



ENERGÉTICA
Qualidade do Ar

ENERGÉTICA IND. E COM. LTDA.

Rua Gravataí, 99 – Rocha
CEP 20975-030 Rio de Janeiro – RJ
CNPJ 29.341.583/0001-04 – IE 82.846.190
Fone: (21) 501-1998 Fax: (21) 241-1354
www.energetica.ind.br

CALIBRAÇÃO E OPERAÇÃO DO AGV PTS PELA VERSÃO ATUALIZADA DA NORMA ABNT NBR 9547 (18/08/05)

INTRODUÇÃO

Após trabalho de atualização, pelo Comitê 01:601.02 da ABNT, da versão original de Set/86, foi promulgada, em Set/1997, a versão atualizada da norma NBR 9547 para a amostragem de grande volume (AGV) de partículas totais em suspensão (PTS).

A atualização da NBR incorpora a experiência acumulada com o uso do AGV (HIVOL) ao longo de muitos anos e dispõe melhor a seqüência das atividades de calibração e operação do aparelho. Além disso, o método atualizado leva para as condições padrão de pressão (760 mm Hg) e temperatura (298 K) o cálculo final da concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Na NBR de SET/1986 isto não está explícito. É, portanto, do interesse do usuário de AGV PTS conhecer esta atualização.

Na amostragem com o AGV PTS, o usuário passa seqüencialmente por três fases:

- **Fase 1:** Calibração do Calibrador Padrão de Vazão (também conhecido por kit de calibração), utilizado na calibração do AGV PTS.
- **Fase 2:** Calibração do AGV PTS
- **Fase 3:** Operação de amostragem com o AGV PTS

Apresentamos a seguir, de forma resumida, as três fases.

FASE 1 – CALIBRAÇÃO DO CALIBRADOR PADRÃO (CPV)

O Calibrador Padrão de Vazão, do tipo orifício, popularmente conhecido por Kit de Calibração, é usado para calibrar o AGV PTS no local de amostragem. Chamá-lo-emos aqui de CPV (Calibrador Padrão de Vazão).

O CPV é normalmente calibrado contra um Medidor Padrão de Volume (MPV) do tipo Roots, levando-se em conta as condições de temperatura (T_1) e pressão (P_1) no momento da calibração. A Calibração do CPV é representada por uma reta da forma:

$$\sqrt{dH_c \left(\frac{P_1}{P_p} \right) \left(\frac{T_p}{T_1} \right)} = a_1(Q_p) + b_1 \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

- Q_p = vazão volumétrica em condições-padrão indicada pelo CPV, m^3/min .
- dH_c = perda de carga através do orifício do CPV, cm H_2O
- P_1 = pressão barométrica durante a calibração do CPV, mm Hg
- T_1 = temperatura ambiente durante a calibração do CPV, K ($\text{K} = ^\circ\text{C} + 273$)
- P_p = pressão em condições-padrão (760 mm Hg)
- T_p = temperatura em condições-padrões (298 K)
- a_1 = inclinação da relação de calibração do CPV
- b_1 = interseção da relação de calibração do CPV

Os valores de a_1 e b_1 são calculados por regressão linear (técnica dos mínimos quadrados).

A reta de calibração do CPV (Eq. 1) é usada posteriormente na calibração do AGV PTS (Fase 2), para se determinar a vazão Q_p em função da pressão diferencial dH_c . Nesse caso, a Eq. 1 toma a forma

$$Q_p = \frac{1}{a_1} \left(\sqrt{dH_c \left(\frac{P_2}{P_p} \right) \left(\frac{T_p}{T_2} \right)} - b_1 \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

onde P_2 e T_2 a pressão barométrica e a temperatura ambiente no local e no momento da calibração do AGV PTS, substituem P_1 e T_1 na Eq. 1.

A Figura 1 mostra um exemplo de certificação do Calibrador Padrão de Vazão, contendo a reta de calibração do mesmo.

Deve-se ressaltar que o usuário do AGV PTS normalmente recebe de terceiros o certificado de calibração do CPV. Com o certificado, ele, posteriormente, usa os parâmetros a_1 e b_1 da reta para determinar a vazão Q_p .

