

CETESB

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL

DIRETORIA DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE EMISSÕES DE VEÍCULOS
DIVISÃO DE PROGRAMAS DE REDUÇÃO DE POLUIÇÃO VEICULAR
SETOR DE FONTES MÓVEIS E RUÍDO

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA Prof. Dr. Lucas Nogueira Garcia
Av. Prof. Frederico Hermann Junior, 345 - Pinheiros
05489-900 - SÃO PAULO - BRASIL

DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES DE MONÓXIDO
DE CARBONO POR VEÍCULOS LEVES
EM MARCHA LENTA

DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES DE MONÓXIDO DE CARBONO POR VEÍCULOS
LEVES EM MARCHA LENTA

Eduardo Mascarenhas Murgel
Alfred Szwarc
Daniel Egon Schmidt
Olimpio de Melo Alvares Jr.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

RESUMO

Este trabalho apresenta uma equação empírica para a determinação da taxa de emissão de monóxido de carbono (CO), expressa em grama/minuto, para veículos leves operando em regime de marcha lenta.

A taxa de emissão é calculada em função da concentração de CO no gás de escapamento (medida como porcentagem em volume), da velocidade angular do motor e da sua cilindrada.

Além disso, com base nos dados de emissão de CO (%) em marcha lenta, obtidos com 5.250 veículos durante a Campanha de Melhoria da Qualidade do Ar em 1988, foi calculada a taxa de emissão de CO, característica da frota circulante na Região Metropolitana de São Paulo. Esta taxa média, que é função das características da frota circulante e dos combustíveis utilizados, pode ser utilizada como parâmetro de dimensionamento de sistemas de ventilação em ambientes fechados onde trafegam veículos, em estudos de impacto ambiental, bem como no gerenciamento de fluxo de tráfego, especialmente nos grandes centros urbanos.

1. INTRODUÇÃO

É fato conhecido que, dentre os poluentes emitidos pelos veículos com motor do ciclo Otto, o monóxido de carbono (CO) tem um destaque especial. Isto se deve à conhecida ação tóxica do CO, que interfere na oxigenação dos tecidos e que, em doses elevadas, leva à morte. Além disso, os veículos com motor do ciclo Otto são a principal fonte de emissão de CO em ambientes tipicamente urbanos.

Para se avaliar o nível de emissão de poluentes pelo escapamento de veículos leves, o método usual é o determinado na norma brasileira NBR-6601. Esta norma descreve um ciclo de condução em dinamômetro de chassi, que simula uma viagem urbana típica, contendo acelerações e desacelerações, trechos de alta, média e baixa velocidade, e períodos com o motor operando em marcha lenta. Ao se executar esta viagem simulada, os gases de escapamento são coletados e posteriormente analisados, sendo apresentado um resultado final que, além da emissão de CO apresenta a emissão de hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Os resultados são expressos em gramas de poluente por quilômetro percorrido (g/km). Esta forma de caracterização da emissão é bastante prática, pois permite conhecer a massa total de poluentes, lançada na atmosfera por apenas um veículo ou por uma frota. Além disso, é possível, através de modelos numéricos, correlacionar a massa de poluentes que é emitida com a qualidade do ar, ou seja, com as respectivas concentrações encontradas na atmosfera.

Entretanto, em determinadas situações, os dados obtidos segundo a NBR-6601, não permitem uma avaliação específica da emissão do veículo. O caso mais comum ocorre quando o motor opera, por longos períodos, em regime de marcha lenta. Como neste regime o motor é alimentado com excesso de combustível, em relação à mistura ar-combustível estequiométrica, ocorre uma emissão alta de CO.

A operação dos veículos em marcha lenta é especialmente crítica em ambientes confinados como garagens, estacionamentos e túneis, onde podem haver más condições de dispersão para os poluentes emitidos. Embora menos crítica, a emissão de CO em marcha lenta, durante os congestionamentos de tráfego, é preocupante, pois contribui para uma sensível deterioração da qualidade do ar.

