

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO MECÂNICO

10  
NOTA 10 (des)

Trem de Amostragem de uma chaminé

Aluno:

Fernando Carlos Fuchs

Prof. Orientador:

Hildo Para

1988

**DEDICATÓRIA**

Dedico esta obra às pessoas que acreditaram em  
mim e que sempre me ajudaram, mesmo nos momentos mais difíceis,  
**MEUS PAIS.**

**Serviço de Bibliotecas  
Biblioteca de Engenharia Mecânica**

## AGRADECIMENTOS

Ao meu Professor orientador Hildo Pera, que me deu toda a orientação e liberdade para a conclusão deste trabalho.

A Engenheira Marilin Mariano dos Santos, que possibilitou o acesso a um grande acervo bibliográfico que foi de fundamental importância.

Ao colega Jeslei Gonçalves Rodrigues, que muito me ajudou na confecção das figuras que ilustram este trabalho e a todos meus colegas da AMCU EQUIPETROL.

## P R E F Á C I O

Esta obra é uma coletânea e um estudo sobre a amostragem de uma chaminé.

Foram feitas e acompanhadas algumas amostragens e a partir disto, foi colocado uma parte com procedimentos experimentais já previamente normalizados.

A secção que corresponde ao apêndice, consta de algumas figuras que ilustram este trabalho.



## S U M Á R I O

- INTRODUÇÃO	pg 01
- OBJETIVOS	pg 01
- PLANEJAMENTO	pg 02
- DESCRIÇÃO	pg 04
- AMOSTRA ISOCINÉTICA	pg 17
- PREPARAÇÃO DO TREM	pg 19
- TREM DE AMOSTRAGEM	pg 20
- CALIBRAÇÕES	pg 22
- AMOSTRAGEM DO MATERIAL PARTICULADO	pg 31
- AMOSTRAGEM DOS GASES	pg 33
- PREPARAÇÃO DO RELATÓRIO	pg 34
- PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	pg 43
- CONCLUSÕES	pg 90
- APÊNDICE	pg 91

## 1. INTRODUÇÃO

### PRINCÍPIO DE AMOSTRAGEM

A determinação da quantidade e da qualidade dos efluentes dos processos e operações que poluem o ar, constitui-se em grande interesse para o controle da poluição do ar para o governo, como para os responsáveis por esta poluição.

O que será tratado por "amostragem em chaminé", tendo em vista a especificidade dos procedimentos e dos equipamentos, deve ser tratada como um capítulo especial no assunto de amostragem de poluentes atmosféricos.

As substâncias poluentes são lançadas ao ar através de um fluxo gasoso, tratando-se de um sistema disperso de um sólido líquido ou gás, considerado poluentes em um gás (ou mistura de gases) considerado inerte. A condição de operação da fonte vai alterar as características do efluente, esta operação é diretamente alterada quando da variação da temperatura, pressão, umidade, ciclo de operação etc.

A amostragem em chaminé, deve coletar uma alíquota dos efluentes ou sistema disperso representativo daquilo que é emitido pela fonte. A partir dessa amostra deve-se separar a substância poluente para análise para um cálculo de sua quantidade, deve-se relacionar a quantidade de poluente medido na amostra com o total emitido pela fonte poluidora.

Portanto, a técnica de escolha do local de amostragem, determinação do período de amostragem, número de pontos a serem amostrados, volume da amostragem, determinação, escolha ou mesmo desenvolvimento de equipamentos de amostragem, procedimento de coleta de amostras, de determinação das características do fluxo gasoso da chaminé e da amostra a ser coletada, tais como peso molecular, temperatura, pressão, vazão, velocidade, umidade etc., as técnicas de laboratório para análise de poluentes, se constituem no "Amostragem em Chaminé".

### OBJETIVOS DA AMOSTRAGEM EM CHAMINÉ

O objetivo básico de uma amostragem em chaminé é

é determinar qual a concentração do poluente no gás inerte ou qual a quantidade de poluente emitido na unidade de tempo em que temperatura, pressão, velocidade, umidade, etc. o efluente está sendo emitido.

O objetivo final da amostragem será a utilização dessas informações e dependendo do uso modifica-se o procedimento de amostragem para melhor atingi-lo. Geralmente os objetivos de amostragem em chaminé podem ser divididos em quatro classes:

A) FISCALIZAÇÃO

Existe um limite máximo de emissão para cada efluente e, devemos saber se a emissão está de acordo com estes limites. Neste caso a amostragem deve ser executada de acordo com o estabelecido, em conjunto com o limite máximo de emissão permissível. Em geral procura-se condições médias que representem valores médios emitidos em certo intervalo de tempo.

B) PARÂMETROS DE PROJETO

Determinação de condições extremas ou de pico, para, no projeto ou seleção de um equipamento para tratar o efluente, utilizar as piores condições o que traria um fator de segurança para outras condições.

C) FATORES DE EMISSÃO

Chegar a emissão média de um determinado tipo de fonte em função de uma característica desta fonte.

D) DETERMINAR A EFICIÊNCIA DE MEDIDAS DE CONTROLE ADOPTADA

Determinações antes e depois da medida de controle ou do equipamento de controle para cálculos de eficiência.

PLANEJAMENTO DE UMA AMOSTRAGEM

Esta é a fase inicial de qualquer amostragem. O desenvolvimento deve ser cuidadoso para evitar desperdícios de tempo e recursos, abaixo serão colocados os passos da fase de planejamento.

1º) Conhecer a fonte a ser amostrada



Deve-se ter um perfeito conhecimento da fonte poluidora, pois este procedimento traz informações fundamentais para a amostragem. É necessário conhecer as matérias primas, reativos e combustíveis que entram no processo, seus produtos, características técnicas deste processo como temperatura, capacidade, ciclo de operação, pressão, características físicas dos equipamentos, como a forma de exaustão, dimensões da chaminé ou dutos onde a amostragem poderia ser realizada, com desenhos onde as singularidades do sistema de exaustão estejam mostradas.

#### 2º) Estudo das emissões

Deve-se estimar as características básicas do seu efluente, tanto para os possíveis poluentes como ao gás inerte que o carrega. É nesta fase que, se decide sobre quais os poluentes a serem amostrados, a decisão sobre quais poluentes se devem amostrar (qualidade) deve ser tomada antes da amostragem a qual irá confirmar ou não a presença do poluente. Através desse estudo chega-se a escolha dos métodos de coleta e análise a serem adotadas e também dos equipamentos.

#### 3º) Escolha do local da amostragem

Este local deve ser tal que nos permita coletar uma amostra representativa daquilo que está sendo emitido pela fonte. O melhor critério é da escolha de um local onde a concentração do poluente esteja uniformemente distribuída no fluxo gasoso (inerte)

Procura-se sempre trechos de dutos retos, longe de singularidades (cotovelos, bifurcações, alargamentos etc.) que causam perturbações ao fluxo gasoso, isto é fundamental para o material particulado.

O aspecto prático também deve ser considerado / tais como a existência ou não de trecho de dutos retos, facilidade e segurança de acesso etc.

#### 4º) Preparação do local

Construção de plataformas, execução de furos, providenciar energia elétrica, tomada de água etc., no local da amostragem.

5ª) Tomada preliminar das condições do fluxo gasoso

Determinação de velocidade, vazão, temperatura, umidade, pressão e peso molecular da mistura gasosa a ser amostrada. Estes / dados serão básicos na calibração do trem de amostragem.

6ª) Preparação da amostragem

Seleção dos equipamentos, reagentes e materiais a serem levados ao campo.

DESCRIÇÃO SUCINTA DE UM TREM DE AMOSTRAGEM

Existem muitas combinações de equipamentos, para a amostragem de chaminé, variando de acordo com o objetivo. De maneira geral um trem de amostragem segue a combinação esquematizada na figura "1".

A) BOQUILHA

Ponto de entrada da amostra no trem da chaminé. Seu objetivo básico é proporcionar uma velocidade de entrada da amostra, igual a velocidade do gás na seção da chaminé onde está se realizando a amostragem.

B) SONDA DE AMOSTRAGEM

Um trecho de tubulação na qual é rosqueada a boquilha, e que é introduzida na chaminé para a coleta da amostra. Vários podem ser os tipos de sondas: de aço sem aquecimento, de aço com aquecimento / (para manter a amostra na temperatura da chaminé), de vidro etc.

C) EQUIPAMENTOS DE COLETA DO POLUENTE DA CHAMINÉ

O equipamento de coleta de poluentes deve primeiro separar o poluente do gás inerte e posterior análise em laboratório.

D) MEDIDAS DE VAZÃO OU VOLUME, TEMPERATURA E PRESSÃO

Para os cálculos de emissão, os parâmetros acima devem ser perfeitamente conhecidos.



#### E) BOMBA DE VÁCUO

A amostra deve ser aspirada para dentro do trem de amostragem. Este é o trabalho da bomba de vácuo. Um ejeter também pode ser utilizado desde que forneça a vazão de amostragem necessária, contra a perda de carga representada pelo próprio trem de amostragem. O trem de amostragem está mostrado na figura "2".

#### BOQUILHAS

As boquilhas são comercialmente encontradas nas dimensões padronizadas de 1/4", 3/8", 1/2", 5/8" e 1" (FIGURA "3"), desta forma a escolha do diâmetro da boquilha será função da vazão de amostragem a ser fixada no medidor.

$$Q_m = V_c \cdot A_b \cdot T_m / T_c \cdot P_c / (P_b - P_m)$$

$Q_m$  = vazão de amostragem nas condições de medidor (pé<sup>3</sup>/min)

$V_c$  = Velocidade da chaminé (pé/min)

$A_b$  = área da boquilha (pé<sup>2</sup>)

$T_c$  = Temperatura da chaminé (°R)

$T_m$  = Temperatura do medidor (°R)

$P_c$  = pressão da chaminé (pol Hg)

$P_b$  = pressão barométrica (pol Hg)

$P_m$  = pressão do medidor (pol Hg)

O volume do vapor  $V_v$  nas condições do medidor de vazão, corresponde a quantidade de condensado ( $V_w$ ) é dado por

$$V_v = V_w \cdot R \cdot T_m / \text{Mol} \cdot P_m$$

$V_v$  = Volume de vapor (pé<sup>3</sup>/min)

$R$  = Constante dos gases perfeitos

$T_m$  = Temperatura do medidor (°R)

Mol = Massa molecular de H<sub>2</sub>O

$P_m$  = Pressão do medidor.

Cálculo da percentagem volumétrica de  $H_2O$

$$f = V_m / V_m + V_v$$

$V_v$  = volume de ar seco, na coleta de umidade (pé 3/min)

Correção da vazão

$$Q_m = Q_n \cdot f$$

#### COLETORES DE AMOSTRAS

Chamaremos de  $W$  a quantidade de poeira coletada.

Existem vários tipos de coletores de partículas, deles são feitas as determinações de peso antes e após a amostragem, cuja diferença representa o valor / de  $W$ .

$$X = P_f - P_i$$

$P_f$  = peso final do filtro

$P_i$  = peso inicial do filtro.

#### PRINCIPAIS TIPOS DE FILTROS

##### CERÂMICA

Feito de cerâmica com formato de dedal e que tem como maior vantagem na sua resistência a umidade e altas temperaturas, podendo ser reutilizado.

##### PAPEL

É economicamente mais barato, tem o mesmo formato do anterior mas não é reutilizável e devem ser tomados cuidados especiais com temperaturas menores que  $149^{\circ}C$

##### FIBRA DE VIDRO

Tem formatos e eficiências variáveis, dependendo de sua utilização e suportam temperaturas de até  $540^{\circ}C$ . Quanto ao seu formato e dimensão, o mesmo irá depender do tipo de Holder (recipiente onde é instalado o filtro) que é adaptado ao trem de amostragem como mostram as figuras "4, 5, 6 e 7".

### BORBULHADORES (impactadores ou "impingers")

Este coletor pode ser utilizado para coletas como absorção, condensação e reações químicas. Desde que a coluna interna esteja provida com pratos impactadores, os mesmos pode ser utilizados / como coletores de partículas sólidas, já que a extremidade inferior desta coluna se apresenta com dimensões reduzidas de tal forma que a passagem do gás se faz em alta velocidade, indo de encontro com o prato de impactação e assim pode ser coletado (FIGURAS "8 e 9").

### MEDIDORES DE VAZÃO, VOLUME E VELOCIDADE

#### 1) TUBO PITOT

A sua função é de medir a velocidade de fluxos gasosos, é um instrumento de fácil manuseio e de alta precisão.

O mais conhecido é o Pitot Standard que, em 2 tubos concêntricos, onde o tubo interno mede a pressão total e o outro mede a pressão estática, dentro de uma corrente de ar. (FIGURAS "10 e 11").

Para a tomada destas medidas, utiliza-se um manômetro em "U" conectado ao tubo pitot, sendo que a diferença entre a pressão total e a estática é a pressão de velocidade que é indicada no manômetro. A pressão de velocidade pode ser usado para o cálculo da velocidade da corrente de gás desde que a densidade seja conhecida.

$$V = \sqrt{2 gh}$$

g = aceleração da gravidade

h = altura de coluna de ar

$$V = 85,48 C_p \sqrt{\frac{T_f}{P_f \cdot M}} \sqrt{V_p}$$

C<sub>p</sub> = coeficiente do tubo pitot (no caso do pitot standard)

C<sub>p</sub> = 0,99

P<sub>f</sub> = pressão absoluta do fluxo

T<sub>f</sub> = temperatura absoluta do fluxo



M = massa molecular do gas

Vp = pressão de velocidade

A massa molecular do gás, que normalmente será o próprio ar, deverá ser corrigida ora com a porcentagem de CO e CO<sub>2</sub> contidos na corrente gasosa ou relacionada com a umidade contida no fluxo. Como o fluxo de ar não é uniforme em toda sua extensão, é necessário obter uma medida de pressão de velocidade, então devemos selecionar um ponto de tomada / de medidas em um local onde o fluxo gasoso é o mais uniforme possível, sem turbulências.

Para o caso de duto de seção circular, o ponto a partir do qual o fluxo torna-se uniforme está localizado a 8 diâmetros da jusante do fluxo e, a 2 diâmetros a montante do fluxo e o número de pontos / da seção a serem medidas neste caso, é igual a 12. Se a seção do duto for quadrada ou retangular é utilizado o diâmetro equivalente determinado por:

$$\text{diâmetro equivalente} = 2 \frac{(\text{comprimento} \times \text{largura})}{(\text{comprimento} + \text{largura})}$$

Esta situação é na maioria das vezes teórica e, sendo assim, a escolha do ponto de tomada de medidas pode ser obtida através do gráfico de número mínimo de ponto e da tabela de localização dos pontos / transversais.

O tubo de pitot, contudo, possui limitações para velocidades inferior a 2,5 m ou superiores a 21,7 m. Existe um outro tipo de tubo de pitot, o tubo pitot "S" (Stenschlebe ou tipo reverso) que deve ser utilizado no caso de fluxo gasoso, por conter grande quantidade de material / particulado, pois neste caso, podem surgir problemas de entupimento nos orifícios de tomada de pressão estática. Para esta utilização devem ocorrer uma calibração em função do tubo pitot standard.

Para uma tomada de velocidade no campo, é necessário a seguinte aparelhagem:

1. Tubo pitot - tipo "S" ou standard
2. Manômetro diferencial - manômetro inclinado

3. Medidor de temperatura
4. Barômetro
5. Analisador de gás Orsat
6. Tubo de sílica gel
7. Bomba de vácuo
8. Medidor de volume

## 2) DRY GAS METER

Estes medidores medem a vazão de 5 a 5000 l/min à pressões acima de 250 lb/pol<sup>2</sup>.

Este medidor consiste de uma caixa selada, exteriormente, duas válvulas de deslizamento, dois foles, 4 mostradores de 1, 10, 100 e 1000 pés cúbicos por revolução e um sistema de fuga. Na primeira / figura o gás entra no medidor e passa ao lado esquerdo pela válvula de deslizamento enchendo os foles do lado esquerdo e, forçando o gás a sair da câmara esquerda. Quando este folo está totalmente estendido, as válvulas de deslizamento mudam e dirigem o gás entrante para a câmara do lado direito. Isto força o gás da câmara do lado direito, isto está colocado nas figuras 12 A e B.

Quando os 2 foles estão inteiramente estendidos as válvulas de deslizamento novamente mudam e esvaziam os foles separadamente. (FIGURAS "12C" e "12D").

## 3) WET TEST METERS

Consiste de um recipiente, com um tambor rotativo, imerso em dois terços de água. O tambor está dividido em 4 seções, cada qual tem uma entrada e uma saída. Quando o gás entra no medidor, ele coloca em ação uma força de empuxo que gira o tambor no sentido horário. Quando um quadrante torna-se cheio, um novo quadrante roda para a posição de enchimento e o cheio começa a expelir gás, através de sua saída. Se a alimentação for constante o tambor rodará, suavemente.

Junto ao medidor está um manômetro de água para medir a pressão diferencial interna e externa e um termômetro para medida da



medida da temperatura do gás entrante. O funil de enchimento e o escoamento e enchimento dos registros, são usados para manter o nível da água no ponto de calibração. A mínima e máxima vazão do Wet test Meter é normalmente entre 1 a 80 l/min. respectivamente.

Uma baixa vazão, resulta em certa perda por atrito e a alta vazão causa excessiva pressão diferencial. Wet test Meters são mais frequentemente usados para calibrar padrões secundários, mas também podem ser usados para medir gases diretamente (V.FIGURA "13")

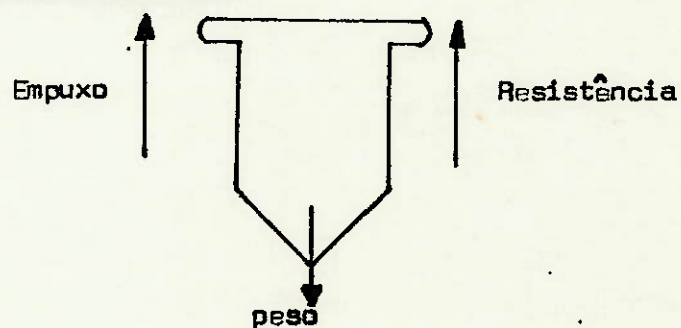
### ROTÂMETROS

São medidores de vazão de leitura direta. Trata-se de um tubo de forma tronco-cônico, contendo no seu interior uma esfera ou corpo de forma especial, por onde passará o fluxo gasoso, cuja vazão se deseja conhecer. O flutuador é suspenso pela passagem do fluxo e, sua posição relativo à escala gravada no cilindro, fornece a vazão.

Um inconveniente deste medidor é a instabilidade da posição do flutuador e, a forma esférica é uma das mais usadas, apesar de ser das mais instáveis, devido à variação da resistência para pequenas mudanças no número de Reynolds. O efeito de rotação, com conseqüente criação de uma força lateral que tende a deslocá-lo da posição central do tubo em direção às paredes.

Rotâmetros são úteis, como indicadores em casos onde a vazão deve ser continuamente acertada para permanecer constante, pois podem ser facilmente instalados no circuito de forma a ficarem visíveis para o operador.

#### Teoria de funcionamento do rotâmetro



Força de resistência:  $CAfpm^2 / 2Qc$

Força peso:  $Vfg fg/Qc$

Força empuxo:  $Vfpmq/Qc$

$Af$  = secção transversal da área do flutuador

$C$  = Coeficiente de resistência

$Q$  = aceleração devido a gravidade

$Qc$  = constante gravitacional

$v$  = velocidade média através da área anular do medidor.

$vf$  = volume do flutuador

$pf$  = densidade do flutuador

$pm$  = densidade do gás medido

Através da figura, podemos fazer uma igualdade

de forças:

$$CAfpmv^2 / 2Qc + VfpmQ / Qc = VfpfQ / Qc$$

$$v = \left( \frac{2VfQ (pf - pm)}{CAfm} \right)^{1/2}$$

$$Af = \pi D^2 / 4$$

substituindo, vem:

$$v = \left( \frac{8VfQ (pf - pm)}{\pi D^2 fpm} \right)^{1/2}$$

Fazendo  $cm = (8/\pi D^2 fpm)^{1/2}$  onde  $cm$  é chamado um coeficiente da medida e é dependente do coeficiente de resistência. Substituindo  $cm$  por  $(8/\pi D^2 fpm)^{1/2}$ , vem:

$$v = cm \left( \frac{VfQ (pf - pm)}{D^2 fpm} \right)^{1/2}$$

O coeficiente de resistência  $C$  é dependente do número de Reynolds, deve ser também uma função do número de Reynolds. Observamos agora que a densidade do gás no rotâmetro é muito menor, comparado com a do flutuador, então podemos modificar o termo  $(pf - pm)$

$$v = cm \left( \frac{VfQpf}{D^2 fpm} \right)^{1/2}$$

A vazão do fluxo  $Q_m$  através do rotâmetro é igual ao produto da velocidade de  $V$  e a área anular do medidor  $A_m$ . Substituindo  $Q_m/A_m$  por  $V$  temos:

$$Q_m/A_m = C_m \cdot \left( \frac{V_f Q_{pf}}{D^2 f_{pm}} \right)^{1/2}$$

$$\text{Logo é: } Q_m = \frac{C_m A_m}{D f} \left( \frac{V_f Q_{pf}}{f_{pm}} \right)^{1/2}$$

$$\text{Fazendo: } P_f = m_f/V_f \text{ e } p_m = \frac{P_m M_m}{R T m}$$

$$\text{Então: } Q_m = \frac{C_m A_m}{D f} \left( \frac{Q_{mf} R T m}{C_m M_m} \right)^{1/2}$$

MEDIDORES DE FLUXO ESTÃO MOSTRADOS NAS FIGURAS 14 e 15.

#### MEDIDOR DE ORIFÍCIO

A utilização entre a diferenciação da pressão estática provocada por constrições do fluxo do escoamento, tem sido comum para possibilitar a determinação das vazões.

OS CÁLCULOS ABAIXO REFEREM-SE À FIGURA 16

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = \int_{P_2}^{P_1}$$

Assumindo fluido incompressível, ou seja,

$$P_1 = P_2 = P, \text{ teremos:}$$

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = \frac{P_1 - P_2}{\rho}$$

De acordo com a equação da continuidade em peso por unidade de tempo.

$$\rho g A_1 V_1 = \rho g A_2 V_2$$

ou

$$V_1 = A_2/A_1 \times V_2$$

Substituindo

$$V_2^2 = \frac{Q (P_1 - P_2)}{\rho \left[ 1 - \frac{(A_2^2)}{(A_1^2)} \right]}$$

e portanto a vazão máxima  $Q_m$

$$Q_m = \rho g A_2 V_2 = A_2 g \sqrt{\frac{2 (P_1 - P_2)}{1 - \frac{(A_2^2)}{(A_1^2)}}}$$

Quando o fluido não é considerado incompressível, pode-se desenvolver uma relação que corrige a vazão, quando se trata de fluido compressíveis e chega-se a

$$Q_m = A_2 g \sqrt{\frac{2 (P_1 - P_2)}{1 - \frac{(A_2^2)}{(A_1^2)}}} \times K_1 \times K_2$$

Onde  $K_1$  = coeficiente de compressibilidade

$K_2$  = coeficiente de fluxo

$$K_1 = \sqrt{\frac{1 - \left[ \left( \frac{A_2^2}{A_1^2} \right) \times \frac{\gamma}{\gamma - 1} \times \frac{1}{1 - \gamma} \times (1 - \gamma^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}) \right] \gamma^{\frac{2}{\gamma}}}{1 - \frac{(A_2^2)}{(A_1^2)} \times \gamma^{\frac{2}{\gamma}}}}$$



$$K_2 = \frac{C}{\sqrt{1 - (A_2^2 / A_1^2)}}$$

C = coeficiente de descarga dado pela figura (pelo fato de tratar-se de fluido real e não ideal)

$$\phi = P_2 / P_1$$

$\gamma$  = relação entre o calor específico do fluido na pressão constante e o volume constante

Número de Reynolds

NA FIG.17, temos o coeficiente de carga (tab.)

$$R = \frac{\rho d v}{\mu}$$

No chamado medidor de orifício a contração do fluido é promovida por um disco perfurado (orifício) conforme esquema da figura "18".

Tendo em vista que a vena contracta tem um diâmetro inferior ao diâmetro do orifício, a tomada de pressão é colocada depois deste. A relação pode ser escrita:

$$Q = C^* v C_c A_2 \frac{\sqrt{2g \left( \frac{P_1 - P_2}{W} \right)}}{\sqrt{1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2}}$$

onde:

W = p.g. nas condições do orifício

Cc = coeficiente de contração (0,61 - 0,72)

C\*v = coeficiente de velocidade (0,95 - 0,99)

em geral expressa-se através do coeficiente



$$K = \frac{C_c C_v}{1 - \left[ \frac{A_2}{A_1} \right]^2} = \frac{C}{1 - \left[ \frac{A_2}{A_1} \right]^2}$$

C = coeficiente de descarga = 0,6

K = é função do número de Reynolds e da relação  $D_2/D_1$ , variando entre 0,59 e 0,64, desta forma:

$$Q = K A_2 \sqrt{2g \frac{P_1 - P_2}{W}}$$

Através da determinação de  $P_1 - P_2$  determina-se o valor de Q.

Um orifício padrão é mostrado na figura número "19".

#### ORIFÍCIO LIMITANTE

O orifício crítico, será usado de forma a ter um controle da corrente gasosa até um valor predeterminado de vazão constante.

Secções de tubos, tubos capilares e agulhas hipodérmicas, pode ser usado / para conseguir uma extraordinária vazão uniforme. Um orifício como mostrado na figura abaixo é mencionado para ser crítico quando a razão da pressão  $P_2$  (saída), para a pressão  $P_1$  (entrada), produz uma velocidade sônica do gás na saída do orifício.

Para o ar, esta condição é encontrada quando  $P_2$  é menor que  $0,53 P_1$ , e a vazão da área transversal,  $A_1$  (entrada) para a área transversal do orifício,  $A_2$  (saída) é maior que 25. V. Figura "20".

Para sintetizar apenas citaremos o cálculo da vazão máxima:

$$Q_{max} = \frac{0,388 \times C \times A_2 \times P_1}{T^{1/2}}$$

onde:

$Q_{\text{máx}} = \text{g/seg.}$

$C = \text{coeficiente de descarga (adimensional)}$

$A_2 = \text{cm}^2$

$P_1 = \text{g/cm}^2$

$T = K$

0,388 = constante de proporcionalidade

#### Medidor Venturi

Utiliza-se do mesmo princípio de promover uma contração no fluxo. Um venturi padrão está mostrado na fig. "21".

A seguinte relação é válida para medidor venturi

$$Q = K_2 A_2 \sqrt{2g \frac{P_1 - P_2}{W}}$$

onde:

$$K_2 = \frac{C}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

O coeficiente de descarga é obtido do diagrama dado e depende de  $p, u, p_1/p_2, V, d_1, d_2$  da rugosidade do duto e da distribuição de velocidade após a contração.

O coeficiente de descarga de medidores venturi é de 0,985 - 0,988

#### MEDIDOR DE BOQUILHA

#### MEDIDOR DE BOQUILHA

Utiliza-se o mesmo princípio que o venturi e o orifício sendo as equações semelhantes e os valores do coeficiente de descarga são da ordem de 0,924 - 0,987 em função de  $(A_2 / A_1)$ .

NA FIG. 22 é apresentada uma boquilha padrão.

#### AMOSTRAGEM ISOCINÉTICA

Ao realizarmos amostragem de partículas sólidas ou líquidas, devemos levar em consideração possíveis distúrbios ocasionados pela presença de uma outra linha de fluxo, imersa na corrente gasosa da chaminé, pois poderá haver uma seletividade de partículas em função do seu tamanho e densidade, de forma a se realizar uma coleta não representativa.

A boquilha de amostragem deverá estar apontada diretamente contra a corrente gasosa e que a velocidade da porção de gás da chaminé que está sendo succionada para dentro da boquilha esteja bem próxima da velocidade dos gases na chaminé na vizinha da boquilha.

Amostragem sob estas condições é chamada "amostragem isocinética". Se a amostragem não for isocinética, segregação de tamanhos de partículas ocorrerá, e a distribuição do tamanho da partícula, concentração em peso e composição química, não será representativo. Considerações sobre os princípios dos momentos, p mostrarão que a concentração das partículas mais pesadas (e usualmente maiores) será bem baixa na amostra de gás coletado, se for mantido na boquilha de amostragem uma velocidade muito alta e será muito alta se a velocidade de boquilha for menor do que a velocidade de chaminé.

A Figura "23" ilustra o que pode ocorrer com as partículas em função da amostragem ser ou não isocinética.

Desvios das condições de amostragem isocinética podem ser permitidas quando o diâmetro máximo das partículas for 5 microns / ou menos. O relativo pequeno momento das partículas leves minimiza a segregação devido a distúrbios do fluxo gasoso ao entrar na boquilha.