FASE 2 – CALIBRAÇÃO DO AGV PTS

Nesta fase, o AGV PTS é calibrado, quando devido, no seu local de amostragem, levando-se em consideração a pressão barométrica P_2 e a temperatura ambiente T_2 medidas no momento da calibração. A calibração do AGV PTS é representada por uma reta da forma

$$\sqrt{D \left(\frac{P_2}{P_p} \right) \left(\frac{T_p}{T_2} \right)} = a_2 Q_p + b_2 \quad (\text{Eq. 3})$$

onde:

- Q_p = vazão volumétrica em condições-padrão indicada pelo CPV, m³-padrão/min.
- D = deflexão da pena no registrador do HI-VOL, de 0 a 10, escala linear e adimensional
- P_2 = pressão barométrica durante a calibração do AGV PTS, mm Hg
- T_2 = temperatura ambiente durante a calibração do AGV PTS, K (K = °C + 273)
- a_2 = inclinação da relação de calibração do AGV PTS
- b_2 = interseção da relação de calibração do AGV PTS

Os valores de a_2 e b_2 são calculados por regressão linear (técnica dos mínimos quadrados).

A reta de calibração do AGV PTS (Eq. 3) é usada posteriormente na Fase 3, na determinação da vazão Q_p durante a operação de amostragem com o AGV PTS. Neste caso, a Eq. 3 toma a forma

$$Q_p = \frac{1}{a_2} \left(\sqrt{D \left(\frac{P_3}{P_p} \right) \left(\frac{T_p}{T_3} \right)} - b_2 \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

onde P_3 e T_3 , a pressão barométrica e a temperatura ambiente médias no local e durante a amostragem do AGV PTS, substituem P_2 e T_2 na Eq. 3.

A Figura 2 mostra um exemplo de certificado da calibração do AGV PTS, contendo a reta de calibração do mesmo.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO
CALIBRADOR PADRÃO DE VAZÃO (CPV)
(VAZÃO EM CONDIÇÕES PADRÃO)**

CPV nº: 0164 MPV (Medidor Roots) nº: 8065037 Data da Calibração: 09/03/98
 Data em Serviço: _____ T_1 (K) 29 7 P_1 (mm Hg) 761
 Calibração realizada por José Silva

DADOS DA CALIBRAÇÃO:

	Placa ou Volts	t (min)	dH_c (cm H ₂ O)	dP (mm Hg)	V_m (m ³)
	40	3,633	9,525	5	4,00
	45	3,350	11,176	6	4,00
	50	3,083	13,208	7	4,00
	60	2,667	17,272	9	4,00
	70	2,367	22,352	12	4,00
	80	2,133	27,432	14	4,00

TABULAÇÃO DE DADOS:

V_p (m ³)	(Eixo - x) Q_p (m ³ /min)	(Eixo - y) $[dH_c(P_1/760)(298/T_1)]^{1/2}$	Regressão Linear
3,6068	0,9927	2,9414	$y = a_1x + b_1$
3,6016	1,0751	3,1861	
3,5963	1,1664	3,4637	
3,5857	1,3446	3,9609	$a_1 = 2,8478$
3,5699	1,5084	4,5058	$b_1 = -0,0757$
3,5593	1,6684	4,9917	$r_1 = 0,9999$

FÓRMULAS PARA CÁLCULO DE V_p e Q_p :

$$V_p = V_m \left(\frac{P_1 - dP}{760} \right) \left(\frac{298}{T_1} \right) \quad Q_p = \frac{V_p}{t}$$

PARA CÁLCULO DAS VAZÕES NAS CALIBRAÇÕES DO AGV PTS:

$$Q_p = \frac{1}{a_1} \left(\sqrt{dH_c \left(\frac{P_2}{760} \right) \left(\frac{298}{T_2} \right)} - b_1 \right)$$

