



NORMA TÉCNICA

L9.225

Mar/1995
15 PÁGINAS

Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação de material particulado: 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	DUTOS E CHAMINÉS DE FONTES ESTACIONÁRIAS DETERMINAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO Método de ensaio	L9.225 MAR/95
--------	---	----------------------

SUMÁRIO

- 1 Objetivo
- 2 Normas complementares
- 3 Definição
- 4 Aparelhagem
- 5 Execução do ensaio
- 6 Resultados

ANEXO A - Seleção de boquilha

ANEXO B - Cálculo da constante de proporcionalidade "K"

1 OBJETIVO

1.1 Esta Norma prescreve o método de determinação do material particulado no fluxo gasoso em dutos e chaminés de fontes estacionárias.

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

1.2 Esta Norma é complementar ao Decreto Estadual nº 8468, artigo 28, de 8/9/76.

2 NORMAS COMPLEMENTARES

Na aplicação desta Norma é necessário consultar:

- L9.221 - Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação de pontos de amostragem
- 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 DEFINIÇÃO

Para os efeitos desta Norma é adotada a definição 3.1.

3.1 Amostragem isocinética

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

4 APARELHAGEM

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

4.1 Aparelhagem para amostragem

4.1.1 Conjunto de boquilhas de aço inoxidável com bordas finas e cônicas, devendo serem aferidas e calibradas.

4.1.2 Sonda de material compatível com a corrosividade e temperatura do meio, provida de Pitot, de termopar e de sistema de aquecimento que evite a condensação de vapor durante a coleta.

4.1.3 Ciclone com Erlenmeyer.

4.1.4 Porta-filtro de material compatível com a corrosividade e temperatura do meio.

4.1.5 Sistema de aquecimento capaz de manter a temperatura de $120 \pm 10^\circ\text{C}$ no porta-filtro durante todo o período da coleta.

4.1.6 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 deve estar vazio e o quarto deve conter sílica-gel.

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

4.1.8 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°C ;
- e) placa de orifício;
- f) dois manômetros diferenciais com fundo de escala de 2452 Pa ($250 \text{ mmHg}_2\text{O}$);
- g) barômetro com menor divisão de 266,6 Pa (2 mmHg);
- h) termômetro com menor divisão de 1°C , e cujo elemento sensível ou termopar é aquele acoplado à sonda (ver 4.1.2);
- i) cronômetro.

4.2 Aparelhagem para preparação e análise da amostra

4.2.1 Escova com comprimento um pouco maior que o da sonda.

4.2.2 Duas pissetas.

4.2.3 Frasco de vidro de borossilicato ou de polietileno.

4.2.4 Placas de Petri.

4.2.5 Cilindro graduado e balança, com precisão de 1 mL e 0,5 g, respectivamente.

4.2.6 Frasco para armazenar a sílica-gel.

4.2.7 Vidro de relógio.

4.2.8 Dessecador.

4.2.9 Balança analítica com precisão de 0,1 mg.

4.2.10 Béqueres.

5 EXECUÇÃO DO ENSAIO

5.1 Princípio do método

O material particulado é amostrado 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.

5.2 Componentes

5.2.1 Filtros de fibra de vidro, livres de compostos orgânicos, apresentando pelo menos 99,95% de eficiência para retenção de partículas até 0,3 μm .

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

5.2.3 Água destilada.

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

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

5.2.6 Graxa de silicone ou equivalente.

5.3 Procedimento

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

5.3.1 Preparação preliminar

5.3.1.1 Certificar-se visualmente que os filtros não apresentam qualquer irregularidade; secá-los em estufa a $120 \pm 10^\circ\text{C}$ por duas horas; dessecá-los a $20 \pm 5^\circ\text{C}$ pelo menos durante duas horas.

5.3.1.2 A seguir pesá-los, com precisão de 0,1 mg, a cada intervalo de duas 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 por mais de um minuto, a uma umidade relativa não superior a 50%.

5.3.2 Determinação preliminar

5.3.2.1 Selecionar o local de amostragem e o número de pontos na seção transversal de acordo com a Norma Técnica CETESB L9.221.

