença (%):	-19.2 %	

Tabela E.31: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 4, Qref = 200 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 250 L/s

Configuração de Ensaio: 4 = veneziana + filtro + registro 300

	(DP1-DP3) (Pa)	+/- inc	K $\alpha$	+/- inc	$\alpha$ (graus)	+/- inc	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	+/- inc	Kv	+/- inc	v (m/s)	+/- inc	v <sup>2</sup> cos $\alpha$ (m/s)	+/- inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/- inc	Qm (kg/s)	+/- inc
Sonda A	-5,8	0,2	-0,429	0,017	-18	1	1,08	0,03	0,4589	0,018	3,17	0,06	3,02	0,06	0,0674	0,002	0,0728	0,002
Sonda B	-3,2	0,1	-0,426	0,017	-18	1	1,08	0,03	0,4556	0,018	2,36	0,07	2,25	0,06	0,0503	0,002	0,0543	0,002
Sonda C	-7,3	0,2	-0,003	0,000	-25	1	1,08	0,03	1,2673	0,051	3,13	0,09	2,84	0,08	0,0634	0,002	0,0685	0,002
Sonda D	0,6	0,0	0,000	0,000	0	0	1,08	0,03	1,4160	0,000	0,95	0,02	0,95	0,02	0,0212	0,001	0,0229	0,001

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m,grade</sub> = 0,2184	0,007
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m,placa</sub> = 0,241	0,004
Diferença (%):	-9,5 %	

Tabela E.32: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 4, Qref = 250 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 300 L/s

Configuração de Ensaio: 4 = veneziana + filtro + registro 300

	(DP1-DP3)	+/- Inc	K <sub>α</sub>	+/- Inc	α	+/- Inc	ρ	+/- Inc	K <sub>v</sub>	+/- Inc	v	+/- Inc	v*cos α	+/- Inc	Q	+/- Inc	Q <sub>m</sub>	+/- Inc
	(Pa)				(graus)		(kg/m <sup>3</sup> )				(m/s)		(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)	
Sonda A	-7.9	0.2	-0.342	0.014	-19	1	1.08	0.03	0.3730	0.015	3.66	0.07	3.47	0.07	0.0774	0.002	0.0835	0.002
Sonda B	-6.4	0.2	-0.168	0.007	-22	1	1.08	0.03	0.1750	0.007	3.38	0.10	3.14	0.09	0.0700	0.002	0.0756	0.003
Sonda C	-8.8	0.2	-0.049	0.002	-24	1	1.08	0.03	1.2673	0.051	3.50	0.10	3.21	0.09	0.0715	0.002	0.0773	0.003
Sonda D	1.1	0.0	-0.074	0.003	26	1	1.08	0.03	-0.1698	0.007	0.93	0.03	0.84	0.02	0.0187	0.001	0.0202	0.001

**Legenda:**

K<sub>α</sub> é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

K<sub>v</sub> é dado por K<sub>v1</sub> ou K<sub>v2</sub> ou ainda K<sub>v</sub> em função de α

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m,grade</sub> = 0.2566	0.008
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m,placa</sub> = 0.288	0.004
Diferença (%):	-10.8 %	

Tabela E.33: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 4, Q<sub>ref</sub> = 300 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 350 L/s

Configuração de Ensaio: 4 = veneziana + filtro + registro 30o

	(DP1-DP3) +/- Inc		K <sub>α</sub>	α		p	K <sub>v</sub>		v	v <sup>2</sup> cos α		Q	Q <sub>m</sub>					
	(Pa)			(graus)	+/- Inc		(kg/m <sup>3</sup> )	+/- Inc		(m/s)	(m/s)		+/- Inc	(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)	+/- Inc		
Sonda A	-10.0	0.3	-0.386	0.015	-18	1	1.08	0.03	0.4177	0.017	4.14	0.08	3.93	0.08	0.0877	0.002	0.0947	0.003
Sonda B	-9.7	0.3	-0.137	0.005	-22	1	1.08	0.03	0.1351	0.005	4.27	0.12	3.96	0.11	0.0884	0.003	0.0954	0.003
Sonda C	-11.4	0.3	-0.028	0.001	-24	1	1.08	0.03	1.2673	0.051	4.10	0.12	3.74	0.11	0.0835	0.003	0.0902	0.003
Sonda D	0.4	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.64	0.01	0.64	0.01	0.0144	0.000	0.0155	0.000

**Legenda:**

K<sub>α</sub> é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

K<sub>v</sub> é dado por K<sub>v21</sub> ou K<sub>v23</sub> ou ainda K<sub>v2</sub> em função de α

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m,grade</sub> = 0.2959	0.009
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m,placa</sub> = 0.332	0.005
Diferença (%):	-10.9 %	

Tabela E.34: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 4, Q<sub>ref</sub> = 350 L/s



**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 400 L/s

Configuração de Ensaio: 4 = veneziana + filtro + registro 300

	(DP1-DP3) +/- Inc		Ka	+/- Inc		$\alpha$	+/- Inc		p	+/- Inc		Kv	+/- Inc		v	+/- Inc		v*cos $\alpha$	+/- Inc		Q	+/- Inc		Qm	+/- Inc			
	(Pa)			(graus)	(kg/m <sup>3</sup> )		(m/s)	(m/s)		(m/s)	(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)														
Sonda A	-13.4	0.4	-0.381	0.015	-18	1	1.08	0.03	0.4128	0.017	4.79	0.09	4.55	0.09	0.1015	0.003	0.1096	0.003										
Sonda B	-13.4	0.4	-0.075	0.003	-23	1	1.08	0.03	1.2673	0.051	4.01	0.11	3.68	0.11	0.0822	0.003	0.0888	0.003										
Sonda C	-17.1	0.5	-0.040	0.002	-24	1	1.08	0.03	1.2673	0.051	4.75	0.13	4.34	0.13	0.0968	0.003	0.1045	0.004										
Sonda D	0.9	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.76	0.02	0.76	0.02	0.0171	0.000	0.0184	0.001										

**Legenda:**

Ka é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m,grade</sub> = 0.3214	0.010
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m,placa</sub> = 0.373	0.006
Diferença (%):	-13.8 %	

Tabela E.35: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 4, Qref = 400 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 450 L/s

Configuração de Ensaio: 4 = veneziana + filtro + registro 300

Sonda	DP1-DP3		K <sub>α</sub>	α	p	K <sub>v</sub>	v	v*cos α	Q	Q <sub>m</sub>								
	Pa	Pa									(graus)	(kg/m <sup>3</sup> )	(m/s)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)		
Sonda A	-16,4	0,5	-0,387	0,015	-18	1	1,08	0,03	0,4183	0,017	5,30	0,11	5,04	0,10	0,1125	0,003	0,1215	0,003
Sonda B	-16,4	0,5	-0,039	0,002	-24	1	1,08	0,03	1,2673	0,051	4,61	0,13	4,21	0,12	0,0939	0,003	0,1014	0,004
Sonda C	-22,6	0,6	-0,033	0,001	-24	1	1,08	0,03	1,2673	0,051	5,39	0,15	4,92	0,14	0,1099	0,004	0,1187	0,004
Sonda D	1,3	0,0	-0,512	0,020	37	1	1,08	0,03	-1,0253	0,041	1,11	0,03	0,89	0,03	0,0198	0,001	0,0213	0,001

**Legenda:**

K<sub>α</sub> é dado por K<sub>21</sub> ou K<sub>23</sub> em função de (DP1-DP3)

K<sub>v</sub> é dado por K<sub>v1</sub> ou K<sub>v2</sub> ou ainda K<sub>v2</sub> em função de α

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m,grade</sub> = 0,3630	0,012
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m,placa</sub> = 0,426	0,007
Diferença (%):	-14,9 %	

Tabela E.36: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 4, Q<sub>ref</sub> = 450 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 500 L/s

Configuração de Ensaio: 4 = veneziana + filtro + registro 300

	DP1-DP3		K $\alpha$		$\alpha$		$\rho$		Kv		v		v $\cos \alpha$		Q		Qm	
	+/-	inc	+/-	inc	(graus)	+/-	inc	(kg/m <sup>3</sup> )	+/-	inc	(m/s)	+/-	inc	(m/s)	+/-	inc	(m <sup>3</sup> /s)	+/-
Sonda A	-22.4	0.6	-0.409	0.016	-18	1	1.08	0.03	0.4396	0.018	6.21	0.12	5.91	0.12	0.1320	0.004	0.1425	0.004
Sonda B	-27.1	0.8	-0.015	0.001	-24	1	1.08	0.03	1.2673	0.051	5.50	0.15	5.01	0.15	0.1118	0.004	0.1208	0.004
Sonda C	-30.4	0.9	-0.008	0.000	-25	1	1.08	0.03	1.2673	0.051	6.20	0.17	5.64	0.16	0.1258	0.004	0.1359	0.005
Sonda D	0.9	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.78	0.02	0.78	0.02	0.0173	0.000	0.0187	0.001

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m,grade</sub> = 0.4179	0.013
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m,placa</sub> = 0.493	0.008
Diferença (%):	-15.3 %	

Tabela E.37: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 4, Qref = 500 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 550 L/s

Configuração de Ensaio: 4 = veneziana + filtro + registro 300

	(DP1-DP3) (Pa)	+/- Inc	K $\alpha$	+/- Inc	$\alpha$ (graus)	+/- Inc	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	+/- Inc	Kv	+/- Inc	v (m/s)	+/- Inc	v <sup>2</sup> cos $\alpha$ (m/s)	+/- Inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/- Inc	Qm (kg/s)	+/- Inc
Sonda A	-27.6	0.8	-0.423	0.017	-18	1	1.08	0.03	0.4528	0.018	6.91	0.14	6.59	0.13	0.1470	0.004	0.1588	0.004
Sonda B	-30.3	0.9	0.163	0.007	-28	1	1.08	0.03	-0.3185	0.013	5.35	0.15	4.72	0.14	0.1053	0.004	0.1137	0.004
Sonda C	-36.6	1.0	-0.046	0.002	-24	1	1.08	0.03	1.2673	0.051	6.84	0.19	6.25	0.18	0.1395	0.005	0.1507	0.005
Sonda D	1.9	0.1	0.218	0.009	21	1	1.08	0.03	0.2354	0.009	1.80	0.05	1.69	0.05	0.0376	0.001	0.0406	0.001

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv1 ou Kv2 ou ainda Kv, em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.4639	0.015
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.538	0.008
Diferença (%):	-13.8 %	

Tabela E.38: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 4, Qref = 550 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 600 L/s

Configuração de Ensaio: 4 = veneziana + filtro + registro 30o

	(DP1-DP3) +/- Inc		Ka	+/- Inc		$\alpha$	+/- Inc		p	+/- Inc		Kv	+/- Inc		v	+/- Inc		v*cos $\alpha$	+/- Inc		Q	+/- Inc		Qm	+/- Inc	
	(Pa)			(graus)	(kg/m <sup>3</sup> )		(kg/m <sup>3</sup> )	(m/s)		(m/s)	(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)												
Sonda A	-32,6	0,9	-0,382	0,015	-18	1	1,08	0,03	0,4136	0,017	7,47	0,15	7,09	0,14	0,1583	0,004	0,1710	0,005								
Sonda B	-36,1	1,0	0,182	0,007	-29	1	1,08	0,03	-0,3530	0,014	5,88	0,17	5,15	0,16	0,1150	0,004	0,1242	0,004								
Sonda C	-48,1	1,4	-0,009	0,000	-25	1	1,08	0,03	1,2673	0,051	7,54	0,21	6,86	0,20	0,1531	0,005	0,1653	0,006								
Sonda D	1,3	0,0	-0,080	0,003	26	1	1,08	0,03	-0,1799	0,007	1,03	0,03	0,92	0,03	0,0206	0,001	0,0223	0,001								