Contudo na prática, amostragem isocinética deve ser seguida, uma vez que a distribuição real do tamanho de partículas não é usualmente conhecida.

Tendo-se a velocidade da chaminé nas condições de fluxo e a boquilha de amostragem fixada então:

$$V_m = \dot{V}_m \left( \frac{T_c}{T_m} \right) \left( \frac{P_{bar} + P_m}{P_c} \right)$$

$V_m$  = volume seco de amostras nas condições da chaminé (cfm)

$\dot{V}_m$  = volume seco nas condições do medidor (cfm)

$T_c$  = Temperatura da chaminé °R

$P_{bar}$  = Pressão barométrica pol. de Hg.

$P_m$  = Pressão de medidor pol. de Hg

$P_c$  = Pressão da chaminé pol. de Hg.

Volume de água contido no fluxo

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O} \cdot R \cdot T_c}{P_c \text{ mol}}$$



$V_{H_2O}$  = volume de água nas condições da chaminé

$m_{H_2O}$  = massa de água coletada

$R$  = constante dos gases perfeitos

$Mol$  = peso molecular de  $H_2O$

A porcentagem de Isocinética é dada por:

$$\% I = \frac{V_m + V_{H_2O}}{t \cdot Ab \cdot Vc}$$

$t$  = tempo de amostragem (min)

$Ab$  = Área da boquilha escolhida

$Vc$  = Velocidade da chaminé

Na utilização do Trem de Amostragem automático, a condição de isocinética é obtida através da utilização de um normógrafo o qual fornece uma indicação instantânea da vazão necessária de amostragem para o estabelecimento das condições de isocinética.

O intervalo de confiança para a porcentagem de isocinética poderá variar em conformidade com a necessidade de precisão requerida para os resultados, contendo em termos de controle de poluição o intervalo mais indicado para tal, está entre  $90\% < I < 110\%$ .

#### Preparação de um Trem de Amostragem

Como anteriormente foi visto, algumas medidas preliminares precisam ser efetuadas para conhecer-se as condições do fluxo na chaminé, bem como executar a preparação do trem de amostragem.

Desta forma, além da tomada de velocidade através do tubo de Pitot, há necessidade de conhecermos a composição volumétrica do gás, a porcentagem de umidade e as condições de temperatura e pressão do gás. V. FIG. 23a

a) Produtos de Combustão

A finalidade para a determinação da composição



da composição volumétrica do gás é a de efetuarmos a correção do peso molecular deste gás, normalmente considerado como ar, em termos de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  e assim realizaremos o cálculo correto da velocidade de fluxo.

b) Temperatura

Também é necessária a medida de Temperatura dos gases na chaminé para que se possa realizar o cálculo da velocidade, uma vez que a temperatura de um gás faz variar a sua densidade. A tomada de temperatura poderá ser tomada através de pares termoeletrônicos ou termômetros calibrados.

c) Pressão

Deve-se ter pressão na chaminé para podermos ter o cálculo da velocidade pois a pressão do gás também faz variar a sua densidade.

A pressão da chaminé é fornecida através da medida de pressão estática tomada através do tubo pitot Standard

TREM DE AMOSTRAGEM

Constituintes Principais

1. Bomba de vácuo.
2. Medidor de volume (Dry Gas Metter)
3. Medidor de vazão (orifício calibrado com manômetro inclinado)
4. Medidor de velocidade (tubo pitot com manômetro inclinado)
5. Sonda aquecida para coleta dos gases
6. Sistemas de filtro e ciclone aquecidos
7. Jogo de impingers para absorção de gases e umidade
8. Nomógrafo para se obter a correspondência entre velocidade e vazão para uma amostragem com isocinética.
9. Cordão umbilical para ligação entre os impingers e a caixa medidora.

Os gases são coletados através de uma sonda aquecida, o que impede a condensação de vapores contidos no fluxo gasoso. Para a coleta, a sonda encontra-se provida com uma boquilha de área conhecida, o que possibilita a determinação da velocidade de passagem dos gases e conseqüentemente da vazão de amostragem.

A sonda é ligada diretamente a um conjunto de ciclone e filtro, para a retenção de material particulado (partículas sólidas ou líquidas), e para se evitar também a condensação de vapores no conjunto, o mesmo é dotado de sistema de aquecimento ( $-120^{\circ}\text{C}$ ).

Logo após o filtro, os gases passam pelos Impingers ou borbulhadores onde são colocados em soluções adequadas para a retenção dos gases que se queira determinar.

Usa-se também os impingers para reter a umidade que é posteriormente calculada e, para tanto, os impingers são mantidos imersos em gelo. Geralmente, usa-se o último impinger contendo sílica-gel para remover até o último vestígio de umidade.

Depois dos impingers os gases são ligados pelo Cordão Umbilical até a Bomba de Vácuo, passando por um sistema de válvulas para o ajuste da vazão adequada. Este sistema de válvulas possui um ajuste fino e um ajuste grosso.

A bomba de vácuo foi projetada para trabalhar em regime selado, para evitar vazamentos, bem como vencer as perdas de carga do sistema. A bomba provoca o arraste do fluxo da chaminé para o sistema, sendo que a vazão de sucção é indicada através de um gasômetro localizado após a bomba.

O medidor de volume é dotado de um par de termômetros que indica a temperatura do gás que está passando através do gasômetro e para a indicação da pressão do gás, encontra-se acoplado ao mesmo um orifício calibrado conectado a um manômetro inclinado.

Uma vez que, como vimos anteriormente, o orifício poder ser utilizado para medidas de vazão, logo as medidas de diferença de pressão acusadas no manômetro, servem para o controle da vazão de amostragem.

Acoplado com a sonda tem-se um Tubo Pitot Tipo S, tendo sua extremidade o mais próximo possível da boquilha, para ter-se a velocidade na chaminé no mesmo ponto e instante, de onde estão sendo colhidos os gases. Este tubo Pitot é ligado a outro manômetro inclinado através de tubos existentes no cordão umbilical.

Tendo-se então as medidas de pressão de velocidade no ponto de amostragem e o controle da vazão através do manômetro do orifício calibrado podemos, com o auxílio do nomógrafo, estabelecer condições de amostragem

estabelecer condições de amostragem isocinéticas ou outras condições que necessitamos para a execução da amostragem - V. FIG. 23 b

### CALIBRAÇÕES

#### Calibração de um Rotâmetro

##### a) Descrição do Método

Esta calibração consiste em se fazer passar um volume de Ar, durante um tempo determinado (1,0 minuto), através de um medidor padrão (WET TEST METER), acoplado a um rotâmetro ajustado previamente para uma vazão desejada.

Passado um minuto, anota-se o volume registrado no medidor (WET TEST METER) e a vazão correspondente no Rotâmetro.

A seguir, com o auxílio de uma presilha, é feita uma variação da vazão no sistema e, dá-se sequência a uma nova leitura.

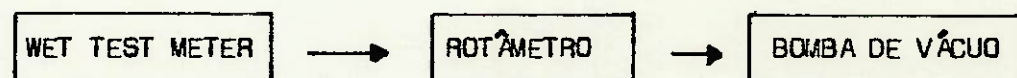
Depois de se obter várias determinações, é estabelecida uma curva relacionando as vazões registradas no WET TEST METER e, as vazões correspondentes no Rotâmetro.

A calibração de um rotâmetro, não corresponde a construção de uma única curva, mas sim a elaboração de uma família de curvas, onde cada uma partirá de uma vazão inicial diferente.

##### b) Cuidados Gerais

Antes do início da calibração, se faz necessário uma verificação das vedações envolvidas no sistema, procurando observar se não há nenhum desvio de fluxo que possa vir a alterar as medidas que serão realizadas.

##### c) Esquema Simplificado



#### Calibração do DRY GAS METER

##### a) Descrição do Método



a) Descrição do Método

Esta calibração, consiste em se fazer passar um volume de Ar, durante um tempo determinado (1,0 minuto) através de um medidor primário (WET TEST METER), acoplado em série com um medidor secundário (DRY GAS METER).

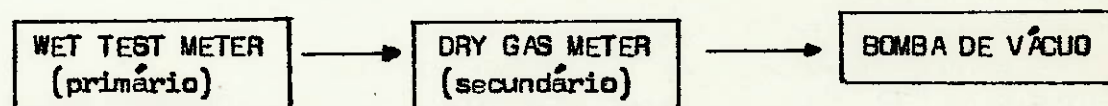
Passado um minuto, anota-se o volume em ambos os medidores, aumenta-se a vazão de Ar e dá-se a sequência de uma nova leitura.

Após se obter várias determinações, se estabelece uma curva relacionando as vazões entre os dois medidores.

b) Cuidados gerais

Antes de se iniciar uma calibração, recomenda-se tomar alguns cuidados tais como a verificação do nível da água do WET / TEST METER, e a verificação das vedações envolvidas no sistema, procurando / observar se não existe nenhum desvio de fluxo que possa alterar as medidas / que serão realizadas.

c) Esquema Simplificado



Calibração do Tubo Pitot "S"

Esta calibração consiste em determinar o coeficiente ( $cp_s$ ) do tubo Pitot "S".

Esta determinação é realizada, tomando-se a pressão de velocidade em um ponto qualquer do fluxo gasoso usando-se o Pitot "S", e um Pitot Standard de coeficiente conhecido.

Recomenda-se que esta calibração deva ser executada em laboratório e a velocidade do fluxo deve variar dentro da faixa de trabalho, que o Pitot "S" será usado.

A expressão que é usada para determinar o coeficiente do tubo Pitot "S" ( $cp_s$ ) é a que segue:



$$C_p = C_{p_{std}} \sqrt{\frac{\Delta P_{std}}{\Delta P_{test}}}$$

Onde:

$C_{p_s}$  = coeficiente do Tubo Pitot "S"

$C_{p_{std}}$  = coeficiente do Tubo Pitot Standard

$\Delta P_{std}$  = Pressão de velocidade determinada com o Pitot Standard

$\Delta P_{Teste}$  = Pressão de velocidade determinada com o tubo Pitot "S".

#### Calibração de um Orifício Medidor de Vazão

##### a) Descrição do Método

Esta calibração, consiste em se fazer passar um volume de ar, durante um tempo determinado (1,0 minuto), através de um medidor padrão (WET TEST METER), acoplado em série com um orifício medidor de vazão.

Passado um minuto, anota-se o volume registrado no medidor (WET TEST METER), e a perda de pressão verificada no manômetro do orifício.

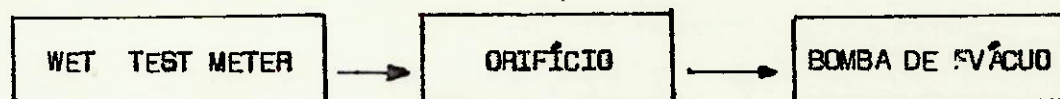
A seguir, eleva-se a perda de pressão, no orifício (Aumento da Vazão de Ar) e, dá-se sequência a uma nova leitura.

Depois de se obter várias determinações, é estabelecida uma curva relacionando as vazões registradas no WET TEST METER, e as perdas de pressões verificadas no manômetro do orifício.

##### b) Cuidados Gerais

Antes do início da calibração, se faz necessária uma verificação das vedações envolvidas no sistema, observar se não há nenhum desvio de fluxo que possa vir a alterar as medidas que serão realizadas.

##### c) Esquema Simplificado



### Calibração do Orifício do Medidor de Vazão do R.A.C.

Esta calibração é realizada em laboratório, para a determinação do fator de proporcionalidade  $K_m$ . Inicialmente, determina-se a vazão para uma perda de 0,5 pol  $H_2O$  no medidor, posteriormente para 1"  $H_2O$ , 2,0"  $H_2O$  e 6"  $H_2O$ .

- $m$  = perda da pressão do medidor (pol  $H_2O$ )
- $V_1$  = leitura inicial do volume do medidor
- $V_2$  = leitura final do volume do medidor
- $\theta$  = tempo gasto para passagem no medidor de 0,5 cf de AR
- $T_1$  = temperatura do AR na entrada do medidor.
- $T_2$  = temperatura do AR na saída do medidor.
- $Q_m$  = Vazão Volumétrica de AR no medidor.
- $K_m$  = fator de proporcionalidade do Orifício.

Cálculo das Vazões ( $Q_m$ ).

$$Q_m = \frac{V_2 - V_1}{\theta} \times \left[ \frac{T_2 + 460}{\frac{(T_1 + T_2)}{2} + 460} \right] \quad \text{então } K_m = Q_m \frac{P_m}{T_m} \frac{M_n}{A_n}$$

$$P_m = P_t \cdot n$$

$$M_n = \text{Mol (ar)} = 29$$

$$T_m = T_a + 460 \quad \therefore$$

$$K_m = \frac{\sum K_m}{4}$$

### Calibração da Medida de Volume do Equipamento RAC

Esta calibração é realizada em laboratório, para a determinação do fator de correção do medidor de Volume RAC, utilizando-se como medidor primário o WET TEST METER.

Inicialmente utiliza-se um volume correspondente a perda de 1"  $H_2O$  e a seguir um volume correspondente a 2"  $H_2O$ , com uma perda / de 10 minutos.

a) Cálculo do Fator de Correção do Medidor.

$$F.C.M. = \frac{(\text{Wet final} - \text{Wet inicial}) (t_{\text{dry}} (P_{\text{wet}}))}{(\text{DRY Final} - \text{DRY Inicial}) (t_{\text{wet}}) (P_{\text{dry}})}$$

Onde:

F.C.M. = fator de correção do medidor

Wet final = leitura do volume final no WET TEST METER (cf)

Wet inicial = leitura do volume inicial no WET TEST METER (cf)

T dry = temperatura no DRY GAS METER ( $^{\circ}\text{R}$ )

Pwet = pressão no Wet Test Meter (pol Hg)

Dry final = leitura do volume final no DRY GAS METER (cf)

Dry Inicial = leitura do volume Inicial no DRY GAS METER (cf)

Twet = temperatura no WET TEST METER ( $^{\circ}\text{R}$ )

P dry = Pressão no DRY GAS METER (pol Hg).

$$T_{\text{dry}} = \frac{(T_{\text{d inicial}} + T_{\text{d final}})}{2} + 460$$

Onde:

Td inicial = temperatura no dry GAS METER no início da calibração ( $^{\circ}\text{F}$ )

Td final = temperatura no dry GAS METER no final da calibração ( $^{\circ}\text{F}$ )

$$T_{\text{wet}} = \frac{(T_{\text{w inicial}} + T_{\text{w final}})}{2} + 460$$

Onde:

Tw inicial = temperatura no WET TEST METER no início da calibração. ( $^{\circ}\text{F}$ )

Tw final = temperatura no WET TEST METER no final da calibração ( $^{\circ}\text{F}$ )

$$P_{\text{dry}} = \left( P_{\text{barom}} - \frac{\Delta Pa}{13,6} \right)$$

Onde:

Pbarom = Pressão barométrica (pol Hg)

$\Delta Pa$  = Perda de pressão no DRY GAS METER (pol  $\text{H}_2\text{O}$ )

$$P_{wet} = \left( P_{barom} - \frac{\Delta P_b}{13,6} \right)$$

Onde:

$P_b$  = Perda de Pressão no WET TEST METER (pol  $H_2O$ )

Determinação do fator de correção (F.C.M.)

O fator de correção do medidor (F.C.M.), será calculado como sendo a média aritmética entre duas determinações FCMA e FCMB.

Onde:

FCMA = fator de correção do medidor para uma perda de pressão no DRY / igual a 1,0 pol  $H_2O$ .

FCMB = fator de correção do medidor para uma perda de pressão no DRY / igual a 2,0 pol  $H_2O$ .

Cálculo do FCMA

$$V_{wet} = \text{wet final} - \text{Wet inicial} =$$

$$V_{wet} = \quad - \quad = \quad \quad \quad (cf)$$

$$V_{dry} = \text{Dry final} - \text{Dry inicial} =$$

$$V_{dry} = \quad - \quad = \quad \quad \quad (cf)$$

$$P_{dry} = \left( P_{barom} - \frac{P_a}{13,6} \right)$$

$$P_{dry} = \left( \quad - \frac{\quad}{13,6} \right) = \quad \quad \quad (pol \text{ Hg})$$

$$P_{wet} = P_{barom} - \frac{P_b}{13,6} =$$

$$P_{wet} = \quad - \frac{\quad}{13,6} = \quad \quad \quad (pol \text{ Hg})$$

$$T_{dry} = \frac{(T_d \text{ inicial} + T_d \text{ final})}{2} + 460$$

$$T_{dry} = \frac{(\quad)}{2} + 460 \quad \quad \quad (^\circ R)$$

$$T_{wet} = \frac{(T_w \text{ inicial} + T_w \text{ final})}{2} + 460$$

$$T_{wet} = \frac{(\quad + \quad)}{2} + 460 \quad \quad \quad (^\circ R)$$



$$F.C.M.A. = \frac{(V_{wet}) (T_{dry}) (P_{wet})}{(V_{dry}) (T_{wet}) (P_{dry})}$$

$$F.C.M.A. = \frac{\quad}{\quad} =$$

Cálculo do F.C.M.B.

$$V_{wet} = \text{wet final} - \text{wet inicial}$$

$$V_{wet} = \quad - \quad = \quad \quad \quad (cf)$$

$$V_{dry} = \text{dry final} - \text{dry inicial}$$

$$V_{dry} = \quad - \quad = \quad \quad \quad (cf)$$

$$P_{dry} = \left( P_{\text{barom}} - \frac{P_{a^*}}{13,6} \right)$$

$$P_{dry} = \left( \quad - \frac{\quad}{13,6} \right) = \quad \quad \quad (pol \text{ Hg})$$

$$P_{wet} = \left( P_{\text{barom}} - \frac{P_{b^*}}{13,6} \right)$$

$$P_{wet} = \left( \quad - \frac{\quad}{13,6} \right) = \quad \quad \quad (pol \text{ Hg})$$

$$T_{dry} = \frac{(T_{d \text{ inicial}} + T_{d \text{ final}})}{2} + 460$$

$$T_{dry} = \frac{(\quad + \quad)}{2} + 460 \quad \quad \quad (^{\circ}R)$$

$$T_{wet} = \frac{(T_{w \text{ inicial}} - T_{w \text{ final}})}{2} + 460$$

$$T_{wet} = \frac{(\quad + \quad)}{2} + 460 \quad \quad \quad (^{\circ}R)$$

$$F.C.M.B. = \frac{(V_{wet})(T_{dry})(P_{wet})}{(V_{dry})(T_{wet})(P_{dry})}$$

$$F.C.M.B. = \frac{\quad}{\quad} =$$

$$F.C.M. = \frac{FCMA + FCMB}{2} =$$

$$F.C.M. = \frac{\quad + \quad}{2} =$$

#### Determinação da velocidade

A velocidade do fluxo é determinada a partir da densidade do gás e da medida da pressão de velocidade usando um tubo / Pitot tipo "S" (Stauscheibe ou tipo reverso).

Aparelhagem:

- 1 - Tubo Pitot - tipo "S"

- 2 - Manômetro diferencial - manômetro inclinado
- 3 - Medidor de temperatura - par ter eletrônico ou equivalente.
- 4 - Manômetro de mercúrio em U ou equivalente para medir pressão estática.
- 5 - Barômetro para medir pressão atmosférica
- 6 - Analisador de gás : "Orsat" para determinar a composição dos gases e o peso molecular.
- 7 - Tubo Pitot - tipo "Standard", para calibrar o Pitot tipo "S"

#### Calibração do tubo Pitot "S"

A calibração do tubo Pitot é feita determinando a pressão de velocidade em algum ponto de um fluxo gasoso usando um Pitot tipo "S" e um tubo Pitot "Standard" de coeficiente conhecido. A calibração / deve ser feita no laboratório e a velocidade do fluxo gasoso deve variar na faixa de trabalho.

$$C_p = C_{p \text{ std}} \left( \frac{p_{\text{std}}}{p_{\text{teste}}} \right)$$

Onde:

$C_p$  = coeficiente do tubo Pitot tipo "S"

$C_{p \text{ std}}$  = coeficiente do tubo Pitot "Standard" = 0,99

$p_{\text{std}}$  = pressão de velocidade determinada com o tubo Pitot "Standard".

$p_{\text{teste}}$  = pressão de velocidade determinada com o tubo Pitot tipo "S"

Determinar os coeficientes do tubo Pitot S em duas posições (uma vez um dos ramos mede pressão total e outra vez mede pressão estática). Estes coeficientes não devem diferir em mais de 0,01.

#### Cálculo da velocidade

$$V_c = K_p C_p \left( \sqrt{\Delta p} \right)^m \sqrt{\frac{T_c}{P_{cM}}}$$

Onde:

$V_c$  = velocidade do fluxo fp

$$K_p = 85,48 \text{ fps} \left( \frac{\text{lb}}{\text{lb mol } \sigma_R} \right)^{1/2}$$

Cp = coeficiente do tubo Pitot

$(\sqrt{\Delta p})_m$  = raiz quadrada média dos valores de pressão de velocidade de  $H_2O$ .

Pc = pressão absoluta da chaminé " de Hg

Tc = temperatura média da chaminé oR

M = peso molecular do efluente (base úmida)

lb/lb mol

$$M = M_s (1 - B_{wo}) + 18 B_{wo}$$

M<sub>s</sub> = peso molecular do efluente (base seca)

B<sub>wo</sub> = proporção de vapor d'água do efluente gasoso.

$$V_{H_2O} = \frac{m (g) p (g/ml) \cdot R \cdot T_m (^{\circ}R)}{P_m (pol.Hg) \cdot Mol H_2O 454}$$

V<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = volume de água (cf)

m = massa de água coletada (g)

R = constante dos gases 21,83  $\frac{inHg \times ft^3}{lb \times ^{\circ}R}$

T<sub>m</sub> = temperatura do medidor ( $^{\circ}R$ )

P<sub>m</sub> = pressão do medidor (pole.Hg)

Mol H<sub>2</sub>O = 18

454 = g. 1/454 = lb

Volume eo medidor

$$V_m = \frac{\text{vazão do orifício (l/min)} \theta (\text{min})}{28,32}$$

$$l = \frac{1}{28,32} ft^3$$

$$V_m = ft^3$$

Unidade em porcentagem volumétrica

$$B_{wo} = \frac{V_{H_2O}}{V_{H_2O} + V_m}$$

B<sub>wo</sub> = proporção de vapor de água por volume na corrente gasosa

V<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = volume de água nas condições do medidor

### Determinação do peso molecular do efluente

Uma amostra de gases é retirada do fluxo gasoso utilizando o trem de amostragem (transparência).

A análise dos gases é feita pelo aparelho / de Orsat.

Cálculo do peso molecular seco:

$$M_s = 0,44 (\% \text{ CO}_2) + 0,32 (\% \text{ O}_2) + 0,28 (\% \text{ N}_2 + \% \text{ CO})$$

Onde:

$M_s$  = peso molecular seco

$\% \text{ CO}_2$  = porcentagem de dióxido de carbono (em volume) base seca

$\% \text{ O}_2$  = porcentagem de oxigênio (em volume) base seca

$\% \text{ N}_2$  = porcentagem de nitrogênio (em volume) base seca

+ CO = porcentagem de monóxido de carbono (em volume) base seca

0,44 - peso molecular do  $\text{CO}_2/100$

0,32 - peso molecular do  $\text{O}_2/100$

0,28 - peso molecular do  $\text{N}_2$  e CO/100

### AMOSTRAGEM DO MATERIAL PARTICULADO

A determinação de material particulado é realizada através da tomada de uma porção do efluente de chaminé em um período de tempo fixado, utilizando-se de um trem de amostragem contínua.

O trem separa o particulado da corrente gasosa, bem como providencia a medida do volume amostrado.

A fonte para qual será feita a avaliação deve rá ser previamente estudada, de forma a que a amostragem seja planejada em função de ciclos, corridas ou emissões medidas ocorridas durante o processo.

A representatividade da amostra será obtida, des de que durante a amostragem estabeleça-se a condição de isocinética e a se - ção transversal amostrada apresente condições de fluxo uniforme, em função da qual deverá ser determinado o número de pontos de coleta necessários e sufici- ente.



### Preparação do trem de amostragem

Pesa-se 200 g de sílica-gel, numerando-se os filtros, que serão utilizados, fazendo-se a sua separação prévia, deixando-os em estufa a 30° por um período de 24 hs.

Após a secagem, os filtros são pesados e colocados em dissecadores. Coloca-se 250 ml de água destilada no primeiro borbulhador, 150 ml no segundo, deixando o terceiro vazio. No quarto borbulhador adiciona-se a sílica-gel.

Monta-se o trem de amostragem sem a sonda, testando o sistema contra vazamentos, que será verificado quando o sistema estiver totalmente vedado e o manômetro da bomba a vácuo, atingir 15 polegadas / de mercúrio e a vazão indicada no gasômetro não ultrapassar a 0,6 l/mi (0,02 cm).

Monta-se novamente a sonda, iniciando-se o seu aquecimento através do movimento de reostato. Deve-se também iniciar o aquecimento do conjunto ciclone-filtro para uma temperatura de aproximadamente 120°C (270°F).

Coloca-se gelo picado em torno dos impingers, em quantidade suficiente para manter praticamente todo impinger em contato com o gelo.

Desta forma o trem de amostragem está preparado para dar início a coleta.

A amostragem deverá ser iniciada, somente após a verificação da normalidade de funcionamento do processo.

Após a coleta faz-se a pesagem dos filtros e dos impingers utilizados na amostragem, e a partir de dados obtidos durante a amostragem, tem-se as condições, necessárias para a determinação de concentração ou taxa de emissão.

$$C = \frac{\text{massa de material coletada}}{\text{volume total da amostra}} \quad \text{mg/Nm}^3$$
$$T = \frac{\text{massa de material coletado}}{\text{tempo de amostragem}} \quad \text{kg/h}$$

## AMOSTRAGEM DE GASES

O procedimento para a coleta e análise de gases são classificados principalmente de acordo com as suas propriedades químicas. Alguns constituintes são coletados e analisados por mais de um método, enquanto para outros, somente um método de coleta e análise são utilizados.

Os métodos de coleta para gases podem ser divididos em dois grupos:

### a) Amostragem instantânea

Neste caso a coleta é realizada em um período de tempo bem curto, ou seja a amostra é coletada em determinados períodos escolhidos durante o processamento da fonte amostrada. Os métodos mais conhecidos são, aplicados / são os dos frascos evacuados, e sacos de teflon.

### a) Amostragem contínua

Para este caso a amostra irá representar a composição média do efluente. Os métodos mais aplicados e conhecidos são os por absorção, condensação e adsorção.

Quanto ao equipamento utilizado, ele pode se compor com os mesmos componentes do trem de amostragem de material particulado.

Para amostragem de gases vale as mesmas observações, feitas com respeito ao seu planejamento, desde o conhecimento da fonte até a representatividade da amostra.

No caso de gases, a mesma não precisa ser obrigatoriamente, realizada sob condições de isocinética, uma vez que estaremos trabalhando com moléculas as quais apresentam uniformidade de tamanho, assim é que, para a amostragem contínua, basta mantermos uma proporcionalidade da vazão de coleta com a da chaminé.

### Preparação da aparelhagem de coleta da amostra

Coloque 100 ml de isopropanol 80% no primeiro borbulhador, 100 ml de peróxido de hidrogênio 3% no segundo e terceiro borbulhador e cerca de 200 g de sílica-gel no quarto borbulhador.

Guarde uma porção de cada reagente para uso na prova branca. Monte a aparelhagem, sem a sonda, com o filtro entre o primeiro e o segundo borbulhador.

Teste o sistema contra-vazamentos, no local da amostragem, tapando a entrada do primeiro borbulhador e fazendo um vácuo no sistema de 15 polegadas de Hg.

A vazão de vazamento não deve exceder a 0,56 l/min (0,02 cfm) nessas condições.

Ligue a sonda ao sistema e coloque em funcionamento o sistema de aquecimento de sonda. Ajuste a temperatura da sonda durante a montagem para evitar qualquer condensação.

Coloque gelo moído em torno dos borbulhadores. Junte mais gelo durante a amostragem para manter a temperatura dos gases / que deixam o último borbulhador a 20°C (70°F), ou menos.

Após a coleta da amostra fazemos a análise por titulação com perclorato de bário e Torina como indicador, de forma que com os dados obtidos durante a amostragem possamos iniciar o cálculo da concentração de SO<sub>2</sub>.

#### PREPARAÇÃO DO RELATÓRIO

O relatório final de uma amostragem de chaminé, deverá conter dados referentes a três fases distintas.

- Planejamento da Amostragem.
- Execução da Amostragem
- Cálculos e Resultados.

##### Fase de Planejamento

Esta fase deverá conter todos os dados necessários para a realização da Amostragem. Estes dados estão subdivididos em dados de chaminé e do Processo.

##### Dados da chaminé

Estes dados se fazem necessários pelos seguintes



seguintes motivos:

- Localização do ponto de coleta (cotação dos furos na chaminé)
- Dimensionamento da plataforma de Amostragem.
- Determinação do número de pontos a serem amostrados em um diâmetro.
- Localização dos pontos a serem amostrados em relação ao diâmetro da chaminé.

