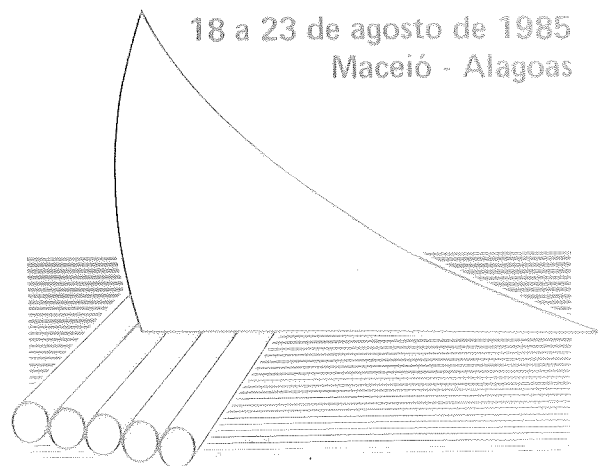


18 a 23 de agosto de 1985
Maceió - Alagoas



ABES - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA

13^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental

107

UTILIZAÇÃO DO PITOT "S" NA AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA EM FONTES ESTACIONÁRIAS

ARQUIVO TÉCNICO

8203
B469u
014325



04459

014325

CETESB



CETESB

Diretor Presidente: Werner Eugênio Zulauf. **Diretor Financeiro:** Paulo Bezerril Junior. **Diretor Administrativo:** Antonio Alves de Almeida. **Diretor de Engenharia:** Nelson Mansour Nabhan. **Diretor de Controle:** Nelson Vieira de Vasconcelos. **Diretor de Planejamento Ambiental:** Fredmar Corrêa. **Diretor de Pesquisa:** Samuel Murgel Branco.

8203
B469u
014325

ESCRITÓRIO CENTRAL

Av. Prof. Frederico Hermann Jr., 345 - Alto de Pinheiros
São Paulo - CEP 05459 - Telefone: (DDD 011) 210-1100
Telex (011) 222-46 - CTS - BR

UNIDADES REGIONAIS E ESCRITÓRIOS

● Estado de São Paulo

Araçatuba: Rua Silva Jardim, 906
Fone: (0186) 23.6838 - CEP 16.100

Araraquara: Av. Espanha, 188
Fone (0162) 32.2211 - CEP 14.800

Baurú: Rua Gerson França, 11-60
Fone: (0142) 23.8466 - CEP 17.100

Campinas: Rua São Carlos, 287
Fone: (0192) 32.3366 - CEP 13.100

Cubatão: Rua Assembléia de Deus, 39 Salas 405 e 407
Fone: (0132) 61.1660 e 611.301 - CEP 11.500

Franca: Av. Champagnat, 1808
Fone: (016) 723.9700 - CEP 14.400

Guarulhos: Rua Brás Cubas, 95
Fone: (011) 209.8413 - CEP 07.000

Ipiranga: Rua Caramuru, 573
Fone: (011) 275.7102 - CEP 04138

Marília: Av. Sampaio Vidal, 106
Fone: (0144) 33.8879, 33.8521, 33.8733 - CEP 17.500

Mogi das Cruzes: Rua Prof. Floriano de Melo, 330
Fone: (011) 469.3490 - CEP 08.700

Novo Horizonte: Av. da Saudade, s/n
Fone: (0175) 42.1950 - CEP 14.960

Osasco: Rua Nathanael Titto Salmon, 268
Fone: (011) 801.9736 - CEP 06.000

Piracicaba: Rua Moraes Barros, 264
Fone: (0194) 34.5132 - CEP 13.400

Presidente Prudente: Rua Siqueira Campos, 699
Fone: (0182) 22.1044 - CEP: 19.100

Ribeirão Preto: Rua Amador Bueno, 1294/1302
Fone: (016) 634.6044, 634.4536, 625.9500
- CEP 14.100

Santana: Av. Gal. Ataliba Leonel, 379
Fone: (011) 267.7562 - CEP 02.033

Santos: Rua Itapura de Miranda, 158
Fone: (0132) 33.7127, 32.9550 - CEP 11.100

Santo André: Rua Juquiá, 555
Fone: (011) 444.3519, 444.5767 - CEP.: 09.000

São Bernardo do Campo: Av. Brig. Faria Lima, 360
Fone: (011) 443.4188 - CEP 09700

Sorocaba: Av. Dr. Eugênio Salermo, 157
Fone: (0152) 31.4877, 312065 - CEP 12.100

Tatuapé: Rua Henrique Setorio, 221
Fone: (011) 217.7505 - CEP 03.066

Taubaté: Rua Itambé, 38
Fone: (0122) 32.4829, 324900, 32.4867 - CEP 12.100

● Outros Estados

Florianópolis - SC

Rua João Pinto, 6 - 29 andar - s/203
Fone: (0482) 22.7690 - CEP 88.000

Recife - PE

Rua das Fronteiras, 160
Fone: (081) 222.1013 - CEP 50.000

UTILIZAÇÃO DO PITOT "S" NA AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA EM FONTES ESTACIONÁRIAS

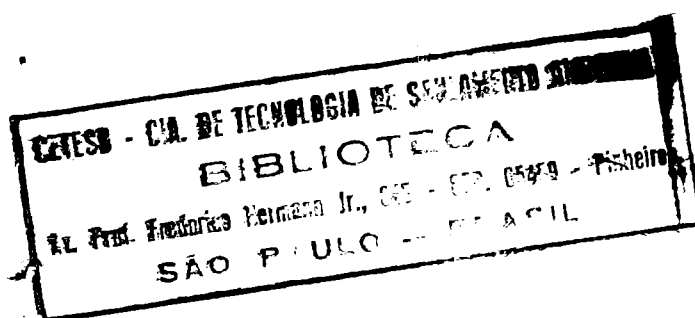
José Flávio Melhado Bezerra
Eng.^o Químico e Sanitarista

DIVISÃO DE FATORES E PADRÕES DE EMISSÃO

Milton Nório Sogabe

Eng.^o Civil

DIVISÃO DE PROJETOS DE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E RUÍDO



INTRODUÇÃO

No Brasil, a metodologia aceita pelos órgãos de controle do meio ambiente para amostragens em fontes estacionárias é a estabelecida pela U.S.E.P.A. De acordo com esta metodologia a amostragem de material particulado deve obedecer a condição de isocineticidade, que ocorre quando a velocidade do fluxo gasoso se iguala a velocidade de entrada da amostra na boquilha.

