



NORMA TÉCNICA

L9.217

Nov/1989
15 PÁGINAS

Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação de material particulado com o sistema filtrante no interior do duto ou chaminé: método de ensaio

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Avenida Professor Frederico Hermann Jr., 345
Alto de Pinheiros CEP 05459-900 São Paulo SP
Tel.: (11) 3133 3000 Fax.: (11) 3133 3402

[http: // www . cetesb . sp . gov . br](http://www.cetesb.sp.gov.br)

CETESB	<p align="center">DUTOS E CHAMINÉS DE FONTES ESTACIONÁRIAS DETERMINAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO COM O SISTEMA FILTRANTE NO INTERIOR DO DUTO OU CHAMINÉ</p> <p align="center">Método de ensaio</p>	<p>L9.217</p> <p>NOV/89</p>
--------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------

SUMÁRIO	Pág.
1 Objetivo.....	1
2 Normas Complementares.....	1
3 Definições.....	2
4 Aparelhagem.....	2
5 Execução do ensaio.....	4
6 Resultados.....	9
Anexo - Seleção de boquilha.....	14

1 OBJETIVO

1.1 Esta Norma prescreve o método para determinação de material particulado no fluxo gasoso de dutos ou chaminés de fontes estacionárias utilizando o sistema filtrante imerso no efluente gasoso.

1.2 Este método não é aplicável quando:

- a) o fluxo gasoso contém gotículas de água ou vapor saturado;
- b) a área projetada do conjunto sonda/porta-filtro cobrir mais de 5% da área da seção da chaminé ou duto (ver Figura 1);
- c) a temperatura do fluxo gasoso for incompatível com o elemento filtrante.

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

2 NORMAS COMPLEMENTARES

Na aplicação desta Norma é necessário consultar:

- L9.221 - Determinação de pontos de amostragem em duto ou chaminé de fonte estacionária.
- L9.222 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da velocidade e vazão dos gases.
- L9.223 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da massa molecular seca e do excesso de ar do fluxo gasoso.
- L9.224 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da umidade dos efluentes.
- E16.030 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Calibração dos equipamentos utilizados na amostragem de efluentes.

3 DEFINIÇÕES

Para os efeitos desta Norma são adotadas as definições 3.1 e 3.2.

3.1 Material particulado

Qualquer partícula sólida ou líquida que permaneça neste estado nas condições de pressão e temperatura da chaminé ou duto.

3.2 Coleta isocinética

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

4 APARELHAGEM

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

4.1 Equipamentos para amostragem

4.1.1 Conjunto de boquilhas com bordas finas e cônicas.

4.1.2 Sonda, provida de Pitot, de termopar e de sistema de aquecimento que evite a condensação de vapor durante a amostragem.

4.1.3 Extensão flexível da sonda quando necessária com parede interna lisa e provida de sistema de aquecimento que evite a condensação de vapor durante a amostragem.

4.1.4 Porta-filtro.

Nota: Os equipamentos mencionados em 4.1.1 a 4.1.4 devem ser compatíveis com a corrosividade e temperatura do meio.

4.1.5 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°C. Os dois primeiros borbulhadores devem conter volumes conhecidos de água, o terceiro estar vazio e o quarto conter sílica-gel.

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

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

4.1.7 Recipiente adequado para a coleta dos gases de combustão.

4.1.8 Frasco de vidro de borossilicato ou de polietileno, com capa

cidade de 500 a 1 000 mL, com tampa de vidro ou de polietileno.

4.1.9 Escova para boquilha.

4.1.10 Placas de Petri.

4.1.11 Sistema de medição e controle composto basicamente de:

- a) vacuômetro;
- b) válvulas para controle de fluxo;
- c) bomba de vácuo;
- d) gasômetro seco, provido de termômetro na entrada e saída, com menor divisão de 1°C;
- e) placa de orifício;
- f) dois monômetros diferenciais com fundo de escala de 2452 Pa (250 mm H₂O);

Nota: Os casos de pressões de velocidade inferiores a 12,7 Pa (1,3 mm H₂O) 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°C, e cujo elemento sensível ou termopar é aquele acoplado a sonda (ver 4.1.2);
- i) cronômetro.