Os dados referentes a chaminé são os seguintes:

tes:

- Tipo de chaminé.
- Altura da chaminé.
- Diâmetros Internos e Externos.
- Informações sobre desvios e fluxos que possam existir na chaminé, tais como cotovelos, estreitamentos, etc...

Dados do Processo

Os dados do processo se fazem necessários por

dois motivos:

- 1) Escolha dos Métodos de Coleta e Análise.
- 2) Controle da fonte a ser amostrada durante o período de Amostragem.

Estes dados variam de acordo com o tipo de fonte a ser amostrada, mas normalmente são os seguintes:

- Tipos de Matérias Primas.
- Quantidades de Matérias Primas Processadas.
- Produto elaborado.
- Combustível utilizado.
- Consumo de Combustível.
- Temperatura e Pressão.
- Existência ou não de Equipamentos de Controle de Poluição.
- Produção da Fonte.
- Fluxogramas gerais do processo Industrial.



### Execução da Amostragem

Os dados referentes a execução da amostragem estão divididos em dados do processo e dados da amostragem.

#### Dados do Processo

São os mesmos vistos anteriormente no planejamento, porém, coletados durante o decorrer das tomadas de amostras.

Estes dados são coletados com o objetivo de servir como referência para estudos no caso de surgir alguma anormalidade nos resultados da amostragem.

#### a) Dados Preparatórios para a Amostragem

São aqueles dados coletados, durante as operações de tomadas de velocidade, umidade e produtos de combustão.

#### b) Dados coletados na Amostragem

São os dados pertinentes a Amostragem em si, registrados durante a coleta de poluentes.

Os dados da Amostragem devem ser apresentados em tabelas de maneira a facilitar os cálculos posteriores.

### CÁLCULOS E RESULTADOS

O objetivo final desta fase, é a determinação da Taxa de Emissão (kg/h), e da concentração de poluentes (mg/Nm<sup>3</sup>). Os cálculos devem seguir a seguinte sequência.

#### Cálculos de Amostragem

Umidade no Efluente da chaminé no primeiro dia de amostragem.

1. Volume de água nas condições da chaminé. Massa de Água coletada =

$$V_{H2O} = \frac{m \text{ (g)} \cdot \rho_{H2O} \text{ (g/ml)} \cdot R \cdot T_c \text{ (}^{\circ}\text{R)}}{P_c \text{ (pol Hg)} \cdot Mol.454}$$

Onde:

V H2O = volume de água (cf)

m = massa de água coletada (g)

$\rho_{H_2O}$  = densidade da água = 1,0 g/ml

$R$  = constante dos gases ideais = 21,83 -  $\frac{\text{pol.Hg.cf}}{\text{lb.mol}^{\circ}R}$

$T_c$  = temperatura da chaminé ( $^{\circ}R$ )

$P_c$  = pressão da chaminé (pol Hg)

mol de água = 18.

$V_{H_2O} = \underline{\hspace{2cm}} =$

$V_{H_2O} =$

2. Volume do medidor nas condições da chaminé.

$$V_m = V_m^* (T_c/T_m) (P_{bar} + H/P_c). f.c.m.$$

Onde:

$V_m$  = volume do medidor nas condições da chaminé (cf)

$V_m^*$  = Volume do medidor nas condições de amostragem (ccf)

$T_m$  = Temperatura do medidor ( $^{\circ}R$ )

$P_{bar}$  = Pressão barométrica (polHg)

$H$  = Perda de carga no Orifício (pol Hg)

$fcm$  = fator de correção do medidor.

$V_m = \underline{\hspace{2cm}} =$

$V_m =$

3. Umidade em porcentagem volumétrica

$$BWO = \frac{V_{H_2O}}{V_{H_2O} + V_m}$$

$BWO = \underline{\hspace{2cm}} =$

$$\% H_2O = BWO \times 100 =$$

$\% H_2O$

Velocidade na chaminé no dia da Amostragem

1. Correção do peso molecular do ar seco com a Umidade.

$$M_c = M_{seco} (1 - BWO) + 18 BWO$$

Onde:

Mc = Peso molecular do ar corrigido

M seco = Peso molecular do ar

BWO = Umidade presente na chaminé.

Mc =

Mc =

2. Cálculo da Velocidade na chaminé

$$V_c = k_p \cdot C_p \cdot \sqrt{\frac{T_c}{M_c \cdot P_c}} \sqrt{\Delta p}$$

Onde:

Vc = velocidade do fluxo na chaminé (fpm)

$k_p = 85,48 \text{ ft/seg} \left( \frac{\text{pol Hg} \cdot \text{lb}}{\text{lb} \cdot \text{mol} \cdot \text{R}} \right)^{1/2}$

Cp = coeficiente do tubo Pitot

p = pressão cinética média.

Vc =

Vc =

Cálculo da Isocinética

$$I = \frac{V_m \text{ (cf)} + V_{H_2O} \text{ (cf)}}{O(\text{min}) \cdot A_b(\text{ft}^2) \cdot V_c(\text{fpm})}$$

Onde:

O = tempo gasto na Amostragem

Ab = área da boquilha utilizada

$$I =$$

$$\% I = I \times 100 =$$

Resultados obtidos na Amostragem.

massa de poluentes coletados = mg.

Cálculo da Taxa de Emissão

Taxa de Emissão da massa de poluentes calculada  
em base da razão da Área.

$$\overline{Pmra} = \frac{Mt.Ac.60}{Ot.Ab.10^6}$$

Onde:

Mt = massa total de poluente coletado (mg)

Ot = tempo de Amostragem (min)

Ac = Área da chaminé (ft<sup>2</sup>)

Ab = Área da boquilha (ft<sup>2</sup>)

$$\overline{Pmra} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\overline{Pmra} = \hspace{1cm} \text{(kg/h)}$$

Taxa de Emissão de poluente calculada sobre base  
de concentração.

$$\overline{Pmrc} = \frac{Mt.Vc.Ac.60}{Vt.10^6}$$

Onde:

Mt = massa total de poluente coletado (mg).

Vc = velocidade da chaminé (fpm)

Vt = Volume total da Amostra (cf)

Ac = Área da chaminé (ft<sup>2</sup>)

$$\overline{Pmrc} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\overline{Pmrc} = \hspace{1cm} \text{(kg/h)}$$

Cálculo da Taxa de Emissão

$$\text{Taxa de Emissão} = \frac{\overline{Pmra} + \overline{Pmrc}}{2}$$

$$\text{Taxa de Emissão} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\text{Taxa} = \hspace{1cm} \text{kg/h}$$



### Cálculo de Concentração

#### Cálculo pelo Método de Amost.

$$C = \frac{\text{Material Particulado Total (mg)}}{\text{Volume total Amostrado (Nm}^3\text{)}}$$

$$V_{\text{normal}} = V_t \left( \frac{T_n}{T_c} \right) \left( \frac{P_c}{P_n} \right)$$

Onde:

$V_t$  = Volume total da Amostra ( $m^3$ ).

$T_n$  = Temperatura Normal =  $273^{\circ}K$ .

$T_c$  = Temperatura da chaminé ( $^{\circ}K$ )

$P_n$  = Pressão Normal = 29,92 (pol Hg)

$P_c$  = Pressão da chaminé (polHg)

$$V_{\text{normal}} = \underline{\hspace{10em}} =$$

$$C = \underline{\hspace{10em}} =$$

$$C = \hspace{10em} \text{mg/Nm}^3$$

#### Cálculo pelo método da Razão da Área

$$C^* = \frac{M_t}{V_{t^*}_n}$$

Onde:

$C^*$  = concentração de material particulado, calculada em base da Razão da Área ( $\text{mg/Nm}^3$ ).

$M_t$  = massa de material particulado total (mg)

$V_{t^*}_n$  = volume total da amostra, calculado em base da razão da área ( $\text{Nm}^3$ ).

$$V_{t^*} = O_t \times V_c \times A_b.$$

Onde:

$V_{t^*}$  = volume total da amostra ( $m^3$ ).

$O_t$  = tempo gasto na Amostragem (min.).

$V_c$  = velocidade na chaminé (m/min).

$A_b$  = Área da boquilha ( $m^2$ ).

$$Vt^* = \quad = \quad m^3$$

Nas condições normais,

$$Vt_n^* = Vt^* \frac{(T_n \text{ } ^\circ K)}{(T_c \text{ } ^\circ K)} \frac{(P_c \text{ pol. Hg})}{(P_n \text{ pol Hg})}$$

$$Vt_n^* = \quad = \quad (Nm^3)$$

$$C = \quad =$$

$$C = \quad mg/Nm^3$$

Cálculo da Concentração ( $C_m$ )

$$C_m = \frac{C^* + C}{2}$$

$$C_m = \quad =$$

$$C_m = \quad mg/Nm^3$$

Cálculo da Concentração de Dióxido de Enxofre

$$C_{SO_2} = \frac{32 \times (V_t - V_b) N \frac{V_{sol}}{V_a}}{V_{mp}}$$

$C_{SO_2}$  = concentração de dióxido de enxofre na condição padrão, base seca ( $mg/Nm^3$ ).

32 = equivalente grama de  $SO_2$

$V_t$  = volume de titulante (perclorato de Bário) gasto na amostra (ml).

$V_b$  = volume de titulante (perclorato de Bário) gasto na prova branca.

$N$  = normalidade do perclorato de Bário.

$V_{sol}$  = volume total da solução da qual se retirou uma alíquota (ml).

$V_a$  = volume da alíquota (ml)

Vmp = volume de gás Amostrado que passou no medidor (N.m<sup>3</sup>).

$$V_{mp} = V_m \times \frac{T_n}{T_m} \times \frac{P_m}{P_n} \text{ fcm}$$

Onde:

Vm = volume de gás Amostrado que passou no medidor (m<sup>3</sup>).

Tn = temperatura normal = 273°K.

Tm = temperatura do medidor (°K).

Pm = pressão do medidor (pol Hg).

Pn = pressão normal = 29,92 pol Hg.

f.c.m. = fator de correção do medidor.

$$V_{mp} = \underline{\hspace{4cm}} = \text{(Nm}^3\text{)}$$

$$C_{SO_2} = \underline{\hspace{4cm}} =$$

$$\overset{6}{SO_2} = \hspace{1.5cm} \text{mg/Nm}^3$$

PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DE PONTOS DE AMOSTRAGEM EM  
DUTO OU CHAMINÉ DE FONTES ESTACIONÁRIAS

Este procedimento fixa as condições exigíveis para a determinação de pontos de amostragem numa seção transversal de duto ou chaminé de fonte estacionária.

Este procedimento só é aplicável nos casos em que o sentido do fluxo dos gases é conhecido.

Este procedimento não é aplicável quando:

- a) o fluxo dos gases é ciclônico;
- b) o duto ou a chaminé tem diâmetro interno menor que 0,30 m ou seção transversal com menos de  $0,070 \text{ m}^2$ ;
- c) não for possível encontrar uma seção transversal que, dentre dois distúrbios de fluxo sucessivos, fique depois de dois ou mais diâmetros do primeiro e antes de 0,5 ou mais diâmetros do segundo no sentido do fluxo. Caso o duto ou chaminé tenha seção retangular, o diâmetro aqui referido será o diâmetro equivalente.

**Fluxo ciclônico**

Aquele no qual as linhas de fluxo não são paralelas ao eixo longitudinal do duto ou chaminé.

**Pitot S<sup>1</sup>**

Instrumento constituído de 2 tubos paralelos com duas tomadas de pressão, uma no mesmo sentido do fluxo e a outra em sentido contrário (V. FIGURA 24).

**Boquilha**

Componente móvel da sonda, por onde é captado o material a ser analisado (V. FIGURA 25).

CONDIÇÕES GERAIS



## CONDIÇÕES GERAIS

### Ocorrência de fluxo ciclônico

Para verificação da ocorrência de fluxo ciclônico, deve-se:

- a) conectar um Pitot S a um manômetro. Nivelar e zerar o manômetro;
- b) posicionar o Pitot S em cada ponto da seção transversal. Considerar como referência  $0^{\circ}$  (zero graus) a posição em que os planos das aberturas forem perpendiculares à seção transversal;
- c) ler a indicação do manômetro. Se indicar 0 (zero), anotar o valor do ângulo ( $0^{\circ}$ ). Se der indicação diferente de 0 (zero), girar o Pitot S até obter leitura nula no manômetro e anotar o ângulo de giro com aproximação de  $1^{\circ}$ ;
- d) calcular a média dos valores absolutos / de todos os ângulos, incluindo aqueles onde a rotação não foi necessária (ângulo igual a zero). Se a média for maior que  $10^{\circ}$ , a condição é de fluxo ciclônico.

### Seleção da seção transversal

#### Seção circular

Para chaminés ou dutos de seção circular a amostragem ou tomada de velocidade deve ser realizada, sempre que possível, na seção transversal situada a pelo menos 8 diâmetros internos e jusante e pelo menos 2 diâmetros internos a montante de qualquer distúrbio de fluxo, tal como o causado por curva, expansão, contração, chama visível, entrada ou desvios. Caso isto seja impraticável, deve ser selecionada uma seção transversal que esteja a pelo menos 2 diâmetros internos a jusante e 0,5 diâmetro interno a montante de qualquer distúrbio de fluxo.

#### Seção retangular

Para chaminés ou dutos de seção retangular, calcula-se o diâmetro equivalente pela seguinte fórmula:

$$D_{eq} = \frac{2 c l}{c + l}$$

onde:

$D_{eq}$  = diâmetro equivalente em m

c = comprimento em m

l = largura em m

Assim, a seção transversal onde será executada a amostragem ou a tomada de velocidade, deve estar, sempre que possível, a pelo menos 8 diâmetros equivalentes a jusante e pelo menos 2 diâmetros equivalentes a montante de qualquer distúrbio de fluxo, tal como o causado por curva, expansão, contração, chama visível, entrada ou desvio. Caso isto seja impraticável, deve ser selecionada uma seção transversal que esteja a pelo menos 2 diâmetros equivalentes a jusante e 0,5 diâmetro equivalente a montante de algum distúrbio de fluxo.

#### Determinação do número de pontos

Amostragem de material particulado em duto ou / chaminé de seção circular.

Quando a seção transversal selecionada for circular e satisfizer o critério de 8 e 2 diâmetros, o número mínimo de pontos será:

- a) 8 pontos - para diâmetro interno entre 0,30 m e 0,60 m.
- b) 12 pontos - para diâmetro interno maior q 0,60 m.

Quando a localização da seção transversal estiver fora da faixa de 8 e 2 diâmetros internos, o número mínimo de pontos é obtido da FIG. 26. Antes de se fazer uso da FIG. 26, medem-se as distâncias da seção transversal até o distúrbio de fluxo anterior e até o posterior, e exprimem-se essas distâncias em diâmetros internos. Assim, da FIG. 26, obtém-se dois números, um a partir da distância a jusante e outro da distância a montante (que podem ser / iguais); escolhe-se o maior e este deve ser considerado o número mínimo de pontos.

Nota: Nos dutos e chaminés circulares, o número de pontos deve ser sempre múltiplo de 4.

Amostragem de material particulado em duto ou chaminé de seção retangular.

Quando a seção transversal selecionada for retangular e satisfizer o critério de 8 e 2 diâmetros, o número mínimo de pontos será:

- a) 9 pontos - para diâmetro equivalente entre 0,30 m e 0,60 m.
- b) 12 pontos - para diâmetro equivalente maior que 0,60 m.

Quando a localização da seção transversal estiver fora da faixa de 8 e 2 diâmetros, o número mínimo de pontos é obtido na FIG. 26. Antes de se fazer uso da FIG. 26, medem-se as distâncias da seção transversal até o distúrbio de fluxo anterior e até o posterior, e exprimem-se essas distâncias em diâmetros equivalentes. Assim, da FIG. 26, /obtem-se dois números, um a partir da distância a jusante e outro da distância a montante (que podem ser iguais); escolhe-se o maior e este deve ser considerado como número mínimo de pontos.

#### Tomada de velocidade

Para determinar a velocidade ou a vazão de gases adotam-se os mesmos procedimentos, utilizando-se porém a fig. 27 e em vez da FIG. 26.

#### DISPOSIÇÃO DOS PONTOS NA SEÇÃO TRANSVERSAL

##### Seções circulares

Uma vez determinado o número de pontos da seção transversal, eles devem ser dispostos sobre dois diâmetros perpendiculares / (metade em cada diâmetro). A TAB. 01 dá a porcentagem do diâmetro para a disposição de cada ponto.

Para amostragem de material particulado, um dos diâmetros deve ficar no plano onde é esperada a maior variação de concentração.

Em dutos ou chaminés com diâmetro superior a 0,60 m, nenhum ponto deve ser disposto a uma distância inferior a 2,5 cm da parede. Caso o diâmetro interno da boquilha seja maior que 2,5 cm, a distân



a distância a partir da parede deverá ser no mínimo igual a esse diâmetro. Em dutos ou chaminés com diâmetro inferior a 0,60 m nenhum ponto deve ser disposto a uma distância inferior a 1,5 cm da parede. Caso o diâmetro da boquilha seja maior que 1,5 cm, a distância a partir da parede deverá ser no mínimo igual a esse diâmetro. Se alguns dos pontos coincidirem, estes devem ser tratados como pontos distintos, mesmo não havendo movimentação da sonda. A FIG. 27, mostra a disposição dos pontos numa seção circular no caso do número deste ser 12.

#### Seções retangulares

Uma vez determinado o número de pontos da seção transversal tira-se da Tab. 2 a matriz para a configuração da malha. Divide-se o maior lado da seção retangular pelo primeiro número de ordem da matriz e o lado menor pelo segundo número. Assim, configurados os retângulos elementares, no centro de cada um deles será localizado um ponto. Caso se deseje aumentar o número de pontos, deve-se partir da matriz inicial e aumentar o número de divisões em um dos lados da matriz ou em ambos. A FIG. 27 mostra a disposição dos pontos para o caso de uma matriz 4 x 3.

TABELA 1 - Disposição dos pontos de amostragem em dutos e chaminés circulares. (Porcentagem do diâmetro a partir da parede ao ponto)

Número de ordem do ponto no diâ- metro	NÚMERO DE PONTOS NO DIÂMETRO					
	2	4	6	8	10	12
1	14,6	6,7	4,4	3,2	2,6	2,1
2	85,4	25,0	14,6	10,5	8,2	6,7
3	-	75,0	29,6	19,4	14,6	11,8
4	-	93,3	70,4	32,3	22,6	17,7
5	-	-	85,4	67,7	34,2	25,0
6	-	-	95,6	80,6	65,8	35,6
7	-	-	-	89,5	77,4	64,4



Número de ordem do ponto no diâ- metro	NÚMERO DE PONTOS NO DIÂMETRO					
	2	4	6	8	10	12
8	-	-	-	96,8	85,4	75,0
9	-	-	-	-	91,8	82,3
10	-	-	-	-	97,4	88,2
11	-	-	-	-	-	93,3
12	-	-	-	-	-	97,9

TABELA 2 - Disposição dos pontos em dutos e chaminés retangulares

Nº de pontos	Matriz
9	3 x 3
12	4 x 3
16	4 x 4
20	5 x 4
25	5 x 5

## MÉTODO DE ENSAIO PARA DUTOS E CHAMINÉS DE FONTES ESTACIONÁRIAS

### Determinação da velocidade e vazão dos gases

Este método prescreve a forma de determinação da velocidade média e da vazão volumétrica do fluxo gasoso em duto ou chaminé de fonte estacionária, através do tubo Pitot S.

#### Pressão de velocidade

Pressão produzida pelo deslocamento de um fluido. Esta pressão é exercida no mesmo sentido da velocidade do fluido. Também chamada pressão cinética.

#### Velocidade média

Média aritmética das velocidades numa seção transversal de um duto ou chaminé, medidas nos pontos de amostragem.

#### Vazão volumétrica

Volume de um gás que passa através da seção transversal de um duto ou chaminé por unidade de tempo.

#### Condição padrão (dos gases numa chaminé ou duto)

Temperatura padrão (dos gases numa chaminé ou duto) de  $20^{\circ}$  e pressão de 760 mm Hg.

#### Aparelhagem

A aparelhagem necessária compreende:

- a) Tubo Pitot S;
- b) Medidor de pressão diferencial capaz de acusar uma variação de pressão de 1,3 mm  $H_2O$ , ou micromanômetro para os casos em que as pressões encontradas forem inferiores a 1,3 mm  $H_2O$ ;
- c) Termômetro de termopar capaz de acusar uma variação menor ou igual a 1,5% da temperatura absoluta mínima da chaminé;

- d) Manômetro em U capaz de acusar uma variação inferior ou igual a 333 Pa (2,5 mm Hg);
- e) Barômetro de mercúrio, capaz de acusar uma variação inferior ou igual a 333 Pa (2,5 mm Hg);
- f) Analisador de gases de combustão.

#### PROCEDIMENTO

##### Preparo do equipamento

Montar a aparelhagem conforme FIG. 28 e verificar todas as conexões para que não ocorram vazamentos.

Fazer o seguinte ensaio para verificar a existência de vazamentos;

a) injetar ar através da abertura do tubo de impacto até / que o manômetro em U registre uma pressão de velocidade de pelo menos 745 Pa (7,6 cm H<sub>2</sub>O) e fechar a abertura de impacto. A pressão deve permanecer estável durante 15 segundos;

b) Adotar o mesmo procedimento do lado da pressão estática, só que succionando para obter a pressão de pelo menos 745 Pa (7,6 cm H<sub>2</sub>O).

Nivelar e zerar o manômetro.

Nota: Deve-se fazer um controle periódico durante os ensaios porque as vibrações podem alterar o nível e o zero.

##### Determinações

Medir a pressão de velocidade (P) e a temperatura dos pontos especificados.

Nota: Verificar se o medidor de pressão diferencial utilizado é próprio para a faixa de valores de "p" encontrados. Se for necessário, utilizar um micromanômetro.

Após terminar todas as medições, fazer novo ensaio de vazamento para validar as mesmas. Se for constatado algum vazamento, re

repetir as operações.

Medir a pressão estática da chaminé

Medir a pressão atmosférica.

Determinar a massa molecular seca dos gases da chaminé

Determinar a unidade do gás.

Determinar a área da seção transversal do duto ou chaminé, no ponto da amostragem. Na impossibilidade de fazer medições diretas das dimensões da seção do duto ou chaminé, podem ser utilizadas as dimensões constantes do projeto.

## RESULTADOS

Calcular a velocidade média do gás nas condições da chaminé ( $v$ ) e a vazão volumétrica do gás seco ( $Q_s$ ), na condição padrão, usando as seguintes expressões:

$$1) \quad v = K_1 C_p (\overline{\Delta P})_m \sqrt{\frac{T}{PMM_u}}$$

$$2) \quad Q_s = \frac{3600 (1 - P_{VWA}) V A T P}{TP_p}$$

onde:

$v$  = velocidade média do gás, em m/s

$Q_s$  = vazão volumétrica do gás seco, na condição padrão, em m<sup>3</sup>/h

$p$  = pressão de velocidade dos gases, em mm H<sub>2</sub>O

$(\overline{\Delta P})_m$  = média das raízes quadradas de  $p$

$C_p$  = coeficiente do tubo Pitot S, adimensional

$K_1$  = constante do tubo Pitot S. No sistema métrico:

$$K_1 = 34,97 \text{ m/s} \left( \frac{(\text{g/g mol}) (\text{mm Hg})}{(\text{K}) (\text{mm H}_2\text{O})} \right)^{0,5}$$

$PMM_u$  = massa molecular do gás, base úmida, em g/g mol

$$PMM_u = PMM_s (1 - P_{VWA}) + 18 P_{VWA}$$

$PMM_s$  = massa molecular do gás, base seca, g/g mol (determinada de acordo com L9.223).



$P$  = pressão absoluta do gás, em mm Hg ( $P = P_{atm} + P_e$ )

$P_{atm}$  = pressão atmosférica, em Hg

$P_e$  = pressão estática do gás na chaminé ou duto, em mm Hg

$T$  = temperatura absoluta média do gás na chaminé ou duto, em K

PVA=proporção, em volume, do vapor de água no fluxo gasoso (determinada de acordo com L9.224)

$T_p$  = temperatura absoluta padrão = 293 K

$P_p$  = pressão absoluta padrão = 760 mm Hg

$A$  = área da seção transversal da chaminé ou duto, em  $m^2$

3600 = fator de conversão, em segundo/hora

18 = massa molecular da água, em g/g mol

Do relatório devem constar os dados referentes à empresa, ao duto ou chaminé, ao operador e aos equipamentos utilizados. Devem também constar as grandezas de cada ponto do duto ou chaminé, utilizadas para a determinação da velocidade média e da vazão volumétrica. Na apresentação dos resultados recomenda-se utilizar um formulário.

#### MÉTODO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA MOLECULAR SECA E DO EXCESSO DE AR DO FLUXO GASOSO

##### OBJETIVO

Prescreve-se o método de determinação da massa molecular base seca e do excesso de ar do fluxo gasoso de dutos e chaminés de fontes estacionárias.

Massa molecular base seca (de uma mistura de gases)

Somatório do produto da fração molar de cada componente, excluindo-se o vapor de água, pela respectiva massa molecular.

Excesso de ar

Quantidade de ar que excede a quantidade estequiométrica necessária para combustão completa.

Aparelhagem

Amostra instantânea

Sonda de material compatível com a corrosividade e temperatura do meio, equipada com filtro de lã de vidro, para retenção de material particulado.

Pera de borracha

Aparelho de Orsat

Amostra integrada

Trem de amostragem para vazões de 500 a 1000 /  
 $\text{cm}^3/\text{min}$ , composto basicamente de:

- a) sonda;
- b) condensador, capaz de reter a umidade sem remover  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  e  $\text{N}_2$ ;
- c) válvula de agulha;
- d) bomba de vácuo;
- e) medidor de vazão, com fundo de escala na faixa de 500 a 1000  $\text{cm}^3/\text{min}$ ;
- f) saco impermeável aos gases, c/capacidade de 50 a 100 litros.

Manômetro tipo tubo em U, capaz de medir pressões diferenciadas de até 2756 Pa (28 cm  $\text{H}_2\text{O}$ ).

Vacuômetro c/fundo de escala 101325 (760 mm Hg);

Aparelho Orsat

#### PROCEDIMENTO

##### Amostra instantânea

Montar a aparelhagem como mostra a FIG. 29 e, verificar se todas as conexões estão livres de vazamento.

Fazer um ensaio de vazamento no aparelho Orsat;

Localizar no eixo do duto ou chaminé um ponto para a tomada da amostra. No caso de dutos ou chaminés com diâmetro interno superior a dois metros, o ponto de amostragem pode estar fora do eixo, mas a não menos de um metro das paredes. Introduzir a sonda na chaminé ou duto, transversalmente, localizando sua extremidade no ponto de amostragem, e purgar a linha.

Tomar uma amostra no aparelho de Orsat e determinar as condições percentuais de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}$ , por diferença calcular a concentração / percentual de  $\text{N}_2$ .

Calcular a massa molecular base seca (MMs),  
como indicado.

Calcular a média aritmética das MMs obtidas.

Se, qualquer dos três valores diferir da  
média mais que 0,3 g/g mol., desprezar esse valor. Proceder assim, até  
que três valores quaisquer das MMs não difiram de sua média mais que 0,3 g  
/ga mol.

Adotar a média desses três valores como massa  
molecular base seca da mistura gasosa em questão.

Calcular as médias aritméticas das concentra-  
ções, para cada componente  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  e  $\text{N}_2$ , das amostras que originaram a  
média final das MMs.

Nota: Sugere-se empregar um formulário como o da FIG. 30 para facilitar os  
cálculos.

#### Amostragem integrada

Montar o equipamento como mostra a FIG. 31 e  
verificar se todas as conexões estão livres de vazamento.

Efetuar ensaio de vazamento no caso de coleta /  
de gases de acordo com o seguinte procedimento:

Conectar ao saco um manômetro de água e pressuri-  
zá-lo de 490 a 981 Pa (5 a 10 cm  $\text{H}_2\text{O}$ ). Qualquer variação no manômetro de água  
após 10 min. indica vazamento.

Efetuar ensaio de vazamento no trem antes de ini-  
ciar a amostragem, de acordo com o seguinte procedimento:

- Colocar o vacuômetro na entrada do condensador.  
Produzir na linha uma depressão de pelo menos 33330 Pa (250 mm Hg). Interrom-  
per o fluxo da saída da linha e imediatamente desligar a bomba de vácuo. O  
vácuo deve permanecer estável por pelo menos 30 s.

Localizar o ponto de amostragem.

Colocar a sonda na chaminé com sua extremidade po-  
sicionada no ponto de amostragem, e pugar a linha.

Iniciar e terminar a amostragem simultaneamente c/  
a determinação de emissão de poluentes. Esta mostra deve ser analisada dentro /  
de um período não superior a 8 h após a coleta.