**Legenda:**

Ka é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv1 ou Kv2 ou ainda Kv2 em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0,4828	0,016
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0,588	0,009
Diferença (%):	-18,0 %	

Tabela E.39: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 4, Qref = 600 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 640 L/s

Configuração de Ensaio: 4 = veneziana + filtro + registro 30o

	(DP1-DP3)		K <sub>α</sub>	α		ρ	K <sub>v</sub>		v	v <sup>α</sup> cos α		Q	Q <sub>m</sub>					
	+/- Inc	(Pa)		+/- Inc	(graus)		+/- Inc	(kg/m <sup>3</sup> )		+/- Inc	(m/s)		+/- Inc	(m <sup>3</sup> /s)	+/- Inc	(kg/s)		
Sonda A	-37.0	1.0	-0.420	0.017	-18	1	1.08	0.03	0.4506	0.018	8.00	0.16	7.62	0.15	0.1701	0.005	0.1837	0.005
Sonda B	-38.3	1.1	0.226	0.009	-30	1	1.08	0.03	-0.4324	0.017	6.09	0.17	5.29	0.16	0.1181	0.004	0.1275	0.005
Sonda C	-51.5	1.5	0.044	0.002	-26	1	1.08	0.03	-0.1232	0.005	5.85	0.16	5.27	0.16	0.1176	0.004	0.1270	0.004
Sonda D	4.2	0.1	-0.622	0.025	41	2	1.08	0.03	-1.2858	0.051	1.95	0.05	1.48	0.06	0.0330	0.001	0.0356	0.001

**Legenda:**

K<sub>α</sub> é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

K<sub>v</sub> é dado por K<sub>v1</sub> ou K<sub>v2</sub> ou ainda K<sub>v2</sub> em função de α

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m,grade</sub> = 0.4739	0.016
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m,placa</sub> = 0.630	0.010
Diferença (%):	-24.8 %	

Tabela E.40: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 4, Q<sub>ref</sub> = 640 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 200 L/s

Configuração de Ensaio: 5 = veneziana + filtro + registro 45o

	(DP1-DP3) +/- inc		K <sub>α</sub>	α (graus)		p (kg/m <sup>3</sup> )	K <sub>v</sub> +/- inc		v (m/s)	v cos α +/- inc		Q +/- inc (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>m</sub> +/- inc (kg/s)					
	(Pa)	(Pa)																
Sonda A	-3.1	0.1	-0.515	0.021	-16	1	1.08	0.03	0.5356	0.021	2.36	0.05	2.26	0.05	0.0505	0.001	0.0546	0.002
Sonda B	-3.3	0.1	-0.189	0.008	-21	1	1.08	0.03	0.2009	0.008	2.40	0.07	2.24	0.06	0.0500	0.002	0.0540	0.002
Sonda C	-6.1	0.2	0.227	0.009	-30	1	1.08	0.03	-0.4338	0.017	2.43	0.07	2.11	0.06	0.0471	0.002	0.0509	0.002
Sonda D	0.1	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.46	0.01	0.46	0.01	0.0104	0.000	0.0112	0.000

**Legenda:**

K<sub>α</sub> é dado por K<sub>21</sub> ou K<sub>23</sub> em função de (DP1-DP3)

K<sub>v</sub> é dado por K<sub>v21</sub> ou K<sub>v23</sub> ou ainda K<sub>v2</sub> em função de α

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0.1706	0.005
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0.198	0.003
Diferença (%):	-13.9 %	

Tabela E.41: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 5, Q<sub>ref</sub> = 200 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 250 L/s

Configuração de Ensaio: 5 = veneziana + filtro + registro 45o

	(DP1-DP3) +/- Inc (Pa)	K $\alpha$	+/- Inc	$\alpha$ (graus)	+/- Inc	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	+/- Inc	Kv	+/- Inc	v (m/s)	+/- Inc	V <sup>c</sup> cos $\alpha$ (m/s)	+/- Inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	Qm (kg/s)	+/- Inc		
																	Qm (kg/s)	
Sonda A	-5.5	0.2	-0.352	0.014	-19	1	1.08	0.03	0.3830	0.015	3.05	0.06	2.89	0.06	0.0644	0.002	0.0696	0.002
Sonda B	-5.7	0.2	0.012	0.000	-25	1	1.08	0.03	1.2673	0.051	2.55	0.07	2.32	0.07	0.0517	0.002	0.0558	0.002
Sonda C	-8.1	0.2	0.018	0.001	-25	1	1.08	0.03	1.2673	0.051	3.05	0.09	2.76	0.08	0.0617	0.002	0.0666	0.002
Sonda D	-0.2	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.55	0.01	0.55	0.01	0.0122	0.000	0.0132	0.000

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.2052	0.007
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.240	0.004
Diferença (%):	-14.5 %	

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv1 ou Kv2 ou ainda Kv3 em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.42. Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 5, Qref = 250 L/s



**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 300 L/s

Configuração de Ensaio: 5 = veneziana + filtro + registro 45o

	(DP1-DP3)		K $\alpha$	K $\alpha$ +/- inc		$\alpha$	$\alpha$ +/- inc		$\rho$	$\rho$ +/- inc		Kv	Kv +/- inc		V	V +/- inc		V $\cos \alpha$	V $\cos \alpha$ +/- inc		Q	Q +/- inc		Qm	Qm +/- inc	
	(Pa)	+/- inc					(graus)			(kg/m <sup>3</sup> )						(m/s)			(m/s)			(m <sup>3</sup> /s)			(kg/s)	
Sonda A	-6.8	0.2	-0.453	0.018	-17	1	1.08	0.03	0.4809	0.019	3.45	0.07	3.29	0.07	0.0735	0.002	0.0794	0.002								
Sonda B	-8.2	0.2	-0.047	0.002	-24	1	1.08	0.03	1.2673	0.051	3.38	0.09	3.07	0.09	0.0686	0.002	0.0740	0.003								
Sonda C	-13.4	0.4	0.158	0.006	-28	1	1.08	0.03	-0.3113	0.012	3.55	0.10	3.13	0.09	0.0699	0.002	0.0755	0.003								
Sonda D	-0.1	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.37	0.01	0.37	0.01	0.0083	0.000	0.0090	0.000								

Vazao grade (kg/s):	Q $_{m,grade}$ = 0.2380	0.008
Vazão placa (kg/s):	Q $_{m,placa}$ = 0.289	0.007
Diferença (%):	-17.5 %	

Legenda:  
 K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)  
 Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$   
 Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio  
 +/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.43: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 4, Qref = 300 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 350 L/s

Configuração de Ensaio: 5 = veneziana + filtro + registro 45o

	(DP1-DP3) +/- inc	K $\alpha$	+/- inc	$\alpha$	+/- inc	$\rho$	+/- inc	Kv	+/- inc	v	+/- inc	v $\cos \alpha$	+/- inc	Q	+/- inc	Qm	+/- inc	
	(Pa)			(graus)		(kg/m <sup>3</sup> )				(m/s)		(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)		
Sonda A	-8.6	0.2	-0.533	0.021	-16	1	1.08	0.03	0.5505	0.022	3.93	0.08	3.78	0.08	0.0843	0.002	0.0911	0.003
Sonda B	-11.8	0.3	0.104	0.004	-27	1	1.08	0.03	-0.2198	0.009	3.22	0.09	2.87	0.09	0.0641	0.002	0.0693	0.002
Sonda C	-15.8	0.4	0.110	0.004	-27	1	1.08	0.03	-0.2298	0.009	3.75	0.11	3.34	0.10	0.0745	0.003	0.0804	0.003
Sonda D	-0.6	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.80	0.02	0.80	0.02	0.0179	0.000	0.0193	0.001

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0.2601	0.008
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0.332	0.004
Diferença (%)	-21.8 %	

**Legenda:**  
 K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)  
 Kv é dado por Kv21 ou Kv23 em função de  $\alpha$   
 Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio  
 +/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.44: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 5, Qref = 350 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 400 L/s

Configuração de Ensaio: 5 = veneziana + filtro + registro 45o

	(DP1-DP3) (Pa)	+/- Inc	K <sub>α</sub>	+/- Inc	α (graus)	+/- Inc	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	+/- Inc	K <sub>v</sub>	+/- Inc	V (m/s)	+/- Inc	V*cos α (m/s)	+/- Inc	Q (m <sup>3</sup> /s)	+/- Inc	Q <sub>m</sub> (kg/s)	+/- Inc
Sonda A	-11.8	0.3	-0.429	0.017	-18	1	1.08	0.03	0.4588	0.018	4.53	0.09	4.32	0.09	0.0964	0.003	0.1041	0.003
Sonda B	-15.9	0.4	0.088	0.004	-27	1	1.08	0.03	-0.1923	0.008	3.66	0.10	3.27	0.10	0.0730	0.003	0.0789	0.003
Sonda C	-20.7	0.6	0.112	0.004	-27	1	1.08	0.03	-0.2319	0.009	4.29	0.12	3.82	0.11	0.0853	0.003	0.0921	0.003
Sonda D	-1.4	0.0	0.163	0.007	-28	1	1.08	0.03	-0.3189	0.013	1.16	0.03	1.03	0.03	0.0229	0.001	0.0247	0.001

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.2997	0.010
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.373	0.005
Diferença (%):	-19.6 %	

Legenda:  
 K<sub>α</sub> é dado por K<sub>21</sub> ou K<sub>23</sub> em função de (DP1-DP3)  
 K<sub>v</sub> é dado por K<sub>v21</sub> ou K<sub>v23</sub> ou ainda K<sub>v2</sub> em função de α  
 Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio  
 +/- Inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.45: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 5, Qref = 400 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 450 L/s

Configuração de Ensaio: 5 = veneziana + filtro + registro 45o

	(DP1-DP3) +/- inc		K $\alpha$	+/- inc		$\alpha$	+/- inc		$\rho$	+/- inc		Kv	+/- inc		v	+/- inc		v $\cos \alpha$	+/- inc		Q	+/- inc		Qm	+/- inc		
	(Pa)						(graus)				(kg/m3)						(m/s)					(m/s)			(m <sup>3</sup> /s)		
Sonda A	-16.2	0.5	-0.373	0.015	-18	1	1.08	0.03	0.4048	0.016	5.26	0.10	4.99	0.10	0.1113	0.003	0.1202	0.003									
Sonda B	-19.6	0.6	0.083	0.003	-26	1	1.08	0.03	-0.1842	0.007	4.04	0.11	3.61	0.11	0.0806	0.003	0.0871	0.003									
Sonda C	-28.5	0.8	0.151	0.006	-28	1	1.08	0.03	-0.2988	0.012	5.17	0.15	4.57	0.14	0.1019	0.004	0.1100	0.004									
Sonda D	-0.1	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.27	0.01	0.27	0.01	0.0061	0.000	0.0066	0.000									