O Pitot "S" (Stausscheibe), equipamento utilizado para medir a velocidade do fluxo gasoso em dutos e chaminés, é um dos componentes da maioria das sondas dos trens de amostragens, sendo sua precisão fator de vital importância na obtenção das condições de isocineticidade.

Neste trabalho será descrito o Pitot "S" recomendado pela U.S.E.P.A. para integrar o trem de amostragem e a sua calibração.

DESCRIÇÃO DO PITOT "S"

O Pitot "S" é constituído por 2 tubos de igual diâmetro, sendo que a extremidade que é imersa no fluxo gasoso tem os tubos dobrados numa mesma direção (ortogonal à linha de eixo de união dos 2 tubos) mas em sentidos opostos, com as duas faces abertas paralelas (Fig. 1).

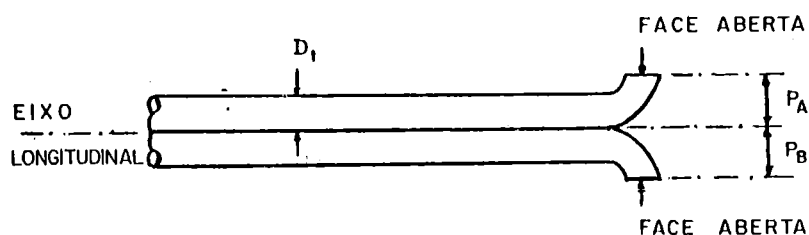


FIGURA 1 - Pitot "S" (Stausscheibe)

CLASS	8203
A	B 469.0
NO	14325

O Pitot "S" e alguns detalhes construtivos são apresentados nas figuras 2, 3 e 4 e para que o mesmo possa fazer parte de um trem de amostragem a U.S.E.P.A. estabelece as seguintes condições:

- Dt = diâmetro externo do tubo entre 0,5 e 0,95 cm;
- As distâncias do eixo longitudinal às faces abertas (P_A e P_B) devem ser iguais e estar entre 1,05 Dt e 1,5 Dt ($1,05 Dt < P_A = P_B < 1,5 Dt$);
- Atender os seguintes limites máximos de desalinhamento:

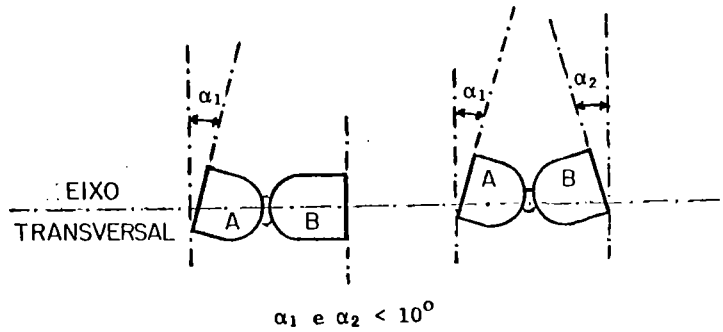


FIGURA 2 - Pitot "S" - Vista Frontal
. desalinhamentos de face

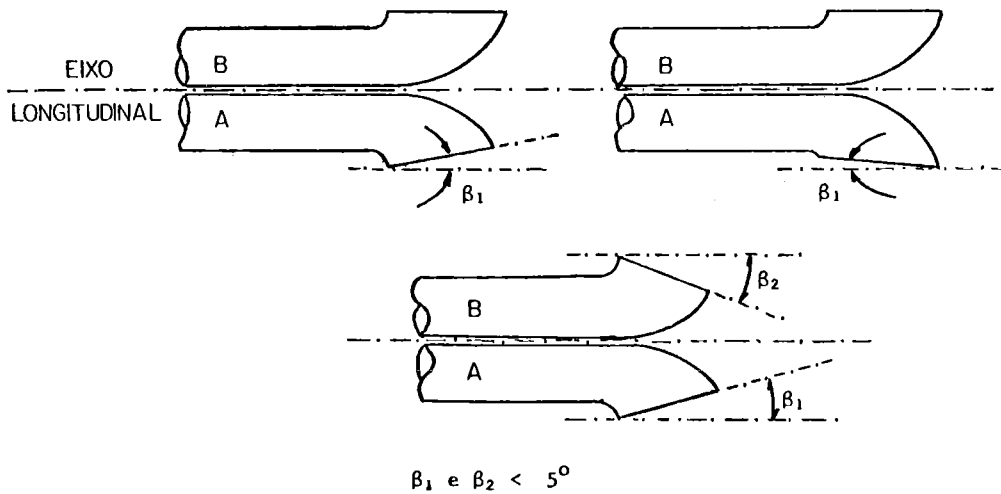


FIGURA 3 - Pitot "S" - Vista Superior
. desalinhamentos de face

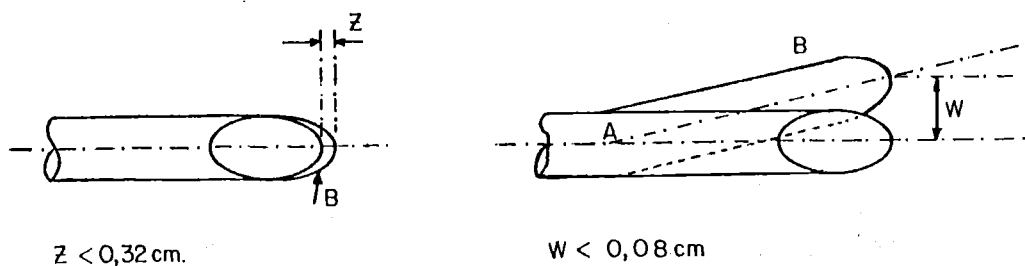


FIGURA 4 - Pitot "S" - Vista Lateral
. desalinhamentos máximos longitudinais

CALIBRAÇÃO DO PITOT "S"

Para calibração do Pitot "S", basicamente necessita-se de um túnel de vento, de um medidor de pressão diferencial e de um Pitot Padrão para ser utilizado como referência.