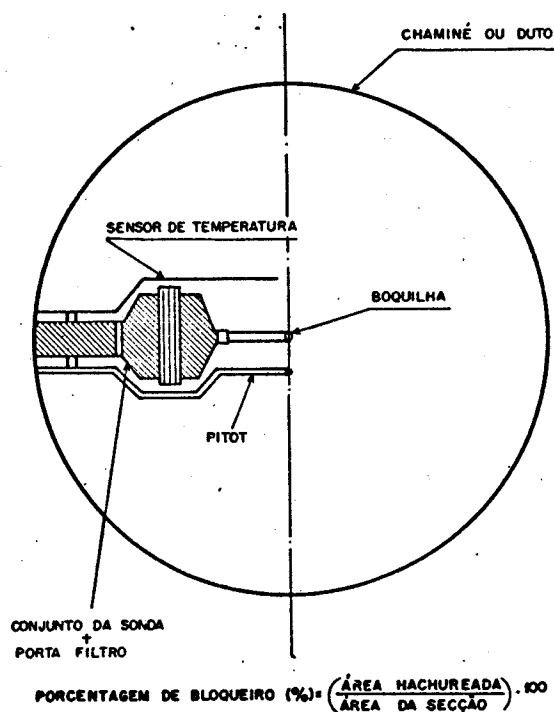


FIGURA 1 - Área projetada e cálculo da % de bloqueio

4.2 Aparelhagem para preparação e análise da amostra

4.2.1 Pisseta.

4.2.2 Balança com precisão de 0,5 g.

4.2.3 Vidro de relógio.

4.2.4 Dessecador.

4.2.5 Balança analítica com precisão de 0,1 mg.

4.2.6 Béquer.

4.2.7 Proveta.

4.2.8 Estufa.

4.2.9 Pinças.

4.2.10 Banho-maria.

4.2.11 Aparelho de Orsat.

5 EXECUÇÃO DO ENSAIO

5.1 Princípio do método

O material particulado é coletado isocineticamente ponto a ponto e simultaneamente é determinado o volume do gás amostrado. A massa do material particulado é determinada gravimetricamente.

5.2 Materiais para amostragem

5.2.1 Filtros com pelo menos 99,95% de eficiência de retenção para partículas de até 0,3 μm , de material não reativo com o meio e compatível com a temperatura.

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

5.2.3 Água destilada.

5.2.4 Cloreto de cálcio anidro ou outro dessecante equivalente com indicador de umidade.

5.2.5 Graxa de silicone.

5.3 Procedimento

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

5.3.1 Preparação preliminar

5.3.1.1 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°C para poder ser reutilizada.

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

5.3.1.3 A seguir pesá-los, com precisão de 0,1 mg, a cada intervalo de 2 h até que a diferença entre duas pesagens consecutivas seja igual ou inferior a 0,5 mg.

Alternativamente, se a temperatura do efluente gasoso na chaminé for superior a 105°C, os filtros poderão ser secos em estufa à temperatura média deste efluente e dessecados até que a diferença entre duas pesagens consecutivas seja menor ou igual 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 que 2 min.

5.3.1.4 Colocar cerca de 100 mL de água destilada no primeiro e no segundo borbulhador e cerca de 200 a 300 g de sílica-gel no quarto borbulhador, deixando o terceiro borbulhador vazio. Pesá-los com precisão de 0,5 g e anotar suas massas.

5.3.1.5 Usando pinça, colocar o filtro (identificado e pesado) no porta-filtro, assegurando-se de que esteja centrado, para que não ocorra vazamento.

5.3.1.6 Montar o trem conforme a Figura 2 usando graxa de silicone nas juntas.

5.3.2 Determinação preliminar

5.3.2.1 Selecionar o local de amostragem e o número de pontos conforme Norma L9.221.

5.3.2.2 Medir a pressão estática do gás no duto ou chaminé, a temperatura e a pressão de velocidade. Fazer teste de vazamento do conjunto Pitot, linhas flexíveis e manômetro conforme item 5.1.2 da Norma L9.222. Determinar a umidade conforme Norma L9.224.

5.3.2.3 Selecionar a boquilha da sonda para uma faixa de pressão de velocidade de modo que não ocorra troca durante a amostragem (ver Anexo). Recomenda-se usar o valor 29 para a massa molecular

úmida do gás.