Figura 1 Formulário de Calibração do CPV, Próprio para o AGV PTS, com exemplo

FORMULÁRIO DE CALIBRAÇÃO DO AGV PTS (1)						
(PARA USO POSTERIOR COM VALORES MÉDIOS DA TEMPERATURA (T ₃) E DA PRESSÃO (P ₃) DURANTE A AMOSTRAGEM)						
DADOS GERAIS DA CALIBRAÇÃO						
AGV PTS N°	Teste	Registrador N°		RP4-0512		
Local:	Rio	Data:	23/08/05	Hora:	10:00	
P ₂ =	762	mm Hg	T ₂ =	23,5	°C	296,5 K
P _p = 760 mm Hg		T _p = 298 K (25 °C)				
Realizada por:		Wal		Supervisionada por: Wal		
DADOS DO CPV (CALIBRADOR PADRÃO DE VAZÃO) (VER CERT. CALIBR.)						
Número do CPV:		0151		Última Calibração:		06/10/04
Relação (Reta) de Calibração:						
Inclin. a ₁ :		2,9230		Interc. b ₁ :		0,0160
				Corr. r ₁ :		0,9999
Para cálculo de Q _p na Coluna (4) abaixo, usar a expressão:						
$Q_p = \frac{1}{a_1} \left[\sqrt{dH_c \left(\frac{P_2}{P_p} \right) \left(\frac{T_p}{T_2} \right)} - b_1 \right]$						
MEDIDAS DA CALIBRAÇÃO						
	1	2	3	4	5	6
	Placa	dH _c	*	Q _p	D	**
		cm H ₂ O		m ³ /min	Deflexão	
	18	28,2	5,3308	1,818	9,80	3,1425
	13	24,7	4,9890	1,701	8,10	2,8570
	10	18,7	4,3410	1,480	6,20	2,4996
	7	17,0	4,1390	1,411	5,90	2,4383
	5	14,8	3,8619	1,316	5,00	2,2447
$(*) = \sqrt{dH_c \left(\frac{P_2}{P_p} \right) \left(\frac{T_p}{T_2} \right)}$			$(**) = \sqrt{D \left(\frac{P_2}{P_p} \right) \left(\frac{T_p}{T_2} \right)}$			
RELAÇÃO DE CALIBRAÇÃO DO AGV PTS/REGRESSÃO LINEAR - MÍNIMOS QUADRADOS						
$Y = a_2 X + b_2$			$\sqrt{D \left(\frac{P_2}{P_p} \right) \left(\frac{T_p}{T_2} \right)} = a_2 Q_p + b_2$			
Inclinação da reta (a ₂) =			1,7134		Intercepto da reta (b ₂) =	
Coeficiente de correlação (r ₂) =			0,9948			
PARA USO POSTERIOR NAS AMOSTRAGENS						
$X = \frac{1}{a_2} (Y - b_2)$			$Q_p = \frac{1}{a_2} \left[\sqrt{D \left(\frac{P_3}{P_p} \right) \left(\frac{T_p}{T_3} \right)} - b_2 \right]$			
Responsável:			Data:			

Figura 2 Formulário de Calibração do AGV PTS (1)

Dá para ver, pela Eq. 4, que, a rigor, o usuário terá grande dificuldade em determinar os valores médios T_3 e P_3 no local de amostragem. T_3 , por exemplo, é a temperatura média durante as 24 horas de amostragem.

Felizmente, a norma atualizada permite uma simplificação sensível: a de que o usuário lance mão dos valores médios sazonais ou anuais de T_3 e P_3 no local de amostragem, valores médios estes representados por T_s e P_s . Só há uma ressalva: a de que a temperatura T_3 ao longo da estação ou do ano, fique dentro de ± 15 °C com relação a T_s e a de que P_3 fique dentro de ± 40 mm Hg com relação a P_s .

Estas condicionantes são satisfeitas para o ano todo na maior parte do Brasil.

Conhecendo T_s e P_s e satisfazendo as condicionantes acima, o usuário então obterá para a calibração do AGV PTS uma reta de forma

$$\sqrt{D \left(\frac{P_2}{P_s} \right) \left(\frac{T_s}{T_2} \right)} = a_2 Q_p + b_2 \quad \text{Eq. 5}$$

onde

P_s = pressão barométrica no local da calibração
 T_s = temperatura sazonal (ou anual) média no local da calibração (K)
 D, P_2, T_2, Q_p, a_2 e b_2 = mesma definição que na Eq. 3.