O método mais prático e usual de análise de CO, em regime de marcha lenta, consiste no uso de instrumentos que expressam o resultado como porcentagem em volume de CO (%). Entretanto, essa forma de expressão não permite uma correlação direta da emissão do poluente emitido com o seu nível de concentração no ambiente.

Portanto, com o intuito de suprir esta deficiência, este trabalho apresenta uma equação empírica que permite converter a emissão expressa como porcentagem em volume, em grama/minuto (g/min.).

2. HIPÓTESE DE TRABALHO

A emissão de CO, em regime constante de operação do motor, é proporcional ao volume de gases emitido e à concentração de CO nesses gases.

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

Para se calcular o volume de gases emitido, pode-se partir da equação que estabelece volume de mistura ar-combustível aspirado por um motor de quatro tempos, e que é dado pela seguinte expressão:

$$V_a = \frac{C_1 \times n}{2}$$

onde: V_a = volume aspirado (l/min.)
 C_1 = cilindrada do motor (l)
 n = velocidade angular do motor (rpm)

Todavia, o volume de gás de escapamento é maior que o volume aspirado, pois o combustível admitido na fase líquido/vapor gera, durante o processo de combustão, outros gases. Além disso, a maior temperatura dos gases de escapamento contribui para o aumento do volume final. Dessa forma, pode-se considerar que o volume do gás de escapamento (V_E) é dado pela equação:

$$V_E = V_a \times K_1 \quad \text{ou} \quad V_E = \frac{K_1 \times C_1 \times n}{2}$$

onde, $\frac{K_1}{2}$ fator de expansão do gás de escapamento.

Multiplicando-se o volume do gás de escapamento (V_E) pela concentração de CO medida como porcentagem em volume (C_{CO}), obtém-se o volume de CO emitido (V_{CO}) em l/min.:

$$V_{CO} = \frac{V_E \times C_{CO}}{100}$$

Considerando que a densidade do CO a 20°C e 101,3 kPa é de 1,164 g/l, a emissão de CO (E_{CO}), expressa em g/min. é dada por:

$$E_{CO} = \frac{1,164 \times C_{CO} \times V_E}{100} \times K_2$$

K_2 é o fator de correção da densidade do CO para as condições de escapamento. Logo,

$$E_{CO} \text{ (g/min)} = K \times \frac{C_{CO} \text{ (\%)} \times C_1 \text{ (l)} \times n \text{ (rpm)}}{100}$$

onde, $K = \frac{K_1 \times K_2 \times 1,164}{2}$

Portanto, resta determinar, empiricamente, o fator teoricamente constante K, de forma a se poder calcular a taxa de emissão de CO em g/min.

3. METODOLOGIA

Para a realização da determinação do fator K, foram utilizados os equipamentos do Laboratório de Emissão Veicular, da CETESB, descritos abaixo:

- analisador de gases de escapamento, marca SUN, modelo EPA-75, para medir a concentração de CO em marcha lenta (expressa em %) e de HC (expressa em ppm);
- tacômetro, marca SUN;
- dinamômetro de chassi, marca Clayton, modelo ECE-50;
- amostrador de gases em volume constante (CVS), com venturi crítico (VC), modelo 20B, da Horiba;
- bancada de analisadores de gases, marca Horiba, composta por dois detetores tipo infra-vermelho não dispersivo para CO e CO₂, um detetor por ionização de chama para HC e um detetor por luminiscência química para NO_x.

Os veículos utilizados foram cedidos por funcionários da CETESB, sendo que apesar de apresentarem ano de fabricação e quilometragem acumulada bastante variada, encontravam-se todos dentro das especificações originais estabelecidas pelos fabricantes.