5.3.2.4 O tempo de coleta por ponto deve ser igual e não inferior a 2,5 min e o tempo total de amostragem não ser inferior a 60 min.

5.3.3 Teste de vazamento

Recomenda-se efetuar um teste de vazamento, antes de iniciar a coleta, como segue:

Ligar o sistema de aquecimento da sonda e aguardar até que atinja a temperatura de $120 \pm 10^{\circ}\text{C}$. Abrir completamente a válvula de ajuste fino, fechar a válvula de ajuste grosso, ligar a bomba de vácuo e fechar a entrada da boquilha. 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). Para eliminar a depressão no sistema, abrir vagarosamente a entrada da boquilha até a equalização das pressões, fechar a válvula de ajuste grosso e desligar a bomba. No teste inicial a taxa de vazamento não deve exceder 0,60 L/min. Caso isso ocorra eliminar o vazamento.

5.3.4 Coleta de amostra

5.3.4.1 Limpar os furos da chaminé ou duto, que dão acesso à sonda, antes de começar a amostragem para minimizar a chance de coletar material depositado.

5.3.4.2 Nivelar e zerar o manômetro no início da amostragem e verificar periodicamente durante a amostragem.

5.3.4.3 Adicionar o gelo na caixa fria, antes e durante a amostragem, de maneira a garantir que a temperatura dos gases na saída do sistema de condensação esteja abaixo de 20°C .

5.3.4.4 Antes de começar a amostragem remover a tampa da boquilha e colocar a sonda no interior da chaminé ou duto no primeiro ponto (na posição correta) tendo cuidado de verificar se a válvula do ajuste grosso está completamente fechada e a do ajuste fino completamente aberta.

5.3.4.5 Vedar o furo de acesso durante a coleta para evitar interferência do ar ambiente no efluente gasoso.

5.3.4.6 Anotar a leitura inicial do gasômetro.

5.3.4.7 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 se o valor

calculado conforme 6.1.9.a) estiver entre 90 e 110%.

Nota: Calculadoras são necessárias para a facilidade de operação isocinética.

5.3.4.8 Coletar uma amostra do gás para determinação de sua massa molecular conforme L9.223.

5.3.4.9 Cuidar para que não ocorram impactos acidentais, tanto com a boquilha como com o porta-filtro, para minimizar a possibilidade de perda do material coletado.

5.3.4.10 Certificar-se de que a depressão no vacuômetro não exceda 50663 Pa (380 mm Hg). Se isto ocorrer, repetir o teste de vazamento (como indicado em 5.3.3). Caso a depressão seja proveniente do filtro é recomendável que seja trocado o conjunto porta-filtro e filtro, ao invés de trocar somente o filtro. Antes da troca deste componente, ou de qualquer outro, efetuar teste de vazamento conforme 5.3.3. Se o vazamento exceder 0,60 L/min rejeitar a amostragem.