## RESULTADOS

### Massa molecular base seca

Calcular a massa molecular base seca (MMs), em g/g.mol., da mistura gasosa, usando a seguinte fórmula:

$$MMs = 0,44 (\% CO_2) + 0,32 (\% O_2) + 0,28 ( (\% N_2) + (\% CO) )$$

### Excesso de ar

Calcular o excesso de ar (% EA) usando a seguinte fórmula:

$$\% EA = 100 \frac{(\% O_2) - 0,5 (\% CO)}{0,264 (\% N_2) - (\% O_2) + 0,5 (\% CO)}$$

Nota: A fórmula acima admite que a fonte de oxigênio é o ar ambiente e que o combustível não contém quantidades apreciáveis de N<sub>2</sub>.

## MÉTODO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DOS EFLUENTES

Este procedimento prescreve o método de determinação da umidade dos efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias de poluição de ar.

Esta norma prescreve três variantes do método / que são o método de referência, o método do fluxo saturado ou com gotículas e o método aproximado, que devem ser escolhidos de acordo com as características do fluxo e/ou necessidades de precisão na informação.

O método de referência deve ser utilizado quando o fluxo não está saturado e/ou não contém gotículas.

O método do fluxo saturado ou com gotículas deve ser utilizado quando o fluxo está saturado e/ou contém gotículas.

O método aproximado pode ser utilizado nos casos em que se deseja uma informação prévia, sem muita precisão, como por exemplo / para o estabelecimento das condições de amostragem. Este método só se aplica para fluxo não saturado e que não contém gotículas.

Nota: Casos especiais terão seus resultados validados após o estudo e aprovação pelo órgão oficial de defesa do meio ambiente.



#### Fluxo saturado

Aquele em que a pressão parcial do vapor do líquido em questão é igual à pressão do vapor saturado do mesmo líquido/ à mesma temperatura.

#### Pressão de vapor saturado

Máxima pressão exercida pelo vapor de um determinado líquido sobre sua superfície líquida no estado de equilíbrio vaporização/condensação, numa determinada temperatura.

#### Condições - padrão (de um gás)

Pressão de 101325 Pa (760 mm Hg) e temperatura de 293 K.

#### APARELHAGEM

Para a execução do ensaio é necessário a aparelhagem indicada a seguir.

No caso do método de referência:

a) sonda, de material compatível com a corrosividade e temperatura do meio, provida de Pitot S, de filtro para retenção do material particulado, de termopar e sistema de aquecimento que evite a condensação do vapor durante a amostragem;

b) condensador, composto de quatro borbulhadores ligados em série com conexões de vidro ou de outro material não contaminante, provido de termômetro na saída do 4º borbulhador, com menor divisão de 1°C. Os dois primeiros borbulhadores devem conter volumes conhecidos de água, o terceiro deve estar vazio e o quarto conter sílica-gel ou outro dessecante equivalente;

c) banho de gelo picado ou outro sistema de resfriamento equivalente;

d) sistema de medição e controle, composto basicamente de:

- vacuômetro;
- válvulas de agulha para controle do fluxo;
- bomba de vácuo;
- gasômetro seco, provido de termômetros na entrada

e saída com menor divisão de  $1^{\circ}\text{C}$ ;

- placa de orifício;

- manômetro diferencial;

e) barômetro de mercúrio ou aneróide, com menor divisão de 266,6 Pa (2 mm Hg);

f) proveta graduada com menor divisão de 1 ml e balança com menor divisão de 0,5 g que permita a pesagem do borbulhador com sílica-gel;

g) termômetro com menor divisão de  $1^{\circ}\text{C}$ , e cujo elemento sensível ou termopar é aquele acoplado à sonda (ver alínea a);

h) cronômetro.

No caso do método do fluxo saturado ou com gotículas, a aparelhagem é como a indicada em a), e), g) e manômetro diferencial.

Neste método o sensor do termopar deve ser protegido por um anteparo, de forma a se evitar que as gotículas entrem em contato direto com o sensor.

No caso do método aproximado a aparelhagem é a indicada com exceção do seguinte:

a) o condensador deve ser composto de dois borbulhadores de 30 ml, ligados em série, provido na sua saída de um tubo de secagem com sílica-gel ou outro dessecante;

b) o sistema de medição e controle deve ser composto de válvula de agulha para controle do fluxo, rotâmetro para vazões de zero a três litros por minuto, bomba de vácuo e gasômetro seco.

#### EXECUÇÃO DO ENSAIO

##### Método de referência

##### Princípio do método

Esta variante consiste em medir a umidade contida na amostra, condensando a parcela condensável e absorvendo em sílica-gel o não condensado. Assim o condensado é medido volumetricamente e o absorvido / gravimetricamente.

##### Procedimento

### Procedimento

Escolher uma sonda de tipo e comprimento adequados de modo que se tenha acesso a todos os pontos de amostragem.

Tarar o borbulhador que contém sílica-gel, arredondando para a graduação mais próxima. Alternativamente pode-se tarar/os quatro borbulhadores e pesá-los no final da coleta, obtendo assim, gravimetricamente tanto a parcela do condensado e a do não condensado.

Quantificar e localizar os pontos de amostragem.

Marcar adequadamente a sonda de forma que as mesmas marcas resistam às condições do fluxo gasoso sem se apagar.

Montar o trem de amostragem como mostra a FIG.32.

Ligar e regular o sistema de aquecimento para uma temperatura de  $120 \pm 10^{\circ}\text{C}$ .

Colocar gelo no sistema de resfriamento do condensador.

Determinar o perfil de velocidade no duto ou na chaminé.

Verificar se o trem de amostragem apresenta vazamento, fechando a entrada da sonda e produzindo uma depressão de 50663 pa (380 mm Hg). A taxa de vazamento não deve exceder 0,60 l/min nem 4% da vazão média de amostragem.

O tempo total mínimo de amostragem deve ser de 60 min e o valor mínimo deve ser de 600 litros nas condições-padrão, sendo que o tempo mínimo de coleta em cada ponto deve ser maior ou igual a 2 minutos. Uma vazão média recomendável é de cerca de 21 l/min.

Para cada ponto de amostragem, ou quando houver variação de vazão ou interrupção, coletar em todos os pontos e adicionar gelo suficiente para manter a temperatura abaixo de  $20^{\circ}\text{C}$  na saída do borbulhador c/ sílica-gel, para impedir perda excessiva de umidade.

Posicionar a boquilha no primeiro ponto, anotar a indicação do gasômetro, ligar imediatamente a bomba e ajustar o fluxo, mantendo



mantendo a vazão de aspiração proporcional à velocidade do efluente gasoso no ponto.

Depois da coleta pesar o líquido coletado e / determinar o aumento de massa de cada um dos borbulhadores com precisão de 0,5 g.

#### Método do fluxo saturado ou com gotículas

##### Princípio do método

Determina-se a temperatura média da seção / transversal do duto ou chaminé e a pressão absoluta (pressão barométrica + pressão estática). A partir destas informações obtém-se a umidade utilizando as tabelas de pressão de vapor de saturação ou cartas psicrométricas. Os fluxos que contêm gotículas são considerados saturados.

##### Procedimento

Escolher uma sonda do tipo e comprimento adequados de modo que se tenha acesso a todos os pontos de amostragem.

Quantificar e localizar os pontos de amostragem.

Marcar adequadamente a sonda de forma que as / marcas resistam às condições do fluxo gasoso sem se apagar.

Posicionar o sensor do termômetro nos pontos determinados no item anterior. Registrar as leituras obtidas e determinar a temperatura média.

Determinar a pressão estática da seção transversal e a pressão barométrica local.

Determinar a pressão de vapor de saturação entrando-se na Tabela com a temperatura média.

##### Método aproximado

##### Princípio do método

Esta variante consiste em medir a umidade contida na amostra, condensando a parcela condensável e admitindo que o não condensado represente 2,5% (em volume) do gás que deixa o condensador.

##### PROCEDIMENTO

Colocar 5 ml de água em cada um dos dois borbulhadores de 30 ml.



Escolher uma sonda de tipo e comprimento adequados de modo a que se alcance o centro da seção ou um ponto afastado no mínimo 1 metro da parede do duto ou chaminé.

Montar o trem de amostragem como mostra a FIG.33

Verificar se o trem de amostragem apresenta vazamento colocando um vacuômetro na entrada da sonda, ligar a bomba de vácuo produzindo uma depressão no sistema de forma que, ao se fechar a válvula situada após a saída do rotâmetro e desligar a bomba, o vacuômetro registre pelo menos 33330 Pa (250 mm Hg). A depressão indicada no vacuômetro deverá permanecer constante durante pelo menos um minuto. Retirar o vacuômetro cuidadosamente, antes de abrir a saída do rotâmetro, para evitar o refluxo.

Effectuar a amostragem, no centro da seção transversal ou em um ponto afastado pelo menos 1 metro da parede da chaminé ou duto, a uma vazão constante de cerca de 2 litros por minuto. Prosseguir a amostragem / até que o gasômetro indique uma passagem de cerca de 30 litros ou até que se observe o carregamento de gáticulas do primeiro para o segundo borbulhador.

Depois de concluída a coleta, misturar o conteúdo dos dois borbulhadores e pesar a água coletada com precisão de 0,5 g.

#### RESULTADOS

##### Método de referência

Calcular o volume de vapor de água coletada nos borbulhadores, nas condições-padrão, pela seguinte fórmula:

$$V_{ag \ c \ p} = 0,001335 (M_f - M_i)$$

Onde:

$V_{ag \ c \ p}$  = volume de vapor de água coletado nos borbulhadores, nas condições padrão, em m<sup>3</sup>;

$M_f$  = massa final dos borbulhadores, em g

$M_i$  = massa inicial dos borbulhadores, em g

Calcular o volume de gás seco medido no gasômetro, nas condições padrão, pela seguinte fórmula:

$$V_{ag \ c \ p} = \frac{0,3858 \ Y \ V_g \ P_g}{T_g}$$

Onde:

$V_{g\ c\ p}$  = volume do gás seco medido no gasômetro, nas condições padrão em  $m^3$ ;

$y$  = fator de calibração do gasômetro, adimensional;

$V_g$  = volume de gás seco medido no gasômetro, nas condições de ensaio, em  $m^3$ ;

$P_g$  = pressão absoluta no gasômetro (pode ser considerada igual à pressão barométrica) em mm Hg;

$T_g$  = média das temperaturas médias do gás na entrada e saída do gasômetro em K.

Calcular a umidade dos gases pela seguinte fórmula:

$$Bag = \frac{V_{g\ c\ p}}{V_{g\ c\ p} + V_g\ c\ p}$$

Onde:

$Bag$  = umidade expressa em termos de proporção em volume do vapor de água nos gases da chaminé ou duto.

Método do fluxo saturado

Calcular a umidade dos gases pela seguinte fórmula:

mula:

$$Bag = \frac{P\ V\ S}{P_{atm} + P_e}$$

Onde:

$Bag$  = umidade dos gases, expressa em termos de proporção em volume do vapor de água nos gases da chaminé ou duto.

$PVS$  = pressão de vapor de saturação em  $N/m^2$

$P_{atm}$  = pressão atmosférica em  $N/m^2$

$P_e$  = pressão estática na seção de coleta, em  $N/m^2$ .

Método aproximado

Calcular o volume de vapor de água condensado nos borbulhadores, nas condições-padrão, pela seguinte fórmula:

$$V_{ag \ c \ p} = 0,001335 (M_f - M_i)$$

Onde:

$V_{ag \ c \ p}$  = volume de vapor de água condensado nos borbulhadores, nas condições-padrão em m<sup>3</sup>;

$M_f$  = massa total final do conteúdo dos borbulhadores em g;

$M_i$  = massa total inicial do conteúdo dos borbulhadores, em g;

Calcular o volume de gás seco, nas condições-padrão, pela seguinte fórmula:

$$V_{g \ c \ p} = \frac{0,3858 \ y \ V_g \ P_g}{T_g}$$

Onde:

$V_{g \ c \ p}$  = volume de gás seco medido no gasômetro nas condições-padrão em m<sup>3</sup>;

Calcular a unidade dos gases pela seguinte fórmula:

$$B'_{ag} = 0,025 + \frac{V_{ag \ c \ p}}{V_{ag \ c \ p} + V_{g \ c \ p}}$$

Onde:

$B'_{ag}$  = unidade aproximada, expressa em termos de proporção em volume de vapor de água nos gases da chaminé ou duto.

#### Coletania isocinética

Coleta realizada em condições tais que o fluxo de gás da entrada do equipamento da amostragem, tenha a mesma velocidade que o fluxo de gás que se pretende analisar.

#### APARELHAGEM

Para execução do ensaio é necessário a aparelha descrita / a seguir.

#### Equipamentos para amostragem

- Conjunto de boquilhas de aço inox com bordas finas e cônicas.
- Sonda de material compatível com a corrosividade e temperatura do meio, pro-

promovida de Pitot S, de termopar e de sistema de aquecimento que evite a condensação de vapor durante a amostragem.

- Ciclone com erlenmeyer
- Porta-filtro de vidro de borossilicato.
- Sistema de aquecimento capaz de manter a temperatura de  $120 \pm 10^{\circ}\text{C}$  no porta-filtro, durante todo o período de coleta.
- Condensador composto de quatro borbulhadores do tipo Greenburg Smith ligados em série com conexões de vidro ou de outro material não contaminante, provido de termômetro na saída do quarto borbulhador, com menor divisão de  $1^{\circ}\text{C}$ . Os dois primeiros borbulhadores devem conter volumes conhecidos de água, o terceiro deve estar vazio e o quarto deve conter sílica-gel.

Nota: O segundo borbulhador deve ser com ponta normal e os outros três c/ ponta modificada.

- Ban ho de gelo picado ou outro sistema de resfriamento equivalente.
- Sistema de medição e controle composto basicamente de:
  - a) vacuômetro;
  - b) válvulas de agulha para controle do fluxo;
  - c) bomba de vácuo;
  - d) gasômetro seco, provido de termômetros na entrada e saída com menor divisão de  $1^{\circ}\text{C}$ ;
  - e) placa de orifício;
  - f) dois manômetros diferenciais com fundo de escala de 2452 Pa (250 mm H<sub>2</sub>O);  
Nota: Os casos de pressões de velocidade inferiores a 12,75 Pa (1,3 mm H<sub>2</sub>O) requerem o uso de manômetros de alta sensibilidade.
  - g) barômetro com menor divisão de 266,6 Pa (2 mm Hg);
  - h) termômetro com menor divisão de  $1^{\circ}\text{C}$ , e cujo elemento sensível ou termopar é aquele acoplado à sonda;
  - i) cronômetro.



#### Aparelhagem para preparação e análise da amostra

- Escova com comprimento um pouco maior que o da sonda.
- Duas pissetas de vidro ou de polietileno.
- Frasco de vidro de borossilicato ou de polietileno, com capacidade de 500 a 1.000ml, com tampa de vidro ou de polietileno.
- Placas de Petri.
- Cilindro graduado e balança, com precisão de 1 ml e 0,5 g respectivamente.
- Frasco de plástico para armazenar a sílica-gel.
- Vidro de relógio.
- Dessecador.
- Balança analítica com precisão de 0,1 mg.
- Béquers de 250 ml.

#### EXECUÇÃO DO ENSAIO

##### Princípio do método

O material particulado é coletado isocineticamente ponto a ponto e sua massa é determinada gravimetricamente. Simultaneamente é determinado o volume do gás amostrado. A concentração de material particulado é obtida pela relação entre ambos.

##### Reagentes

Filtros de fibra de vidro, livre de compostos orgânicos, apresentando pelo menos 99,95% de eficiência para retenção de partículas de até 0,3  $\mu$ m

Sílica-gel, com indicador de umidade, com granulometria de 1,0 a 3,4 mm (aproximadamente 16 a 6 mesh).

Água destilada.

Acetona grau p.a., com resíduo máximo de 0,001%

Sulfato de cálcio anidro ou outro dessecante - equivalente com indicador de umidade.

##### Procedimento

Antes de iniciar a amostragem certificar-se de que a aparelhagem esteja calibrada de acordo com E16.030.

##### Preparação preliminar

Pesar aproximadamente 200 - 300 g de sílica-gel,

no borbulhador que será utilizado na amostragem.

Nota: Sílica-gel previamente utilizada deve ser secada durante duas horas a  $175^{\circ}\text{C}$  para poder ser reutilizada.

Certificar-se visualmente que os filtros não / apresentam qualquer irregularidade, numerá-los e dessecá-los a  $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$  à pressão ambiente pelo menos durante 24 horas.

A seguir pesá-los, com precisão de 0,1 mg, a cada intervalo de 6 horas até que a diferença entre duas pesagens consecutivas seja igual ou inferior a 0,5 mg.

Nota: Durante cada pesagem o filtro não deve ficar exposto ao ambiente do laboratório, cuja umidade <sup>relativa</sup> não deve ser superior a 50%, por mais de dois minutos.

#### Determinação preliminar

Selecionar o local de amostragem e o número de pontos na seção transversal.

Determinar a pressão estática na seção de amostragem.

Determinar a temperatura na seção de amostragem.

Determinar a pressão de velocidade.

Determinar o teor de umidade

Determinar o tempo de coleta de cada ponto de acordo com a fonte a ser amostrada, não devendo este ser menor que 2 minutos.

Selecionar a boquilha da sonda para uma faixa / de pressão de velocidade de modo que não ocorra troca durante a amostragem (v. anexo).

#### Preparo dos equipamentos para coleta de amostra

Montar o trem de amostragem como mostra a FIG.34

Colocar 100 ml de água destilada em cada um dos dois primeiros borbulhadores, deixando o terceiro vazio e o quarto com a sílica-gel.

Passar cada um dos borbulhadores com precisão de 0,5 g.

Colocar o filtro, previamente tarado no porta-filtro.

Manter os borbulhadores no banho de gelo.

#### Teste de vazamento

Fechar a entrada da boquilha e ligar o sistema de aquecimento da sonda e do porta-filtro. Aguardar até que a câmara do porta-filtro atinja a temperatura de  $120 \pm 10^\circ\text{C}$ . Abrir completamente a válvula de ajuste fino, fechar a válvula de ajuste grosso e ligar a bomba de vácuo. Abrir parcialmente a válvula de ajuste grosso e vagarosamente fechar a válvula de ajuste fino até que se atinja uma depressão de 50663 Pa (380 mm Hg). Um vazamento de até 0,60 l/min é tolerável. Para eliminar a depressão no sistema, abrir vagarosamente a entrada da boquilha e desligar imediatamente a bomba.

#### Coleta da amostra

Ligar o sistema de aquecimento da sonda.

Durante a amostragem, a temperatura do filtro / deve permanecer na faixa de  $120 \pm 10^\circ\text{C}$ .

Anotar a leitura inicial do gasômetro e a pressão barométrica, e zerar os manômetros antes de iniciar a amostragem.

Colocar a sonda no interior da chaminé ou duto no primeiro ponto, tendo o cuidado de verificar se a válvula do ajuste grosso está completamente fechada e a do ajuste fino completamente aberta.

Ligar a bomba e ajustar o fluxo, abrindo a válvula de ajuste grosso e, em seguida, ajustar a vazão com a válvula do ajuste fino para uma amostragem isocinética e simultaneamente acionar o cronômetro. Considerar isocinética a amostragem em cada ponto se estiver entre 90 e 110%.  
Nota: Nomógrafos e calculadoras são necessários para a facilidade de operação isocinética.

Certificar-se de que a depressão no vacuômetro / não exceda 50663 Pa (380 mm Hg). Se isto ocorrer, repetir o teste de vazamento e trocar o filtro. Anotar a taxa de vazamento caso este ocorra.

Manter a temperatura dos gases que saem do último borbulhador (sílica-gel) abaixo de  $20^\circ$ .

O tempo de coleta em cada ponto não deve ser inferior a 2 min e o tempo total de coleta, não deve ser inferior a 60 min. O volume total coletado não deve ser inferior a 850 l.



Coletar amostra do gás para determinação da sua massa molecular seca.

No final da amostragem, simultaneamente desligar a bomba de vácuo e o cronômetro. Retirar a sonda do interior da chaminé ou do tubo e registrar a leitura final do gasômetro.

Fazer teste de vazamento, na depressão máxima registrada durante a amostragem e anotar a taxa de vazamento caso este ocorra.

Calcular o valor da isocinética. Considerar válida a amostragem somente se o valor encontrado estiver na faixa de 90 a 110%.

#### Recuperação e manuseio da amostra

Remover a sonda e fechar com rolha todas as aberturas existentes na sonda, porta-filtro e borbulhadores.

Remover em um vidro de relógio, previamente pesado, o filtro com a amostra coletada de material particulado.

Remover em bôquer, previamente pesado, todo o material particulado depositado no interior da boquilha sendo ciclone e erlenmeyer. Nota: Para remover o material particulado da boquilha, sonda, ciclone e erlenmeyer utilizar a escova e uma mistura de acetona e água destilada. Lavar até que nenhum material seja percebido visualmente.

Registrar o volume total da mistura utilizada.

#### Análise

Colocar o vidro de relógio que contém o filtro em um dessecador contendo sulfato de cálcio anidro ou de um dessecante equivalente por 24 horas.

Pesá-los, com precisão de 0,1 mg, a cada intervalo de 6 horas até que a diferença entre duas pesagens consecutivas seja igual ou inferior a 0,5 mg.

Nota: Durante cada pesagem o filtro não deve ficar exposto ao ambiente do laboratório, cuja umidade relativa não deve ser superior a 50%, por mais de dois minutos.

Colocar numa placa de aquecimento o bôquer que contém o material particulado até evaporação total da mistura.

Dessecar por 24 horas e pesar com aproximação de 0,1 mg, anotando a massa somente quando a diferença entre duas pesagens consecutivas



consecutivas for menor ou igual que 0,5 mg.

Nota: Durante cada pesagem o filtro não deve ficar exposto ao ambiente do laboratório, cuja umidade relativa não deve ser superior a 50%, por mais de dois minutos.

Pesar cada um dos borbulhadores com precisão de 0,5 g.

Efetuar a prova em branco da mistura, da seguinte maneira:

- colocar 200 ml da mistura acetona/água destilada em béquer de 250 ml previamente pesado e proceder conforme instruções anteriores.

Determinar a massa molecular seca.

#### Representatividade da amostragem

É necessário que a amostragem seja representativa das condições de operação da fonte de emissão. Deve-se então efetuar pelo menos duas determinações de material particulado por fonte. A amostragem deve ser considerada representativa se os resultados obtidos em cada coleta / não forem discrepantes entre si.

#### RESULTADOS

Pressão absoluta do gás na chaminé ou duto:

$$P = P_{atm} + P_e$$

Pressão absoluta do gasômetro:

$$P_g = P_{atm} + \frac{\Delta H}{13,6}$$

Volume de água nas condições da chaminé ou duto

nos casos de fluxo não saturado e sem gotículas:

$$V_{ag} = \frac{0,00346 T M_{ag}}{P}$$

Volume de gás medido nas condições da chaminé

ou duto:

$$V = \frac{Y V_g T P_g}{P T_g}$$

sendo que:

$$V_g = V_{gf} - V_{gi}$$

No caso de constatar-se, durante e/ou final da amostragem, um vazamento superior a 0,6 l/min o valor de  $V_g$  deve ser calculado como abaixo indicado:

$$V_g = (V_{gf} - V_{gi}) - \sum_{i=1}^n Q_i \cdot O_i$$

Unidade nos casos de fluxo não saturado e sem gotículas:

$$B_{ag} = \frac{V_{ag}}{V_{ag} + V}$$

Unidade nos casos de fluxo saturado ou com gotículas:

$$B_{ag} = \frac{PVS}{P_{atm} + P_e}$$

Volume de água nas condições da chaminé ou duto nos casos de fluxo saturado ou com gotículas:

$$V_{ag} = \frac{B_{ag} \cdot V}{1 - B_{ag}}$$

Massa molecular base úmida:

$$MM_u = MM_s (1 - B_{ag}) + 18 B_{ag}$$

Velocidade média do gás na chaminé ou duto:

$$v = 34,97 \cdot C_p \cdot \sqrt{\frac{T}{P \cdot MM_u}} \cdot (\sqrt{\Delta P})_m$$

Isocinética:

$$a) \quad I^* = \frac{0,0477 \cdot Y \cdot V^*_{ag} \cdot P_{g_1}}{C_p \cdot O^*_{Ab} \cdot T^*_{g_1} \cdot (1 - B^*_{ag}) \cdot (\sqrt{\Delta P})^* \cdot \sqrt{\frac{P}{T^*_{g_1} \cdot MM_u}}}$$

$$b) \quad I = \frac{1,667 \cdot (V + V_{ag})}{v \cdot O_{Ab}}$$

Vazão nas condições normais (0°C e 1 atm),  
base seca:

$$Q_{nbs} = \frac{0,3692 \cdot Q \cdot P \cdot (1 - B_{ag})}{T}$$

Volume do gás medido nas condições normais

normais ( $0^{\circ}\text{C}$  e 1 atm), base seca:

$$V_{gn} = \frac{0,3592 V_g P_g Y}{T_g}$$

Concentração de material particulado nas condi-

ções normais, base seca:

$$C = \frac{M_{mp}}{V_{gn}}$$

Taxa de emissão de material particulado:

$$T_e = 10^{-6} C Q_{nbs}$$

<u>Símbolo</u>	<u>Unidade</u>	<u>Significado</u>
Ab	m <sup>2</sup>	Área da boquilha
A	m <sup>2</sup>	Área da chaminé
Bag	adimens.	Unidade dos gases expressa em termos de proporção em volume do vapor de água dos gases da chaminé ou duto.
B*ag	adimens.	Unidade dos gases avaliada previamente para o / ponto de coleta e intervalo de tempo $\Delta t$ , expressa em termos de proporção em volume do vapor de água nos gases da chaminé ou duto.
C	mg/NM <sup>3</sup>	Concentração de material particulado nas condições normais, base seca
Cp	adimens.	Coefficiente do Pitot S
I	%	Isocinética
I*	%	Isocinética no ponto de coleta no intervalo de tempo $\Delta t$
M <sub>ag</sub>	g	Massa total de água coletada nos borbulhadores
M <sub>mp</sub>	mg	Massa total de material particulado coletado
M <sub>Ms</sub>	g/g mol	Massa molecular base seca
M <sub>Mu</sub>	g/g mol	Massa molecular base úmida
P	mm Hg	Pressão absoluta do gás na chaminé ou duto
P <sub>atm</sub>	mm Hg	Pressão atmosférica
P <sub>e</sub>	mm Hg	Pressão estática da chaminé ou duto

<u>Símbolo</u>	<u>Unidade</u>	<u>Significado</u>
Pg	mm Hg	Pressão absoluta no gasômetro
PVS	mm Hg	Pressão de vapor de saturação
Q	m <sup>3</sup> /h	Vazão do efluente nas condições da chaminé ou duto.
Qi	m <sup>3</sup> /min	Taxa de vazamento no período i
Qns	Nm <sup>3</sup> /h	Vazão do efluente nas condições normais, base - seca.
T	K	Temperatura absoluta média do gás na chaminé ou duto
T <sup>o</sup>	K	Temperatura absoluta do gás no ponto de coleta
Te	Kg/h	Taxa de emissão de material particulado
Tg	K	Média das temperaturas médias do gás na entrada e saída do gasômetro.
T <sup>o</sup> g	K	Média das temperaturas do gás na entrada e saída do gasômetro no ponto de coleta.
v	m/s	Velocidade média do gás na chaminé ou duto
V	m <sup>3</sup>	Volume do gás medido no gasômetro nas condições da chaminé ou duto
Vag	m <sup>3</sup>	Volume de água nas condições da chaminé ou duto
Vg	m <sup>3</sup>	Volume de gás seco medido no gasômetro nas condições de ensaio
V <sup>o</sup> g	m <sup>3</sup>	Volume do gás seco coletado no ponto de coleta, no intervalo de tempo 0 <sup>o</sup> , medido no gasômetro / nas condições de ensaio
Vgf	m <sup>3</sup>	Leitura final no gasômetro
Vgi	m <sup>3</sup>	Leitura inicial no gasômetro
Vgn	Nm <sup>3</sup>	Volume de gás medido nas condições normais, base seca
Y	adimens.	Fator de correção do medidor
H	mm H <sub>2</sub> O	Média aritmética das pressões do orifício
P	mm H <sub>2</sub> O	Pressão de velocidade da chaminé ou duto
Ob	m	Diâmetro da boquilha



<u>Símbolo</u>	<u>Unidade</u>	<u>Significado</u>
O	min	Tempo total de coleta
O'	min	Tempo de coleta no ponto de coleta
O <sub>i</sub>	min	Duração do período i
( P ) <sub>m</sub>	(mm H <sub>2</sub> O) <sup>0,5</sup>	Média das raízes quadradas de P
( P )'	(mm H <sub>2</sub> O) <sup>0,5</sup>	Raiz quadrada de P no ponto de coleta

#### SELEÇÃO DE BOQUILHA

A fim de manter a condição isocinética durante toda a amostragem sem troca de boquilha é de fundamental importância a boa escolha do diâmetro.