Inicialmente, aplicou-se a seguinte sequência de ensaio:

- a) diagnóstico completo e regulagem do veículo;
- b) percurso da primeira fase do ciclo de condução estabelecido na norma NBR-6601, porém sem amostragem dos gases de emissão;
- c) medição de CO (%) e rpm de marcha lenta;
- d) manutenção, por cinco minutos, do motor funcionando em marcha lenta, com amostragem de gases no CVS. Análise de CO, HC e NO_x;
- e) medição de CO e rpm, em marcha lenta, e cálculo da média entre este valor e o medido no item "c";
- f) repetição por duas vezes dos procedimentos descritos nos itens "c" a "e".

De acordo com a sequência acima, foram ensaiados dez veículos e observou-se que não era necessário realizar três medidas em cada veículo na mesma condição, pois a variabilidade dos dados obtidos com um mesmo veículo foi desprezível. Como os veículos ensaiados estavam regulados de acordo com a especificação do fabricante, com o CO variando entre 1% e 5%, não se obteve uma distribuição equitativa ao longo dessa faixa.

Em vista disso, foram selecionados mais sete veículos, que foram ensaiados conforme o mesmo procedimento básico, porém, ao invés de se regular a porcentagem de CO em marcha lenta antes da primeira medição, conforme a especificação do fabricante, cada veículo foi regulado de forma a se obter uma mistura pobre, que foi sendo gradualmente enriquecida após cada teste, num total de quatro a seis medições para cada veículo. Dessa forma, cobriu-se uma faixa de 0,2 a 8,0% de CO em regime de marcha lenta. Deve-se notar que no caso de se variar a mistura ar-combustível, é indiferente se o veículo é a álcool ou a gasolina, pois a emissão passa a independender do tipo de combustível.

Todos os dados obtidos foram colocados em um gráfico, cuja absissa é a emissão de CO, expressa em g/min., medida diretamente no CVS (item "d") e a ordenada é o produto da cilindrada (l), da rotação (rpm) e da concentração média de CO (%) medida (item "e"). Calculando-se a regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, determinou-se o fator de conversão "K" que é o coeficiente da reta calculada.

4. DADOS_OBTIDOS

As tabelas 1 e 2 (Anexo 1) apresentam os dados obtidos nas duas etapas da pesquisa, mostrando os dados obtidos diretamente e o produto cilindrada x rotação x %CO.

100

5. ANÁLISE_DOS_DADOS

Os dados obtidos para a emissão de CO em g/min. e o produto CO x rotação x cilindrada, foram plotados na figura 1 (Anexo 2).

Fazendo-se uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, determina-se a reta média, que intercepta o eixo Y no ponto 7,2 e tem uma inclinação $m = 6,31$. O coeficiente de correlação, para os pontos medidos é de 0,93, conferindo bastante confiabilidade à fórmula obtida. Assim temos:

$$Y = mx + b \quad \text{ou} \quad Y = 6,31x + 7,2$$

$$\text{Portanto: } \frac{(C_i \times n \times C_{CO})}{100} = 6,31 \times E_{CO} + 7,2$$

$$\text{Logo: } E_{CO} = 0,158 \times \frac{(C_i \times n \times C_{CO} - 7,2)}{100}$$

onde: C_i = cilindrada do motor, em l
 n = rotação do motor, em rpm
 C_{CO} = concentração de CO medida, em %
 E_{CO} = emissão de CO calculada, em g/min.

Esta fórmula é válida, com um coeficiente de confiança de 95%, para uma emissão de CO entre 0,5 e 19,0 g/min, que implica no produto

$$\frac{C_i \times n \times C_{CO}}{100}$$

variar entre 10 e 130 l/min. Fora deste intervalo, a experiência não pode assegurar que os resultados tenham validade prática.