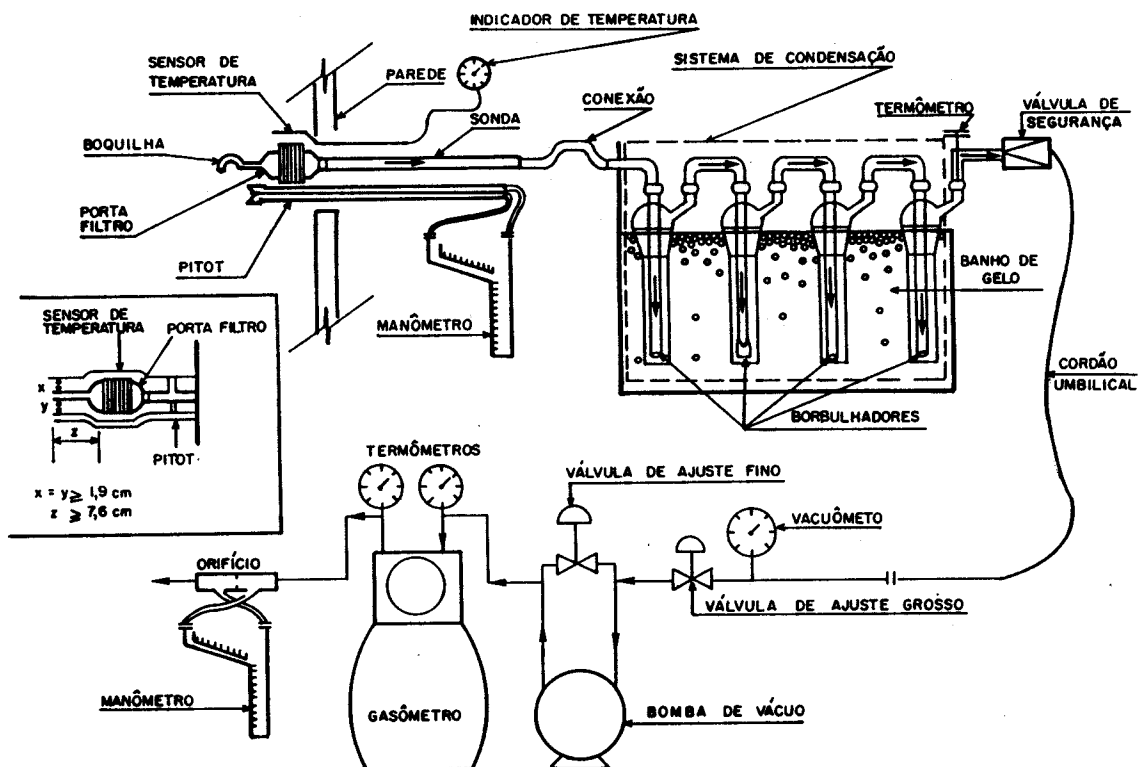


FIGURA 2-Trem de amostragem

5.3.4.11 Ao término do tempo de amostragem, fechar a válvula de ajuste grosso e desligar a bomba.

5.3.4.12 Fazer teste de vazamento, conforme 5.3.3, na depressão

máxima registrada durante a amostragem. Se o vazamento exceder 0,60 L/min rejeitar a amostragem.

5.3.4.13 Anotar os dados num formulário como o da figura 3.

FIRMA: _____		DATA: ____/____/____		PROCESSO: _____							
TEMPO: _____		LOCAL: _____		P. ATM: _____							
INÍCIO: _____		TÉRMINO: _____		T. AMBIENTE: _____							
COLETA/AMOSTRAGEM:											
19 EIXO	PONTO	TEMPO	DISTÂNCIA	VOLUME DO GAS	ΔP	ΔH	VÁCUO	TEMPERATURA			
								GASÔMETRO		ÚLTIMO BORBULHADOR	CHAMINÉ
								ENTRADA	SAÍDA		
	01										
	02										
	03										
	04										
	05										
	06										
	07										
	08										
	09										
	10										
11											
12											
20 EIXO	01										
	02										
	03										
	04										
	05										
	06										
	07										
	08										
	09										
	10										
	11										
	12										
				V. TOTAL	$\sqrt{\Delta P}$	$\overline{\Delta H}$		TEMPERATURA		TEMP	
EQUIPE:						PRESSÃO ESTÁTICA			média		
1	_____										
2	_____										
3	_____										

FIGURA 3 Modelo de folha de campo

5.3.4.14 Após a amostragem e durante o transporte do conjunto porta-filtro e filtro, este deverá ter suas extremidades vedadas para evitar perdas. Drenar para o sistema de condensação todo condensado eventualmente presente na sonda ou extensão flexível, caso utilizada. Vedar as extremidades do sistema de condensação.

Nota: Remover a aparelhagem utilizada na coleta para uma área apropriada.

5.3.5 Recuperação e manuseio da amostra

5.3.5.1 Proceder à limpeza externa do conjunto boquilha, porta-filtro

e sonda.

5.3.5.2 Remover cuidadosamente o filtro, com uma pinça, e colocá-lo em uma placa de Petri identificada. Caso seja necessário dobrar o filtro, a face coletora deverá ficar voltada para a parte interna. Transferir cuidadosamente para a placa de Petri qualquer material particulado que estiver aderido na parte interna do porta-filtro.

5.3.5.3 Separar uma parte da água de lavagem para a prova em branco.

5.3.5.4 Lavar o interior da boquilha e a parte interna do porta-filtro; transferir o produto da lavagem para um recipiente identificado. Marcar o nível do volume transferido.