Existem vários caminhos a seguir para a seleção do diâmetro mais adequado de boquilha para cada conjunto de condições de uma amostragem.

O procedimento baseado no cálculo direto do diâmetro da boquilha, baseado nas condições fluidodinâmicas no conjunto chaminé-tubo de amostragem, é mais genérico e por isso é aqui recomendado.

O diâmetro da boquilha, por este procedimento, é calculado pela seguinte fórmula:

$$D_b = \sqrt{\frac{608 Q_m P_g}{T_m C_p (1-Bag)}} \times \sqrt{\frac{T_{MMu}}{P \cdot P}}$$

Onde:

D<sub>b</sub> = diâmetro da boquilha em mm

Q<sub>m</sub> = vazão do fluxo gasoso no medidor, em m<sup>3</sup>/min

T<sub>m</sub> = temperatura no medidor, em K

P = média das pressões de velocidade, em mm H<sub>2</sub>O

P<sub>g</sub>, C<sub>p</sub>, Bag, T. MMu e P têm o significado e unidades indicados anteriormente.

Escolhe-se a boquilha cujo diâmetro mais se aproxime do cálculo acima.

## MÉTODO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO DIÓXIDO DE ENXOFRE

Este procedimento prescreve o método de determinação de dióxido de enxofre do fluxo basoso em dutos ou chaminés de fontes estacionárias.

que o  
Este procedimento só se aplica nos casos de fluxos não contêm gotículas.

Nota| Casos especiais terão seus resultados validados após estudo e aprovação pelo órgão oficial de defesa do meio ambiente.

### APARELHAGEM (V FIG 34)

Para execução do ensaio é necessário a aparelhagem descrita a seguir:

#### Equipamentos para amostragem

Sonda de material compatível com a corrosividade e temperatura do meio, provida de sistema de aquecimento que evite a condensação de vapor durante a amostragem e de filtro de lã de vidro para remover o material particulado e névoas ácidas.

Quatro borbulhadores de vidro de 30 ml, ligados em série, com juntas esféricas de vidro esmerilhado. O primeiro deve ser provido de lã de vidro na sua parte superior e o quarto, na sua saída, de um termômetro com menor divisão de 1°C.

Tubo com sílica-gel, com indicador de umidade, com granulometria de 1,0 a 3,4 mm (aproximadamente 16 a 6 mesh).

Válvula de agulha para controle do fluxo.

Bomba de vácuo.

Rotâmetro para vazões em torno de 100 cm<sup>3</sup>/min.

Gasômetro seco provido de termômetro com menor divisão de 1°C

Barômetro com menor divisão de 266,6 (2 mm Hg).

Banho de gelo picado ou outro sistema de resfriamento equivalente.

Cronômetro.

Vacuômetro com fundo de escala de 101325 Pa (760 mm Hg).

Aparelhagem para preparação e análise da amostra

Duas pissetas de polietileno ou de vidro.

Frascos de polietileno de 500 ml para armazenar as amostras dos borbulhadores.

Pipetas volumétricas de 5 ml, 20 ml e 25 ml.

Balões volumétricos de 100 ml e 1000 ml.

Buretas de 5 e 50 ml.

Erlenmeyers de 250 ml.

Frasco conta-gotas para adicionar o indicador.

Proveta de 100 ml.

#### EXECUÇÃO DO ENSAIO

##### Límite de detecção

O limite de detecção para este poluente é de 3,4 mg de  $\text{SO}_2$ /m<sup>3</sup>.

##### Interferências

As possíveis interferências para determinação de dióxido de enxofre são a amônia livre, cátions solúveis em água e fluoretos.

Os cátions e fluoretos são removidos com filtro de lã de vidro e um borbulhador contendo isopropanol.

Quando se tratar de fluxo gasoso com altas concentrações de fumos metálicos deve-se usar um filtro de fibra de vidro com eficiência de pelo menos 99,95% no lugar de lã de vidro, para remover os cátions interferentes.

A amônia livre interfere reagindo com o  $\text{SO}_2$ , formando sulfatos com o indicador.

##### Reagentes

Água destilada deionizada.

Isopropanol 100% e a 80% em volume.

Peróxido de hidrogênio a 3% em massa.

Solução de iodeto de potássio a 10%

Indicador torina (sal dissódico do ácido 1 - (o arsenofenilazo) -2- naftol - 3,6 - dissulfônico) a 0,2%

Solução de perclorato de bário 0,01 N.



Ácido sulfúrico 0,01 N.

Lã de vidro.

Nota: Todas as soluções devem ser preparadas com reagentes p.a.

#### Procedimento

Antes de iniciar a amostragem certificar-se de que a aparelhagem esteja calibrada.

#### Preparação preliminar

Montar o trem de amostragem como mostra a figura.

Colocar 15 ml de isopropanol a 80% no primeiro borbulhador e 15 ml de peróxido de hidrogênio no segundo e terceiro borbulhadores. Deixar o quarto borbulhador vazio.

Regular o aquecimento da sonda a uma temperatura suficiente para evitar a condensação de água.

Manter os borbulhadores no banho de gelo.

Efetuar teste de vazamento antes de iniciar a coleta de acordo com o seguinte procedimento.

- Fechar a entrada da sonda e produzir uma depressão de pelo menos 33330 Pa (250 mm Hg). A vazão do vazamento não deve exceder a 2% da vazão de coleta. Abrir cuidadosamente a entrada da sonda e desligar a bomba.

#### Coleta da amostra

Anotar a leitura inicial do gasômetro seco e a pressão barométrica.

Posicionar a ponta da sonda no ponto de coleta.

Conectar a sonda ao borbulhador e ligar a bomba.

Ajustar o fluxo da coleta a uma vazão de aproximadamente /  $1000 \text{ cm}^3/\text{min}$  no rotâmetro. Manter constante esta vazão durante toda a amostragem. O tempo mínimo de coleta deve ser 20 min e o volume total coletado não deve ser inferior a 20 l.

A cada cinco minutos anotar o volume e a temperatura do gás no gasômetro seco, a temperatura do último borbulhador e a depressão indicada / pelo vacuômetro.

Adicionar gelo durante a coleta para garantir que os gases



para que os gases saiam do último borbulhador com uma temperatura não superior a 20°C.

No final da coleta desligar a bomba, retirar a sonda do ponto de amostragem, anotar as leituras finais e efetuar o teste de vazamento como descrito, anotando a taxa de vazamento caso este ocorra. O teste / de vazamento deve ser conduzido na depressão máxima registrada durante a amostragem.

Se a taxa de vazamento for superior a 2% da vazão de coleta, desprezar a amostragem.

Passar ar limpo através do sistema durante 15 minutos a uma vazão de aspiração igual à de coleta.

Nota: Ar limpo pode ser obtido passando-se ar através de um filtro de carvão ativado.

#### Recuperação da amostra

Retirar os borbulhadores do banho de gelo e descartar o conteúdo do primeiro borbulhador.

Transferir os conteúdos dos outros borbulhadores para um / frasco de polietileno.

Lavar os três borbulhadores com água destilada deionizada e juntar essa água de lavagem ao frasco de polietileno e identificar o frasco.

#### Análise da amostra

Transferir o conteúdo do frasco de polietileno para um balão volumétrico de 100 ml e diluir com água destilada deionizada até a marca do balão.

Pipetar uma alíquota de 20 ml dessa solução para um erlenmeyer de 250 ml, adicionar 80 ml de isopropanol 100% e 2 a 4 gotas de indicador tornina e titular com perclorato de bário 0,01 N até o ponto de viragem (de verde para rosa).

Repetir a titulação para uma segunda alíquota.

Calcular a média das duas titulações.

TREM DE AMOSTRAGEM PARA SO<sub>2</sub> V. FIG. 35

Nota: a diferença dos volumes do titulante gasto nas titulações não deve ser maior que 1% ou 0,2 ml.

Fazer teste em branco para cada série de análises.

#### Representatividade da amostragem

É necessário que a amostragem para determinação do dióxido de enxofre e da vazão seja representativa das condições de operação da fonte de emissão. Deve-se então efetuar pelo menos duas determinações de  $\text{SO}_2$  e de vazão por fonte. A amostragem deve ser considerada representativa se os resultados obtidos em cada coleta não forem discrepantes entre si.

Determinação do volume do gás medido nas condições normais base seca.

$$V_{gn} = \frac{0,359 Y V_g P_g}{T_g}$$

onde:

$V_{gn}$  = volume do gás medido nas condições normais, base seca, em  $\text{Nm}^3$ .

$Y$  = fator de correção do medidor, adimensional.

$V_g$  = volume do gás seco medido no gasômetro nas condições / de ensaio, em  $\text{m}^3$ .

$P_g$  = pressão absoluta no gasômetro, em MMHg

$T_g$  = média das temperaturas do gás na entrada do gasômetro, em K.

#### Concentração de dióxido de enxofre

$$C_{\text{SO}_2} = \frac{32,03 N(V_t - V_{tb}) V_{sol}}{V_a V_{gn}}$$

onde:

$C_{\text{SO}_2}$  = concentração de dióxido de enxofre nas condições normais, base seca, em  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ .

$N$  = normalidade do perclorato de bário, em equivalente - grama/litro.

$V_t$  = volume de perclorato de bário gasto na titulação, em ml.

$V_{tb}$  = volume de perclorato de bário gasto na titulação na prova em branco, em ml.

$V_{sol}$  = volume total da solução da qual se tirou uma alíquota, em ml.

$V_a$  = volume da alíquota, em ml.

$V_{gn}$  = volume do gás medido no gasômetro seco nas condições normais, base seca, em Nm<sup>3</sup>.

Taxa de emissão de dióxido de enxofre

$$Te_{SO_2} = 0,9317 \cdot 10^{-6} \cdot C_{SO_2} \cdot Q_s$$

onde:

$Te_{SO_2}$  = taxa de emissão de dióxido de enxofre, em kg/h

$C_{SO_2}$  = concentração de dióxido de enxofre nas condições normais, base seca em mg/Nm<sup>3</sup>.

$Q_s$  = vazão volumétrica do gás seco, na condição padrão, em m<sup>3</sup>/h.

#### MÉTODO DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DE DIÓXIDO DE ENXOFRE E DE NÉVOAS DE ÁCIDO SULFÚRICO E TRIÓXIDO DE ENXOFRE:

Este procedimento prescreve o método de determinação de dióxido de enxofre e de névoas de ácido sulfúrico e trióxido de enxofre do fluxo gasoso em dutos ou chaminés de fontes estacionárias.

Nota 1: O material particulado pode ser determinado conjuntamente, inserindo-se um filtro de fibra de vidro aquecido entre a sonda e o primeiro borbulhador. Se esta opção for a escolhida a análise de material particulado deve ser gravimétrica e as névoas de ácido sulfúrico e trióxido de enxofre não podem ser determinadas separadamente.

Nota 2: Casos especiais terão seus resultados validados após estudo e aprovação pelo órgão oficial de defesa do meio ambiente.

#### APARELHAGEM

Para a execução do ensaio é necessária a aparelhagem descrita a seguir:



#### Equipamentos para amostragem

Conjunto de boquilhas de aço inox com bordas finas e cônicas.

Sonda, de material compatível com a corrosidade e temperatura do meio, provida de Pitot S, de termopar e de sistema de aquecimento que evite a condensação de vapor durante a amostragem.

Ciclone com erlenmeyer.

Porta-filtro de vidro de borossilicato.

Condensador, composto de quatro borbulhadores do tipo Greenburg Smith ligados em série com conexões de vidro ou de outro material não contaminante, provido de termômetro da saída do quarto borbulhador, com menor divisão de  $1^{\circ}\text{C}$ .

Nota: O primeiro e o terceiro borbulhadores devem ser com ponta normal e o segundo e quarto com ponta modificada.

Banho de gelo picado ou outro sistema de resfriamento / equivalente.

Sistema de medição e controle composto basicamente de:

- a) vacuômetro;
- b) válvulas de agulha para controle do fluxo;
- c) bomba de vácuo;
- d) gasômetro seco, provido de termômetros na entrada e saída com menor divisão de  $1^{\circ}\text{C}$ ;
- e) placa de orifício;
- f) dois manômetros diferenciais com fundo de escala de 2452 Pa (250 mm H<sub>2</sub>O);

Nota: Os casos de pressões de velocidade inferiores a 12,75 Pa (1,3 mmH<sub>2</sub>O) requerem o uso de manômetros de alta sensibilidade.

- g) barômetro com menor divisão de 266,6 Pa (2 mm Hg);
- h) termômetro com menor divisão de  $1^{\circ}\text{C}$ , e acoplado à sonda

#### Aparelhagem para preparação e análise da amostra

Duas pissetas de vidro ou de polietileno.

Frascos de polietileno de 1000 ml, c/tampa, para armazenar amostras.



Provetas de 100 e 250 ml.

Balões volumétricos de 500 ml.

Balança com capacidade de 500 g e com precisão de 0,5 g para pesagem dos borbulhadores.

Pipetas volumétricas de 25 e 100 ml.

Bureta de 50 ml.

Erlenmeyer de 250 ml.

Frasco conta-gotas para adicionar o indicador.

#### EXECUÇÃO DO ENSAIO

Limite de detecção.

Os limites mínimos de detecção destes poluentes são: 0,05 mg/m<sup>3</sup> para trióxido de enxofre e 1,2 mg/m<sup>3</sup> para dióxido de enxofre.

Interferências

As possíveis interferências para determinação de dióxido de enxofre e de névoa de ácido sulfúrico e trióxido de enxofre são a amônia livre, fluoretos e dimetil anilina.

Reagentes

Filtros de fibra de vidro, livres de compostos orgânicos, apresentando pelo menos 99,99% de eficiência na retenção de partículas de até 0,3 µm.

Sílica-gel com indicador de umidade, com granulometria de 1,0 a 3,4 mm (aproximadamente 16 a 6 mesh).

Água destilada deionizada.

Isopropanol 100% e a 80% em volume.

Peróxido de hidrogênio a 3% em massa.

Indicador torina (sal dissódico do ácido 1 - (o - arseno-fenilazo) -2-naftol-3,6-dissulfônico ) a 0,2%.

Solução de perclorato de bário 0,01 N.

Ácido sulfúrico 0,01 N.

Lã de vidro

Nota: Todas as soluções devem ser preparadas com reagentes p.a.

#### PROCEDIMENTO:

Antes de iniciar a amostragem certificar-se de que a

## PROCEDIMENTO

Antes de iniciar a amostragem certificar-se de que a aparelhagem esteja calibrada de acordo com E16.030.

### Preparação preliminar

Pesar aproximadamente 200-300 g de sílica-gel, no borbulhador que será utilizado na amostragem.

Nota: Sílica-gel previamente utilizada deve ser secada durante duas horas a  $175^{\circ}\text{C}$  para poder ser reutilizada.

Certificar-se visualmente de que os filtros não apresentem qualquer irregularidade, numerá-los e dessecá-los a  $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$  à pressão ambiente pelo menos durante 24 horas.

Nota: Caso se esteja determinando simultaneamente o material particulado, tomar as precauções recomendadas anteriormente.

### Preparo dos equipamentos para coleta de amostra

Montar trem de amostragem como mostra a FIG 34.

Colocar 100 ml de isopropanol a 80% no primeiro borbulhador, 100 ml de peróxido de hidrogênio no segundo e no terceiro borbulhadores e cerca de 200-300 g de sílica-gel no quarto borbulhador.

Pesar cada um dos borbulhadores com precisão de 0,05g.

Colocar lâ de vidro na parte superior do primeiro borbulhador.

Manter os borbulhadores no banho de gelo.

Efetuar teste de vazamento antes de iniciar a coleta, de acordo com o seguinte procedimento:

- Fechar a entrada da boquilha e ligar o sistema de aquecimento da sonda e do porta-filtro. Aguardar até que a câmara do porta-filtro atinja a temperatura de  $120 \pm 10^{\circ}\text{C}$ . Abrir completamente a válvula de ajuste fino, fechar a válvula de ajuste grosso e ligar a bomba de vácuo. Abrir parcialmente a válvula de ajuste grosso e vagarosamente fechar a válvula de ajuste fino até que se atinja uma depressão de 50 663 Pa (380 mm Hg). Um vazamento / de até 0,60 l/min é tolerável. Para eliminar a depressão no sistema, abrir vagarosamente a entrada da boquilha e desligar imediatamente a bomba.

#### Coleta de amostra

Ligar o sistema de aquecimento da sonda.

Durante a amostragem a temperatura do filtro deve permanecer na faixa de  $120 \pm 10^\circ \text{C}$ .

Anotar a leitura inicial do gasômetro seco e a pressão barométrica, e zerar os manômetros antes de iniciar a amostragem.

Colocar a sonda no interior da chaminé ou duto no primeiro ponto, tendo o cuidado de verificar se a válvula do ajuste grosso está completamente fechada e a do ajuste fino completamente aberta.

Ligar a bomba e ajustar o fluxo, abrindo a válvula de ajuste grosso e, em seguida ajustar a vazão com a válvula de ajuste fino para uma amostragem isocinética e simultaneamente acionar o cronômetro. Considerar isocinética a amostragem em cada ponto.

Nota: Nomógrafos e calculadores são necessários para a facilidade de operação isocinética.

Certificar-se de que a depressão no vacuômetro não exceda 50 663 Pa (380 mm Hg). Se isto ocorrer, repetir o teste de vazamento e trocar o filtro. Anotar a taxa de vazamento caso este ocorra.

Manter a temperatura dos gases que saem do último borbulhador (sílica-gel) abaixo de  $20^\circ \text{C}$ .

O fluxo da coleta não deve exceder a uma vazão de  $0,021 \text{ m}^3/\text{min}$  durante a amostragem.

No final da amostragem, simultaneamente desligar a bomba de vácuo e o cronômetro. Retirar a sonda do interior da chaminé ou duto e registrar a leitura final do gasômetro.

Fazer teste de vazamento na depressão máxima registrada durante a amostragem e anotar a taxa de vazamento caso este ocorra.

Passar ar limpo através do sistema durante 15 minutos a uma vazão de aspiração igual à de coleta.

Nota: Ar limpo pode ser obtido passando-se ar através de um filtro de carvão / ativo.

Calcular o valor da isocinética de acordo com 6.1.10 b) da L9.225. Considerar válida a amostragem somente se o valor encontrado estiver na faixa de 90 a 110%.



#### Recuperação e manuseio da amostra

Remover a sonda e fechar com rolha todas as aberturas existentes na sonda, porta-filtro e borbulhadores.

Retirar os borbulhadores do banho de gelo, pesá-los e anotar a massa de cada um com precisão de 0,5 g.

Transferir o isopropanol do primeiro borbulhador para um balão volumétrico de 500 ml.

Lavar a sonda, o ciclone com erlenmeyer, o porta-filtro e o primeiro borbulhador com isopropanol a 80%. Acrescentar essa solução de lavagem e o filtro ao balão volumétrico e completar seu volume com isopropanol a 80%.

Nota: Caso se esteja determinando simultaneamente o material particulado, exceto que a solução de lavagem deve ser isopropanol a 80%. A seguir dissolver / com isopropanol a 80% o resíduo resultante da determinação do material particulado (resíduo contido no béquer e filtro) e transferir o conteúdo para um balão volumétrico de 500 ml, juntamente com a solução do primeiro borbulhador e completar seu volume com isopropanol 80%.

Transferir as soluções do segundo e terceiro borbulhadores para um balão volumétrico de 500 ml.

Lavar toda a vidraria após o primeiro borbulhador e até o quarto borbulhador exclusiva, com água destilada deionizada e transferir essa água de lavagem para o balão volumétrico. Completar seu volume com água destilada deionizada.

#### Análise da amostra

Determinar as névoas de ácido sulfúrico e trióxido de enxofre como segue:

- a) agitar o frasco contendo a solução de isopropanol e o filtro;

Nota: Se o filtro se despedaçar, esperar até que os fragmentos se sedimentem.

- b) pipetar uma alíquota de 100 ml desta solução para um erlenmeyer de 250 ml, adicionar 2 a 4 gotas de indicador / torina e titular com perclorato de bário 0,01 N até o /



- ponto de viragem (de verde para rosa);
- c) repetir a titulação para uma segunda alíquota;
  - d) calcular a média das duas titulações;

Nota: A diferença dos volume dos titulantes gastos nas titulações não deve ser maior que 1% ou 0,2 ml.

- e) fazer teste em branco para cada série de análises.

Determinar o dióxido de enxofre como segue:

- a) agitar o frasco contendo as soluções do segundo e terceiro borbulhadores;
- b) pipetar uma alíquota de 10 ml desta solução para um erlenmeyer de 250 ml, adicionar 40 ml de isopropanol 100%, 2 a 4 gotas de indicador torina e titular com perclorato de bário 0,01 N até o ponto de viragem (de verde para rosa);

#### Determinação da vazão

Determinar a vazão dos gases no duto ou chaminé de acordo com L9.222, utilizando os dados obtidos durante a coleta.

#### Representatividade da amostragem

É necessário que a amostragem para determinação de dióxido de enxofre e de névoas de ácido sulfúrico e trióxido de enxofre e da vazão seja representativa das condições de operação da fonte de emissão. Deve-se então efetuar pelo menos duas determinações por fonte. A amostragem deve ser considerada representativa se os resultados obtidos em cada coleta não forem discrepantes entre si.

Concentração de névoas de ácido sulfúrico e trióxido de enxofre.

$$C_{H_2SO_4} = \frac{49,04 N (Vt - Vtb) Vsol}{Va Vgn}$$

onde:

$$C_{H_2SO_4} = \text{concentração de névoas de ácido sulfúrico e trióxido de enxofre, expressa em termos de ácido sulfúrico, nas condições normais, base seca, em mg/Nm}^3$$

N = normalidade do perclorato de bário, em equivalente grama/litro

Vt = volume do perclorato de bário basto na titulação, em ml.

Vtb = volume de perclorato de bário gasto na titulação na prova em branco, em ml.

Vsol = volume total da solução da qual se tirou uma alíquota, em ml.

Va = volume da alíquota, em ml

Vgn = volume do gás medido no gasômetro seco nas condições normais, base seca, Nm<sup>3</sup>

Concentração de dióxido de enxofre

$$C_{SO_2} = \frac{32,03 N (Vt - Vtb) Vsol}{Va Vgn}$$

onde:

$C_{SO_2}$  = concentração de dióxido de enxofre nas condições normais, base seca, em mg/Nm<sup>3</sup>

N, Vt, Vtb, Vsol, Va e Vgn são os mesmos valores anteriormente identificados.

Taxa de emissão de névoas de ácido sulfúrico e trióxido de enxofre

$$Te_{H_2SO_4} = 10^{-6} C_{H_2SO_4} Qnbs$$

onde:

$Te_{H_2SO_4}$  = taxa de emissão de névoas de ácido sulfúrico e trióxido de enxofre, expressa em termos de ácido sulfúrico, em kg/h.

$C_{H_2SO_4}$  = concentração de névoas de ácido sulfúrico e trióxido de enxofre, expressa em termos de ácido sulfúrico, nas condições normais, base seca, em mg/Nm<sup>3</sup>

$Q_{nbs}$  = vazão do efluente nas condições normais, base seca, em  $Nm^3/h$

Taxa de emissão de dióxido de enxofre

$$T_{e_{SO_2}} = 10^{-6} C_{SO_2} Q_{nbs}$$

onde:

$T_{e_{SO_2}}$  = taxa de emissão de dióxido de enxofre, em kg/h

$C_{SO_2}$  = concentração de  $SO_2$  nas condições normais, base seca, em mg/ $Nm^3$

$Q_{nbs}$  = vazão do efluente nas condições normais, base seca, em  $Nm^3/h$ .

#### PROCEDIMENTO PARA PLANEJAMENTO DE AMOSTRAGEM EM DUTOS E CHAMINÉS DE FONTES ESTACIONÁRIAS

Este planejamento fixa as condições exigíveis para o planejamento de amostragem em fontes estacionárias de poluição do ar.

Ciclo operacional da fonte amostrada

Tempo de duração de um processo de transformação e sua frequência.

Fluxo ciclônico

Fluxo no qual as linhas não são paralelas ao eixo longitudinal do duto ou chaminé

Pressão de velocidade

Diferença entre a pressão total e a pressão estática.

Vazão de amostragem

Relação entre a alíquota do efluente gasoso, a ser analisado, pelo tempo.

Tam de amostragem

Qualquer sistema montado especificamente com componentes ne-



componentes necessários e adequados à coleta de amostras de que se deseja determinar.

**Orifício medidor de vazão**

Medidor de vazão que emprega o diferencial de pressão entre cada um dos lados de uma placa dotada de um orifício.

**Gasômetro**

Equipamento para a medição de volume de gás

**Pitot "S"**

Pitot modificado para ser utilizado em fluxos gasosos contendo alto teor de umidade e elevada concentração de material particulado.

**Boquilha**

Componente móvel da sonda, por onde é captado o material a ser analisado.

**CONDIÇÕES GERAIS**

**Informações preliminares**

A amostragem em fontes estacionárias constitui uma atividade complexa, envolvendo a necessidade de informações preliminares, mencionadas abaixo, que serão definidas em reuniões com técnicos das áreas implicadas:

- a) características do ciclo operacional;
- b) matérias-primas utilizadas e suas características gerais;
- c) tipo de combustível utilizado;
- d) produção;
- e) características do fluxo gasoso;
- f) geometria do duto ou chaminé e sua localização;
- g) verificação, in loco, das dimensões internas reais do duto ou chaminé;
- h) determinação da quantidade dos furos para amostragem e suas localizações;
- i) definição da equipe de trabalho.

**Infra-estrutura básica necessária ao local de amostragem**

Para a execução dos trabalhos, o local de amostragem deve apresentar a seguinte infra-estrutura básica:

- a) plataforma de amostragem em Anexo;
- b) escada de acesso à plataforma;
- c) dispositivos de içamento do trem de amostragem e acessórios;
- d) fontes de energia elétrica (110/220 V - 2.500 W);
- e) proteção dos equipamentos e da equipe contra condições adversas.

#### Estudo preliminar do efluente gasoso

O estudo preliminar do efluente gasoso fornecerá informações básicas para viabilizar a amostragem. Os seguintes parâmetros devem ser observados:

- a) condições do fluxo,
  - verificar a estabilidade do fluxo e se o mesmo não é ciclônico;
- b) pressões de velocidade,
  - verificar se as pressões de velocidade, máxima e mínima são compatíveis com o manômetro do equipamento;
- c) temperatura,
  - verificar o perfil da temperatura na seção transversal e sua variação num mesmo ponto;
- d) pressão estática,
  - medir pressão estática;
- e) umidade
  - estimar a umidade do fluxo gasoso;
  - verificar a existência de névoas ou gotículas;
- f) composição dos gases,
  - estimar a massa molecular dos efluentes gasosos;
- g) características do poluente no efluente gasoso,
  - avaliar a concentração de material particulado no efluente, associando-a com o tempo e vazão de amostragem / para evitar excesso de troca de filtros ou quantidade

insuficiente de material particulado para a pesagem;

- avaliar a possibilidade de entupimento ou aumento de perda de carga no trem de amostragem devido à concentração ou natureza do material particulado;
- avaliar se a temperatura do filtro não promove alterações físico-químicas no material particulado (como por ex.: sublimação e decomposição).

#### Preparação do trem de amostragem

Fazer uma listagem de todos equipamentos e acessórios / necessários.

Separar os itens relacionados.

Inspecionar e/ou limpar os equipamentos e acessórios que foram separados.

Calibrar, se necessário, os seguintes equipamentos:

- a) orifício medidor de vazão;
- b) gasômetro;
- c) pitot "S";
- d) medidores de temperatura.

Acondicionar e transportar para o local de amostragem, os equipamentos e acessórios a serem utilizados.

Montar o trem de amostragem e realizar o teste de vazamento.

Selecionar a boquilha adequada.

#### Segurança da equipe

Deverão ser seguidas as Normas Brasileiras de Resolução pertinente, bem como as Normas de Segurança da Empresa.

A equipe deverá receber e usar os equipamentos de proteção individual, de acordo com as condições do local de amostragem.