Túnel de vento

Para a construção deste equipamento devem-se tomar cuidados especiais, uma vez que, pequenas falhas construtivas podem levar a resultados totalmente insatisfatórios. Para dutos de seções circulares o diâmetro mínimo deve ser de 30 cm, enquanto que no caso de seções retangulares o menor lado deve ter, no mínimo, 25 cm.

Na seção de teste deve-se garantir um fluxo estável de maneira que o perfil de velocidade seja uniforme; desta forma a face aberta de impacto do Pitot "S" e do Padrão estarão imersos em fluxo gasoso de mesma velocidade. Deve-se evitar também, que a seção de teste seja influenciada por pulsações geradas pelo ventilador; isto pode ser conseguido instalando-se uma câmara de expansão. O ideal é que a seção de teste esteja numa parte do túnel constituída de material transparente (por exemplo acrílico) de forma que seja possível verificar os alinhamentos do equipamento a ser calibrado e o de referência. Uma configuração sugerida de seção de teste está na Figura 5.

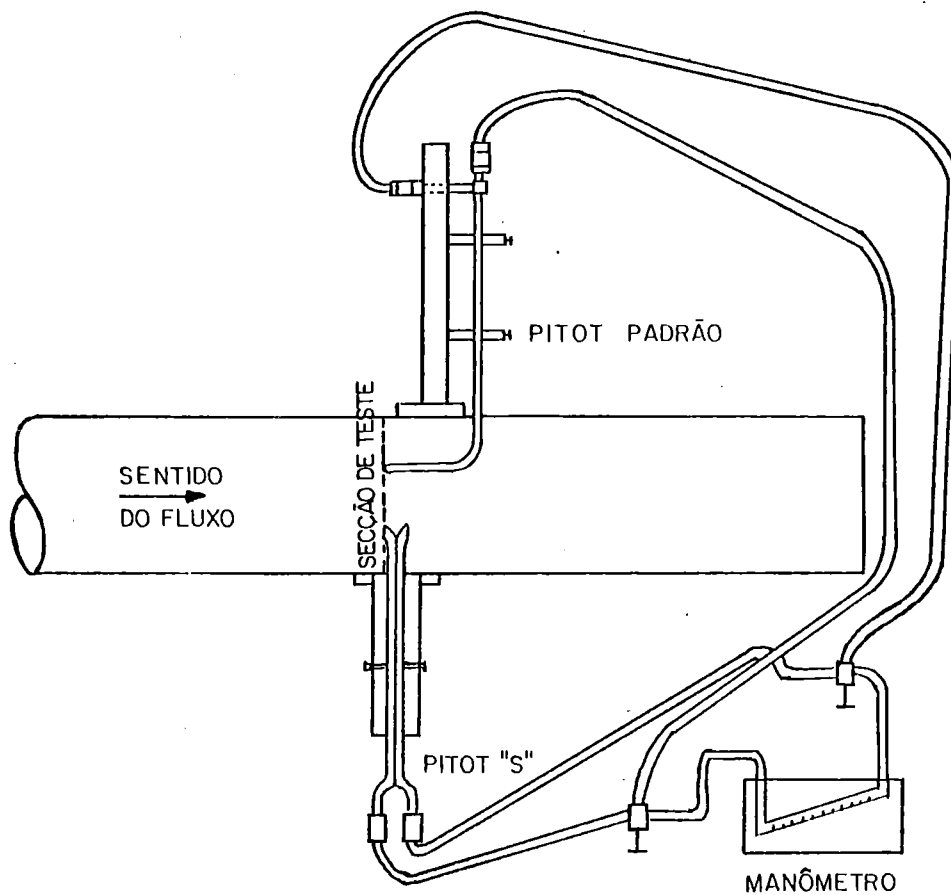


FIGURA 5 - Esquema de seção de teste para calibração

O túnel de vento, para a calibração do pitot "S", deve ser dimensionado de maneira que possa gerar fluxos gasosos com velocidades na faixa de 3 a 25 m/s⁽¹⁾.

A U.S.E.P.A.⁽²⁾ recomenda que o túnel tenha, no mínimo, 10 diâmetros (ou diâmetros equivalentes, no caso de seção transversal retangular) e que a seção de teste esteja a 8 diâmetros (ou diâmetros equivalentes) a jusante da última singularidade e a 2 diâmetros (ou

diâmetros equivalentes) a montante da singularidade seguinte à seção de teste. Segundo McCain⁽³⁾; o ideal é que o túnel tenha 19 diâmetros (ou diâmetros equivalentes), sendo a seção de teste localizada a 14 e 5 diâmetros à jusante e à montante respectivamente das singularidades adjacentes.

Pitot padrão

Dos tipos de Pitot Padrão existentes o mais comum é do tipo Prandtl de ponta hemisférica (Fig. 6). Para o Pitot Padrão do tipo Prandtl pode-se assumir um fator de correção de $0,99 \pm 0,01$ (4). No método 2 da U.S.E.P.A. (2) consta um Pitot Padrão de ponta hemisférica (Fig. 7) cuja principal diferença com o anterior é a menor distância entre os buracos de pressão estática e a ponta hemisférica do pitot. Este também possui um coeficiente de correção igual a $0,99 \pm 0,01$ (2).