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>z1</sub> ou Kv<sub>z3</sub> ou ainda Kv<sub>z</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.3239	0.010
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.423	0.008
Diferença (%):	-23.4 %	

Tabela E.46: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 5, Qref = 450 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 500 L/s

Configuração de Ensaio: 5 = veneziana + filtro + registro 45o

	(DP1-DP3)	+/- inc	K $\alpha$	+/- inc	$\alpha$	+/- inc	$\rho$	+/- inc	Kv	+/- inc	v	+/- inc	v*cos $\alpha$	+/- inc	Q	+/- inc	Qm	+/- inc
	(Pa)		(graus)	(kg/m3)		(m/s)		(m/s)		(m/s)		(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)		
Sonda A	-22.0	0.6	-0.412	0.016	-18	1	1.08	0.03	0.4431	0.018	6.16	0.12	5.87	0.12	0.1310	0.004	0.1414	0.004
Sonda B	-28.4	0.8	0.180	0.007	-29	1	1.08	0.03	-0.3491	0.014	5.21	0.15	4.57	0.14	0.1020	0.004	0.1102	0.004
Sonda C	-38.0	1.1	0.162	0.006	-28	1	1.08	0.03	-0.3174	0.013	5.99	0.17	5.28	0.16	0.1177	0.004	0.1272	0.005
Sonda D	-0.4	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.2673	0.000	0.56	0.01	0.56	0.01	0.0126	0.000	0.0136	0.000

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0.3924	0.013
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0.373	0.006
Diferença (%):	5.3 %	

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.47: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 5, Qref = 550 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 550 L/s

Configuração de Ensaio: 5 = veneziana + filtro + registro 45o

	(DP1-DP3)	+/- inc	K $\alpha$	+/- inc	$\alpha$	(graus)	+/- inc	p	(kg/m <sup>3</sup> )	Kv	+/- inc	v	(m/s)	+/- inc	v <sup>2</sup> cos $\alpha$	(m/s)	+/- inc	Q	(m <sup>3</sup> /s)	+/- inc	Qm	(kg/s)	+/- inc
Sonda A	-27.5	0.8	-0.384	0.015	-18	1	1.08	0.03	0.4154	0.017	6.86	0.14	6.52	0.13	0.1454	0.004	0.1571	0.004					
Sonda B	-35.8	1.0	0.282	0.011	-31	1	1.08	0.03	-0.5372	0.021	5.90	0.17	5.05	0.16	0.1128	0.004	0.1218	0.004					
Sonda C	-46.3	1.3	0.238	0.010	-30	1	1.08	0.03	-0.4547	0.018	6.70	0.19	5.80	0.18	0.1295	0.005	0.1399	0.005					
Sonda D	0.4	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.77	0.02	0.77	0.02	0.0171	0.000	0.0185	0.001					

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m,grade</sub> = 0.4373	0.014
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m,placa</sub> = 0.538	0.009
Diferença (%):	-18.7 %	

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.48: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 5, Qref = 550 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 600 L/s

Configuração de Ensaio: 5 = veneziana + filtro + registro 45o

	(DP1-DP3) +/- inc (Pa)	K $\alpha$ +/- inc	$\alpha$ +/- inc (graus)	p +/- inc (kg/m <sup>3</sup> )	Kv +/- inc	v +/- inc (m/s)	v*cos $\alpha$ +/- inc (m/s)	Q +/- inc (m <sup>3</sup> /s)	Qm +/- inc (kg/s)	
Sonda A	-33.5	0.9	-18	1.08	0.4326	7.59	7.22	0.15	0.1612	0.1741
Sonda B	-41.5	1.2	-32	1.08	-0.6162	6.34	5.37	0.17	0.1198	0.1294
Sonda C	-58.6	1.7	-29	1.08	-0.3761	7.50	6.56	0.20	0.1465	0.1582
Sonda D	-1.0	0.0	0	1.08	1.4160	0.96	0.96	0.02	0.0214	0.0231

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.4848
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.593
Diferença (%):	..... -18.3 %

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.49: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 5, Qref = 600 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 640 L/s

Configuração de Ensaio: 5 = veneziana + filtro + registro 45o

	(DP1-DP3) +/- inc (Pa)	K $\alpha$ +/- inc	$\alpha$ (graus)	$\rho$ +/- inc (kg/m <sup>3</sup> )	Kv +/- inc	v +/- inc (m/s)	v <sup>2</sup> cos $\alpha$ +/- inc (m/s)	Q +/- inc (m <sup>3</sup> /s)	Qm +/- inc (kg/s)									
Sonda A	-37.1	1.0	-17	1.08	0.018	1	0.03	0.4675	0.019	8.03	0.16	7.66	0.15	0.1709	0.005	0.1846	0.005	
Sonda B	-47.0	1.3	-33	1.08	0.014	1	0.03	-0.6657	0.027	6.73	0.19	5.66	0.18	0.1263	0.005	0.1364	0.005	
Sonda C	-69.0	2.0	-30	1.08	0.010	1	0.03	-0.4740	0.019	8.18	0.23	7.07	0.22	0.1578	0.006	0.1704	0.006	
Sonda D	4.8	0.1	-883	0.035	50	2	1.08	0.03	-1.9647	0.079	2.00	0.06	1.30	0.06	0.0290	0.002	0.0313	0.002

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.5228
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.629
Diferença (%):	..... -16.8 %

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.50: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 5, Qref = 640 L/s



**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 200 L/s

Configuração de Ensaio: 6 = veneziana + filtro + registro 90o

	(DP1-DP3)	+/- inc	K $\alpha$	+/- inc	$\alpha$	+/- inc	p	+/- inc	Kv	+/- inc	v	+/- inc	v*cos $\alpha$	+/- inc	Q	+/- inc	Qm	+/- inc
	(Pa)		(graus)		(kg/m3)		(m/s)		(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)					
Sonda A	-3.2	0.1	-0.923	0.037	-12	0	1.08	0.03	0.8047	0.032	2.60	0.05	2.54	0.05	0.0567	0.002	0.0613	0.002
Sonda B	-4.9	0.1	0.184	0.007	-29	1	1.08	0.03	-0.3563	0.014	2.16	0.06	1.90	0.06	0.0423	0.002	0.0457	0.002
Sonda C	-8.1	0.2	0.420	0.017	-35	1	1.08	0.03	-0.8206	0.033	2.78	0.08	2.28	0.07	0.0509	0.002	0.0550	0.002
Sonda D	0.0	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.46	0.01	0.46	0.01	0.0102	0.000	0.0110	0.000

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.1730	0.006
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.206	0.003
Diferença (%):	.....	-15.8 %

Tabela E.51: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 6, Qref = 200 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 250 L/s

Configuração de Ensaio: 6 = veneziana + filtro + registro 90o

	(DP1-DP3)	+/- inc	K $\alpha$	+/- inc	$\alpha$	+/- inc	p	+/- inc	Kv	+/- inc	v	+/- inc	v <sup>2</sup> cos $\alpha$	+/- inc	Q	+/- inc	Qm	+/- inc
	(Pa)		(graus)		(kg/m <sup>3</sup> )		(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)							
Sonda A	-4.6	0.1	-0.564	0.023	-16	1	1.08	0.03	0.5749	0.023	2.89	0.06	2.78	0.06	0.0620	0.002	0.0669	0.002
Sonda B	-7.6	0.2	0.225	0.009	-30	1	1.08	0.03	-0.4299	0.017	2.71	0.08	2.35	0.07	0.0525	0.002	0.0567	0.002
Sonda C	-11.4	0.3	0.386	0.015	-34	1	1.08	0.03	-0.7468	0.030	3.30	0.09	2.74	0.09	0.0612	0.002	0.0661	0.002
Sonda D	0.5	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.57	0.01	0.57	0.01	0.0127	0.000	0.0137	0.000

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.2035	0.007
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.242	0.003
Diferença (%):	.....	-15.7 %

Tabela E.52. Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 6, Qref = 250 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 300 L/s

Configuração de Ensaio: 6 = veneziana + filtro + registro 90o

	(DP1-DP3)	+/- inc	K $\alpha$	+/- inc	$\alpha$	+/- inc	p	+/- inc	Kv	+/- inc	v	+/- inc	v $\cos \alpha$	+/- inc	Q	+/- inc	Qm	+/- inc
		(Pa)		(graus)		(kg/m <sup>3</sup> )		(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)		
Sonda A	-8.1	0.2	-0.463	0.019	-17	1	1.08	0.03	0.4902	0.020	3.76	0.07	3.60	0.07	0.0803	0.002	0.0867	0.002
Sonda B	-10.3	0.3	0.228	0.009	-30	1	1.08	0.03	-0.4367	0.017	3.16	0.09	2.75	0.08	0.0613	0.002	0.0662	0.002
Sonda C	-17.7	0.5	0.467	0.019	-36	1	1.08	0.03	-0.9220	0.037	4.07	0.11	3.30	0.11	0.0735	0.003	0.0794	0.003
Sonda D	0.9	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.89	0.02	0.89	0.02	0.0198	0.001	0.0214	0.001

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.2537	0.008
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.287	0.004
Diferença (%):	.....	-11.5 %

Tabela E.53: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 6, Qref = 300 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 350 L/s

Configuração de Ensaio: 6 = veneziana + filtro + registro 90o

	(DP1-DP3) +/- inc (Pa)		K $\alpha$ +/- inc		$\alpha$ +/- inc (graus)		p +/- inc (kg/m3)		Kv +/- inc		v +/- inc (m/s)		v'cos $\alpha$ +/- inc (m/s)		Q +/- inc (m <sup>3</sup> /s)		Qm +/- inc (kg/s)	
Sonda A	-9.2	0.3	-0.466	0.019	-17	1	1.08	0.03	0.4924	0.020	4.02	0.08	3.84	0.08	0.0857	0.002	0.0926	0.003
Sonda B	-14.3	0.4	0.349	0.014	-33	1	1.08	0.03	-0.6710	0.027	3.71	0.10	3.12	0.10	0.0696	0.003	0.0751	0.003
Sonda C	-21.6	0.6	0.506	0.020	-37	1	1.08	0.03	-1.0109	0.040	4.48	0.13	3.57	0.12	0.0797	0.003	0.0861	0.003
Sonda D	0.9	0.0	0.000	0.000	0	0	1.08	0.03	1.4160	0.000	0.89	0.02	0.89	0.02	0.0199	0.001	0.0215	0.001

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0.2753	0.009
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0.328	0.005
Diferença (%)	.....	-16.1 %

Tabela E.54: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 6, Qref = 350 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 400 L/s

Configuração de Ensaio: 6 = veneziana + filtro + registro 90o

	(DP1-DP3)	+/- inc	K $\alpha$	+/- inc	$\alpha$	+/- inc	P	+/- inc	KV	+/- inc	V	+/- inc	V*cos $\alpha$	+/- inc	Q	+/- inc	Qm	+/- inc
	(Pa)		(graus)		(kg/m3)		(m/s)		(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)	
Sonda A	-12.5	0.4	-0.463	0.019	-17	1	1.09	0.03	0.4903	0.020	4.66	0.09	4.45	0.09	0.0993	0.003	0.1083	0.003
Sonda B	-17.8	0.5	0.241	0.010	-30	1	1.09	0.03	-0.4601	0.018	4.14	0.12	3.58	0.11	0.0799	0.003	0.0871	0.003
Sonda C	-29.7	0.8	0.477	0.019	-36	1	1.09	0.03	-0.9439	0.038	5.24	0.15	4.23	0.14	0.0944	0.004	0.1029	0.004
Sonda D	1.4	0.0	-0.054	0.002	26	1	1.09	0.03	-0.1383	0.006	0.99	0.03	0.89	0.03	0.0198	0.001	0.0216	0.001