Na Campanha para Melhoria da Qualidade do Ar, realizada em 1988, determinou-se uma emissão de CO em marcha lenta de 5,4%, com um desvio padrão de 2,7% em uma amostra de 2.362 veículos movidos a gasolina. Na média de 2.888 veículos a álcool, a emissão de CO ficou em 4,1% com desvio padrão de 2,4%. Portanto, considerando-se uma composição atual da frota circulante como sendo de 60% de veículos a gasolina e 40% movidos a álcool, obtemos uma concentração média de 4,9% de CO no escapamento de um veículo típico, representativo da frota.

Após uma análise do perfil da frota nacional, quanto ao volume dos motores, que variam entre um litro e 4,1 litros e considerando a distribuição dos diversos modelos, pode-se considerar 1,7 l como o valor típico da cilindrada do veículo nacional atual, embora não exista nenhum motor sendo comercializado com esta cilindrada. Da mesma forma, se estabeleceu o valor da rotação de marcha lenta típico, obtendo-se 850 rpm.

Colocando-se os valores de 4,9% de CO, 1,7 l de cilindrada e 850 rpm na expressão obtida, obtemos:

$$E_{CO} = 0,158 \left(1,7 \times 850 \times \frac{4,9}{100} - 7,2 \right)$$

ou seja,

$$E_{CO} = 10,05 \text{ g/min.}$$

Portanto, pode-se considerar que, até março de 1989, a frota em circulação pode ser caracterizada por uma taxa de emissão em marcha lenta de 10 gramas de monóxido de carbono por minuto, por veículo. Deste modo fica bem simples a estimativa da massa total de CO que é lançada na atmosfera em locais como cruzamentos congestionados, postos de pedágio, estacionamentos, túneis etc., bastando se multiplicar a taxa de emissão pelo número de veículos e pelo tempo de operação do motor em marcha lenta.

Cumprindo observar que o valor de 5,4% de CO emitido pelos veículos a gasolina, foi obtido com gasolina contendo 22% de álcool anidro. Com a redução do teor de álcool, esse valor tende a aumentar sensivelmente, sendo que a média obtida para a frota global (veículos a álcool e a gasolina) também é alterada.

Ensaio realizado pela CETESB com onze veículos, representativos de diversos modelos em circulação, indicam um aumento médio na emissão de CO em marcha lenta de 32,4% com desvio padrão de 14,1%, quando o teor de álcool na gasolina é reduzido de 22% para 16%.

Quanto à emissão de hidrocarbonetos, não foi possível determinar qualquer correlação, sendo que a emissão desse poluente variou entre 0,13 e 2,98 g/min, estando em geral abaixo de 1 g/min, enquanto que a emissão de óxidos de nitrogênio foi desprezível em todas as medições.

Deve-se ressaltar que, com a alteração do perfil da frota circulante, em função do uso de combustíveis e características dos motores, a estimativa apresentada anteriormente, deve ser periodicamente revista.

Considerando-se a recente mudança na especificação do teor de álcool anidro na gasolina, que passou de 22% +/- 1% para 18% +/- 2% (Portaria nº 19, de 13/03/89, do Conselho Nacional do Petróleo), pode-se admitir a atual taxa de emissão de CO como sendo 12,4 g/min. para o caso mais crítico, ou seja, teor de álcool igual a 16%.