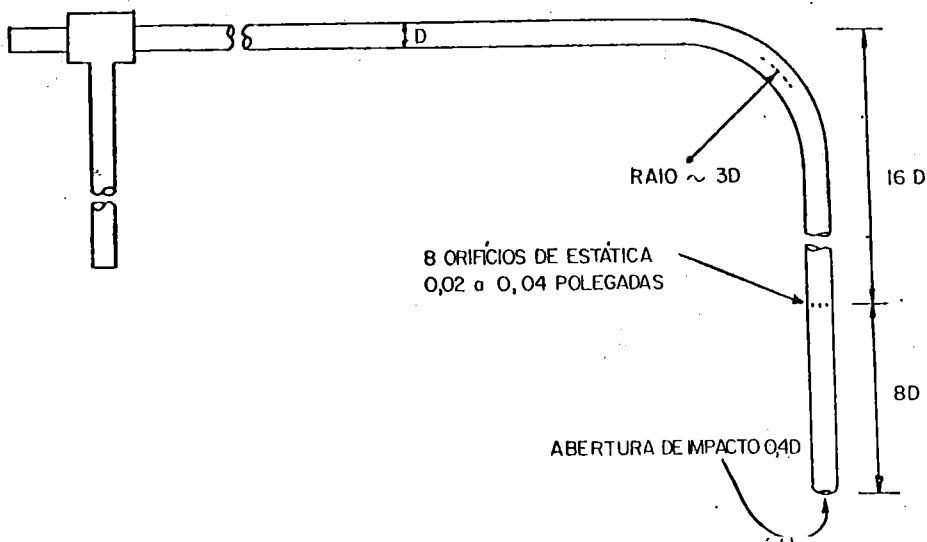


FIGURA 6 - Pitot Padrão tipo Prandtl de ponta hemisférica⁽⁴⁾

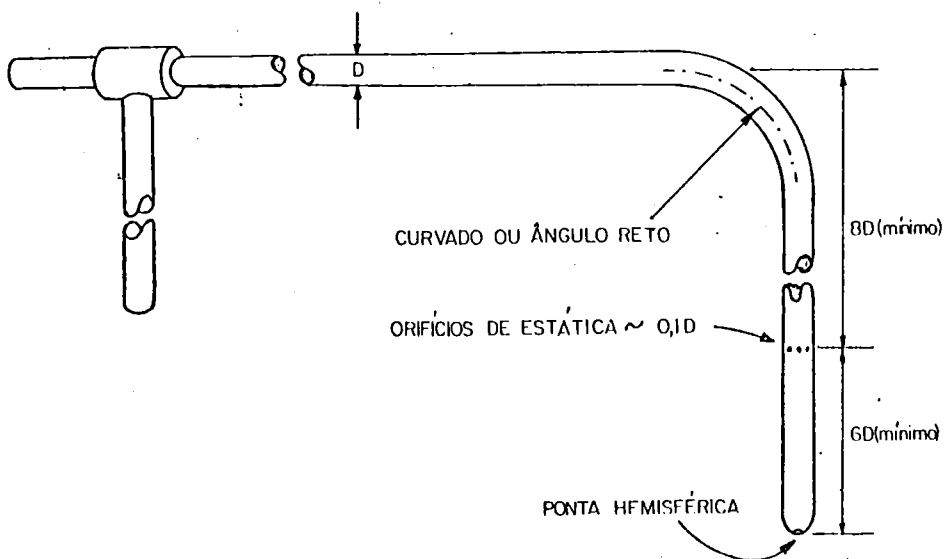


FIGURA 7 - Pitot Padrão recomendado pela USEPA, de ponta hemisférica⁽²⁾

A British Standards Institute - BSI ⁽⁴⁾ recomenda o uso de um Pitot Padrão de ponta elipsoidal (Fig. 8), cujo coeficiente de correção é função de suas características geométricas (Fig. 9).