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m,grade</sub> = 0.3198	0.011
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m,placa</sub> = 0.371	0.006
Diferença (%):	.....	-13.8 %

Tabela E.55: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 6, Qref = 400 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 450 L/s

Configuração de Ensaio: 6 = veneziana + filtro + registro 90o

	(DP1-DP3)	+/- inc	K $\alpha$	+/- inc	$\alpha$	+/- inc	P	+/- inc	Kv	+/- inc	V	+/- inc	V $\cdot$ cos $\alpha$	+/- inc	Q	+/- inc	Qm	+/- inc
	(Pa)		(graus)	(kg/m <sup>3</sup> )	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)	(m/s)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)	(m/s)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)	
Sonda A	-17.9	0.5	-0.381	0.015	-18	1	1.08	0.03	0.4127	0.017	5.53	0.11	5.25	0.11	0.1172	0.003	0.1266	0.003
Sonda B	-26.5	0.7	0.276	0.011	-31	1	1.08	0.03	-0.5256	0.021	5.07	0.14	4.35	0.13	0.0971	0.004	0.1049	0.004
Sonda C	-44.1	1.2	0.491	0.020	-37	1	1.08	0.03	-0.9767	0.039	6.41	0.18	5.14	0.17	0.1147	0.004	0.1239	0.005
Sonda D	1.4	0.0	0.240	0.010	20	1	1.08	0.03	0.2616	0.010	1.53	0.04	1.43	0.04	0.0320	0.001	0.0345	0.001

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m grade</sub> = 0.3898	0.013
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m placa</sub> = 0.435	0.007
Diferença (%):	.....	-10.3 %

Tabela E.56: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 6, Qref = 450 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 500 L/s

Configuração de Ensaio: 6 = veneziana + filtro + registro 90o

	(DP1-DP3) +/- inc (Pa)	K $\alpha$ +/- inc	$\alpha$ +/- inc (graus)	$\rho$ +/- inc (kg/m <sup>3</sup> )	Kv +/- inc	v +/- inc (m/s)	v <sup>2</sup> cos $\alpha$ +/- inc (m/s)	Q +/- inc (m <sup>3</sup> /s)	Qm +/- inc (kg/s)							
Sonda A	-23.7	0.7	-0.373	0.015	1	1.09	0.03	0.4048	0.016	6.33	0.12	0.1340	0.004	0.1461	0.004	
Sonda B	-35.0	1.0	0.353	0.014	-33	1	1.09	0.03	-0.6792	0.027	5.78	0.16	0.1083	0.004	0.1180	0.004
Sonda C	-50.9	1.4	0.513	0.021	-37	1	1.09	0.03	-1.0274	0.041	6.83	0.19	0.1212	0.005	0.1321	0.005
Sonda D	1.3	0.0	0.437	0.017	17	1	1.09	0.03	0.4659	0.019	1.52	0.04	0.0324	0.001	0.0353	0.001

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.4314
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.484
Diferença (%):	-10.9 %

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.57: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 6, Qref = 500 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 550 L/s

Configuração de Ensaio: 6 = veneziana + filtro + registro 90o

	(DP1-DP3)	+/- inc	K $\alpha$	+/- inc	$\alpha$	(graus)	$\rho$	+/- inc	Kv	+/- inc	v	+/- inc	v*cos $\alpha$	+/- inc	Q	+/- inc	Qm	+/- inc
	(Pa)					(kg/m <sup>3</sup> )					(m/s)		(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)	
Sonda A	-27.8	0.8	-0.480	0.019	-17	1	1.09	0.03	0.5046	0.020	6.96	0.14	6.66	0.13	0.1487	0.004	0.1621	0.004
Sonda B	-45.0	1.3	0.415	0.017	-35	1	1.09	0.03	-0.8089	0.032	6.51	0.18	5.36	0.17	0.1196	0.005	0.1304	0.005
Sonda C	-71.7	2.0	0.567	0.023	-39	2	1.09	0.03	-1.1522	0.046	8.04	0.23	6.26	0.22	0.1397	0.006	0.1522	0.006
Sonda D	0.7	0.0	0.000	0.000	0	0	1.09	0.03	1.4160	0.000	0.66	0.01	0.66	0.01	0.0147	0.000	0.0161	0.000

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazão grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.4609	0.016
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.540	0.008
Diferença (%)	.....	-14.7 %

Tabela E.58: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 6, Q<sub>ref</sub> = 550 L/s



**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 600 L/s

Configuração de Ensaio: 6 = veneziana + filtro + registro 90o

	(DP1-DP3)	+/- inc	K $\alpha$	+/- inc	$\alpha$	(graus)	$\rho$	+/- inc	Kv	+/- inc	v	+/- inc	v $\cos\alpha$	+/- inc	Q	+/- inc	Qm	+/- inc
		(Pa)					(kg/m <sup>3</sup> )				(m/s)		(m/s)		(m <sup>3</sup> /s)		(kg/s)	
Sonda A	-33.5	0.9	-0.401	0.016	-18	1	1.09	0.03	0.4326	0.017	7.56	0.15	7.19	0.14	0.1605	0.004	0.1749	0.005
Sonda B	-41.5	1.2	0.322	0.013	-32	1	1.09	0.03	-0.6162	0.025	6.31	0.18	5.34	0.17	0.1192	0.004	0.1300	0.005
Sonda C	-58.6	1.7	0.195	0.008	-29	1	1.09	0.03	-0.3761	0.015	7.47	0.21	6.53	0.20	0.1458	0.005	0.1589	0.006
Sonda D	-1.0	0.0	0.000	0.000	0	0	1.09	0.03	1.4160	0.000	0.96	0.02	0.96	0.02	0.0213	0.001	0.0233	0.001

Legenda:

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m,grade</sub> = 0.4870	0.016
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m,placa</sub> = 0.597	0.009
Diferença (%):	.....	-18.5 %

Tabela E59: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 6, Qref = 600 L/s

**RESULTADOS: GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

Vazão referência = 640 L/s

Configuração de Ensaio: 6 = veneziana + filtro + registro 90o

	(DP1-DP3) +/- inc (Pa)	K $\alpha$ +/- inc	$\alpha$ +/- inc (graus)	$\rho$ +/- inc (kg/m3)	Kv +/- inc	v +/- inc (m/s)	v*cos $\alpha$ +/- inc (m/s)	Q +/- inc (m <sup>3</sup> /s)	Qm +/- inc (kg/s)									
Sonda A	-38.4	1.1	-0.496	0.020	0.020	-17	1	1.08	0.03	0.5193	0.021	8.24	0.16	0.1762	0.005	0.1903	0.005	
Sonda B	-60.9	1.7	0.470	0.019	-36	1	1.08	0.03	-0.9285	0.037	7.55	0.21	6.11	0.21	0.1363	0.005	0.1472	0.008
Sonda C	-95.5	2.7	0.566	0.023	-39	2	1.08	0.03	-1.1512	0.046	9.33	0.26	7.26	0.26	0.1620	0.007	0.1749	0.007
Sonda D	6.1	0.2	-0.707	0.028	43	2	1.08	0.03	-1.4998	0.060	2.31	0.07	1.68	0.07	0.0375	0.002	0.0405	0.002

Vazao grade (kg/s):	Q <sub>m, grade</sub> = 0.5529	0.020
Vazão placa (kg/s):	Q <sub>m, placa</sub> = 0.635	0.010
Diferença (%):	.....	-12.9 %

**Legenda:**

K $\alpha$  é dado por K21 ou K23 em função de (DP1-DP3)

Kv é dado por Kv<sub>21</sub> ou Kv<sub>23</sub> ou ainda Kv<sub>2</sub> em função de  $\alpha$

Q é a vazão em volume nas condições locais do ensaio

+/- inc é a incerteza combinada de cada parâmetro

Tabela E.60: Resultados de ensaios com grade sensora multidirecional, configuração 6, Qref = 640 L/s

## Resultados da medição de vazão com placa de orifício

### Configuração 1 : Ensaio com tomada de ar externo só com veneziana

Q <sub>ref_ind</sub> (L/s)	Δplaca (Pa)	P <sub>1abs</sub> (kPa)	T4 (°C)	P <sub>b</sub> (kPa)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	Q <sub>placa</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>m_placa</sub> (kg/s)	V <sub>tub</sub> (m/s)	Reynolds	μ (Pa.s)	E1	C <sub>placa</sub> Inc.												
200	693.5	3	92.66	0.82	22.6	0.2	92.84	0.66	1.083	0.03	0.1708	0.0026	0.206	0.003	10.007	0.16	9.21E+04	2.70E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9975	0.0003	0.6146	0.0035
250	952.1	5	92.93	0.81	21.3	0.2	93.18	0.66	1.09	0.03	0.2003	0.0030	0.241	0.004	11.668	0.18	1.08E+05	3.20E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9966	0.0004	0.6139	0.0035
300	1330	7	92.83	0.81	21.3	0.2	93.18	0.66	1.09	0.03	0.2362	0.0035	0.284	0.004	13.754	0.22	1.28E+05	3.70E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9952	0.0006	0.6133	0.0035
350	1965	10	92.66	0.80	21.7	0.2	93.17	0.66	1.09	0.03	0.2859	0.0043	0.344	0.005	16.68	0.26	1.54E+05	4.50E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9929	0.0008	0.6126	0.0035
400	2335	12	92.57	0.80	21.7	0.2	93.18	0.66	1.09	0.03	0.3110	0.0047	0.374	0.006	18.15	0.29	1.68E+05	4.90E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9915	0.0010	0.6124	0.0035
450	3085	15	92.37	0.80	21.77	0.2	93.17	0.66	1.09	0.03	0.3563	0.0054	0.429	0.007	20.788	0.33	1.92E+05	5.60E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9888	0.0013	0.6119	0.0035
500	4039	20	92.15	0.80	21.84	0.2	93.17	0.66	1.09	0.03	0.4058	0.0061	0.489	0.007	23.696	0.3787	2.19E+05	6.40E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.98529	0.0017	0.6116	0.0035
550	4920	25	91.92	0.80	21.9	0.2	93.16	0.66	1.09	0.03	0.4461	0.0068	0.537	0.008	26.064	0.4103	2.41E+05	7.05E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.98201	0.0021	0.6113	0.0035
600	6039	30	91.67	0.79	21.94	0.2	93.18	0.66	1.09	0.03	0.4920	0.0075	0.592	0.009	28.739	0.46	2.66E+05	7.80E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.97787	0.0026	0.6110	0.0035
640	6918	35	91.41	0.79	21.97	0.2	93.13	0.66	1.09	0.03	0.5245	0.0081	0.632	0.010	30.658	0.49	2.83E+05	8.30E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9746	0.0030	0.6109	0.0035

Legenda:

Q<sub>ref\_ind</sub>: vazão de referência indicada no medidor de vazão tipo coifa