A N E X O S

Tabela 1 - Medições realizadas na primeira etapa

VEIC	COMB (A/G)	CIL (l)	CO (%)	RPM	C _{CO-n.C.}	CO	HC	NO _x
					100			
1	A	1,6	1,9	740	22,50	2,46	0,16	ND
			1,8	740	21,31	2,27	0,15	ND
			1,7	730	19,86	2,09	0,16	ND
2	G	1,6	2,7	870	37,58	3,80	0,31	0,01
			2,0	845	27,04	3,27	0,32	0,01
			2,0	845	27,04	3,19	0,32	0,01
3	A	1,5	1,7	795	20,27	1,64	0,20	0,01
			1,7	785	20,02	1,64	0,17	ND
			1,7	780	19,89	1,82	0,15	ND
4	G	1,8	5,1	830	76,19	9,35	0,34	0,01
			5,0	840	75,60	9,02	0,31	0,01
			5,0	845	76,05	8,95	0,31	0,01
5	A	1,3	2,1	800	21,84	2,78	0,15	0,01
			1,9	790	19,51	2,30	0,13	ND
			1,8	780	18,25	2,26	0,13	ND
6	A	1,6	2,8	880	39,42	5,93	1,07	ND
			2,5	840	33,60	4,90	1,46	ND
			2,3	820	30,18	4,29	1,70	ND
7	G	2,5	3,4	645	54,83	7,52	0,28	0,01
			3,0	635	47,63	5,89	0,23	0,01
			2,9	635	46,04	5,67	0,22	0,01
8	G	1,4	3,0	865	36,33	4,21	0,31	0,01
			3,0	835	35,07	5,20	0,26	0,01
			3,0	825	34,65	5,15	0,26	0,01
9	A	1,6	1,0	880	14,08	1,14	0,23	0,01
			0,8	880	11,26	0,81	0,22	ND
			0,7	880	9,86	0,77	0,20	0,01
10	A	1,8	1,3	780	22,46	1,60	0,21	0,01
			1,4	790	23,04	1,62	0,20	ND
			1,4	790	25,45	1,79	0,19	0,01

ND = não detectado

Tabela 2 - Medições realizadas na segunda etapa

VEIC	COMB (A/B)	CIL (l)	CO (%)	RPM	C _{CO} +n.C ₁	CO	HC	NO _x
					100			
11	B	4,1	0,3	500	6,15	0,54	0,48	0,02
			1,8	550	40,59	4,29	0,85	0,02
			3,5	480	68,88	7,61	1,02	0,01
			5,0	480	98,40	11,34	1,30	0,01
			6,5	460	122,59	16,14	2,44	0,01
			8,0	460	150,88	17,96	2,98	0,01
12	B	1,5	0,3	900	4,05	0,89	0,19	0,01
			1,6	920	22,08	3,89	0,24	0,01
			3,0	1000	45,00	6,35	0,27	0,01
			4,0	1000	60,00	7,60	0,28	0,01
13	A	1,6	0,3	880	4,22	0,52	0,22	ND
			1,8	900	25,92	2,36	0,19	ND
			3,6	900	51,84	4,59	0,23	ND
			5,0	880	70,40	6,74	0,34	ND
14	A	1,6	0,3	640	3,07	0,48	0,37	ND
			1,6	680	17,41	2,48	0,32	ND
			3,0	680	32,64	4,04	0,36	ND
			4,0	650	41,60	5,62	0,85	ND
15	A	1,5	0,3	830	3,74	0,50	0,16	ND
			1,4	860	18,06	1,84	0,15	ND
			2,5	880	33,00	3,64	0,18	ND
			3,4	880	44,88	5,46	0,23	ND
			4,3	870	56,12	6,69	0,27	ND
			5,0	820	61,50	8,42	0,36	ND
16	A	1,8	0,2	720	2,59	0,67	0,44	ND
			1,4	680	17,14	1,92	0,22	ND
			3,2	740	42,62	4,35	0,26	ND
			4,5	720	58,32	6,61	0,38	ND
			5,8	720	75,17	10,89	1,20	ND
17	A	1,6	0,3	800	3,84	1,06	0,13	ND
			1,6	820	20,99	3,64	0,17	ND
			3,0	780	37,44	7,76	0,28	ND
			4,8	800	61,44	13,04	0,80	ND
			6,5	780	81,12	15,69	1,26	ND
			7,0	790	88,48	19,15	2,42	ND