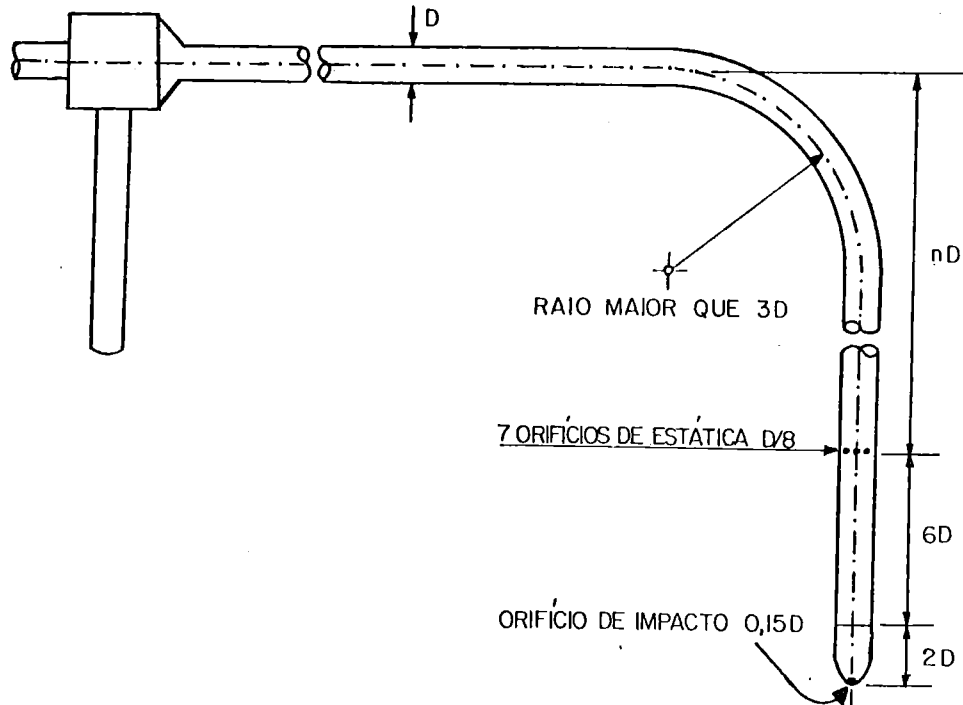


FIGURA 8 - Pitot Padrão do BSI, de ponta elipsoidal

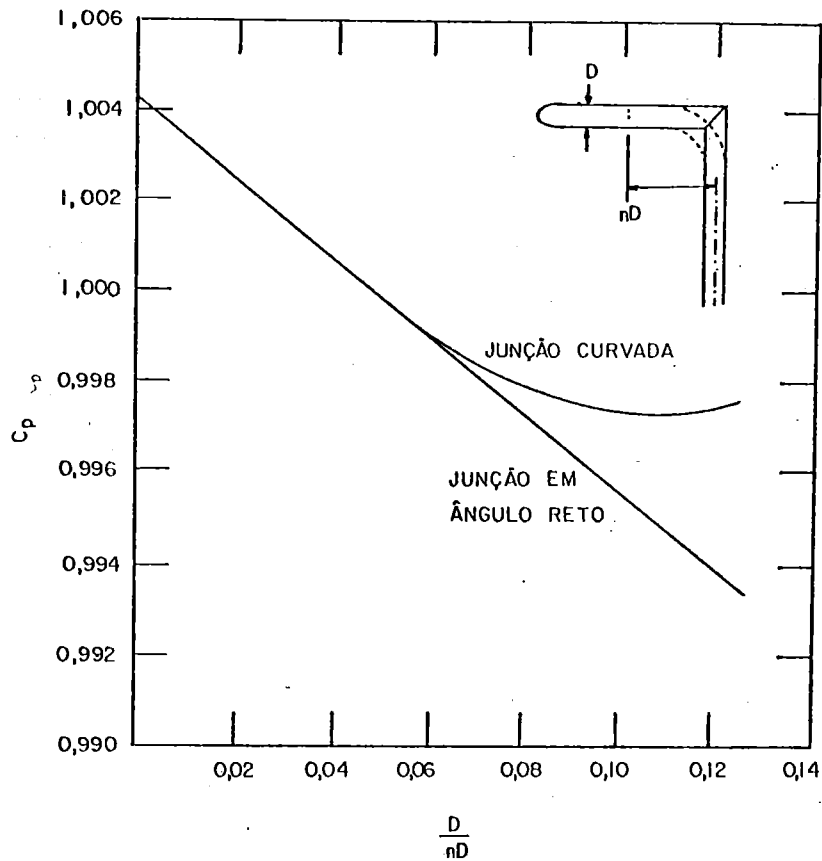


FIGURA 9 - Gráfico para determinação do fator de correção do Pitot Padrão da BSI

(4)

Medidores de pressão diferencial

Como medidor de pressão diferencial usualmente, utiliza-se manômetro inclinado que permita leituras com precisão de $\pm 0,13$ mm H₂O (0,005 pol.H₂O). Os tubos flexíveis que ligam os pitots ao manômetro devem ser verificados visualmente quanto ao seu estado.

Um teste de vazamento deve ser feito para o conjunto pitot, tubos flexíveis e manômetro, antes da introdução dos pitots no túnel de vento; e quando da ocorrência de vazamento o mesmo deve ser corrigido antes de se iniciar a calibração.

Calibração do Pitot "S"

Antes de se iniciar a calibração é necessário que o Pitot "S" seja identificado de maneira permanente. Quando o Pitot "S" é usado sem estar acoplado a uma sonda, os tramos que o compõem também devem ser identificados.

Para a calibração, recomenda-se a seguinte sequência:

- Inspeccionar o manômetro e no caso de usar um do tipo inclinado, verificar se o óleo está livre de contaminação. Observar se não há vazamento nos tubos flexíveis e reparar ou substituí-los se necessário;
- Nivelar e zerar o manômetro. Ligar o ventilador e permitir que o fluxo se estabilize. Estabelecer a velocidade desejada para o fluxo gasoso no túnel de vento e selar bem o orifício por onde entra o Pitot "S";
- Posicionar o Pitot Padrão no ponto de calibração e alinhar em direção do fluxo;
- Ler e anotar os valores de pressão de velocidade com o Pitot Padrão (ΔP_p). Um exemplo de Folha de Calibração é apresentado em anexo. Retirar o Pitot Padrão do duto, desconectá-lo do manômetro e fechar o seu orifício de entrada;
- Conectar o Pitot "S" ao manômetro. Abrir o orifício de entrada do mesmo no túnel e introduzir e alinhá-lo, de forma que a face aberta a ser calibrada esteja no mesmo ponto em que ficou estacionado o Pitot Padrão;
- Ler e anotar os valores de pressão de velocidade do Pitot "S" (ΔP_s). Retirá-lo do túnel e desconectá-lo do manômetro;
- Repetir os passos desde o posicionamento do Pitot Padrão no ponto de calibração até o item anterior, para três valores de pressão de velocidade;
- Ajustar o sistema para uma outra velocidade de fluxo gasoso e permitir que o fluxo gasoso se estabilize. Repetir novamente o procedimento como no item anterior.

Este procedimento deve ser repetido para diferentes velocidades de fluxo e para cada face aberta do Pitot "S".

Os cálculos para preenchimento da Folha de Calibração, em anexo, são explicados a seguir:

Fator de correção do Pitot "S" {Cp(s)}

$$Cp(s) = Cp(\text{padrão}) \sqrt{\frac{\Delta P_p}{\Delta P_s}}$$

Cp(s) = fator de correção do Pitot "S"

Cp(padrão) = fator de correção do Pitot Padrão

ΔP_p = pressão de velocidade medida com o Pitot Padrão

ΔP_s = pressão de velocidade medida com Pitot "S"

Fator de correção médio do Pitot "S" { \bar{C}_p }

Este valor é definido para cada conjunto de valores e corresponde à média dos Cp(s) determinados para cada tomada.

Velocidade média do fluxo

Para cálculo da velocidade média do fluxo gasoso para cada conjunto de tomadas usar a seguinte equação:

$$\bar{V} = K \cdot C_p \sqrt{\frac{T \cdot \overline{\Delta P_p}}{P \cdot M}}$$

onde:

\bar{V} = velocidade média na seção de teste para o conjunto de tomadas (m/s)

K = constante do tubo pitot = 34,47 m/s $\left[\frac{(\text{g/g mol}) (\text{mmHg})}{(\text{°K}) (\text{mmH}_2\text{O})} \right]^{1/2}$

C_p = coeficiente de correção do Pitot Padrão = adimensional

T = temperatura ambiente durante a calibração (°K)

P = pressão barométrica durante a calibração (mmHg)

$\overline{\Delta P_p}$ = média dos três valores de ΔP_p do conjunto (mmHg)

M = massa molecular do gás = 29 (g/g mol), nas condições normais de calibração em laboratório.

O Pitot "S" só deve ser usado quando:

- Todos os desvios (tanto de um como do outro tramo que compõem "S") forem < 0,01
- A diferença do valor de C_p entre as duas faces, para uma mesma velocidade, deve ser menor ou igual a 0,01. Para valores superiores a este, os tramos do Pitot "S" não podem ser usados indistintamente.

O PITOT "S" NA AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA

Nas amostragens de chaminé normalmente o Pitot "S" é usado como componente de um conjunto e isto pode provocar, no seu fator de correção, diferenças apreciáveis devido às interferências aerodinâmicas dos componentes.

Para se minimizar as interferências aerodinâmicas, o conjunto deve guardar as seguintes restrições:

- O espaço livre entre o Pitot "S" e a boquilha deve ser de pelo menos 19 mm, quando da utilização da maior boquilha disponível (Figuras 10 e 11).
- A distância entre a ponta do sensor do termopar e o Pitot "S" deve ser de 19 mm quando o termopar estiver ao lado do Pitot "S" (Fig. 12) e de 50 mm quando o sensor estiver recuado (Fig. 13).
- A bainha da sonda deve manter uma distância mínima de 76 mm do centro do Pitot "S" (Fig. 12).