Δplaca: diferença de pressão na placa de orifício

P<sub>1abs</sub>: pressão estática absoluta na tubulação à montante da placa

T4: temperatura do ar na tubulação

P<sub>b</sub>: pressão barométrica local

ρ: massa específica do ar

Q<sub>placa</sub>: vazão volumétrica de ar na condição de ρ padrão

Q<sub>m\_placa</sub>: vazão em massa de ar na placa de orifício

V<sub>tub</sub>: velocidade média na seção transversal da tubulação

Reynolds: número de Reynolds

μ: viscosidade dinâmica do ar

E1: coeficiente de compressibilidade para o ar na tubulação

C<sub>placa</sub>: coeficiente de descarga da placa de orifício

Tabela E.61: Resultados de valores medidos para a determinação da vazão de ar com placa de orifício, configuração 1

## Resultados da medição de vazão com placa de orifício

### Configuração 2 : Ensaio com tomada de ar externo com veneziana + filtro

Q <sub>ref_ind</sub> (L/s)	Δplaca (Pa)		P1abs (kPa)		T4 (°C)		Pb (kPa)		ρ (kg/m <sup>3</sup> )		QPAD placa (m <sup>3</sup> /s)		Qm_placa (kg/s)		Vtub (m/s)		Reynolds		μ (Pa.s)		E1		Cplaca	
	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.
200	676	3	92.79	0.81	22.39	0.2	93.04	0.66	1.08	0.03	0.1687	0.0025	0.203	0.003	9.88	0.16	9.10E+04	2.70E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.99759	0.0003	0.6147	0.0035
250	971.9	5	92.70	0.81	22.48	0.2	93.04	0.66	1.08	0.03	0.2018	0.0030	0.243	0.004	11.822	0.19	1.09E+05	3.20E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9965	0.0004	0.6139	0.0035
300	1398	7	92.56	0.80	22.5	0.2	93.04	0.66	1.08	0.03	0.2413	0.0036	0.291	0.004	14.148	0.22	1.30E+05	3.80E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9949	0.0006	0.6132	0.0035
350	1829	9	92.41	0.80	22.6	0.2	93.03	0.66	1.08	0.03	0.2753	0.0042	0.331	0.005	16.146	0.25	1.48E+05	4.30E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.99334	0.0008	0.6128	0.0035
400	2348	12	92.24	0.80	22.6	0.2	93.02	0.66	1.08	0.03	0.3111	0.0047	0.375	0.006	18.245	0.29	1.68E+05	4.90E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.99145	0.0010	0.6124	0.0035
450	3215	16	91.98	0.80	22.6	0.2	93.02	0.66	1.08	0.03	0.3625	0.0055	0.436	0.007	21.271	0.34	1.95E+05	5.70E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.98827	0.0014	0.6119	0.0035
500	3933	20	91.77	0.80	22.7	0.2	93.03	0.66	1.08	0.03	0.3996	0.0061	0.481	0.007	23.456	0.37	2.15E+05	6.30E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9856	0.0017	0.6116	0.0035
550	5016	25	91.46	0.79	22.7	0.2	93.03	0.66	1.08	0.03	0.4492	0.0069	0.541	0.008	26.365	0.42	2.42E+05	7.10E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.98158	0.0022	0.6113	0.0035
600	6168	31	91.09	0.79	22.71	0.2	93	0.66	1.08	0.03	0.4956	0.0076	0.597	0.009	29.101	0.466	2.67E+05	7.80E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.97726	0.0026	0.6110	0.0035
640	7022	35	90.86	0.79	22.69	0.2	93	0.66	1.08	0.03	0.5269	0.0082	0.634	0.010	30.942	0.50	2.84E+05	8.30E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9740	0.0030	0.6109	0.0035

#### Legenda:

Q<sub>ref\_ind</sub>: vazão de referência indicada no medidor de vazão tipo coifa

Δplaca: diferença de pressão na placa de orifício

P1abs: pressão estática absoluta na tubulação à montante da placa

T4: temperatura do ar na tubulação

Pb: pressão barométrica local

ρ: massa específica do ar

QPAD placa: vazão volumétrica de ar na condição de ρ padrão

Qm\_placa: vazão em massa de ar na placa de orifício

Vtub: velocidade média na seção transversal da tubulação

Reynolds: número de Reynolds

μ: viscosidade dinâmica do ar

E1: coeficiente de compressibilidade para o ar na tubulação

Cplaca: coeficiente de descarga da placa de orifício

Tabela E.62: Resultados de valores medidos para a determinação da vazão de ar com placa de orifício, configuração 2

## Resultados da medição de vazão com placa de orifício

Configuração 3 : Ensaio com tomada de ar externo com veneziana + filtro + registro a 60°

Q <sub>ref_ind</sub> (L/s)	Aplaca (Pa)		P1abs (hPa)		T4 (°C)		Pb (hPa)		ρ (kg/m <sup>3</sup> )		QPAD placa (m <sup>3</sup> /s)		Qm_placa (kg/s)		Vtub (m/s)		Reynolds		μ (Pa.s)		E1		Cplaca	
	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.
200	688	3	92.43	0.80	22.5	0.2	92.68	0.66	1.08	0.03	0.1998	0.0026	0.204	0.003	9.99	0.16	9.15E+04	2.70E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9975	0.0003	0.6146	0.0035
250	1004	5	92.33	0.80	22.6	0.2	92.69	0.66	1.08	0.03	0.2046	0.0031	0.246	0.004	12.04	0.19	1.10E+05	3.20E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9963	0.0004	0.6139	0.0035
300	1351	7	92.22	0.80	22.7	0.2	92.69	0.66	1.08	0.03	0.2368	0.0036	0.285	0.004	13.93	0.22	1.28E+05	3.70E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9951	0.0006	0.6133	0.0035
350	1814	9	92.05	0.80	22.7	0.2	92.67	0.66	1.08	0.03	0.2736	0.0042	0.329	0.005	16.11	0.25	1.47E+05	4.30E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9934	0.0008	0.6128	0.0035
400	2266	11	91.91	0.80	22.8	0.2	92.67	0.66	1.08	0.03	0.3051	0.0046	0.367	0.006	17.97	0.28	1.64E+05	4.80E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9917	0.0010	0.6124	0.0035
450	3101	16	91.65	0.79	22.9	0.2	92.67	0.66	1.08	0.03	0.3554	0.0054	0.428	0.007	20.94	0.33	1.91E+05	5.60E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9886	0.0013	0.6120	0.0035
500	4123	21	91.33	0.79	22.9	0.2	92.67	0.66	1.08	0.03	0.4080	0.0062	0.491	0.007	24.04	0.38	2.20E+05	6.40E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9848	0.0018	0.6116	0.0035
550	5098	25	91.05	0.79	22.9	0.2	92.68	0.66	1.08	0.03	0.4518	0.0069	0.544	0.008	26.62	0.42	2.43E+05	7.10E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9812	0.0022	0.6113	0.0035
600	6002	30	90.76	0.79	22.9	0.2	92.65	0.66	1.08	0.03	0.4881	0.0075	0.588	0.009	28.79	0.46	2.63E+05	7.70E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9778	0.0026	0.6111	0.0035
640	7015	35	90.45	0.78	22.9	0.2	92.63	0.65	1.08	0.03	0.5256	0.0082	0.633	0.010	30.98	0.50	2.83E+05	8.30E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9739	0.0030	0.6109	0.0035

### Legenda:

Q<sub>ref\_ind</sub>: vazão de referência indicada no medidor de vazão tipo coifa

Aplaca: diferença de pressão na placa de orifício

P1abs: pressão estática absoluta na tubulação à montante da placa

T4: temperatura do ar na tubulação

Pb: pressão barométrica local

ρ: massa específica do ar

QPAD placa: vazão volumétrica de ar na condição de ρ padrão

Qm\_placa: vazão em massa de ar na placa de orifício

Vtub: velocidade média na seção transversal da tubulação

Reynolds: número de Reynolds

μ: viscosidade dinâmica do ar

E1: coeficiente de compressibilidade para o ar na tubulação

Cplaca: coeficiente de descarga da placa de orifício

Tabela E.63: Resultados de valores medidos para a determinação da vazão de ar com placa de orifício, configuração 3

## Resultados da medição de vazão com placa de orifício

Configuração 4 : Ensaios com tomada de ar externo com veneziana + filtro + registro a 30°  
referência: 2909

Q <sub>ref_ind</sub> (L/s)	Δplaca (Pa)		P1abs (kPa)		T4 (°C)		Pb (kPa)		ρ (kg/m <sup>3</sup> )		QPAD placa (m <sup>3</sup> /s)		Qm_placa (kg/s)		Vtub (m/s)		Reynolds		μ (Pa.s)		E1		Cplaca	
	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.
200	684	3	92.36	0.80	23	0.2	92.66	0.66	1.08	0.03	0.1692	0.0026	0.204	0.003	9.97	0.16	9.11E+04	2.70E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9975	0.0003	0.6147	0.0035
250	965	5	92.26	0.80	23	0.2	92.67	0.66	1.08	0.03	0.2005	0.0030	0.241	0.004	11.82	0.19	1.08E+05	3.20E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9965	0.0004	0.6140	0.0035
300	1377	7	92.11	0.80	23.1	0.2	92.69	0.66	1.08	0.03	0.2389	0.0036	0.288	0.004	14.08	0.22	1.29E+05	3.80E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.995	0.0006	0.6133	0.0035
350	1844	9	91.92	0.80	23.1	0.2	92.67	0.66	1.08	0.03	0.2757	0.0042	0.332	0.005	16.25	0.26	1.48E+05	4.30E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9933	0.0008	0.6128	0.0035
400	2336	12	91.71	0.79	23.1	0.2	92.67	0.66	1.08	0.03	0.3095	0.0047	0.373	0.006	18.25	0.29	1.67E+05	4.90E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9914	0.0010	0.6124	0.0035
450	3079	15	91.44	0.79	23.1	0.2	92.68	0.66	1.08	0.03	0.3541	0.0054	0.426	0.007	20.88	0.33	1.91E+05	5.60E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9887	0.0013	0.6120	0.0035
500	4161	21	91.06	0.79	23.1	0.2	92.69	0.66	1.08	0.03	0.4096	0.0063	0.493	0.008	24.16	0.38	2.20E+05	6.40E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9846	0.0018	0.6115	0.0035
550	4988	25	90.73	0.79	23.2	0.2	92.68	0.66	1.08	0.03	0.4468	0.0069	0.538	0.008	26.36	0.42	2.40E+05	7.00E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9815	0.0022	0.6113	0.0035
600	6019	30	90.39	0.78	23.2	0.2	92.69	0.66	1.08	0.03	0.4887	0.0076	0.588	0.009	28.83	0.46	2.63E+05	7.70E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9776	0.0026	0.6111	0.0035
640	6958	35	90.04	0.78	23.2	0.2	92.69	0.66	1.08	0.03	0.5233	0.0081	0.630	0.010	30.87	0.50	2.82E+05	8.30E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9740	0.0030	0.6109	0.0035

Legenda:

Q<sub>ref\_ind</sub>: vazão de referência indicada no medidor de vazão tipo coifa