5.3.2.2 Determinar a pressão estática na seção de coleta.

5.3.2.3 Determinar a temperatura na seção de coleta.

5.3.2.4 Determinar a pressão de velocidade de acordo com a Norma Técnica CETESB L9.222.

5.3.2.5 Determinar o teor de umidade de acordo com a Norma Técnica CETESB L9.224.

5.3.2.6 Determinar o tempo de coleta em cada ponto de acordo com a fonte a ser amostrada, não devendo este ser menor que 2,5 minutos. O tempo total de coleta não deve ser inferior a 60 minutos e o volume mínimo coletado de 850 L (273 K e 101325 Pa).

Nota: Em função da fonte amostrada, o tempo e o volume poderão ser superiores aos anteriormente citados.

5.3.2.7 Selecionar a boquilha da sonda para uma faixa de velocidade de modo que não ocorra troca durante a amostragem (ver Anexo A).

5.3.2.8 Calcular a constante de proporcionalidade "K" (ver Anexo B).

5.3.3 Preparo dos equipamentos para coleta

5.3.3.1 Montar o trem de amostragem como mostra a Figura 1.

5.3.3.2 Colocar 100 mL de água destilada em cada um dos dois primeiros borbulhadores, deixando o terceiro vazio e o quarto com 200-300 g de sílica-gel.

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

5.3.3.4 Colocar o filtro previamente tarado no porta porta-filtro.

5.3.3.5 Manter os borbulhadores no banho de gelo ou outro sistema de resfriamento equivalente.

5.3.4 Teste de vazamento

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, 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 mmHg). 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. A taxa de vazamento não deve exceder 0,6 L/min. Caso isto ocorra, eliminar o vazamento.

5.3.5 Coleta

5.3.5.1 Durante a coleta, a temperatura do filtro e da sonda deve permanecer na faixa de $120 \pm 10^\circ\text{C}$.

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

5.3.5.3 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.