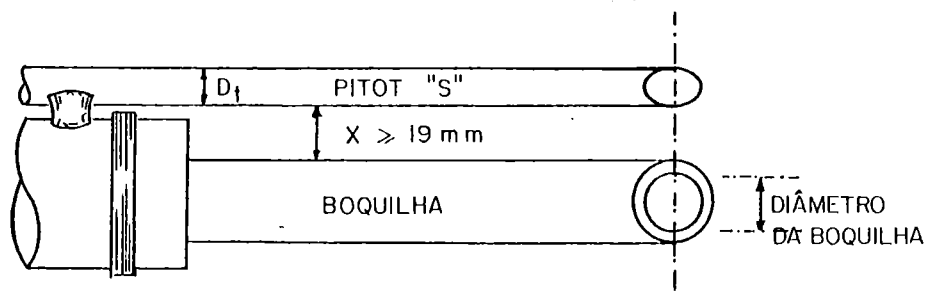


FIGURA 10 - Distância mínima requerida entre a boquilha e Pitot "S" com D_t entre 4,8 e 9,5mm

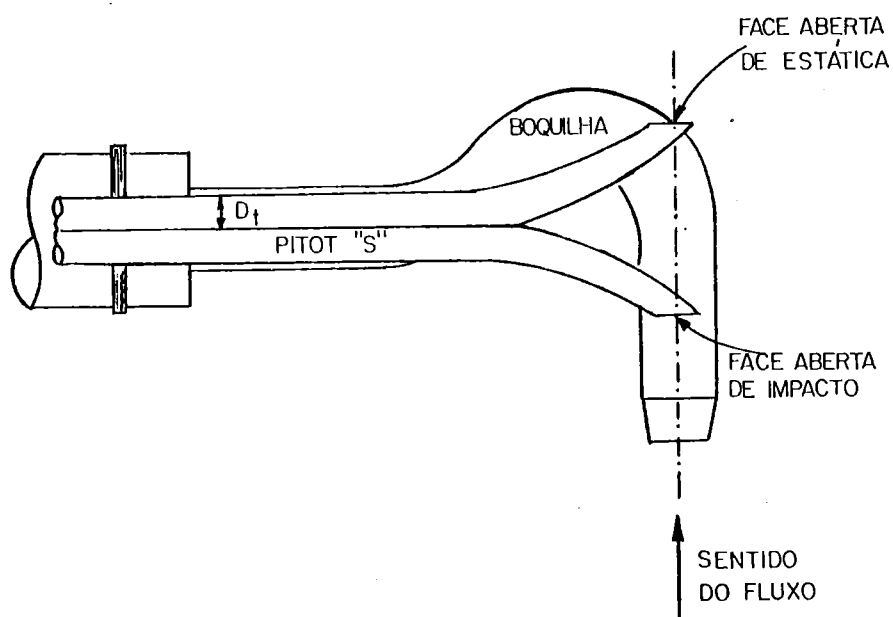


FIGURA 11 - Posicionamento das faces abertas do Pitot "S" em relação às linhas de fluxo, na verificação da distância mínima de 19 mm, conforme figura 10.

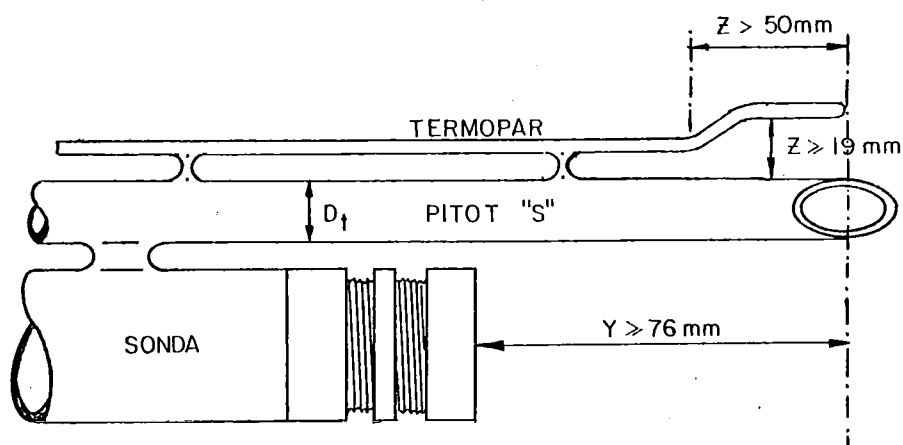


FIGURA 12 - Distâncias mínimas do termopar e bainha da sonda do Pitot "S" de D_t entre 4,8 e 9,5 mm.

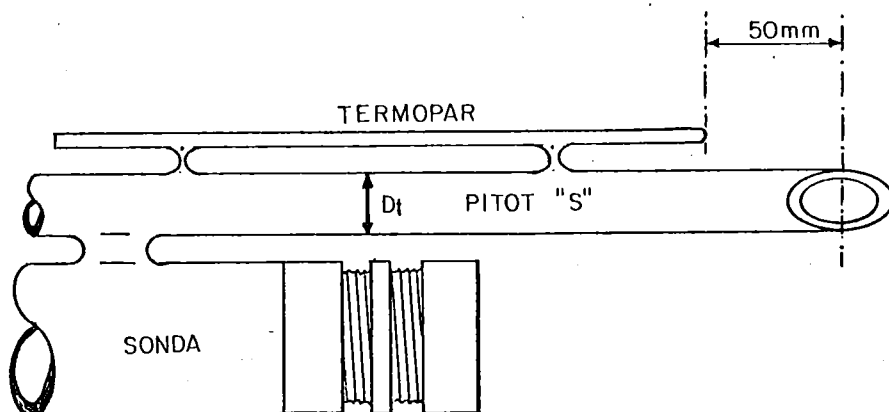


FIGURA 13 - Distância mínima entre o termopar e o Pitot "S", para uma posição alternativa, de D_t entre 4,8 e 9,5 mm.