Δplaca: diferença de pressão na placa de orifício

P1abs: pressão estática absoluta na tubulação à montante da placa

T4: temperatura do ar na tubulação

Pb: pressão barométrica local

ρ: massa específica do ar

QPAD placa: vazão volumétrica de ar na condição de ρ padrão

Qm\_placa: vazão em massa de ar na placa de orifício

Vtub: velocidade média na seção transversal da tubulação

Reynolds: número de Reynolds

μ: viscosidade dinâmica do ar

E1: coeficiente de compressibilidade para o ar na tubulação

Cplaca: coeficiente de descarga da placa de orifício

Tabela E.64: Resultados de valores medidos para a determinação da vazão de ar com placa de orifício, configuração 4

## Resultados da medição de vazão com placa de orifício

### Configuração 5 : Ensaio com tomada de ar externo com veneziana + filtro + registro a 45°

Q <sub>ref_ind</sub> (L/s)	Δplaca (Pa)		P1abs (kPa)		T4 (°C)		Pb (kPa)		ρ (kg/m <sup>3</sup> )		QPAD placa (m <sup>3</sup> /s)		Qm_placa (kg/s)		Vtub (m/s)		Reynolds		μ (Pa.s)		E1		Cplaca	
	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.
200	645	3	92.61	0.80	22.8	0.2	92.85	0.66	1.08	0.03	0.1646	0.0025	0.198	0.003	9.66	0.15	8.87E+04	2.60E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9977	0.0003	0.6148	0.0035
250	948	5	92.50	0.80	22.8	0.2	92.85	0.66	1.08	0.03	0.1993	0.0030	0.240	0.004	11.68	0.18	1.07E+05	3.10E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9966	0.0004	0.6140	0.0035
300	1366	7	92.21	0.80	23.2	0.2	92.71	0.66	1.08	0.03	0.2397	0.0036	0.289	0.004	14.12	0.22	1.29E+05	3.80E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.995	0.0006	0.6133	0.0035
350	1840	9	92.20	0.80	22.9	0.2	92.85	0.66	1.08	0.03	0.2761	0.0042	0.332	0.005	16.2	0.26	1.49E+05	4.30E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9933	0.0008	0.6128	0.0035
400	2319	12	92.06	0.80	22.8	0.2	92.86	0.66	1.08	0.03	0.3095	0.0047	0.373	0.006	18.12	0.29	1.67E+05	4.90E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9915	0.0010	0.6124	0.0035
450	3026	15	91.66	0.79	23.2	0.2	92.69	0.66	1.08	0.03	0.3511	0.0053	0.423	0.006	20.7	0.33	1.89E+05	5.50E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9889	0.0013	0.6120	0.0035
500	4076	20	91.52	0.79	22.8	0.2	92.87	0.66	1.08	0.03	0.4067	0.0062	0.490	0.007	23.86	0.38	2.19E+05	6.40E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.985	0.0018	0.6116	0.0035
550	4983	25	91.06	0.79	23.2	0.2	92.69	0.66	1.08	0.03	0.4467	0.0069	0.538	0.008	26.34	0.42	2.40E+05	7.00E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9816	0.0021	0.6113	0.0035
600	6095	30	90.87	0.79	22.7	0.2	92.84	0.66	1.08	0.03	0.4928	0.0076	0.593	0.009	28.93	0.46	2.66E+05	7.80E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9775	0.0026	0.6110	0.0035
640	6924	35	90.45	0.78	23.2	0.2	92.66	0.66	1.08	0.03	0.5221	0.0081	0.629	0.010	30.81	0.49	2.81E+05	8.20E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9743	0.0030	0.6109	0.0035

#### Legenda:

Q<sub>ref\_ind</sub>: Vazão de referência indicada no medidor de vazão tipo cofa

Δplaca: diferença de pressão na placa de orifício

P1abs: pressão estática absoluta na tubulação à montante da placa

T4: temperatura do ar na tubulação

Pb: pressão barométrica local

ρ: massa específica do ar

QPAD placa: vazão volumétrica de ar na condição de ρ padrão

Qm\_placa: vazão em massa de ar na placa de orifício

Vtub: velocidade média na seção transversal da tubulação

Reynolds: número de Reynolds

μ: viscosidade dinâmica do ar

E1: coeficiente de compressibilidade para o ar na tubulação

Cplaca: coeficiente de descarga da placa de orifício

Tabela E.65: Resultados de valores medidos para a determinação da vazão de ar com placa de orifício, configuração 5

## Resultados da medição de vazão com placa de orifício

Configuração 6 : Ensaios com tomada de ar externo com veneziana + registro + filtro ( ângulo de 90o)

Q <sub>ref_ind</sub> (L/s)	Δplaca (Pa)		P1abs (kPa)		T4 (°C)		Pb (kPa)		ρ (kg/m <sup>3</sup> )		QPAD placa (m <sup>3</sup> /s)		Qm_placa (kg/s)		Vtub (m/s)		Reynolds		μ (Pa.s)		E1		Cplaca	
	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.	Inc.
200	693	3	92.57	0.80	22.8	0.2	92.82	0.66	1.08	0.03	0.1707	0.0026	0.206	0.003	10.01	0.16	9.19E+04	2.70E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9975	0.0003	0.6146	0.0035
250	963	5	92.46	0.80	22.8	0.2	92.80	0.66	1.08	0.03	0.2006	0.0030	0.242	0.004	11.78	0.19	1.08E+05	3.20E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9965	0.0004	0.6140	0.0035
300	1361	7	92.35	0.80	22.8	0.2	92.82	0.66	1.08	0.03	0.2380	0.0036	0.287	0.004	13.96	0.22	1.28E+05	3.70E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9951	0.0006	0.6133	0.0035
350	1789	9	92.21	0.80	22.8	0.2	92.81	0.66	1.08	0.03	0.2724	0.0041	0.328	0.005	15.96	0.25	1.47E+05	4.30E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9935	0.0008	0.6128	0.0035
400	2295	11	92.08	0.80	22.9	0.2	92.83	0.66	1.09	0.03	0.3082	0.0046	0.371	0.006	18.01	0.28	1.66E+05	4.80E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9916	0.0010	0.6124	0.0035
450	3186	16	91.80	0.80	22.8	0.2	92.83	0.66	1.08	0.03	0.3610	0.0055	0.435	0.007	21.17	0.33	1.94E+05	5.70E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9883	0.0014	0.6119	0.0035
500	3962	20	91.59	0.79	22.7	0.2	92.86	0.66	1.09	0.03	0.4020	0.0061	0.484	0.007	23.48	0.37	2.17E+05	6.30E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9855	0.0017	0.6116	0.0035
550	4975	25	91.32	0.79	22.7	0.2	92.87	0.66	1.09	0.03	0.4488	0.0068	0.540	0.008	26.18	0.42	2.42E+05	7.10E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9817	0.0021	0.6113	0.0035
600	6159	31	90.94	0.79	22.7	0.2	92.84	0.66	1.09	0.03	0.4961	0.0076	0.597	0.009	29.03	0.46	2.67E+05	7.80E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9772	0.0026	0.6110	0.0035
640	7011	35	90.69	0.79	22.5	0.2	92.83	0.66	1.08	0.03	0.5270	0.0081	0.635	0.010	30.89	0.50	2.84E+05	8.30E+03	1.83E-05	9.20E-08	0.9740	0.0030	0.6109	0.0035

### Legenda:

Q<sub>ref\_ind</sub>: vazão de referência indicada no medidor de vazão tipo corifa

Δplaca: diferença de pressão na placa de orifício

P1abs: pressão estática absoluta na tubulação à montante da placa

T4: temperatura do ar na tubulação

Pb: pressão barométrica local

ρ: massa específica do ar

QPAD placa: vazão volumétrica de ar na condição de ρ padrão

Qm\_placa: vazão em massa de ar na placa de orifício

Vtub: velocidade média na seção transversal da tubulação

Reynolds: número de Reynolds

μ: viscosidade dinâmica do ar

E1: coeficiente de compressibilidade para o ar na tubulação

Cplaca: coeficiente de descarga da placa de orifício

Tabela E.66: Resultados de valores medidos para a determinação da vazão de ar com placa de orifício, configuração 6



## **ANEXO F**

### **RESULTADOS DE ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTAÇÃO – MÓDULO EXPERIMENTAL**

### Ensaio de calibração para os sensores de temperatura do módulo experimental

termopar no.1		termopar no. 2		termopar no. 4	
mV	T (°C)	mV	T (°C)	mV	T (°C)
0.5871	11.4	0.5842	11.4	0.5944	11.4
0.8070	15.7	0.8031	15.7	0.8132	15.7
1.0517	20.4	1.0508	20.4	1.0612	20.4
1.2949	25.0	1.2910	25.0	1.3018	25.0
1.5560	30.0	1.5539	29.9	1.5640	29.9
1.8411	35.3	1.8383	35.3	1.8480	35.3

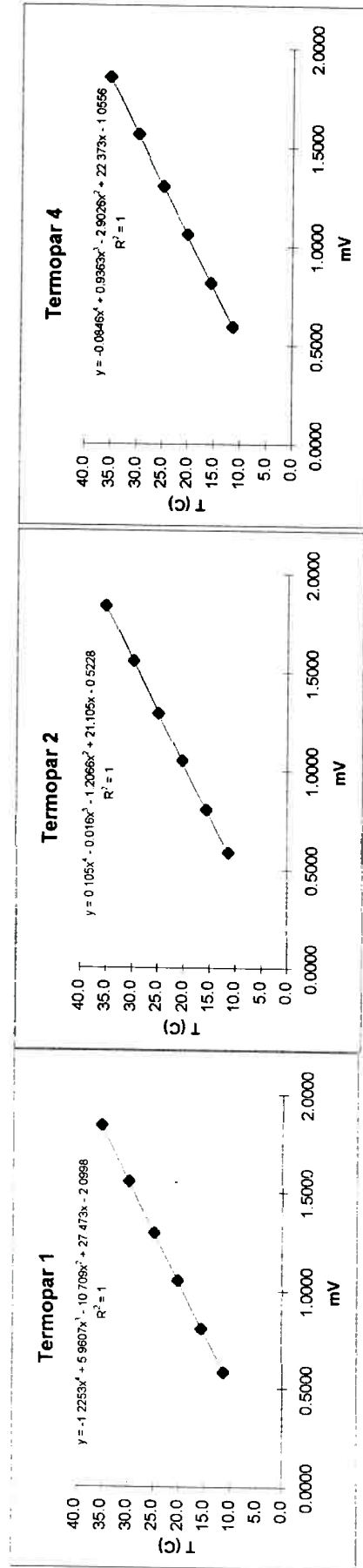


Figura F.1: Tabelas com resultados e gráficos com o ajuste de polinômio interpolador para cada um dos termopares

### Ensaio de calibração para os sensores de pressão diferencial do módulo experimental

transdutor 2		transdutor 3	
mA	P (mmca)	mA	P (mmca)
3.980	0	3.979	0
6.064	100	6.054	100
8.136	200	8.123	200
10.199	300	10.187	300
12.281	400	12.267	400
14.355	500	14.339	500