Com P_s e T_s a Eq. 5 tomará a seguinte forma na Fase 3:

$$Q_p = \frac{1}{a_2} (\sqrt{D} - b_2) \quad \text{Eq. 6}$$

Comparando-se a Eq. 6 com a Eq. 4, vê-se a grande simplificação advinda do uso de P_s e T_s .

A Figura 3 contém um exemplo de certificação de calibração do AGV PTS usando-se a pressão e temperaturas médias P_s e T_s .

FASE 3 – OPERAÇÃO DE AMOSTRAGEM COM O AGV PTS

Na operação de amostragem com o AGV PTS, geralmente de 24 horas, obtém-se o traçado de uma curva numa carta gráfica circular com escala linear e adimensional de 0 a 10.

Cada ponto dessa curva, que chamamos de D (deflexão da pena), corresponde a uma certa vazão Q_p (em m³/min).

A correlação entre Q_p e o ponto D na curva é dada pela reta de calibração do AGV PTS (Eqs. 3 ou 5).

Para facilitar o cálculo de Q_p em função de D , as Eqs. 3 e 5 são rearranjadas nas formas das Eqs. 4 e 6, respectivamente, ou sejam:

$$Q_p = \frac{1}{a_2} \left(\sqrt{D \left(\frac{P_3}{P_p} \right) \left(\frac{T_p}{T_3} \right)} - b_2 \right) \quad \text{(Eq. 4)}$$

$$Q_p = \frac{1}{a_2} (\sqrt{D} - b_2) \quad \text{(Eq. 6)}$$

FORMULÁRIO DE CALIBRAÇÃO DO AGV PTS (2)						
(PARA USO POSTERIOR COM VALORES MÉDIOS SAZONAIS DA TEMPERATURA (T _s) E DA PRESSÃO (P _s) DURANTE A AMOSTRAGEM)						
DADOS GERAIS DA CALIBRAÇÃO						
AGV PTS N°	HVP-0155		Registrador N°	RP4-0132		
Local:	Rio	Data:	17/04/98	Hora:	10:00	
P ₂ =	758,0	mm Hg	T ₂ =	24,0	°C	297,0 K
P _s =	759,0	mm Hg	T _s =	26,0	°C	299,0 K
P _p =	760 mm Hg		T _p =	298 K (25 °C)		
Realizada por:	Angela		Supervisionada por:			
DADOS DO CPV (CALIBRADOR PADRÃO DE VAZÃO) (VER CERT. CALIBR.)						
Número do CPV:	0164		Última Calibração:	09/03/98		
Relação (Reta) de Calibração:						
	Inclin. a ₁ :	2,8478	Interc. b ₁ :	-0,0757	Corr. r ₁ :	0,9999
Para cálculo de Q _p na Coluna (4) abaixo, usar a expressão:						
$Q_p = \frac{1}{a_1} \left[\sqrt{dH_c \left(\frac{P_2}{P_p} \right) \left(\frac{T_p}{T_2} \right)} - b_1 \right]$						
MEDIDAS DA CALIBRAÇÃO						
	1	2	3	4	5	6
	Placa	dH _c	*	Q _p	D	**
		cm H ₂ O		m ³ /min	Deflexão	
	18	26,3	5,1302	1,828	7,80	2,8004
	13	22,6	4,7557	1,697	6,70	2,5954
	10	18,3	4,2794	1,529	5,70	2,3939
	7	11,1	3,3329	1,197	3,30	1,8215
	5	7,6	2,7578	0,995	2,30	1,5207
$(*) = \sqrt{dH_c \left(\frac{P_2}{P_p} \right) \left(\frac{T_p}{T_2} \right)}$			$(**) = \sqrt{D \left(\frac{P_2}{P_s} \right) \left(\frac{T_s}{T_2} \right)}$			
RELAÇÃO DE CALIBRAÇÃO DO AGV PTS/REGRESSÃO LINEAR - MÍNIMOS QUADRADOS						
$Y = a_2 X + b_2$			$\sqrt{D \left(\frac{P_2}{P_s} \right) \left(\frac{T_s}{T_2} \right)} = a_2 Q_p + b_2$			
Inclinação da reta (a ₂) =			1,5483	Intercepto da reta (b ₂) =		-0,0174
Coeficiente de correlação (r ₂) =			0,9989			
PARA USO POSTERIOR NAS AMOSTRAGENS						
$X = \frac{1}{a_2} (Y - b_2)$			$Q_p = \frac{1}{a_2} (\sqrt{D} - b_2)$			
Responsável:			Data:			