5.3.5.5 Pesar os quatro borbulhadores com precisão de 0,5 g.

5.3.5.6 Pesar os filtros obedecendo ao mesmo procedimento adotado na preparação.

5.3.5.7 Transferir quantitativamente o volume obtido em 5.3.5.4 para um béquer graduado, previamente seco em estufa a 105°C e tarado. Anotar o volume e secar em banho-maria seguido de secagem em estufa a 105°C. Alternativamente fazer a secagem apenas em estufa a 105°C. Dessecar e pesar.

5.3.5.8 Fazer uma prova em branco em paralelo usando o mesmo volume da amostra. Descontar o resíduo da prova em branco do resíduo obtido em 5.3.5.7.

5.3.5.9 Determinar a massa molecular seca do gás conforme L9.223.

5.3.5.10 Anotar todos os dados obtidos num formulário como o da Figura 4.

5.4 Representatividade da amostragem

Deve-se efetuar pelo menos duas determinações de material particulado por fonte. A amostra será considerada representativa se os resultados obtidos em cada coleta não forem discrepantes entre si.

6 RESULTADOS

6.1 Cálculos

Usando a nomenclatura de 6.2, proceder aos cálculos indicados em 6.1.1 a 6.1.14.

6.1.1 Pressão absoluta do gás na chaminé ou duto:

$$P = P_{atm} \pm P_e$$

6.1.2 Pressão absoluta no gasômetro:

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

6.1.3 Volume de água nas condições da chaminé ou duto:

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

6.1.4 Volume de gás medido nas condições da chaminé ou duto:

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

sendo que:

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

6.1.5 Umidade:

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

6.1.6 Volume de água nas condições da chaminé ou duto:

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

6.1.7 Massa molecular base úmida:

$$M_{Mu} = M_{Ms}(1 - B_{ag}) + 18 B_{ag}$$

6.1.8 Velocidade média do gás na chaminé ou duto:

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

6.1.9 Isocinética:

$$a) I' = \frac{0,0477 Y V'g P_g}{C_p \theta' Ab T'g (1 - B'ag) (\sqrt{\Delta P})' \sqrt{\frac{P}{T' M_{Mu}}}}$$

$$b) I = \frac{1,677 (V + V_{ag})}{v \theta Ab}$$

6.1.10 Vazão nas condições da chaminé ou duto:

$$Q = 3600 vA$$

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

$$Q_{nbs} = \frac{0,3592 Q P (1 - Bag)}{T}$$

6.1.12 Volume do gás medido nas condições normais (0°C e 1 atm), base seca:

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

6.1.13 Concentração de material particulado nas condições normais, base seca:

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

6.1.14 Taxa de emissão de material particulado:

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

FIRMA _____	DATA _____	COLETA AMOSTRAGEM _____		
COMPONENTES	% ACUMULADA	% Bz	Nz	Mz . Bz
CO ₂			0,44	
O ₂			0,32	
CO			0,28	
N ₂	100		0,28	
TOTAL		100%	MMS	
BORBULHADOR	MASSA DE BORBULHADOR (g)		MASSA DE ÁGUA. Mg (g)	
	FINAL	INICIAL		
1				
2				
3				
4				
TOTAL				
FILTRO NÚMERO	MASSA DE FILTRO (mg)		MASSA DE MATERIAL PARTICULADO (mg)	
	FINAL	INICIAL		
TOTAL				
BÉQUER NÚMERO	MASSA DO BÉQUER (mg)		MASSA DE MATERIAL PARTICULADO (mg)	
	FINAL	INICIAL		
TOTAL				
PROVA BRANCO				
MASSA TOTAL DE MATERIAL PARTICULADO (mg)				
FILTROS	+	BÉQUER	-	PROVA BRANCO + Mmp
	+		-	

FIGURA 4-Modelo de formulário para produtos de combustão material particulado, água coletada e prova em branco

6.2 Nomenclatura

Segue abaixo a nomenclatura, com respectivas unidades, utilizada nos cálculos em 6.1.