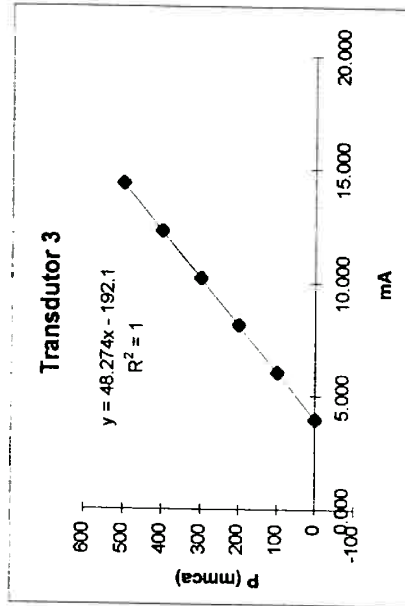
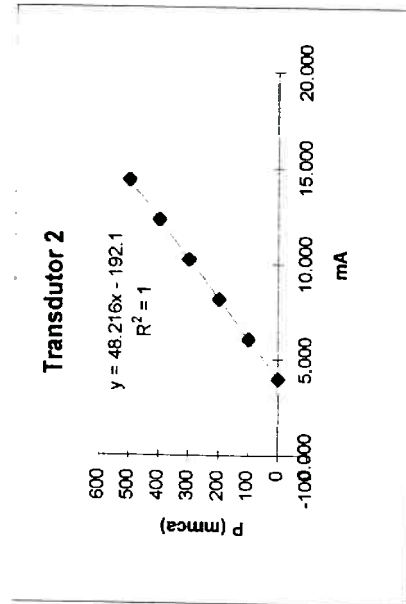


Figura F.2: Tabelas com resultados e gráficos com ajuste da reta de interpolação para cada um dos transdutores de pressão diferencial

## 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 não 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

Figura F.3: Resultados da avaliação dimensional da placa de orifício  
 Padrão para medição da vazão

## ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE VAZÃO TIPO COIFA - FLOW HOOD

ESCALA 2: 200 a 470 L/s

Data	Medida	TBS ( °C )	TPO ( °C )	P <sub>atm</sub> ( mmHg )	P <sub>atm</sub> ( Pa )	W ( kg/kg )	P <sub>real</sub> ( kg/m <sup>3</sup> )	Vazão indicada ( L/s )	Vazão real padrão ( L/s )	Vazão real ( L/s )
28/Abr	1	25.1	11.9	701.7	93483	0.009411	1.076	400	328.244	346.7
28/Abr	2	25.1	11.9	701.7	93483	0.009411	1.076	305	257.804	272.3
05/Mai	8	27.2	14.8	698	92990	0.011469	1.059	300	256.934	273.5
05/Mai	9	27.2	14.8	698	92990	0.011469	1.059	350	297.048	316.2
05/Mai	10	27.2	14.8	698	92990	0.011469	1.059	400	334.625	356.2
05/Mai	11	27.2	14.8	698	92990	0.011469	1.059	450	382.912	407.6

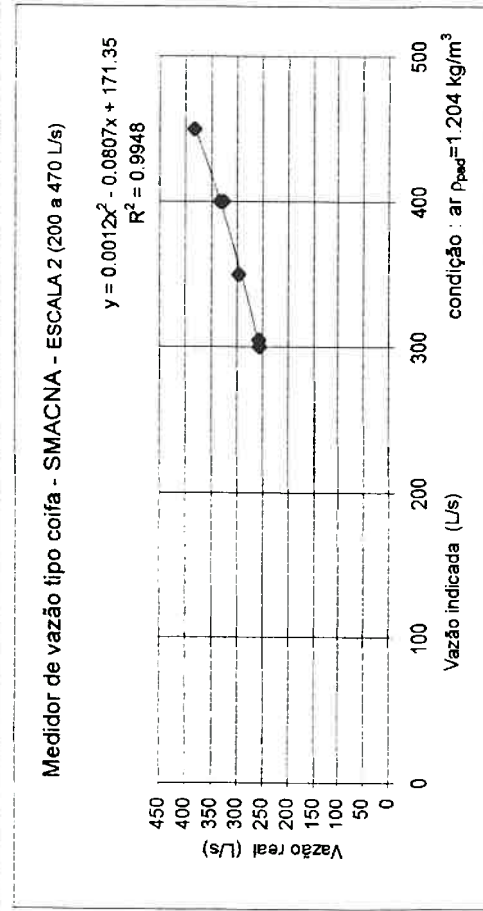


Figura F.4: Tabela com resultados e gráfico de calibração do medidor de vazão tipo coifa na escala: 200 a 470 L/s

## ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE VAZÃO TIPO COIFA - FLOW HOOD

**ESCALA 3: 400 a 940 L/s**

Data	Medida	TBS ( °C )	TPO ( °C )	P <sub>atm</sub> ( mmHg )	P <sub>atm</sub> ( Pa )	w ( kg/kg )	P <sub>rel</sub> ( kg/m <sup>3</sup> )	Vazão indicada ( L/s )	Vazão real padrão ( L/s )	Vazão real ( L/s )
28/Abr	3	25.1	11.9	701.7	93483	0.009411	1.076	500	429.832	454.0
28/Abr	4	25.1	11.9	701.7	93483	0.009411	1.076	600	510.969	539.7
28/Abr	5	25.1	11.9	701.7	93483	0.009411	1.076	700	610.285	644.6
28/Abr	6	25.1	11.9	701.7	93483	0.009411	1.076	800	702.406	741.9
05/Mai	12	27.2	14.8	698	92990	0.011469	1.059	520	434.768	462.8

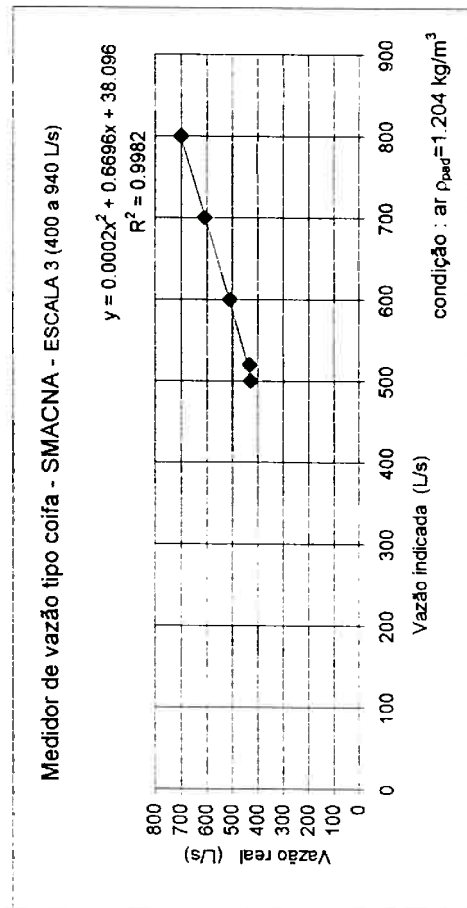


Figura F.5: Tabela com resultados e gráfico de calibração do medidor de vazão tipo coifa na escala: 400 a 940 L/s

## **ANEXO G**

### **PROGRAMA PARA A GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL**

## ANEXO G

**GRADE SENSORA MULTIDIRECIONAL  
PROGRAMA PARA TRATAMENTO DE DADOS - RFINAL  
Estrutura lógica para programação de cálculos – para ser aplicado em  
planilhas eletrônicas**

**Parte 1: Processamento de dados, obtenção de resultados**

{Cálculo de (DP1 - DP3)}

Expressão: = (DP1 - DP3)

{Cálculo de (DP2 - DP1)}

Expressão: = (DP2 - DP1)

{Cálculo de (DP2 - DP3)}

Expressão: = (DP2 - DP3){Cálculo de  $K\alpha$ }Expressão: Se:  $|(DP1 - DP3)| \leq 1$ Então:  $K\alpha = 0$ Se não: Se  $(DP1 - DP3) > 0$ Então:  $K\alpha = \frac{DP2 - DP1}{DP1 - DP3}$  {= K21}Se não:  $K\alpha = \frac{DP2 - DP3}{DP1 - DP3}$  {= K23}{Comentário: o valor experimental adotado para que  $k\alpha$  seja zero (0) é $(DP1 - DP3) \cong 0$  , admitido como  $|(DP1 - DP3)| \leq 1$  Pa}



{Cálculo de  $\alpha$ }

Expressão: Se:  $K\alpha = 0$

Então:  $\alpha = 0$

Se não: Se  $(DP1 - DP3) > 0$

Então:  $\alpha = \text{Regressão } \alpha = \alpha \text{ (K21)}$

Se não:  $\alpha = \text{Regressão } \alpha = \alpha \text{ (K23)}$

{Comentário: se  $(DP1 - DP3) = 0 \Rightarrow \alpha = 0$  pois  $K\alpha$  veio com valor zero das condições das células U7, que calcula  $K\alpha$ .}

{Valor da área associada a cada sonda é de  $\frac{1}{4}$  da área de passagem na seção da grade sensora}

Expressão:  $= 0.02232 \text{ m}^2$

{Comentário: área total:  $S = 0,08928 \text{ m}^2$ }

{Valor de  $\rho$ }

Expressão: = Placa!  $\$J\$<n>$

{Comentário: valor importado e atualizado em função do apresentado na planilha "Placa" da mesma pasta, na coluna J, linha  $<n>$ }

{Cálculo de  $Kv_{21}$  auxiliar, a ser testado}

{Condição  $\alpha > 0 \Rightarrow$  cálculo de  $Kv_{21}$  auxiliar}

Expressão: Se:  $(\text{Regressão } Kv_{21} = Kv_{21}(\alpha) > 0 \text{ E } (DP2 - DP1) > 0) \text{ OU}$   
 $(\text{Regressão } Kv_{21} < 0 \text{ E } (DP2 - DP1) < 0)$

Então: Se:  $(-0,1 < (\text{Regressão } Kv_{21} = Kv_{21}(\alpha)) < +0,1)$

Então:  $Kv_{21}$  auxiliar = 1,2673 {valor médio de  $Kv_2 \alpha \cong 25^\circ$ }

Se não:  $Kv_{21}$  auxiliar = Regressão  $Kv_{21} = Kv_{21}(\alpha)$

Se não:  $Kv_{21}$  auxiliar = 1,2673

{Comentário: As células auxiliares de  $Kv_{21}$  auxiliar verificam:

a) se o  $Kv_{21}$  e  $(DP2 - DP1)$  possuem mesmo sinal;

- b) se  $Kv_{21} \cong 0$  (está entre  $(-0,1$  e  $0,1)$ ), o que ocorre para caso de  $DP_2 = DP_1$ , e  $\alpha \cong 25^\circ$ ), atribui para  $Kv$  o valor particular  $Kv_2 = 1,2673$  (válido para  $\alpha \cong 25^\circ$  e associados à média de  $(DP_1$  e  $DP_2)$  e não mais à diferença de seus valores).
- c) Caso  $Kv_{21} \neq 0$  adota-se para  $Kv_{21}$  auxiliar o valor da regressão}

{Cálculo de valor auxiliar para velocidade:  $V_{aux}$ }

{Condição  $\alpha > 0$ }

Expressão: Se:  $(-0,1 < (\text{Regressão } Kv_{21} = Kv_2(\alpha)) < +0,1)$

$$\text{Então: } V_{aux} = \sqrt{\frac{|\text{Média}(DP_1; DP_2)|}{1/2 * \rho * 1,2673}}$$

$$\text{Se não: } V_{aux} = \sqrt{\frac{(DP_2 - DP_1)}{1/2 * \rho * K_{v_{aux}}}}$$