## CONCLUSÃO

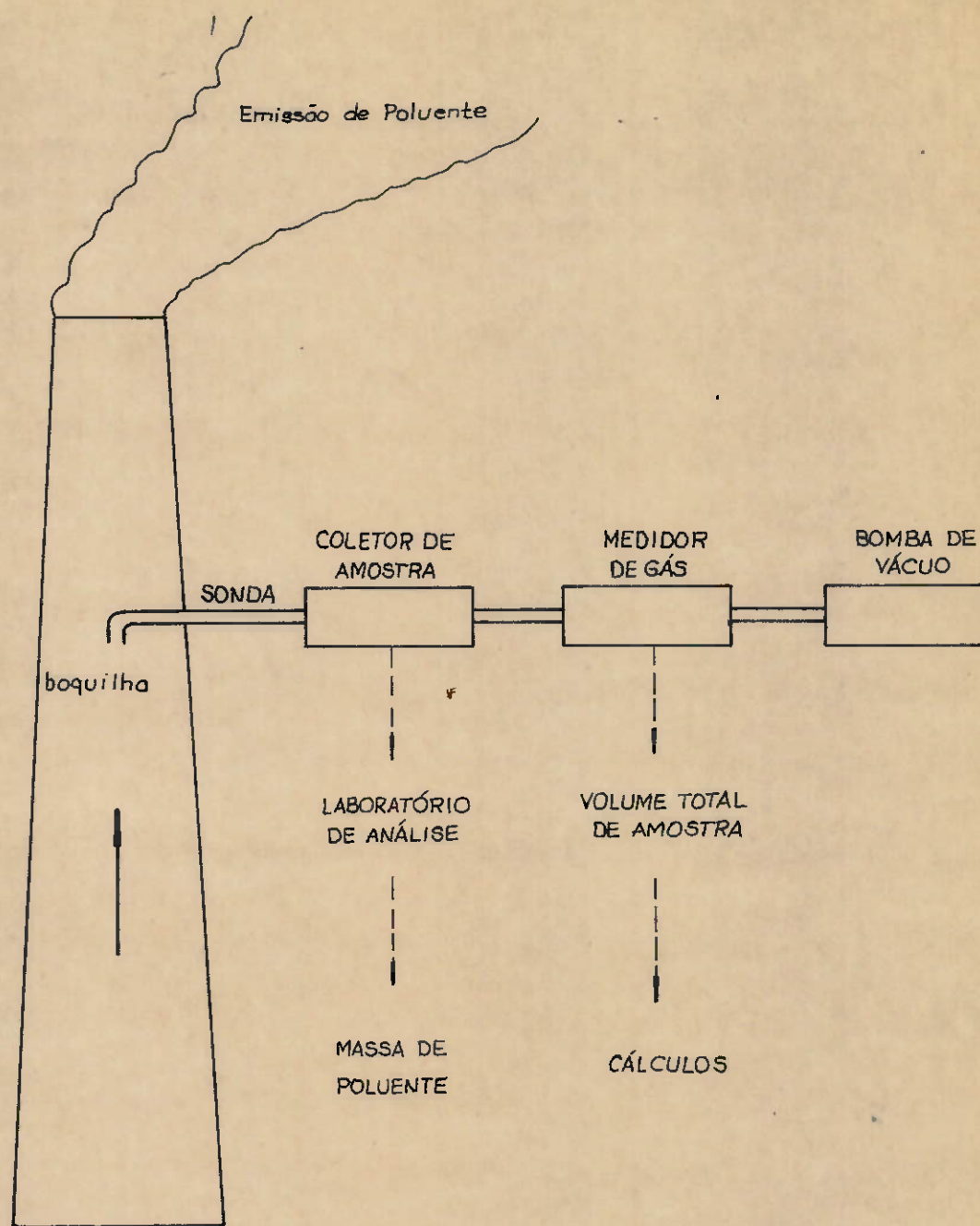
Nesta conclusão, vamos mostrar estruturalmente como funciona, e como arranja-se um trem de amostragem para dutos verticais (apêndice 1), dutos horizontais (apêndice 2) e dutos inclinados (apêndice 3).

Para a construção dos mesmos devemos tomar as seguintes providências:

1. Instalar tomada de 110 volts e 2.500 W, no piso da plataforma.
2. O piso da plataforma deverá ser totalmente uniforme.
3. Providenciar escada de acesso e equipamento para elevar à plataforma, o material necessário para as coletas (80 kg).
4. A plataforma deverá possuir proteção lateral de até a altura de 1 metro.
5. A escada de acesso, se exceder 4 metros, deverá possuir proteção lateral (tipo marinho).

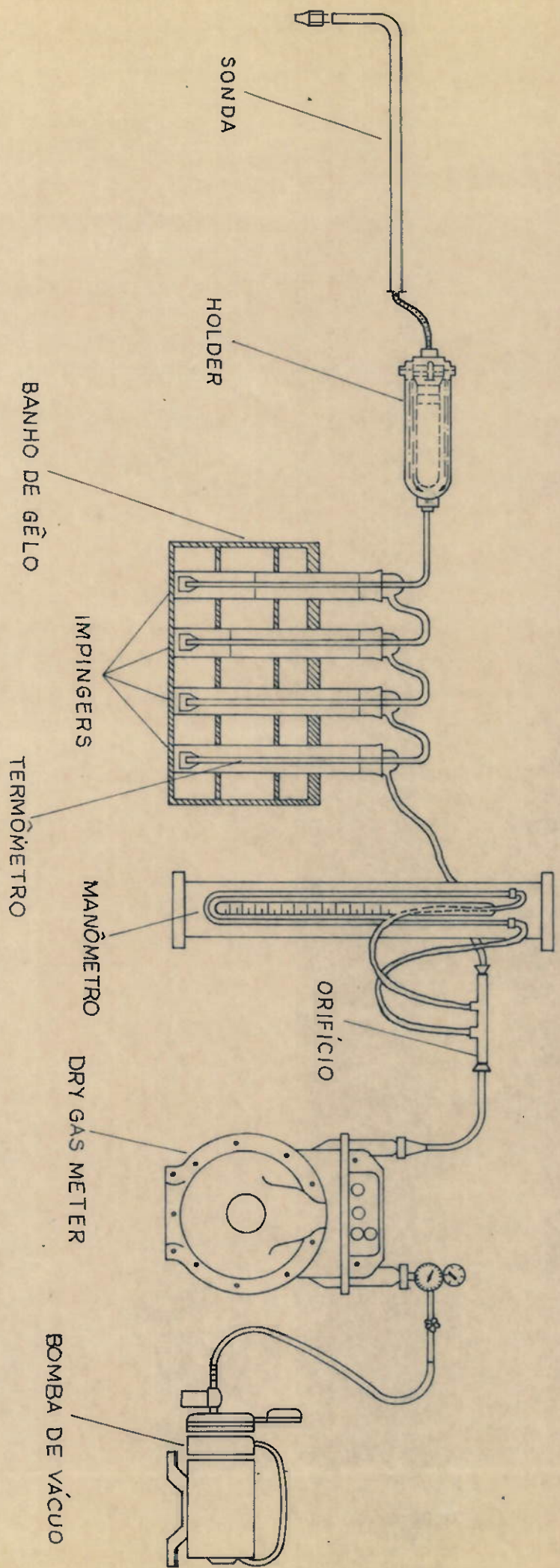
É importante a análise da amostragem de uma chaminé para início de cálculos térmicos, para o efeito do balanceamento térmico, cálculo do rendimento e também o nível ambiental.





**FIGURA 1**

## TREM DE AMOSTRAGEM SIMPLES



52

*FIGURA 2*



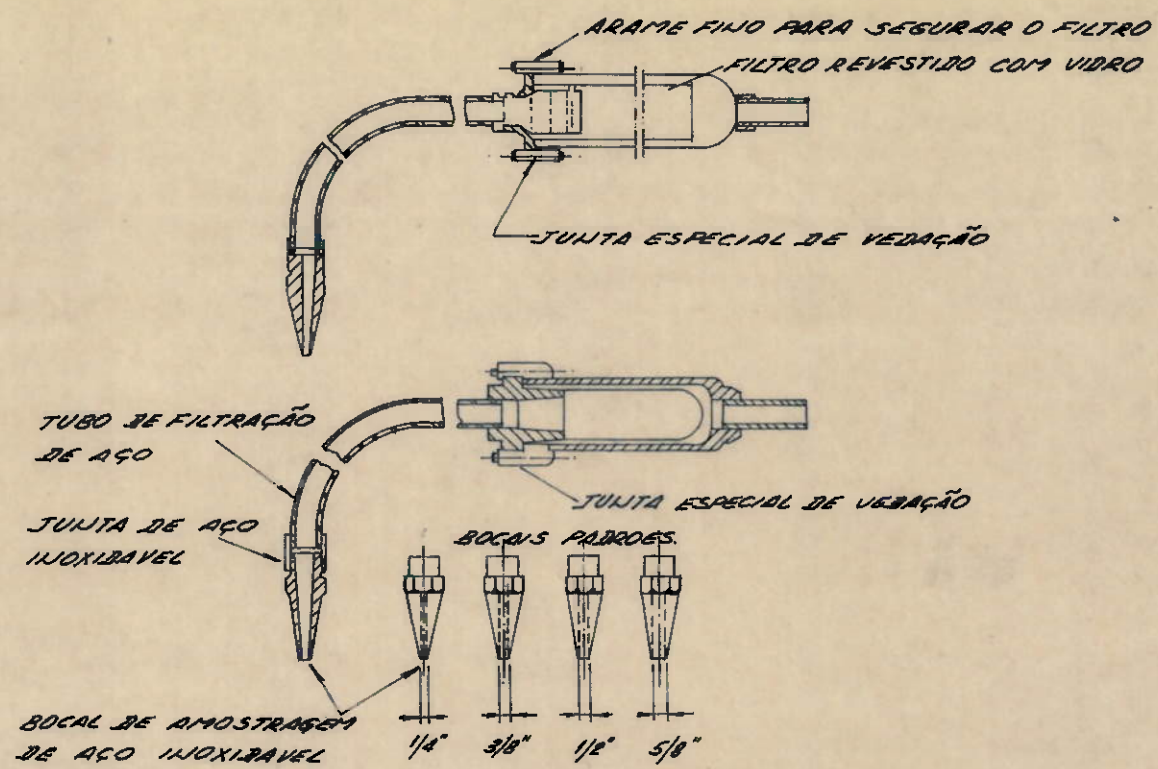


Fig. 3

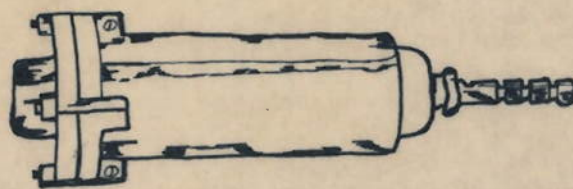


Fig. 4

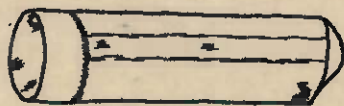
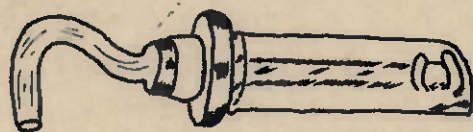


Fig. 5

FILTRO DE AÇO INOXIDÁVEL DE 1/2"



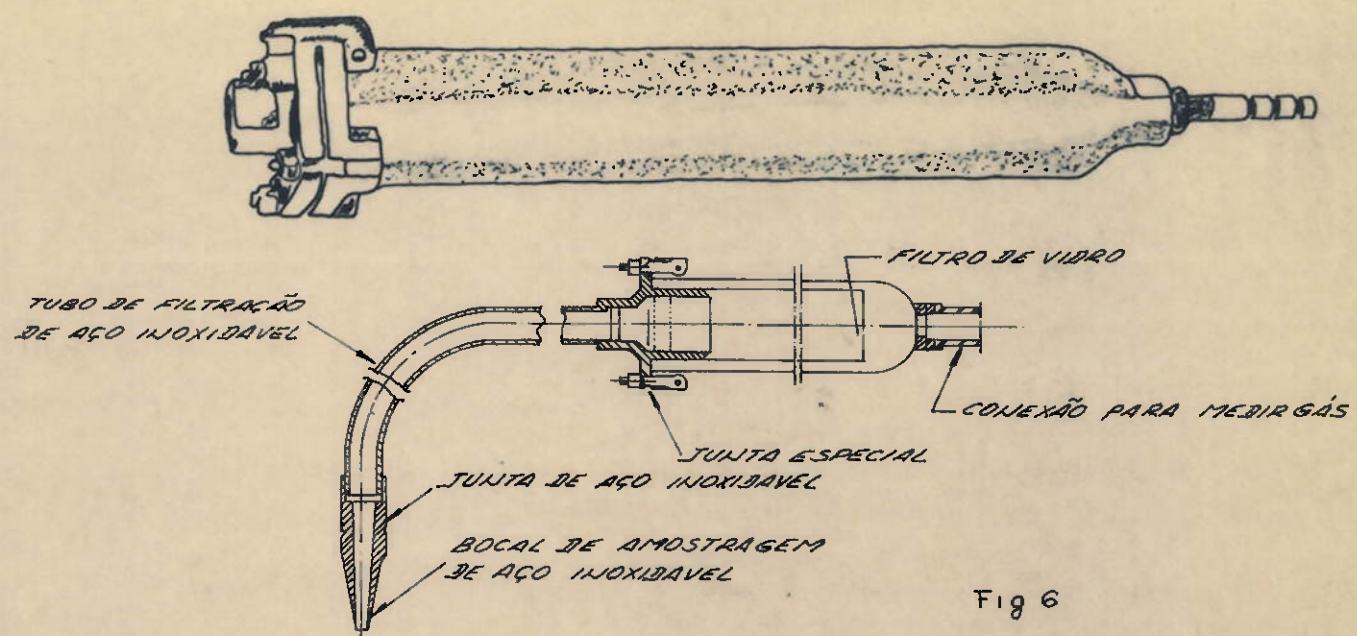


Fig 6

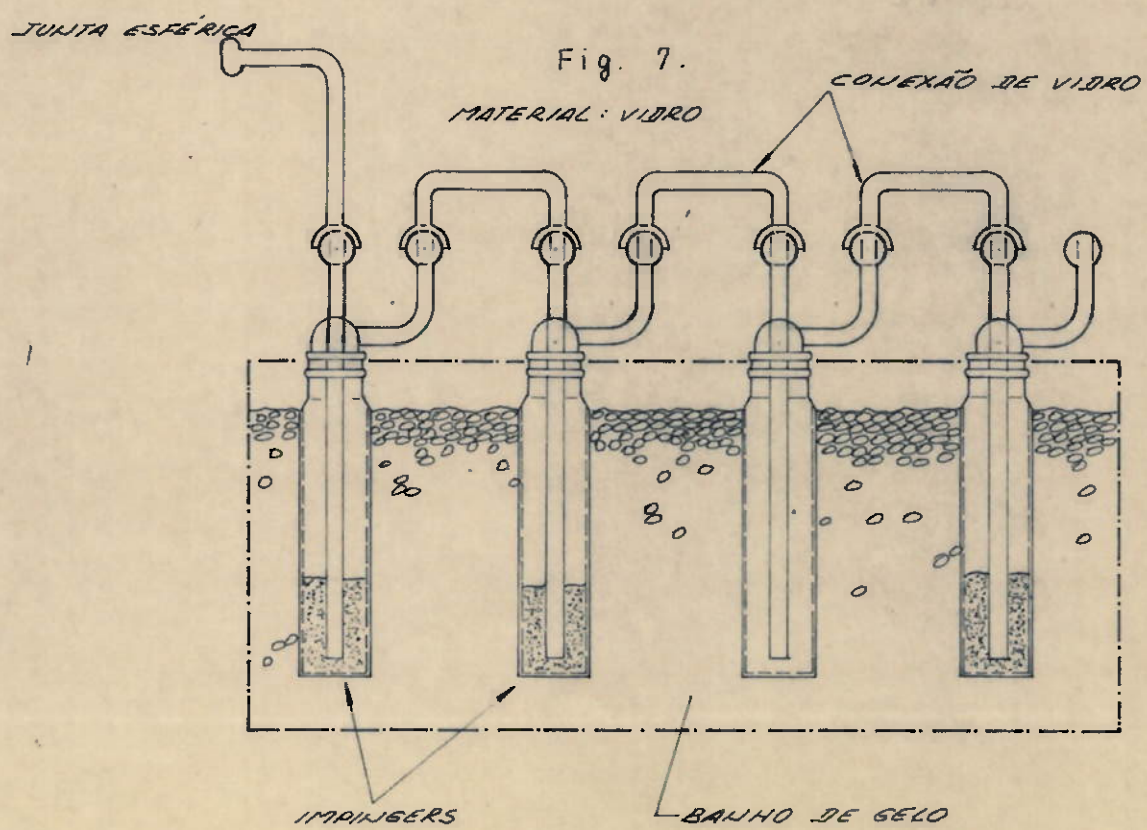
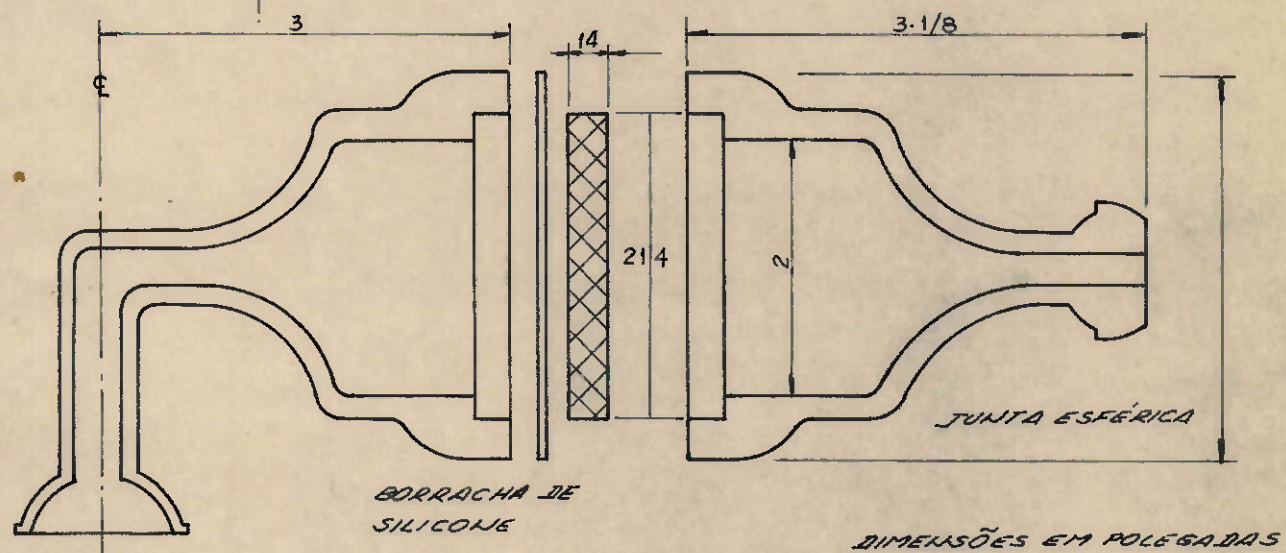


Fig. 8



Fig. 9

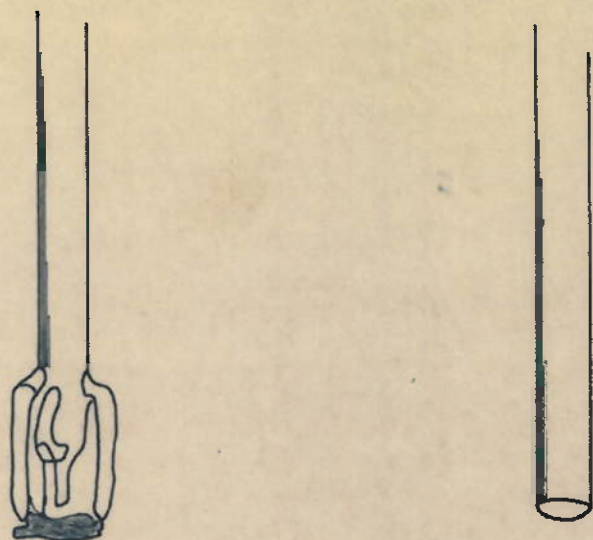


Fig. 10

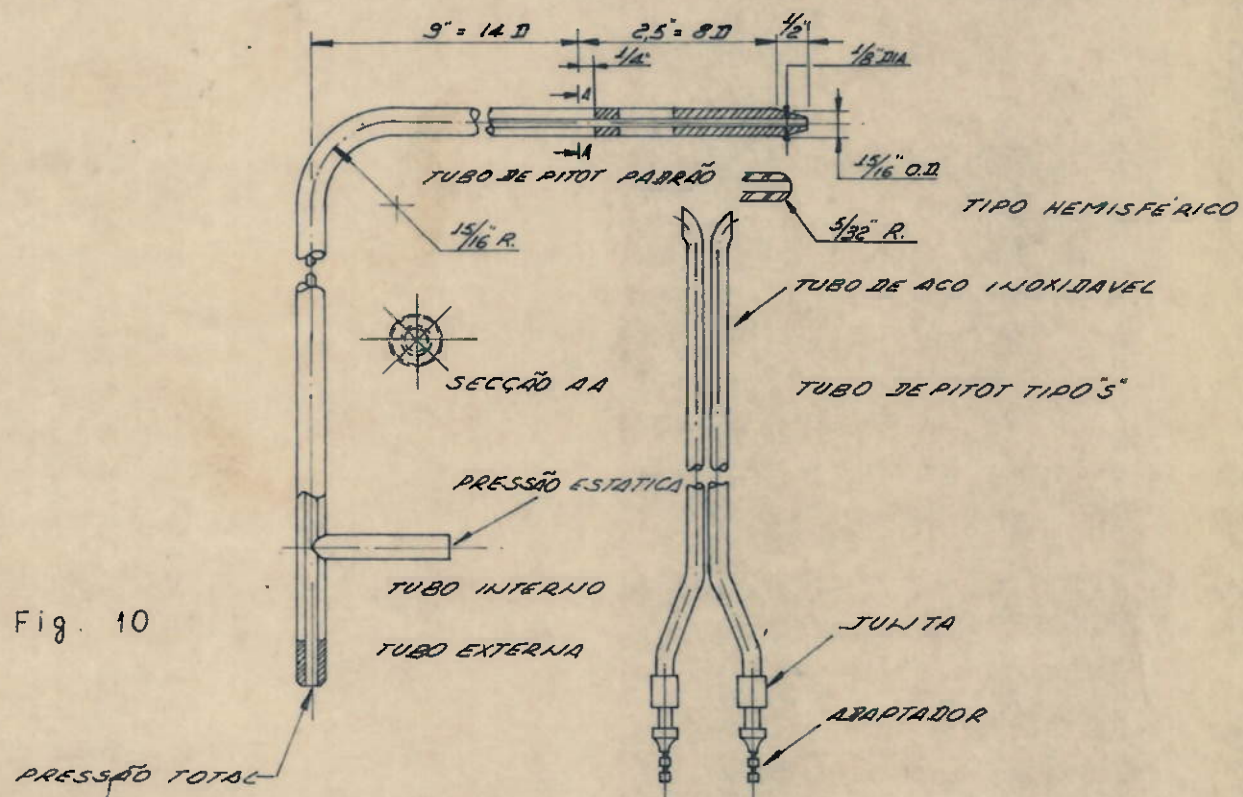


Fig. 11

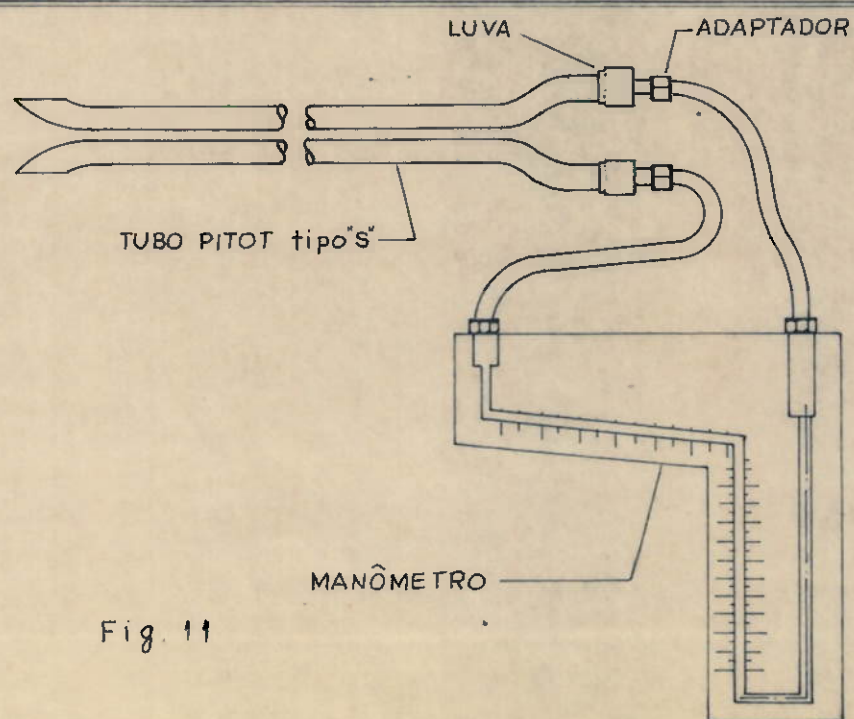






Fig. 12.