Além das distâncias, anteriormente citadas, deve-se observar o bloqueio causado pela bainha da sonda na seção de teste. Principalmente nos túneis de vento de pequeno diâmetro o bloqueio causado pela bainha da sonda pode acarretar variações significativas no valor do fator de correção. Para se verificar o percentual de bloqueio, determinar a área projetada conforme exemplo mostrado na Figura 14.

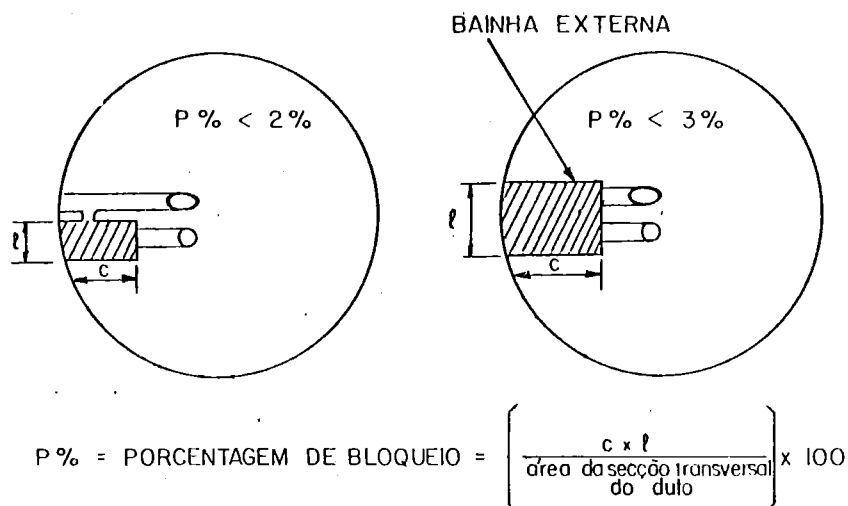


FIGURA 14 - Modelos de áreas projetadas

Com relação ao tamanho das boquilhas a serem utilizadas para a calibração do Pitot "S", Vollaro (4) recomenda que as mesmas sejam escolhidas em função da velocidade do fluxo gasoso, conforme é mostrado na tabela 1.

TABELA 1 - DIÂMETRO DA BOQUILHA A SER UTILIZADA⁽⁴⁾

VELOCIDADE DO FLUXO (m/s)	DIÂMETRO DA BOQUILHA	
	(mm)	(polegada)
5 a 7,5	12,70	1/2
7,5 a 12,5	9,52	3/8
12,5 a 23	6,35	1/4
23 a 25	3,18	1/8

Ao se introduzir o Pitot "S" no orifício de calibração do túnel de vento, podem ocorrer desalinhamentos que poderão acarretar erros significativos no fator de correção. Portanto, o Pitot "S" deve estar nivelado e, durante a calibração, suas faces abertas, deverão ser mantidas perpendiculares às linhas de fluxo (sem rotação no eixo longitudinal do Pitot "S". A face aberta de impacto na seção de teste não deve sofrer rotação em relação à linha perpendicular ao eixo longitudinal que passa no orifício de calibração. As figuras 15 e 16 apresentam as porcentagens de erro na medida da velocidade quando se gira o Pitot "S" no eixo longitudinal e no eixo vertical à linha longitudinal que passa pelo orifício de calibração⁽¹⁾.

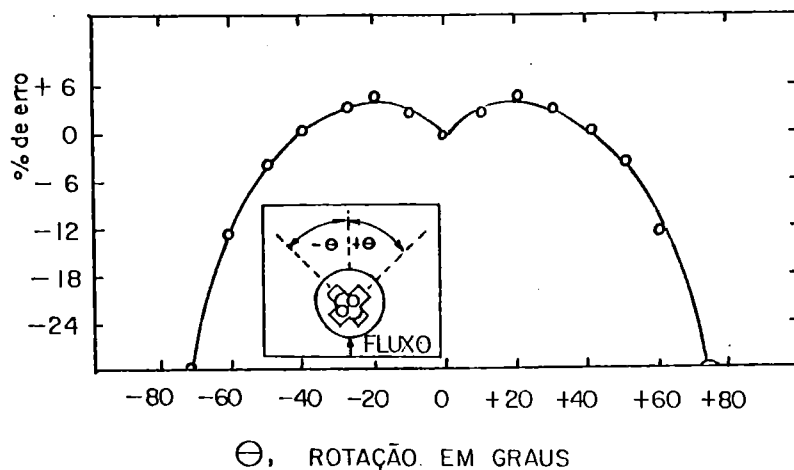


FIGURA 15 - Porcentagem de erro na velocidade versus rotação em torno do eixo longitudinal ⁽¹⁾

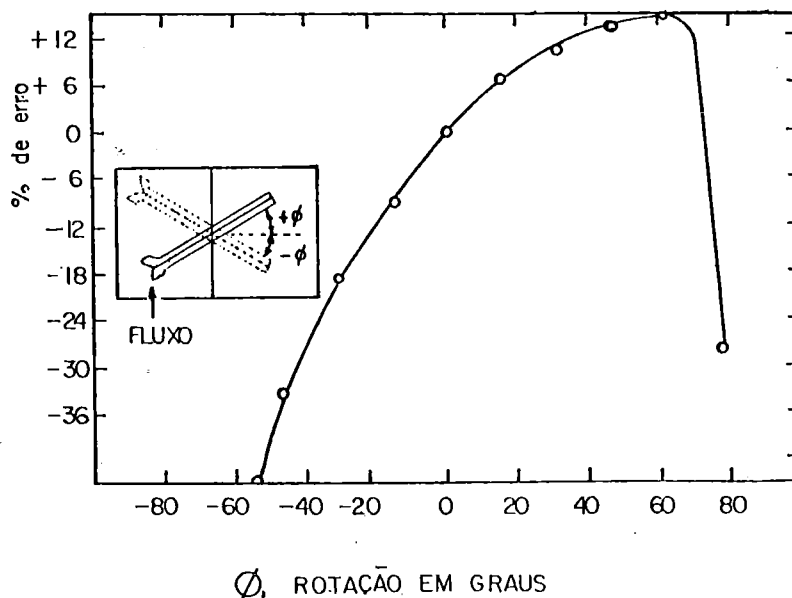


FIGURA 16 - Porcentagem de erro na velocidade versus rotação em torno da vertical do eixo longitudinal, que passa no orifício de calibração ⁽¹⁾

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Shigehara (5) considera que em uma amostragem isocinética o erro máximo é de 15.4% e a utilização do Pitot "S" como o principal fator de erro.