{Comentário: caso de  $\alpha \cong 25^\circ$  no qual  $(Kv = Kv(DP_2 - DP_1)) \rightarrow 0$  então usa-se um  $Kv$  particular em função de  $DP$ ; se não recai na situação genérica.}

{Cálculo de  $Kv$  auxiliar, a ser testado}

{Condição  $\alpha < 0 \Rightarrow Kv_{23}$  auxiliar}

Expressão: Se:  $(\text{Regressão } Kv_{23} = Kv_{23}(\alpha) > 0 \text{ E } (DP_2 - DP_3) > 0) \text{ OU } (\text{Regressão } Kv_{23} = Kv_{23}(\alpha) < 0 \text{ E } (DP_2 - DP_3) < 0)$

Então: Se:  $(-0,1 < (\text{Regressão } Kv_{23} = Kv_{23}(\alpha)) < +0,1)$

Então:  $K_{v_{auxiliar}} = 1,2673$

Se não:  $K_{v_{auxiliar}} = \text{Regressão } Kv_{23} = Kv_{23}(\alpha)$

Se não:  $K_{v_{auxiliar}} = 1,2673$

{Comentário: Cálculo e condições idênticas às de  $Kv_{21}$ }

{Cálculo de  $V_{aux}$  - Valor auxiliar para módulo da velocidade}

{Condição  $\alpha < 0$ }

Expressão: Se:  $(-0,1 < \text{Regressão } K_{v23} = K_{v23}(\alpha) < +0,1)$

$$\text{Então: } V_{aux} = \sqrt{\frac{\text{Média}(DP2; DP3)}{1/2 * \rho * 1,2673}}$$

$$\text{Se não: } V_{aux} = \sqrt{\frac{(DP2 - DP3)}{1/2 * \rho * K_{v_{aux}}}}$$

{Comentário: Da mesma, que o  $v_{aux}$  anterior, verifica-se os valores para ângulos  $\alpha \cong 25^\circ$  usando equação específica para este caso}

{Cálculo de  $K_v$ } {Utiliza  $K_v$  auxiliares}

Expressão: Se:  $\alpha > 0$

$$\text{Então: } K_v = K_{v_{auxiliar}} = K_{v21 \text{ aux}}$$

$$\text{Se não: } K_v = K_{v_{auxiliar}} = K_{v23 \text{ aux}}$$

{Cálculo de  $V$ }

Expressão: Se:  $\alpha > 0$

$$\text{Então: } V = V_{aux} (\alpha > 0)$$

Se não: Se:  $\alpha = 0$

$$\text{Então: } V = \sqrt{\frac{\text{Média}(|(DP2 - DP1)|; |(DP2 - DP3)|)}{1/2 * \rho * K_v}}$$

$$\text{Se não: } V_{aux} = V = V_{aux} (\alpha < 0)$$

{Cálculo de  $(V * \cos \alpha)$ }

$$\text{Expressão: } V \cos \alpha = V * \cos(\alpha * \pi/180)$$

{Cálculo da vazão volumétrica:  $Q$ }

$$\text{Expressão: } Q = V * S/4$$

{Cálculo da vazão em massa:  $Q_m$ }

Expressão:  $Q_m = Q \cdot \rho$

## Parte 2: Cálculo de incertezas

{Incerteza de  $(DP1 - DP3)$ }

Expressão:  $INC = |0,02828 \cdot (DP1 - DP3)|$

{Considerou-se  $\pm 2\%$  para incerteza combinada de cada sensor, que acumulado na média quadrática = 0,02828}

{Incerteza de  $K_\alpha$ }

Expressão: Se:  $|DP1 - DP3| > 0$

Então: Se:  $(DP2 - DP1) = 0$

Então:  $INC K_\alpha = 0$

Se não:  $INC K_\alpha = \left| \sqrt{\left(\frac{INC(DP1 - DP3)}{DP1 - DP3}\right)^2 + \left(\frac{INC(DP2 - DP1)}{DP2 - DP1}\right)^2} \cdot K_\alpha \right|$

Se não: Se  $((DP1 - DP3) = 0)$

Então:  $INC K_\alpha = 0$

Se não:  $K_\alpha = \left| \sqrt{\left(\frac{INC(DP1 - DP3)}{DP1 - DP3}\right)^2 + \left(\frac{INC(DP2 - DP3)}{DP2 - DP3}\right)^2} \cdot k_\alpha \right|$

{Incerteza de  $(DP2 - DP1)$ }

Expressão:  $INC (DP2 - DP1) = |0,02828 \cdot (DP2 - DP3)|$

{Considerou-se  $\pm 2\%$  para incerteza combinada de cada sensor, que acumulado na média quadrática = 0,02828}

{Incerteza de  $(DP2 - DP3)$ }

Expressão:  $INC (DP2 - DP3) = |0,02828 \cdot (DP2 - DP3)|$

{Incerteza de  $\alpha$ }

Expressão: Se:  $|K\alpha > 0|$

$$\text{Então: } \text{INC}\alpha = \left| \sqrt{\left(\frac{\text{INC } k\alpha}{k\alpha}\right)^2} * \alpha \right|$$

Se não:  $\text{INC } \alpha = 0$

{Incerteza de  $\rho$ }

Expressão:  $\text{PLACA! } \text{K}\langle n \rangle \quad |0,02828 * (\text{DP1} - \text{DP3})|$

{Valor importado e atualizado da planilha "placa" da mesma pasta, da coluna K, linha  $\langle n \rangle$ }

{Incerteza de  $K_v$ }

Expressão: Se:  $|\alpha| > 0$

$$\text{Então: } \text{INC } K_v \left| \sqrt{\left(\frac{\text{INC } \alpha}{\alpha}\right)^2} * K_v \right|$$

Se não:  $\text{INC } K_v = 0$

{Incerteza de  $v$ }

Expressão:

Se:  $\alpha > 0$

Então: Se:  $(\text{DP2} - \text{DP1}) = 0$

$$\text{Então: } \text{INC } v = \left| \sqrt{\left(0,5 * \frac{\text{INC } K_v}{K_v}\right)^2 + \left(0,5 * \frac{\text{INC } \rho}{\rho}\right)^2} * v \right|$$

$$\text{Se não: } \text{INC } v = \left| \sqrt{\left(0,5 * \frac{\text{INC } (\text{DP2} - \text{DP1})}{(\text{DP2} - \text{DP1})}\right)^2 + \left(0,5 * \frac{\text{INC } K_v}{K_v}\right)^2 + \left(0,5 * \frac{\text{INC } \rho}{\rho}\right)^2} * v \right|$$

Se não: Se:  $(\text{DP2} - \text{DP3}) = 0$

$$\text{Se não: INC } v = \sqrt{\left(0,5 * \frac{\text{INC (DP2 - DP3)}}{(\text{DP2 - DP3})}\right)^2 + \left(0,5 * \frac{\text{INC } \rho}{\rho}\right)^2 + \left(0,5 * \frac{\text{INC } K_v}{K_v}\right)^2} * v$$

{Incerteza de (V \* COS  $\alpha$ )}

Expressão: Se:  $|v| > 0$

Então: Se: (DP2 – DP1) = 0

$$\text{Então INC (V * COS } \alpha = \sqrt{\left(\frac{\text{INC } v}{v}\right)^2 + (\text{tg} \alpha * \text{INC} \alpha)^2} * (v * \cos \alpha)$$

Se não: INC (v \* cos $\alpha$ ) = 0

{Incerteza de Q}

$$\text{Expressão: INC } Q = \sqrt{\left(\frac{\text{INC (S/4)}}{(S/4)}\right)^2 + \left(\frac{\text{INC (v * cos } \alpha)}{(v * \cos \alpha)}\right)^2} * Q$$

{Incerteza de Qm}

$$\text{Expressão: INC } Q_m = \sqrt{\left(\frac{\text{INC } Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\text{INC } \rho}{\rho}\right)^2} * Q_m$$

## **ANEXO H**

### **EQUAÇÕES PARA A ANÁLISE DE INCERTEZAS**

## ANEXO H

### ANÁLISE DE INCERTEZAS

A estimativa de incertezas para os parâmetros utilizados no módulo experimental de medição de vazão utilizado nesta pesquisa foi feita através do uso de programas de computador que realizaram a aquisição e tratamento dos dados, CENTRAL2 e PLINCERT. Estes programas adotaram as recomendações e usaram equações obtidas nas normas utilizadas como referências, a saber ISO 5167, ISO 5168 e ANSI / ASME PTC 19.1.

As incertezas associadas à grade sensora multidirecional, foram determinadas a partir das equações apresentadas no anexo G, que foram aplicadas através do programa RFINAL, que fez o tratamento de dados.

No procedimento adotado foram 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 Reader-Harris/Gallagher, a atualização da norma ISO 5167, sugere que se adote para o presente caso, onde  $\beta = 0,65$ :

$$\frac{\delta C_d}{C_d} = (1.667 * \beta - 0.5)(\%)$$

- Incerteza de  $\varepsilon_1$  (Coeficiente de compressibilidade)

$$\frac{\delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} = 4 \times \frac{DP}{P_1} (\%)$$

- 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 (do):

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:

$$\left(\frac{\delta do}{do}\right)_{\text{combinada}} = \pm 0.05\%$$

- Incerteza na medição de pressão diferencial da placa de orifício (DP<sub>placa</sub>):

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:

$$\left(\frac{\delta DP_{\text{placa}}}{DP_{\text{placa}}}\right)_{\text{combinada}} = \left[ \left(\frac{\delta DP_{\text{placa}}}{DP_{\text{placa}}}\right)_{\text{sistematica}}^2 + \left(\frac{\delta DP_{\text{placa}}}{DP_{\text{placa}}}\right)_{\text{aleatoria}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

onde  $\left(\frac{\delta DP}{DP}\right)_{\text{sistematica}}^2 = \pm 0.5\%$

- Incerteza na determinação da massa específica (ρ):

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.

$$\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_{\text{combinada}}^2 = \left[ \left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_{\text{sistematica psicrômetro}}^2 + \left(\frac{\delta T1}{T1}\right)_{\text{combinada}}^2 + \left(\frac{\delta T2}{\delta T2}\right)_{\text{combinada}}^2 + \left(\frac{\delta Patm}{\delta Patm}\right)_{\text{combinada}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

onde  $\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_{\text{sistematica psicrômetro}}^2 = \pm 2\%$

- Incerteza na pressão estática absoluta (P1):

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) ( $P_b$ ):

Para esta grandeza, é determinada a incerteza combinada, o valor aleatório foi avaliado a partir das medições efetuadas em cada ensaio, e o valor sistemático foi admitido fixo:

$$\left(\frac{\delta P_b}{P_b}\right)_{\text{combinada}} = \left[ \left(\frac{\delta P_b}{P_b}\right)_{\text{sistemática}}^2 + \left(\frac{\delta P_b}{P_b}\right)_{\text{aleatória}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

onde  $\left(\frac{\delta P_b}{P_b}\right)_{\text{sistemática}} = \pm 0.5\%$  para o transdutor nº5

- 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 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  $\left(\frac{\delta T4}{T4}\right)_{\text{sistemático}} = \pm 0.75\%$