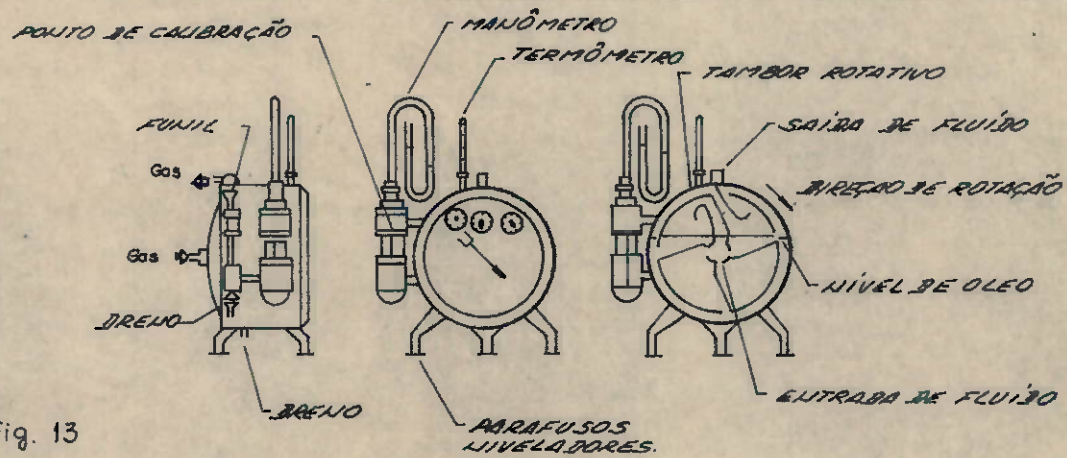
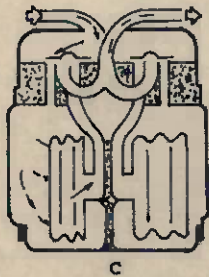


Fig. 13

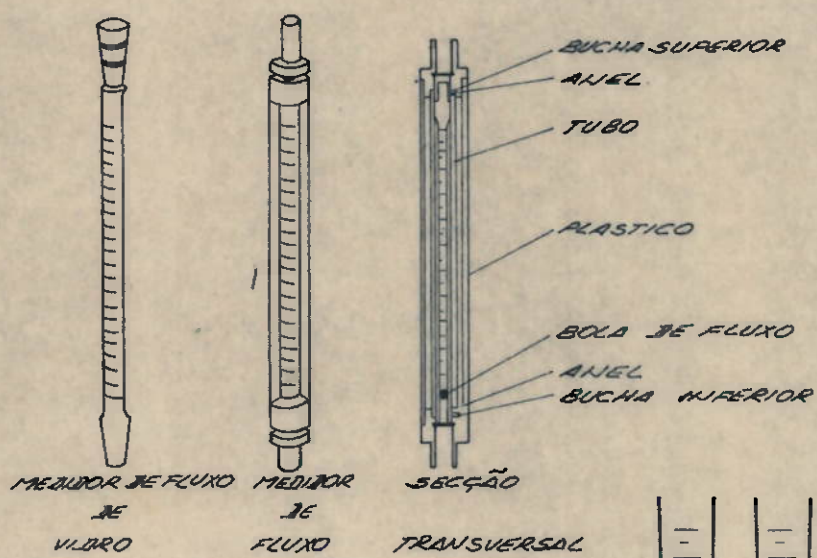


Fig. 14

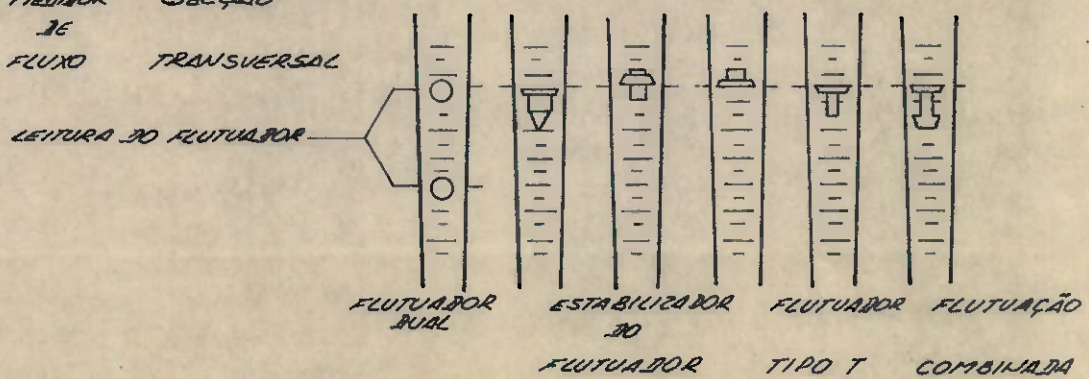


Fig. 15



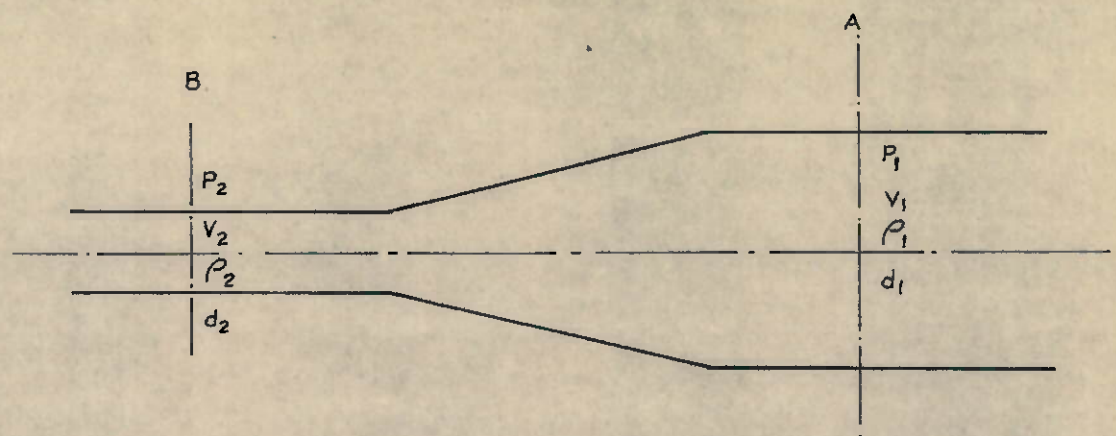


Fig. 16

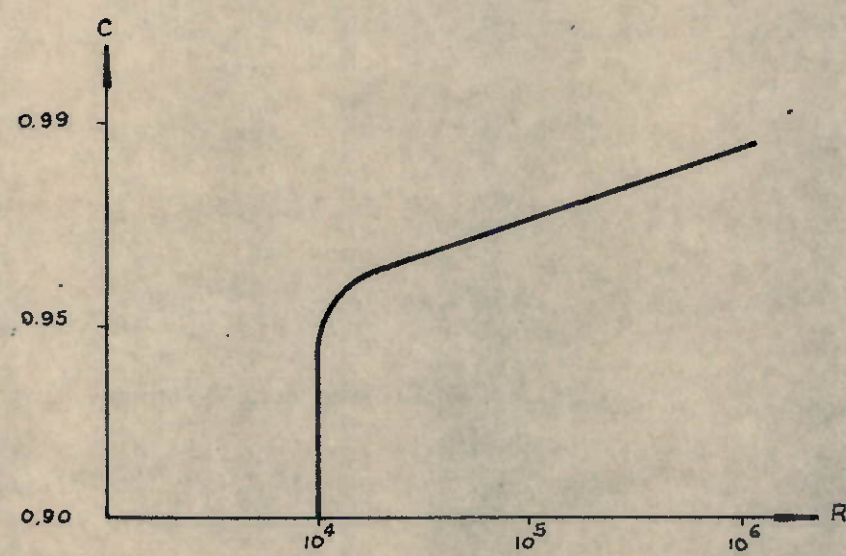


Fig. 17

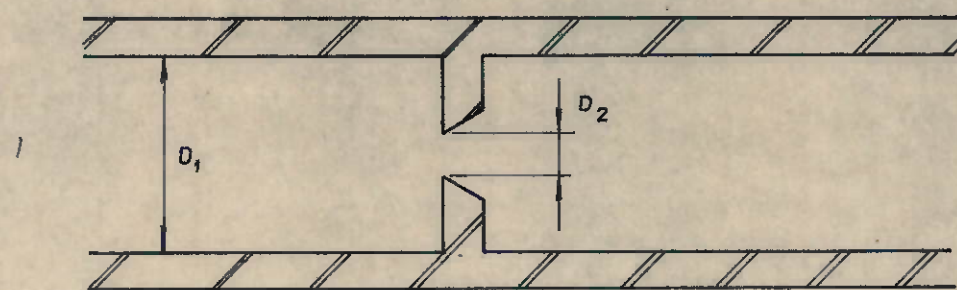


Fig. 18



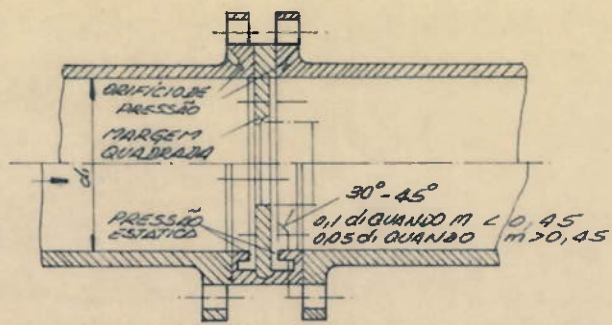


FIG 19

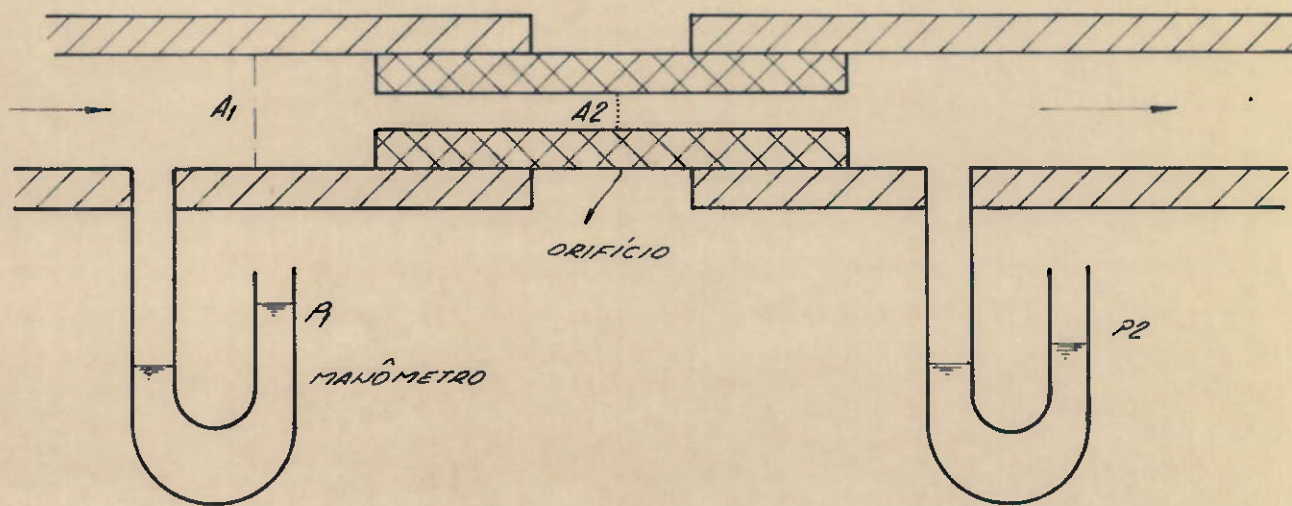


FIG 20

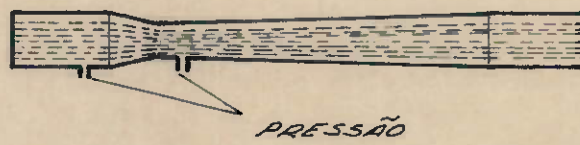


FIG 21

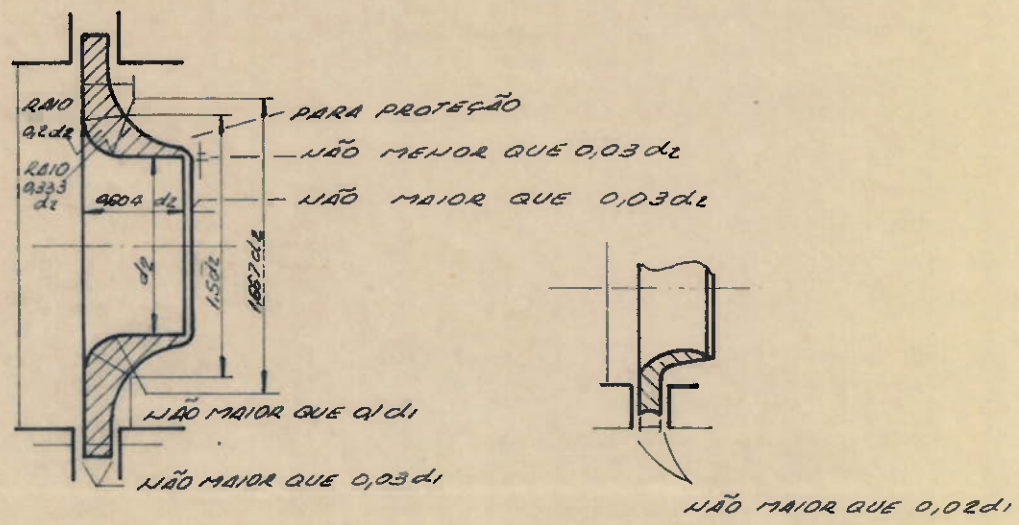
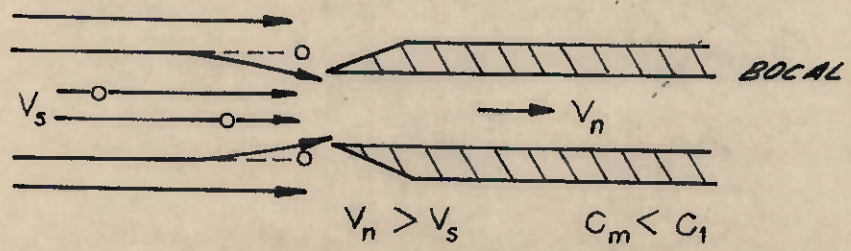
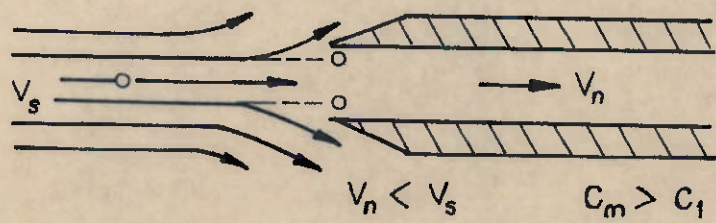


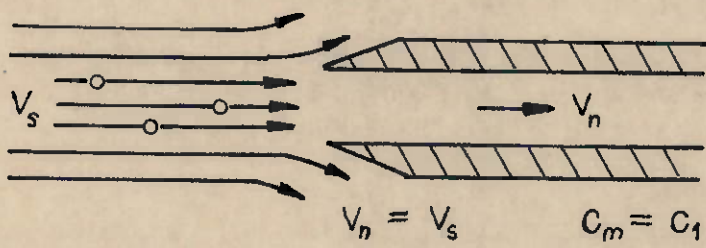
FIG 22



*AMOSTRA NÃO É REPRESENTATIVA*



*AMOSTRA NÃO É REPRESENTATIVA*



*AMOSTRA É REPRESENTATIVA*

**FIGURA 23**



# TREM PARA DETERMINAÇÃO DE UMIDADE

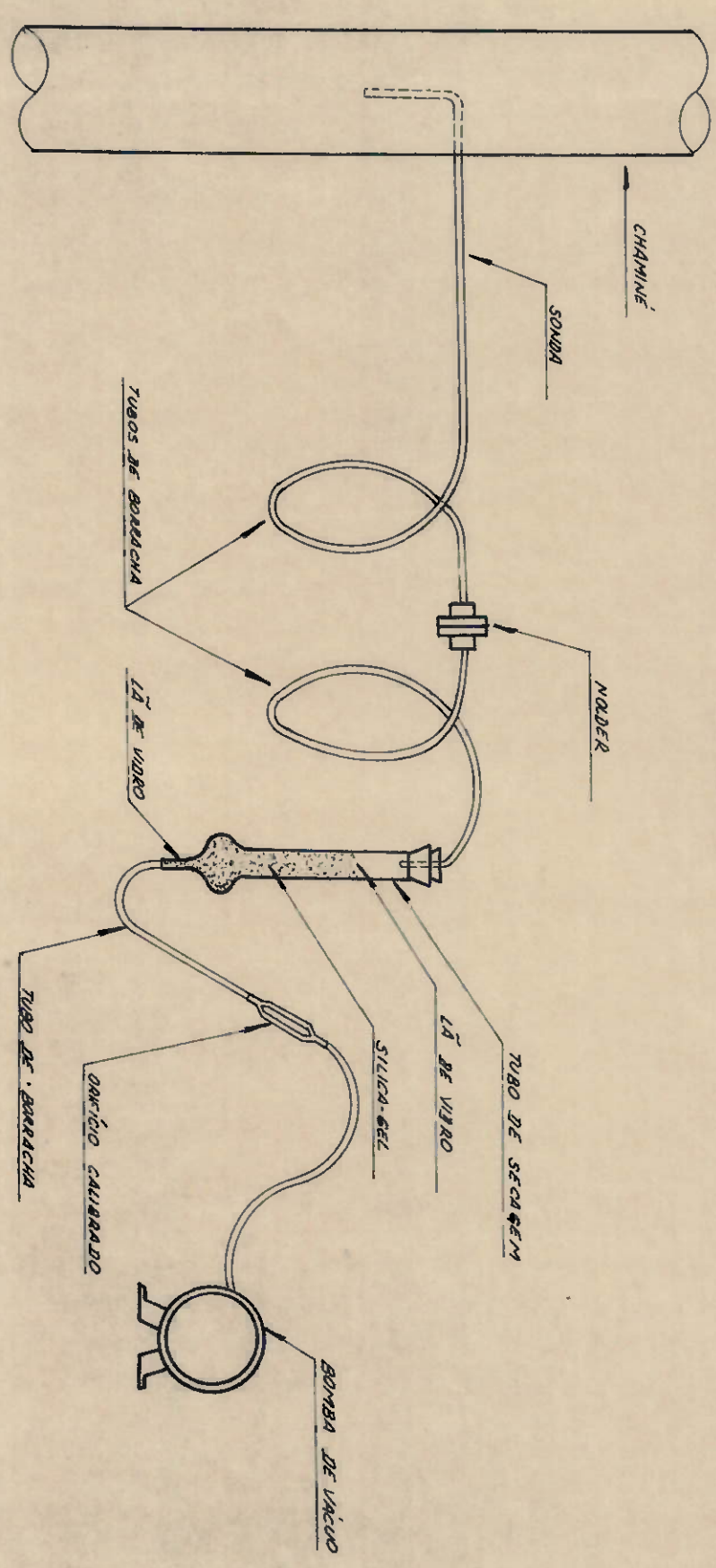


FIGURA 23 A

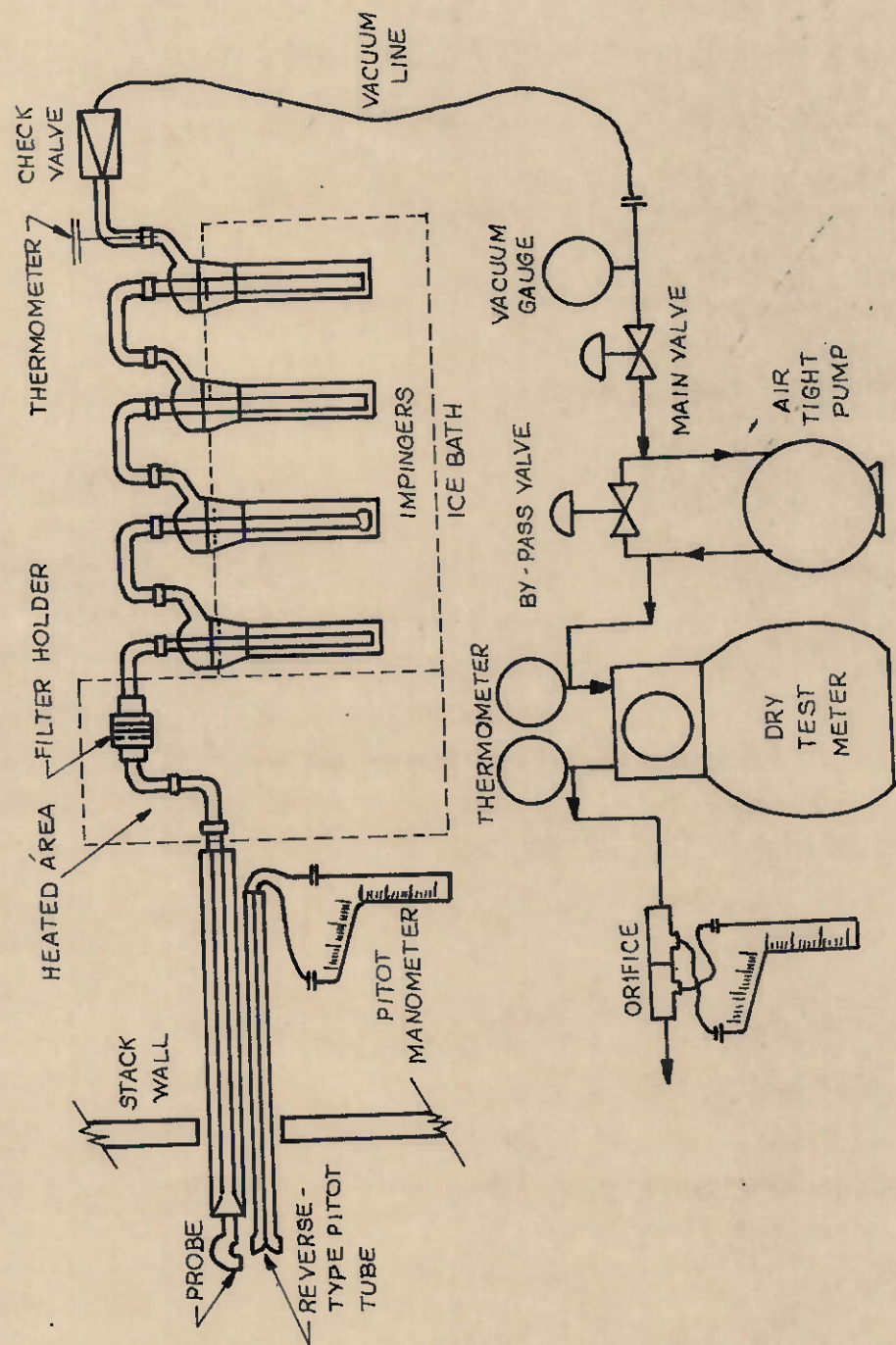


FIGURA 23B



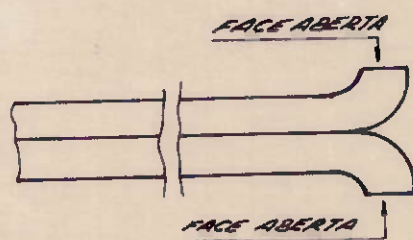


FIGURA 24 ESQUEMA DE UM TUBO  
PITOT S

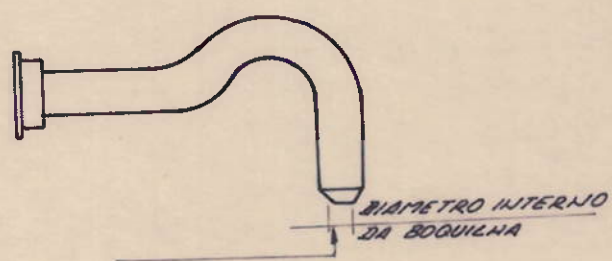


FIGURA 25 ESQUEMA DA BOGUILHA



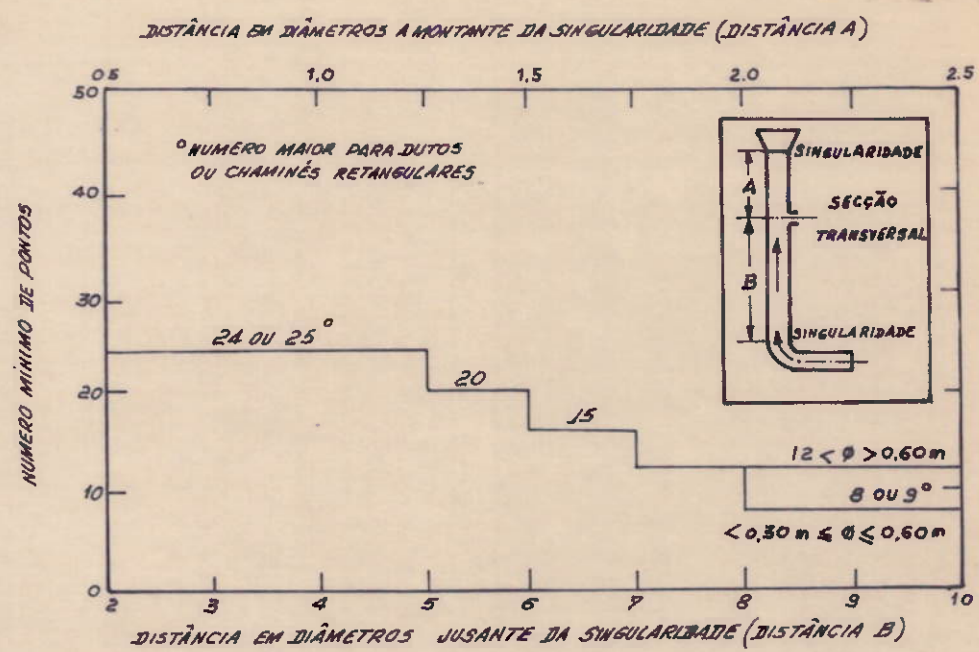


FIGURA - 26

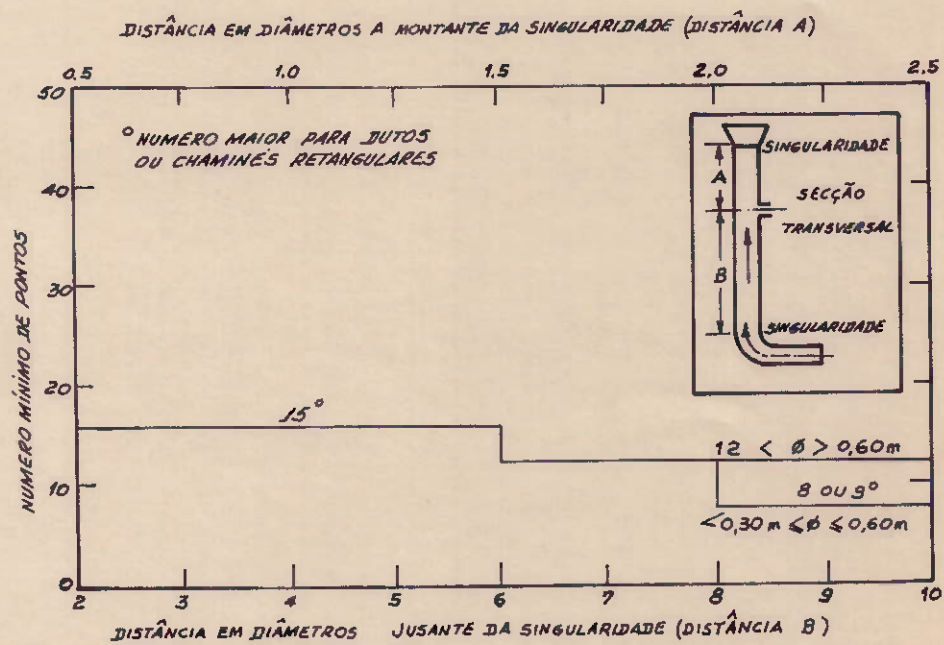


FIGURA - 27

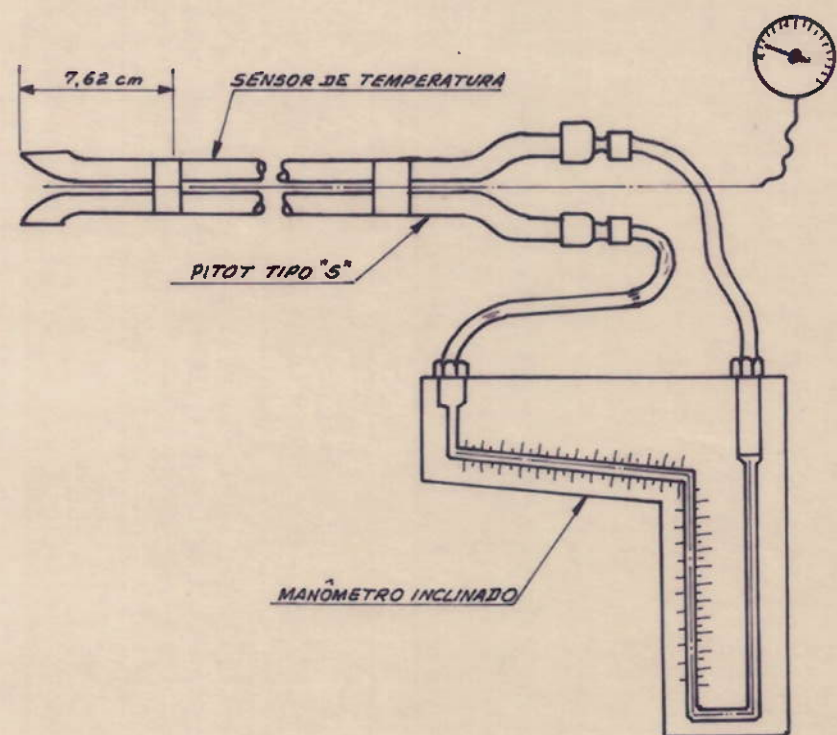


Fig 28



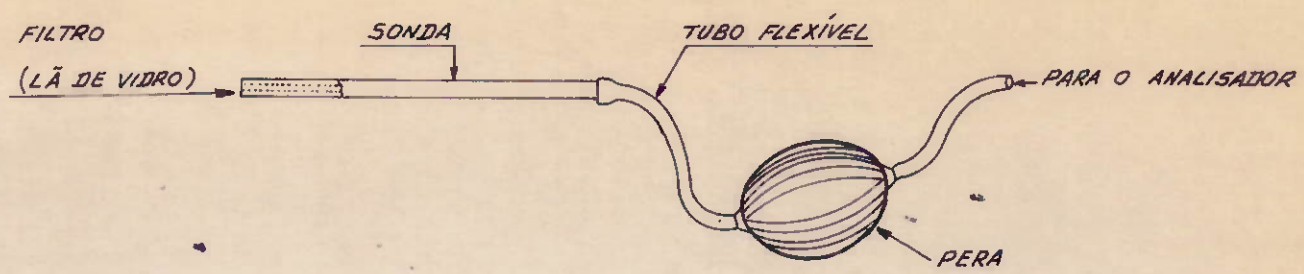


FIGURA - 29

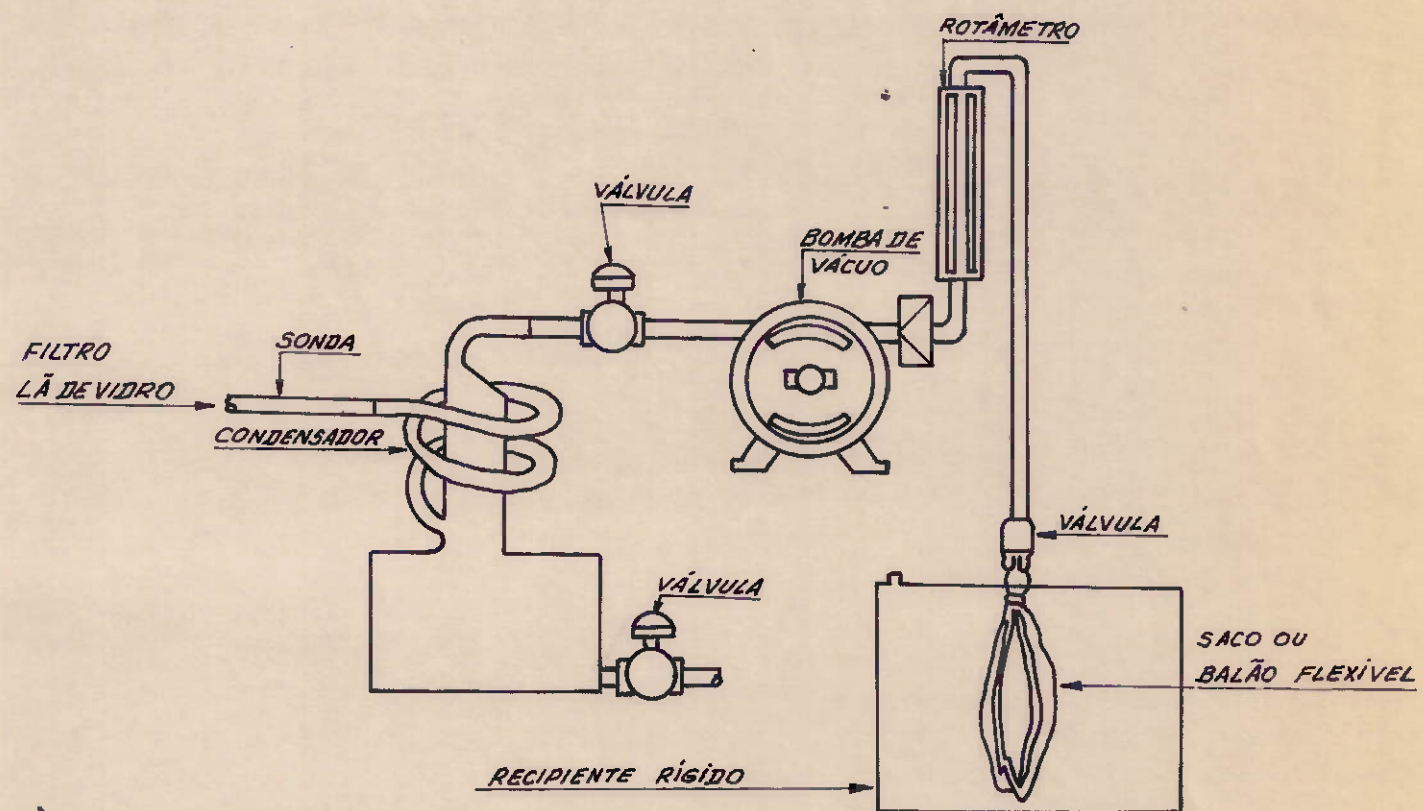


FIGURA - 31



GÁS	1			2			3			4			5		
	VOLUME INICIAL	VOL. APÓS ABSORÇÃO	DIF. VOLUME	VOLUME INICIAL	VOL. APÓS ABSORÇÃO	DIF. VOLUME	VOLUME INICIAL	VOL. APÓS ABSORÇÃO	DIF. VOLUME	VOLUME INICIAL	VOL. APÓS ABSORÇÃO	DIF. VOLUME	VOLUME INICIAL	VOL. APÓS ABSORÇÃO	DIF. VOLUME
$CO_2$	100			100			100			100			100		
$CO_2$ (A)															
$CO$ (B)															
$H_2$ (C)															
MMNS															

(A) - VOLUME INICIAL É O VOLUME APÓS ABSORÇÃO DE  $CO_2$

(B) - VOLUME INICIAL É O VOLUME APÓS ABSORÇÃO DE  $O_2$

(C) - A PORCENTAGEM DE  $H_2$  É 100 MENOS O VOLUME LIDO APÓS A ABSORÇÃO DE  $CO$ .