Segundo Brenchley (6), o erro máximo ocasionado pelo Pitot "S" é de 10% e portanto é de fundamental importância que tanto sua utilização como sua calibração sejam feitas de maneira bastante criteriosa.

O Fator de Correção do Pitot "S" obtido em laboratórios necessita ainda de um estudo mais acurado de modo a representar o real fator multiplicativo entre o valor medido e o real.

Hoje já se sabe que em certas faixas de velocidade o Fator de Correção do Pitot "S" tem um comportamento irregular (Fig. 17), pois tem se verificado que este é função da variação do número de Reynolds que por sua vez depende de densidade do fluido, da velocidade, do diâmetro do túnel e da viscosidade dinâmica, que não é a mesma no ambiente de calibração e no local do teste ⁽⁷⁾.

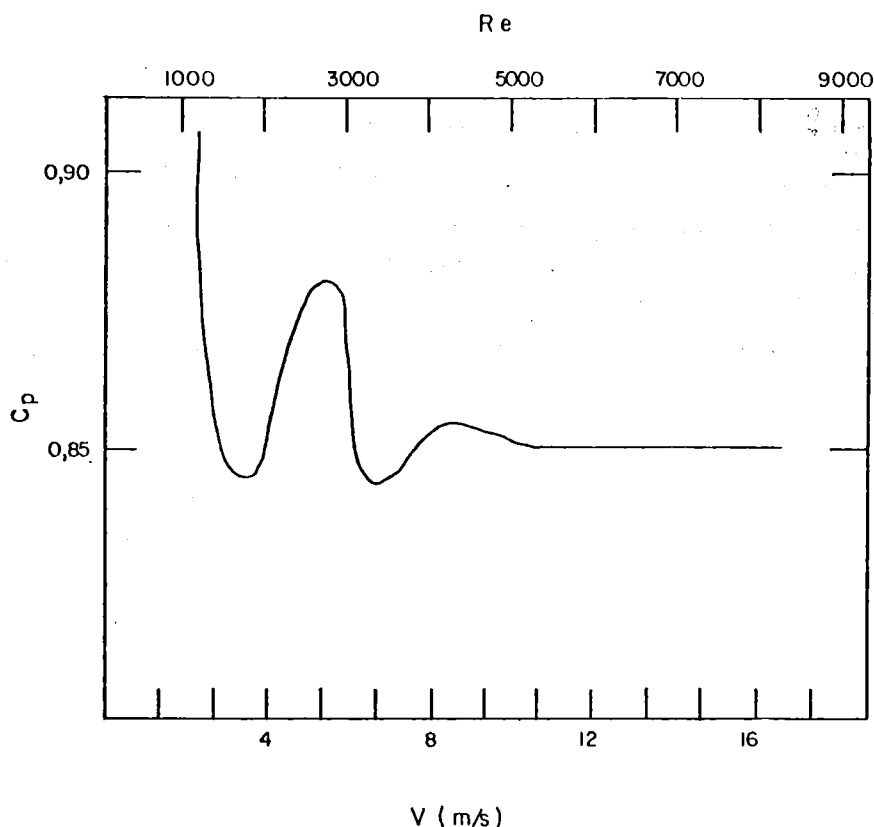


FIGURA 17 - Correlação do coeficiente de correção do Pitot "S" e número de Reynolds a 35°C (7).

Sempre que se conduzir uma calibração em laboratório, é recomendável que sejam medidas todas as distâncias dos componentes da sonda (boquilha, termopar, bainha da sonda) ao Pitot "S" de forma que com uma rápida verificação em campo, se possa concluir se estas características se mantiveram inalteradas durante o transporte do equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. USEPA. *Quality assurance handbook*. January 15, 1980. v.III.
2. USEPA. *Method 2 - Determination of stack gas velocity and volumetric flow rate (Type "S" Pitot tube)*. Federal Register, Revisão de junho de 1978.
3. MCCAIN, J.D. *Curso de amostragem em chaminé*. CETESB, 14 a 20 de março de 1984.
4. VOLLARO, R.F. Guidelines for Type "S" Pitot tube calibration. In: USEPA. *Stack sampling technical information - a collection of monographs and papers*, outubro 1978. v. II.
5. SHIGEHARA, R.T; TODD, W.F. & SMITH, W.S. Significance of errors in static sampling measurements. *63rd Annual Meeting of the Air Pollution Control Association*, St Louis, Missouri, 1970. paper 70-35.
6. BRENCHLEY, D.L.; TURLEY, C.D.; YARMAC, R.F. *Industrial Source Sampling*. Ann Arbor Science Publisher Inc., 1973.
7. BLAGUN, B.E.; MITCHELL, W.J. Better check your Reynolds number. *Pollution Engineering*, may 1980. p.78-79.

BIBLIOGRAFIA

1. BEZERRA J.F.M.; SOGABE M.N. *Curso de Amostragem em chaminé*. São Paulo, CETESB, 1984.
2. BUFFALO FORGE COMPANY. *Fan Engineering*. 8.ed. Buffalo (NY), 1983.
3. LELAND P.J. et alii. *Correction of S Type Pitot static tube coefficient when used for isokinetic sampling from stationary sources*. Department of Mechanical Engineering, Iowa State University, June 1976.
4. PERRY, P.H.; CHILTON, C.H. *Chemical engineer's handbook*. 5.ed. McGraw Hill.

ANEXO

IDENTIFICAÇÃO DO PITOT "S": _____ DATA: _____

TRAMO: _____

CONJUNTO	TOMADA	ΔP_p	ΔP_s	$C_p(s)$	$C_p(s) - \bar{C}_p$	VELOCIDADE MÉDIA \bar{V}
A	1					
	2					
	3					
B	1					
	2					
	3					
C	1					
	2					
	3					
D	1					
	2					
	3					

EXEMPLO DE FOLHA DE CALIBRAÇÃO DO PITOT "S"

Data Aguis.: 02/08/85
Indic.:
Livraria:
Preço: Cr\$ 1:00
Data Tomba: 02/08/85



CETESB

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
Av. Professor Frederico Hermann Jr., 345 - São Paulo - SP. - CEP 05459
Telefone: (011) 210-1100 (Telex (011) 222-46-CTS - BR