

# METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS PARA ELABORAÇÃO DE INVENTÁRIO DE EMISSÃO DE AUTOMÓVEIS

Elisete Gomides Dutra<sup>1</sup>, Edwan Fernandes Fioravante<sup>1</sup>, Ramon Molina Vale<sup>2</sup>,  
Roberto Márcio de Andrade<sup>2</sup>  
Fundação Estadual do Meio Ambiente<sup>1</sup>, Universidade Federal de Minas Gerais<sup>2</sup>

[elisete.gomides@meioambiente.mg.gov](mailto:elisete.gomides@meioambiente.mg.gov), [edwan.fernandes@meioambiente.mg.gov.br](mailto:edwan.fernandes@meioambiente.mg.gov.br),  
[ramon@demec.ufmg.br](mailto:ramon@demec.ufmg.br), [rma@ufmg.br](mailto:rma@ufmg.br)

## RESUMO

Os gases poluentes que são emitidos pelo escapamento dos automóveis (veículos leves do ciclo Otto) são produtos das reações químicas associadas ao processo de combustão que ocorrem nos motores. Dentre os principais poluentes têm-se o monóxido de carbono (*CO*) e os hidrocarbonetos (*HC*) que são produtos de combustão incompleta. Para quantificar as emissões dos automóveis de uma região mediante elaboração de Inventários de Emissão Veicular – IEV é necessário conhecer os fatores médios de emissão dos veículos novos, os fatores médios de deterioração das emissões com o tempo de uso dos veículos, as quilometragens médias anuais percorridas e os dados de caracterização da frota. Os fatores médios de emissão dos veículos novos são definidos e disponibilizados anualmente pelo IBAMA e os dados da frota devem ser fornecidos pelos órgãos responsáveis pelo licenciamento anual dos veículos. Dessa forma, os fatores de deterioração para *CO* e para *HC* e as quilometragens médias anuais percorridas foram determinados para os automóveis de Belo Horizonte. As concentrações desses gases no escapamento de 900 veículos foram medidas e agrupadas por ano de fabricação definindo, assim, os fatores de emissão de *CO* e de *HC*. As razões entre os fatores médios de emissão de *CO* e de *HC* dos veículos em uso (concentrações observadas) e os originalmente permitidos para veículos novos nacionais (concentrações estimadas) foram calculadas e analisadas pela técnica de suavização exponencial de Holt. Os fatores de deterioração obtidos se mostraram consistentes com o desenvolvimento das tecnologias automotivas para a última década. Para veículos com 1 ano de uso esses fatores são, em média, inferiores a 1,01 e 1,03 e os acréscimos nas emissões, após 10 anos de uso dos veículos, são de cerca de 26% e 45%, respectivamente. As quilometragens médias anuais percorridas para todos os veículos da amostra foram obtidas pelo questionário respondido pelos condutores e também pelos registros dos hodômetros. Apenas para os veículos fabricados antes de 1994, a diferença média entre essas duas informações foi significativa (teste t-Student,  $\alpha$  igual a 0,05). Os valores obtidos pelo questionário foram os escolhidos para representar as quilometragens médias anuais para os veículos fabricados antes de 1993 e os obtidos via hodômetro para os veículos fabricados a partir de 1994. As metodologias para determinação de fatores de deterioração das emissões, assim como das quilometragens médias anuais percorridas, mostraram-se eficientes e podem ser usadas em regiões com Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso implantados.

## INTRODUÇÃO

A emissão de poluentes pelos automóveis está relacionada com o ano de fabricação, com a quilometragem percorrida e com a condição de manutenção. Com relação ao ano de

fabricação tem-se que a partir de 1986 os automóveis, em atendimento às metas estabelecidas pelo Programa de Controle de Poluição Veicular - PROCONVE, saem de fábrica emitindo menos poluentes a cada ano. Além disso, as emissões tendem a aumentar com o tempo de uso dos veículos devido ao desgaste das peças dos motores e dos sistemas de controle de emissão sujeitos a altas pressões e temperaturas, muitas vezes agravada pela manutenção inadequada dos veículos. Com relação a quilometragem percorrida, tem-se que quanto maior a atividade do veículo maior o consumo de combustível e conseqüentemente maior a emissão.