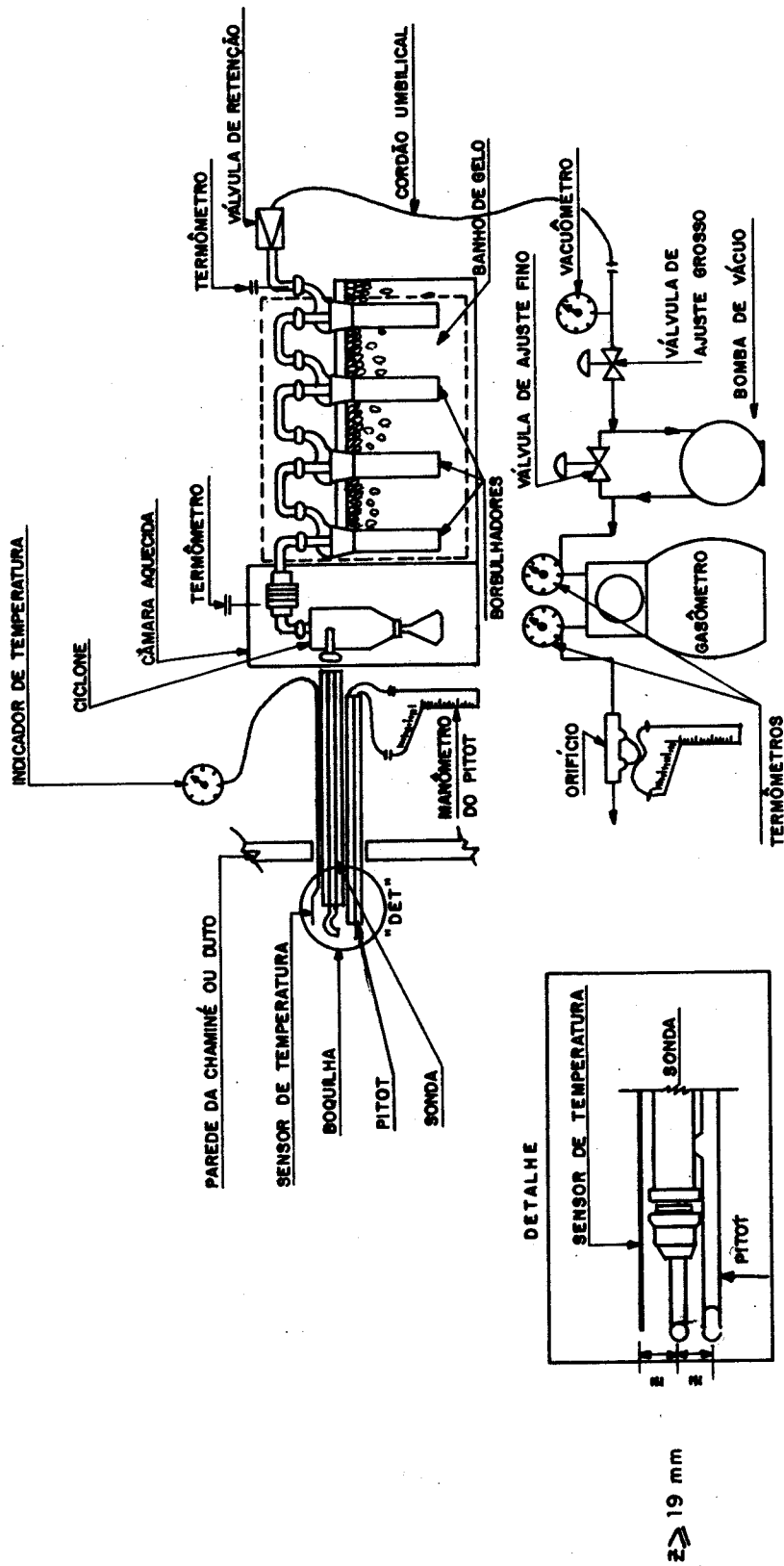


FIGURA 1 TREM DE AMOSTRAGEM PARA MATERIAL PARTICULADO

5.3.5.4 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 coleta isocinética e simultaneamente acionar o cronômetro. Considerar isocinética a coleta em cada ponto se o valor calculado conforme 6.1.10, item a), estiver entre 90 e 110%.

5.3.5.5 Certificar-se de que a depressão no vacuômetro não exceda 50663 Pa (380 mmHg). Caso exceda, interromper a coleta e fazer o teste de vazamento conforme 5.3.4, com a depressão máxima ajustada durante a coleta.

Nota: Se o vazamento exceder 0,6 L/min, rejeitar a coleta.

5.3.5.6 Manter a temperatura dos gases que saem do último borbulhador (sílica-gel) abaixo de 20°C.

5.3.5.7 Anotar os dados durante a coleta em um formulário como o da Figura 2.

5.3.5.8 Realizar a coleta do gás para determinação de sua massa molecular seca conforme a Norma Técnica CETESB L9.223.

5.3.5.9 No final da coleta, fechar a válvula de ajuste grosso, desligar a bomba de vácuo, retirar a sonda do interior da chaminé ou duto e registrar a leitura final do gasômetro.

5.3.5.10 Fazer teste de vazamento (como indicado em 5.3.4) na depressão máxima registrada durante a coleta. Se o vazamento exceder 0,60 L/min, rejeitar a coleta.

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

5.4 Recuperação e manuseio da amostra

5.4.1 Remover cuidadosamente para uma área limpa todas as partes do equipamento que contenham o material coletado.

5.4.2 Transferir para uma placa de Petri o filtro com a amostra.

5.4.3 Transferir todo o material particulado depositado no interior da boquilha, sonda, ciclone, Erlenmeyer e porta-filtro para um recipiente com tampa.

Nota: Para remover o material particulado da boquilha, sonda, ciclone, Erlenmeyer e porta-filtro, utilizar a escova e um volume conhecido de uma mistura a 50% de acetona e água destilada. Lavar até que nenhum material seja percebido visualmente.

5.5 Análise

5.5.1 Colocar a(s) placa(s) de Petri aberta(s) com o(s) filtro(s) utilizado(s) em uma estufa a $120 \pm 10^\circ\text{C}$ por duas horas, dessecá-las a $20 \pm 5^\circ\text{C}$ pelo menos durante duas horas.

5.5.2 Pesar o(s) filtro(s), com precisão de 0,1 mg, a cada intervalo de duas horas até que a diferença entre duas pesagens consecutivas seja igual ou inferior a 0,5 mg.