FIGURA 30

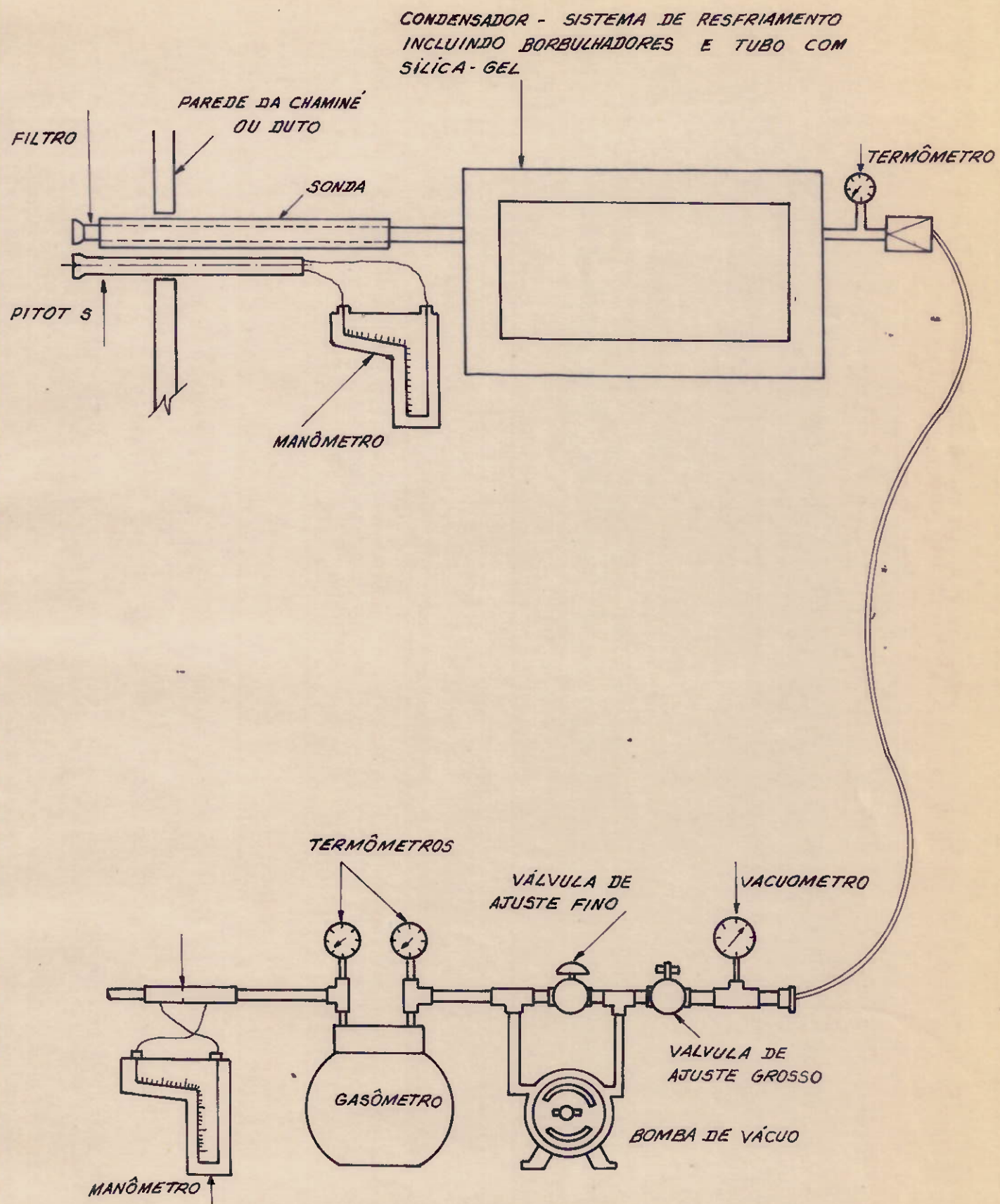


Fig 32



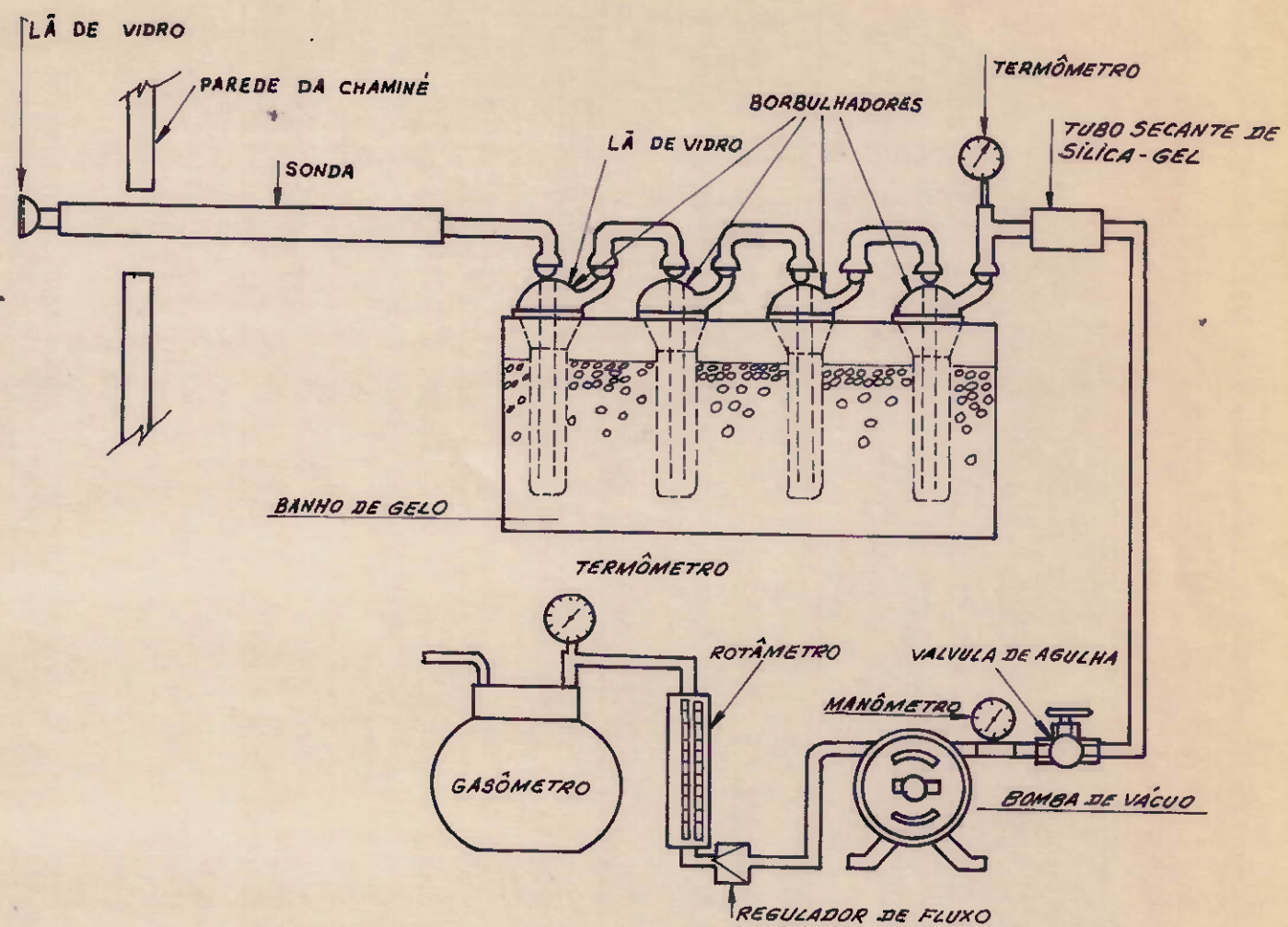


Fig 36

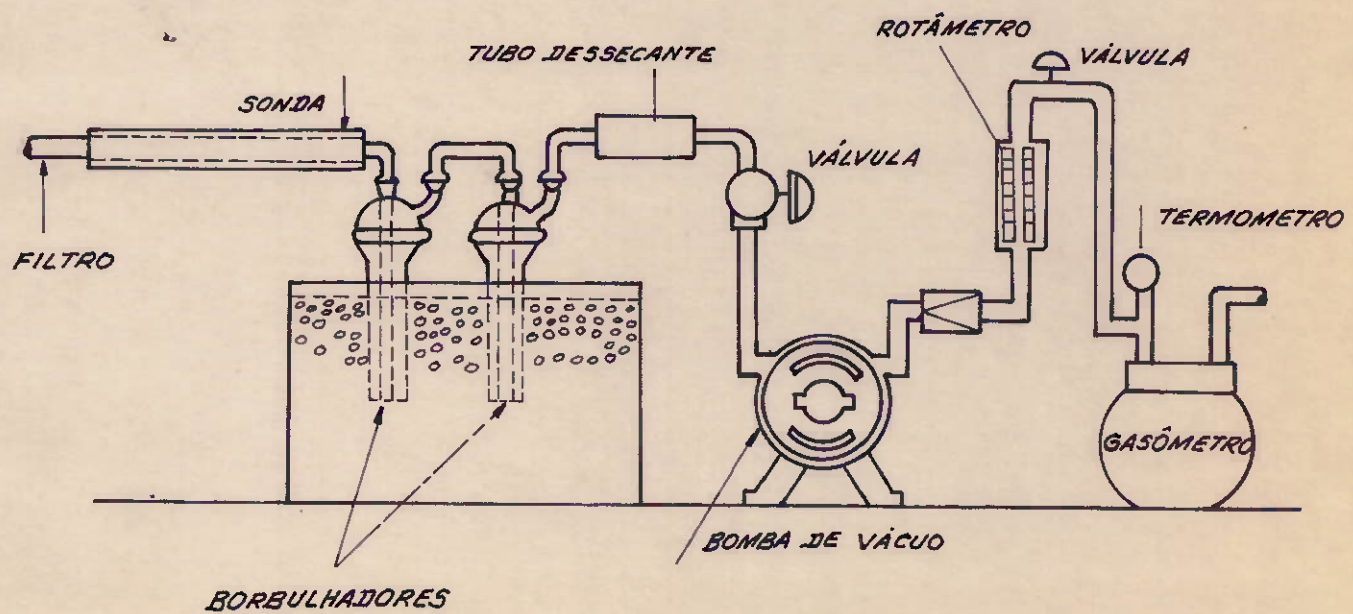


Fig 33



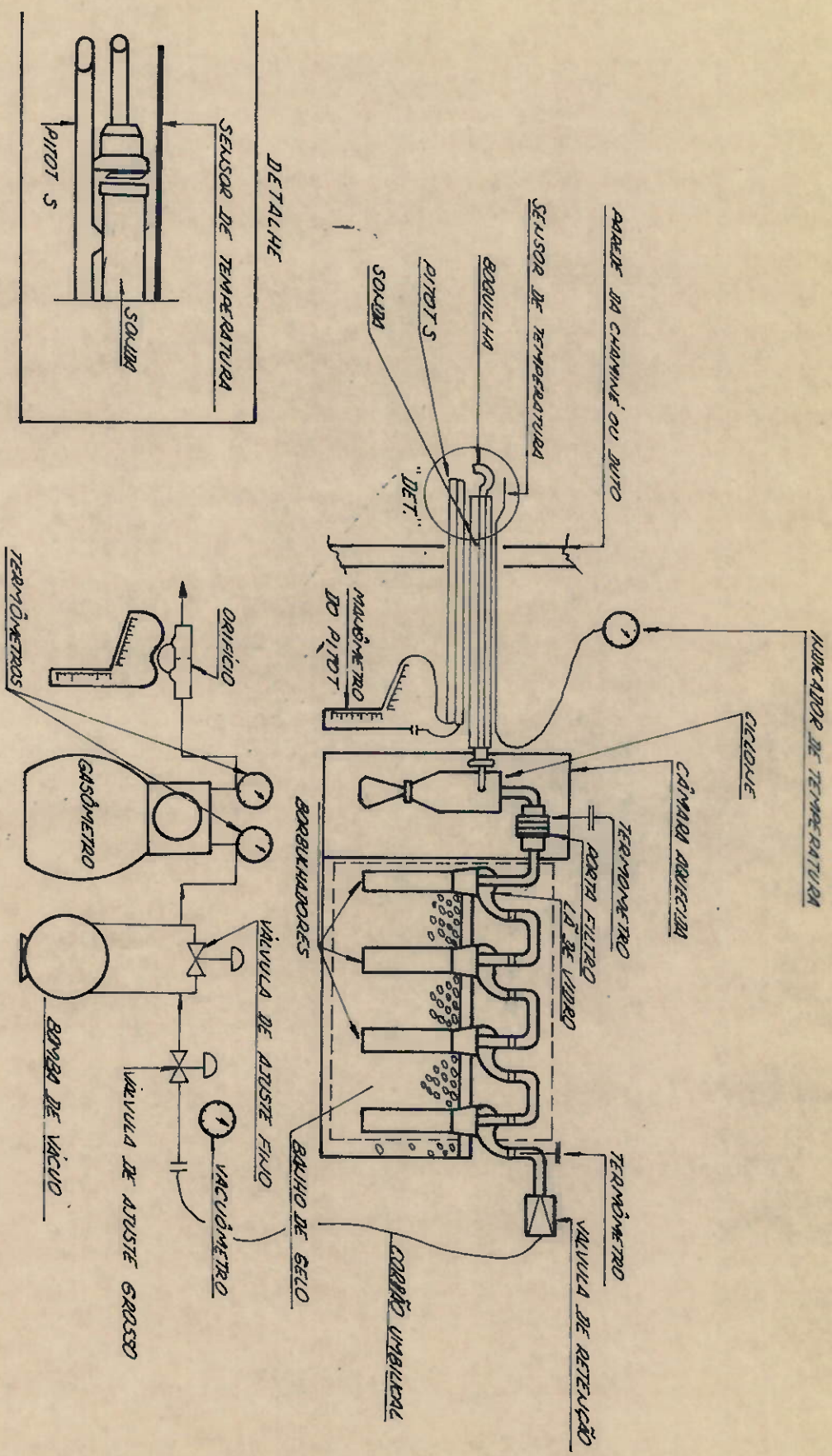
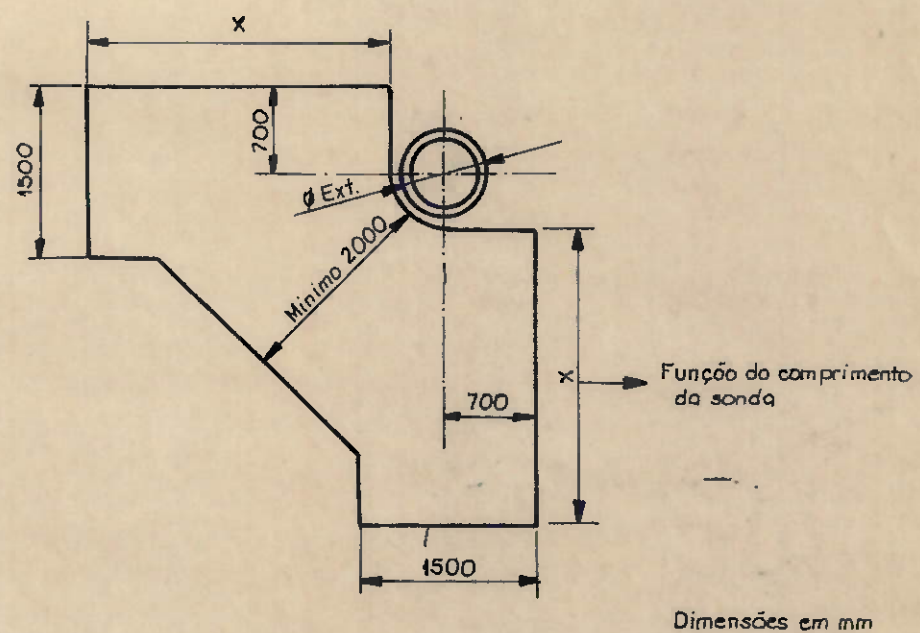
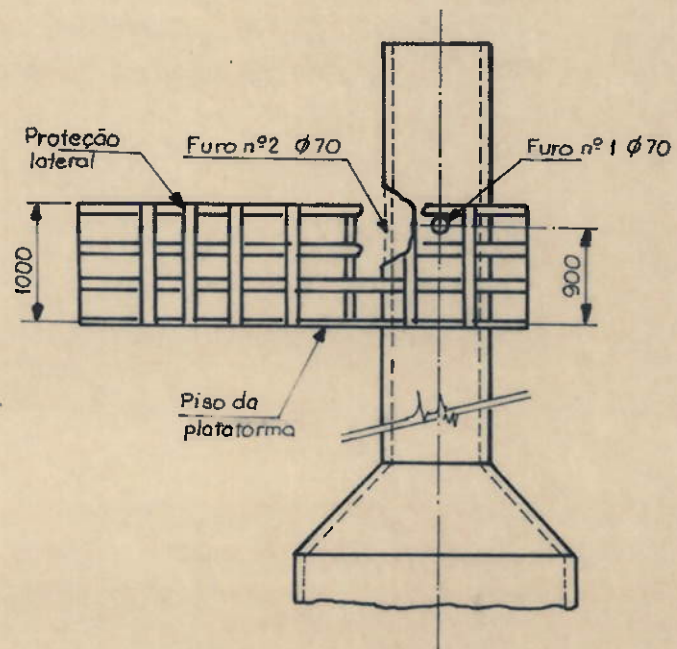
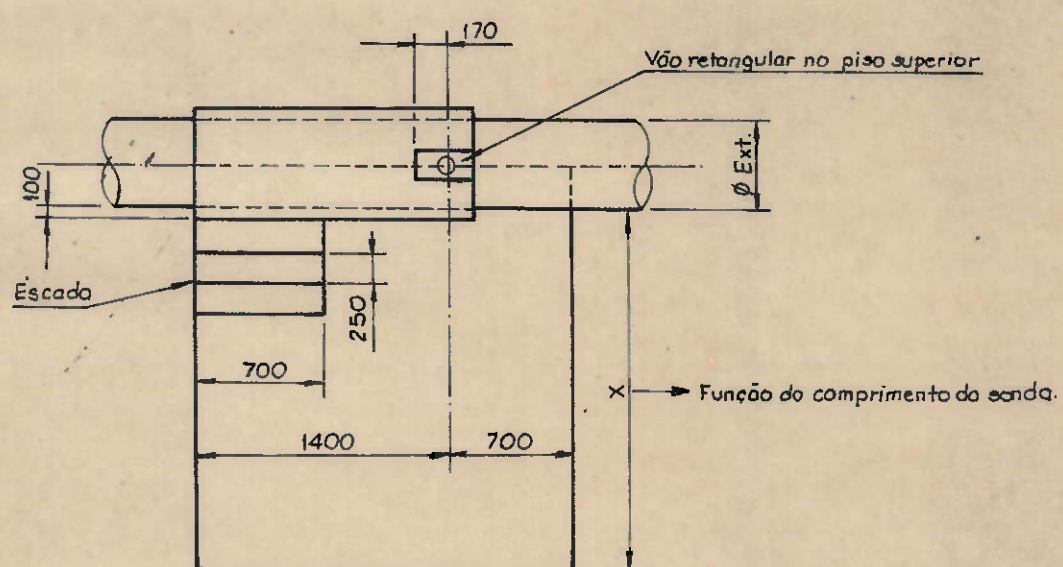
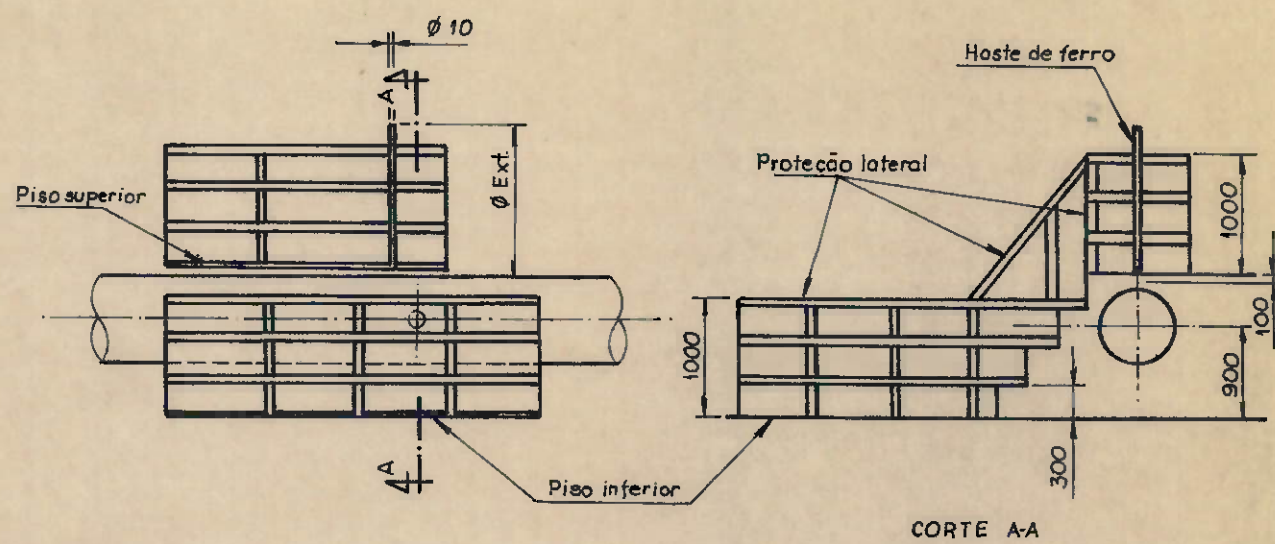


FIGURA 34 e 35



## APENDICE I





Dimensões em mm

## APENDICE 2



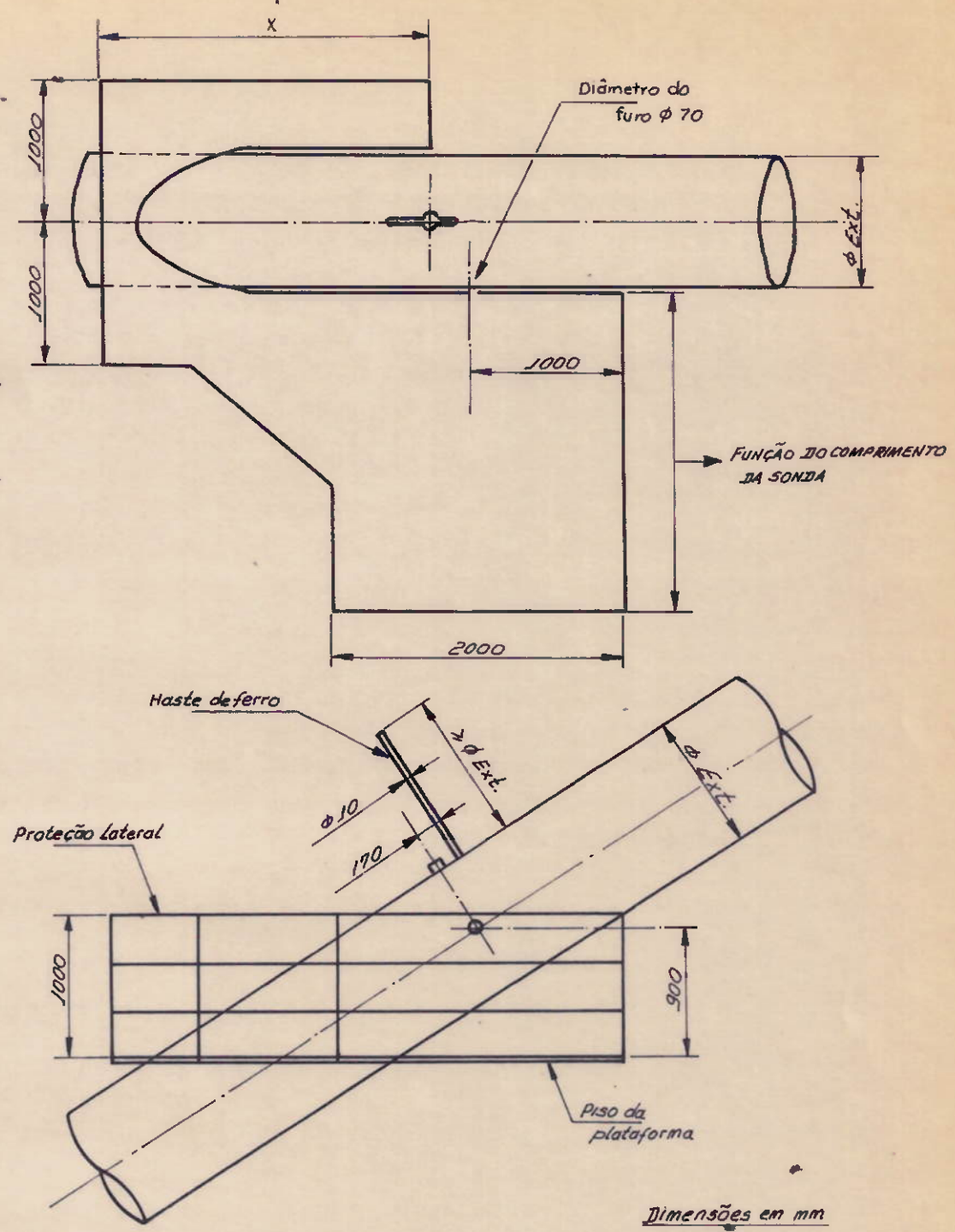


FIGURA 3

## BIBLIOGRAFIA

- Measurement of particular emission including  
grit and dust - BSI - 1.983
- Methods of Measuring Dust Content in Stack gas  
JIS - 1.983
- Determining Dust Concentration in as Gas Stream  
- ASME - 1.957
- Flue and Exhaust Gas Analyses - ASME - 1.981
- Allen, T. 1.975. Particle Size Measurement. John  
Wiley and Sons, New York, New York. 454 pages.
- Bird, A.N. Jr. 1.973. Summary of Techniques Used  
for Measuring Concentration and Size of Fine Particulate Emission.
- Brenchley, D.L., G.D. Turley, and R.F. Yarnac. /  
1.974. Industrial Source Sampling. Ann Arbor Science Publishers, Inc.,  
Ann Arbor, Michigan.
- Normas consultadas