Figura 3 Formulário de Calibração do AGV PTS (2)

Vale ressaltar que a vazão Q_p calculada acima já é corrigida para as condições-padrão de pressão e temperatura.

A partir da vazão Q_p , determinada em função de D obtido na curva traçada na carta gráfica e o tempo, t , decorrido de amostragem, calcula-se o volume total, V_p , de ar amostrado com o AGV PTS.

Na prática, determina-se o V_p da seguinte maneira:

- Divide-se o tempo decorrido da amostragem em 12 ou mesmo 24 segmentos, de 120 min ou 60 min, respectivamente;
- Olhando-se o traçado da pena na carta gráfica, toma-se, para cada segmento, o respectivo valor médio da deflexão (D);
- Entra-se com o D médio para cada segmento e calcula-se a vazão (Q_p) média para aquele segmento;
- Multiplica-se o Q_p médio de cada segmento pelo tempo do segmento (60 min ou 120 min), determinando-se o volume de ar que passou no filtro durante aquele período de tempo;
- Após calculados todos os elementos de volume (12 ou 24), efetua-se a somatória dos elementos de volume, obtendo-se o volume total V_p .

De posse do volume V_p e da massa de material particulado retido no filtro, calcula-se então a concentração de material particulado no ar ambiente em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

O valor da concentração obtido já está corrigido para as condições padrão de pressão (760 mm Hg) e temperatura (25 °C).

Ver as Figura 4 e Figura 5, com exemplos de planilhas de amostragem, nas quais o tempo decorrido de amostragem foi dividido em 12 segmentos de 120 minutos cada. As planilhas são detalhadas e completas, mostrando, além do volume total da amostragem, os valores das pesagens do filtro e o cálculo final da concentração de PTS.

Note-se que a planilha da Figura 4 corresponde ao procedimento de amostragem em que o usuário tem meios de determinar os valores médios da temperatura (T_3) e pressão (P_3) durante o período de amostragem. Neste caso, é obrigatório que a calibração do AGV PTS seja executada conforme apresentado na Figura 2.

A planilha da Figura 5, por outro lado, corresponde ao procedimento de amostragem em que o usuário tem dificuldades de determinar os valores médios da temperatura e pressão durante o período de amostragem e passa a utilizar os valores médios sazonais, ou mesmo anuais, da temperatura (T_s) e pressão (P_s), obviamente caso estes sejam conhecidos. Neste caso, é obrigatório que a calibração do AGV PTS seja executada conforme apresentado na Figura 3.

Planilha de Amostragem - AGV PTS (1)