FIRMA: _____ DATA: ___/___/___ PROCESSO: _____
 TEMPO: _____ LOCAL: _____ P. ATM: _____
 INÍCIO: _____ TÉRMINO: _____ T. AMBIENTE: _____
 AMOSTRAGEM: _____

PONTO	TEMPO	DISTÂNCIA	VOLUME DO GÁS	A. P.	A. H.	VÁCUO	TEMPERATURA				
							GASÔMETRO		ULTIMO BORSBU- LINDOR	PORTA FILTRO	CHAMINE
							ENTRADA	SAÍDA			
01											
02											
03											
04											
05											
06											
07											
08											
09											
10											
11											
12											
01											
02											
03											
04											
05											
06											
07											
08											
09											
10											
11											
12											
			V. TOTAL	$\sqrt{\Delta P}$	ΔH	TEMPERATURA					TEMP.

19 EIXO

29 EIXO

EQUIPE:
 1 _____
 2 _____
 3 _____

PRESSÃO ESTÁTICA

							média
--	--	--	--	--	--	--	-------

FIGURA 2 - Modelo de folha de campo

Nota: Durante cada pesagem o(s) filtro(s) não deve(m) ficar exposto(s) ao ambiente do laboratório por mais de um minuto, a uma umidade relativa não superior a 50%.

5.5.3 Transferir o material particulado coletado (item 5.4.3) para um béquer previamente tarado. Aquecer até a evaporação total, tomando o cuidado para que não ocorra calcinação.

5.5.4 Dessecar por duas horas e pesar com aproximação de 0,1 mg, considerando a massa somente quando a diferença entre as duas pesagens consecutivas for menor ou igual a 0,5 mg.

Nota: Durante cada pesagem o béquer não deve ficar exposto ao ambiente do laboratório por mais de um minuto, a uma umidade relativa não superior a 50%.

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

5.5.6 Efetuar a prova em branco, utilizando o mesmo volume do item 5.4.3 (Nota) e proceder conforme 5.5.3 e 5.5.4.

5.5.7 Determinar a massa molecular seca de acordo com L9.223.

5.5.8 Anotar todos os dados em um formulário como o da Figura 3.

5.6 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 amostra 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 6.1.15. (760 mmHg = 101 325 Pa).

6.1.1 Pressão absoluta do gás na chaminé ou duto:

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

6.1.2 Pressão absoluta no gasômetro:

$$P_g = P_{atm} + \Delta H$$

6.1.3 Volume de água nas condições da chaminé ou duto nos casos de fluxo não saturado e sem gotículas:

$$V_{ag} = \frac{0,461346 T M_{ag}}{P}$$

_____ FIRMA	_____ DATA	_____ COLETA/AMOSTRAGEM		
COMPONENTES	% ACUMULADA	%Bx	Mx	Mx . Bx
CO ₂			0,44	
O ₂			0,32	
CO			0,28	
N ₂			0,28	
TOTAL	100%	100%	MMs	
BORBULHADOR	MASSA DE ÁGUA COLETADA (g)			
	FINAL	INICIAL	DIFERENÇA	
1				
2				
3				
4				
TOTAL				
FILTRO NÚMERO	MASSA DE MATERIAL PARTICULADO COLETADO (g)			
	FINAL	INICIAL	DIFERENÇA	
TOTAL				
BÉQUER NÚMERO	MASSA DE MATERIAL PARTICULADO COLETADO NA BOQUILHA, SONDA, CICLONE E ERLLENMEYER (g)			
	FINAL	INICIAL	DIFERENÇA	
TOTAL				
PROVA BRANCO (g)				
FILTROS + BOQUILHA, SONDA, CICLONE, ERLLENMEYER - PROVA EM BRANCO = TOTAL (g)				

FIGURA 3 - Modelo de formulário para produtos de combustão, material particulado, água coletada e prova em branco

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 nos casos de fluxo não saturado e sem gotículas:

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

6.1.6 Umidade nos casos de fluxo saturado ou com gotículas:

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

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

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

6.1.8 Massa molecular base úmida:

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

6.1.9 Velocidade média do gás na chaminé ou duto:

$$v = 128.96 C_p \sqrt{\frac{T}{P MMu}} (\sqrt{\Delta P})$$

6.1.10 Isocinética:

$$a) I' = \frac{0.0129 Y V'g P_g}{C_{pe} Ab T'g (1 - B'ag) (\sqrt{\Delta P})'} \sqrt{\frac{P}{T' MMu}}$$

$$b) I = \frac{1.667 (V + V_{ag})}{v_e Ab}$$

6.1.11 Vazão nas condições da chaminé ou duto:

$$Q = 3600 vA$$

6.1.12 Vazão nas condições normais (0°C e 101 325 Pa), base seca:

$$Q_{nbs} = \frac{0.0027 Q P (1 - Bag)}{T}$$

6.1.13 Volume do gás medido nas condições normais (0°C e 101 325Pa), base seca:

$$V_{gn} = \frac{0.0027 V_g P_g Y}{T_g}$$

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

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

6.1.15 Taxa de emissão de material particulado:

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

6.2 Nomenclatura

Segue abaixo a nomenclatura, com respectivas unidades, utilizadas nos cálculos de 6.1.