<u>Símbolo</u>	<u>Unidade</u>	<u>Significado:</u>
Ab	m ²	área da boquilha.
A	m ²	área da chaminé.
Bag	adimensional	unidade dos gases, expressa em termos de proporção em volume do vapor de água nos gases da chaminé ou duto.
B'ag	adimensional	unidade dos gases, avaliada previamente para o ponto de coleta e intervalo de tempo θ' , expressa em termos de proporção em volume do vapor de água nos gases da chaminé ou duto.
C	mg/Nm ³	concentração de material particulado nas condições normais, base seca.
Cp	adimensional	coeficiente do pitot.
I	%	isocinética.
I'	%	isocinética no ponto de coleta no intervalo de tempo θ' .
Mag	g	massa total de água coletada nos borbulhadores.
Mmp	mg	massa total de material particulado coletado.
MMs	g/g mol	massa molecular base seca.
MMu	g/g mol	massa molecular base úmida.
P	mm Hg	pressão absoluta do gás na chaminé ou duto.
Patm	mm Hg	pressão atmosférica.
Pe	mm Hg	pressão estática da chaminé ou duto.
Pg	mm Hg	pressão absoluta no gasômetro.
Q	m ³ /h	vazão do efluente nas condições da chaminé ou duto.
Qnbs	Nm ³ /h	vazão do efluente nas condições normais, base seca.
T	K	temperatura absoluta média do gás na chaminé ou duto.
T'	K	temperatura absoluta do gás no ponto de coleta.

<u>Símbolo</u>	<u>Umidade</u>	<u>Significado</u>
Te	kg/h	taxa de emissão de material parti <u>culado</u> .
Tg	K	média das temperaturas médias do gás na entrada e saída do gasô <u>metro</u> .
T'g	K	média das temperaturas do gás na entrada e saída do gasômetro no pon <u>to</u> de coleta.
v	m/s	velocidade média do gás na chaminé ou duto.
V	m ³	volume do gás medido no gasômetro nas condições da chaminé ou duto.
Vag	m ³	volume de água nas condições da cha <u>miné</u> ou duto.
Vg	m ³	volume do gás medido no gasômetro nas condições de ensaio.
V'g	m ³	volume do gás seco coletado no pon <u>to</u> , no intervalo de tempo θ' , medido no gasômetro nas condições de en <u>saio</u> .
Vgf	m ³	leitura final no gasômetro.
Vgi	m ³	leitura inicial no gasômetro.
Vgn	Nm ³	volume de gás medido nas condições normais, base seca.
Y	adimensional	fator de calibração do gasômetro.
$\overline{\Delta H}$	mm H ₂ O	média aritmética das pressões dife <u>renciais</u> do orifício.
ΔP	mm H ₂ O	pressão de velocidade dos gases na chaminé.
θ	min	tempo total de coleta.
θ'	min	tempo de coleta no ponto.
$(\overline{\sqrt{\Delta P}})$	(mm H ₂ O) ^{0,5}	média das raízes quadradas de ΔP .
$(\sqrt{\Delta P})'$	(mm H ₂ O) ^{0,5}	raiz quadrada de ΔP no ponto de coleta.

ANEXO - SELEÇÃO DE BOQUILHA

A-1 A fim de manter a condição isocinética durante toda a amostragem sem troca de boquilha é de fundamental importância a boa escolha do diâmetro.

A-2 Existem vários caminhos a seguir para a seleção do diâmetro mais adequado de boquilha para cada conjunto de condições de uma amostragem.

A-3 O procedimento baseado no cálculo direto do diâmetro nas condições fluidodinâmicas no conjunto chaminé - trem de amostragem, é mais genérico e por isso é aqui recomendado.

A-4 O diâmetro da boquilha, por este procedimento, é calculado pela seguinte fórmula:

$$Db = \sqrt{\frac{608 Q_m P_g}{T_m C_p (1 - Bag)} \frac{T M_{Mu}}{P \bar{\Delta P}}}$$

Onde:

Db = diâmetro da boquilha, em mm

Qm = vazão do fluxo gasoso no medidor, em m³/min

Tm = temperatura no medidor, em K

$\bar{\Delta P}$ = média das pressões de velocidade, em mm H₂O

Pg, Cp Bag, T, M_{Mu} e P têm o significado e unidades indicados em 6.2

A-5 Escolhe-se a boquilha cujo diâmetro mais se aproxime do calculado acima.