Dados da Amostragem					
N° da Amostragem:	05/04		Período:	31/10/98	a 01/11/98
N° do Amostrador:	HVP-0155		Hora:	1/2 noite	a 1/2 noite
Local:	Estação B3-Itaperuna		Duração:	24 horas (nominal)	
N° Filtro:	05/0010		Tipo:	Fibra de vidro	
Dados da Calibração do AGV PTS					
Calibrado c/ CPV N°:	0164	Última calibração do AGV PTS:	17/04/98		
Inclinação (a ₂):	1,5447	Intecepto (b ₂):	-0,0173	Correlação (r ₂):	0,9989
ANOTAÇÕES DE CAMPO					
Temperatura ambiente média (T ₃):	25 °C	298 K	T _p = 298 K		
Pressão barométrica média (P ₃):	761 mm Hg	P _p = 760 mmHg			
Leitura inicial horâmetro:	234,85 horas	Leitura final horâmetro:	259,97 horas		
Diferença de leituras do horâmetro:	25,12 horas	Diferença em minutos:	1.507,2 minutos		
Dados do Volume					
Número Intervalo	Deflexão	Vazão (m ³ /min)	Intervalo (min)	Volume (m ³)	
1	5,6	1,5442	120	185,30	
2	5,6	1,5442	120	185,30	
3	4,6	1,4006	120	168,07	
4	4,1	1,3229	120	158,75	
5	4,1	1,3229	120	158,75	
6	4,3	1,3545	120	162,54	
7	3,9	1,2905	120	154,86	
8	3,8	1,2740	120	152,88	
9	3,8	1,2740	120	152,88	
10	3,7	1,2573	120	150,87	
11	3,3	1,1880	120	142,56	
12	3,1	1,1518	187,2	215,61	
Volume total de ar em condições padrão =				1.988,37	m ³
$Q_p = \frac{1}{a_2} \left[\sqrt{D \left(\frac{P_3}{760} \right) \left(\frac{298}{T_3} \right) - b_2} \right]$					
Dados da Pesagem					
Peso inicial (M _i):	3,1426	g			
Peso final (M _f):	3,3017	g			
Peso líquido (M _l):	0,1591	g			
Dados da Concentração de Partículas Totas em Suspensão (PTS)					
Concentração (PTS):		80,02	µg/m ³		
$PTS = \left(\frac{M_l}{V_p} \right) 10^6$					
OBSERVAÇÕES (anormalidades durante a amostragem)					
Responsável: _____			Data: _____		

Figura 4 Planilha de Amostragem do AGV PTS
(para valores médios de temperatura e pressão durante a amostragem)

Planilha de Amostragem - AGV PTS (2)					
Dados da Amostragem					
N° da Amostragem:	05/04		Período:	31/10/98	a 01/11/98
N° do Amostrador:	HVP-0155		Hora:	1/2 noite	a 1/2 noite
Local:	Estação B3-Itaperuna		Duração:	24 horas (nominal)	
N° Filtro:	05/0010		Tipo:	Fibra de vidro	
Dados da Calibração do AGV PTS					
Calibrado c/ CPV N°:	0164	Última calibração do AGV PTS:	17/04/98		
Inclinação (a ₂):	1,5483	Intecepto (b ₂):	-0,0174	Correlação (r ₂):	0,9989
ANOTAÇÕES DE CAMPO					
Temperatura ambiente média (T _s):	26 °C	299 K	T _p =	298 K	
Pressão barométrica média (P _s):	759 mm Hg		P _p =	760 mmHg	
Leitura inicial horômetro:	234,85 horas	Leitura final horômetro:	259,47 horas		
Diferença de leituras do horômetro:	24,62 horas	Diferença em minutos:	1.477,2 minutos		
Dados do Volume					
Número Intervalo	Deflexão	Vazão (m ³ /min)	Intervalo (min)	Volume (m ³)	
1	5,6	1,5396	120	184,76	
2	5,6	1,5396	120	184,76	
3	4,6	1,3965	120	167,58	
4	4,1	1,3190	120	158,28	
5	4,1	1,3190	120	158,28	
6	4,3	1,3505	120	162,07	
7	3,9	1,2867	120	154,41	
8	3,8	1,2703	120	152,43	
9	3,8	1,2703	120	152,43	
10	3,7	1,2536	120	150,43	
11	3,3	1,1845	120	142,14	
12	3,1	1,1484	157,2	180,53	
Volume total de ar em condições padrão =				1.948,10 m ³	
$Q_p = \frac{1}{a_2} (\sqrt{D} - b_2)$					
Dados da Pesagem					
Peso inicial (M _i):		3,1426	g		
Peso final (M _f):		3,3017	g		
Peso líquido (M _l):		0,1591	g		
Dados da Concentração de Partículas Totas em Suspensão (PTS)					
Concentração (PTS):		81,67	µg/m ³		
$PTS = \left(\frac{M_l}{V_p} \right) 10^6$					
OBSERVAÇÕES (anormalidades durante a amostragem)					
Responsável:			Data:		

Figura 5 Planilha de Amostragem do AGV PTS (para médias sazonais de temperatura e pressão)