Símbolo	Unidade	Significado
Ab	m ²	área da boquilha.
A	m ²	área da chaminé.
Bag	adimensional	umidade dos gases, expressa em termos de proporção, em volume, do vapor dos gases da chaminé ou duto.
B'ag	adimensional	umidade dos gases avaliada previamente para o ponto de coleta e intervalo de tempo e', 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 e'.

Símbolo	Unidade	Significado
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	Pa	pressão absoluta do gás na chaminé ou duto.
Patm	Pa	pressão atmosférica.
Pe	Pa	pressão estática da chaminé ou duto.
Pg	Pa	pressão absoluta do gasômetro.
PVS	Pa	pressão de vapor de saturação.
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.
Te	Kg/h	taxa de emissão de material particulado.
Tg	K	média das temperaturas médias do gás na entrada e saída do gasômetro.
T'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 ³	volume do gás medido no gasômetro nas condições da chaminé ou duto.
Vag	m ³	volume de água nas condições da chaminé ou duto.
Vg	m ³	volume do gás seco medido no gasômetro nas condições de ensaio.

Símbolo	Unidade	Significado
V'g	m ³	volume do gás seco coletado no ponto de coleta, no intervalo de tempo e', medido no gasômetro nas condições de ensaio.
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 medidor.
ΔH	Pa	média aritmética das pressões do orifício.
ΔP	Pa	pressão de velocidade da chaminé ou duto.
Db	m	diâmetro da boquilha.
e	min	tempo total de coleta.
e'	min	tempo de coleta no ponto de coleta.
$(\sqrt{\Delta P})$	(Pa) ^{0,5}	média das raízes quadradas de ΔP .
$(\sqrt{\Delta P})'$	(Pa) ^{0,5}	raiz quadrada de ΔP no ponto de coleta.

/ANEXO A

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

A-3 O diâmetro da boquilha, por este procedimento, é calculado pela seguinte fórmula:

$$D_b = \sqrt{\frac{164,867 Q_m P_g}{T_m C_p (1 - B_{ag})}} \sqrt{\frac{T M_{Mu}}{P \overline{\Delta P}}}$$

onde:

D_b = diâmetro da boquilha, em mm.

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

T_m = temperatura do medidor, em K

$\overline{\Delta P}$ = média das pressões de velocidade, em Pa

P_g , C_p , B_{ag} , T , M_{Mu} e P têm o significado e unidades indicados em 6.2.

A-4 Escolhe-se a boquilha cujo diâmetro mais se aproxime do calculado acima.

/ANEXO B

ANEXO B - Cálculo da constante de proporcionalidade (K)

B-1 A equação utilizada em campo para se ter a condição isocinética é a seguinte:

$$\Delta H = K \cdot \Delta P$$

onde:

ΔH = pressão no orifício necessária para se ter a condição isocinética

ΔP = pressão de velocidade dos gases na chaminé ou duto no ponto de coleta

B-2 A constante K tem a seguinte expressão:

$$K = 8,035 \times 10^{-5} \cdot \Delta H@ \cdot Cp^2 \cdot Db^4 \cdot MMs \cdot Tg \cdot P \cdot (1-Bag)^2$$

$$\frac{MMu}{T \cdot Pg}$$

onde:

$\Delta H@$ = média aritmética das pressões no orifício, obtidas na calibração, mmH₂O

Cp = coeficiente do tubo Pitot, adimensional

Db = diâmetro da boquilha calculado através do Anexo A, mm

MMs = massa molecular seca, g/g mol

MMu = massa molecular úmida, g/g mol

Tg = média das temperaturas do gás na entrada e saída do gasômetro, K

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

P = pressão absoluta do gás na chaminé ou duto, mmHg

Pg = pressão absoluta do gasômetro, mmHg

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