ND = não detectado

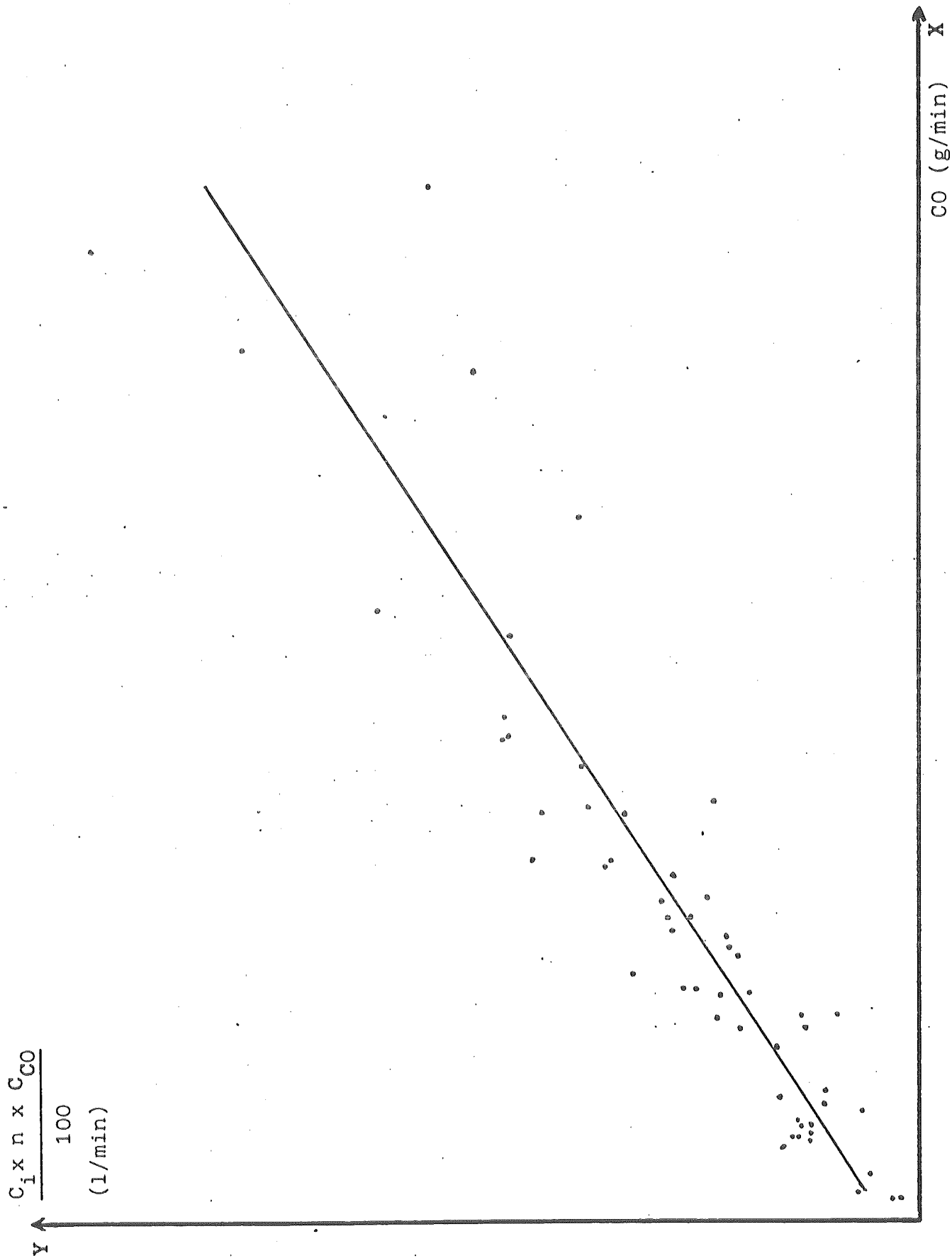


Figura 1

Data Akuis:	7/5/93
Indis:	Memo 14/93 DER 26/4/93
Livrada:	
Preço:	0\$
Data Tomba:	7/5/93