Os principais gases poluentes emitidos pelo escapamento dos automóveis ou veículos leves são monóxido de carbono e os hidrocarbonetos. Para quantificar essas emissões para uma região mediante elaboração de Inventários de Emissão Veicular – IEV é necessário conhecer os fatores médios de emissão dos veículos novos ( $FE_{novo}$ ), os fatores médios de deterioração das emissões ( $FD$ ) com o tempo de uso dos veículos, as quilometragens médias anuais percorridas ( $Q$ ) e a caracterização da frota em estudo. Os dados de caracterização de frota são basicamente: número de veículos por ano de fabricação, por combustível, por tipo de uso (particular ou comercial).

Os fatores médios de emissão dos veículos leves novos nacionais são determinados através de ensaios padronizados realizados conforme a norma brasileira NBR N° 6601 [1]. Para os automóveis fabricados a partir de 1986, em atendimento ao PROCONVE, a indústria automobilística passou a certificar os  $FE_{novo}$  de todos os modelos produzidos. São então calculadas as médias ponderadas dos fatores de emissão para cada modelo determinando-se os  $FE_{novo}$  para cada ano de fabricação [2].

Os fatores de emissão de monóxido de carbono e de hidrocarbonetos tendem a aumentar ao longo dos anos em decorrência do uso do veículo, mesmo sob manutenção adequada. Dessa forma, para os veículos em uso, esses fatores são obtidos multiplicando-se os  $FE$  dos veículos novos pelo  $FD$ . Para quantificar as emissões de  $CO$  e de  $HC$  de veículos leves nacionais, geralmente são utilizados  $FD$  definidos pela USEPA [3] para os veículos dos Estados Unidos, considerando uma defasagem tecnológica de cerca de 10 anos. Entretanto, esses fatores não refletem a realidade do nosso país quanto à qualidade dos combustíveis, vias de tráfego, clima e manutenção dos veículos. Para melhorar a representatividade das estimativas das emissões é necessário definir fatores de deterioração locais ou regionais representativos dos veículos nacionais.

Apesar da quilometragem média anual percorrida ( $Q$ ) pelos veículos ser um parâmetro imprescindível para estimar suas emissões utilizando modelos de inventários simplificados, no Brasil existe uma carência muito grande de levantamentos locais ou regionais dessa informação. Em geral são utilizados os valores de quilometragem média anual percorrida em função da idade dos veículos definidos pela CETESB [4] para elaboração de inventários de emissão pela frota de São Paulo.

## 1. METODOLOGIA

A primeira etapa do estudo constou da medição das concentrações de  $CO$  e de  $HC$  no gás de escapamento de uma amostra representativa dos automóveis registrados em Belo Horizonte e do levantamento dos dados de quilometragem percorrida por esses veículos. Na segunda etapa, os dados experimentais foram analisados com a finalidade de determinar os fatores de deterioração das emissões desses gases com o tempo de uso dos veículos. Os dados de

quilometragem percorrida foram também analisados para determinação dos valores a serem adotados para os automóveis de Belo Horizonte.

## 1.1. Determinação dos fatores de emissão e levantamento de dados de quilometragem

### 1.1.1. Determinação dos fatores de emissão de *CO* e *HC*

Os fatores de emissão de *CO* e de *HC* da frota de automóveis de Belo Horizonte foram obtidos mediante medição da concentração desses gases no escapamento de uma amostra representativa da frota. O planejamento amostral baseou-se na técnica de amostragem estratificada, uma vez que essas emissões são heterogêneas em função do ano de fabricação dos veículos. Para cada estrato assim definido, para no período de 1994 a 2004, utilizou-se, de forma aproximada, o método de Amostragem Aleatória Simples (AAS) sem reposição para o cálculo do tamanho da amostra.

O tamanho da amostra foi calculado considerando, para cada estrato ( $h$ ), população normalmente distribuída, nível de confiança de 95% e erro de estimação  $B_h$  mediante utilização da Equação (1), proposta por Scheaffer [5]:

$$n_h = \frac{N_h s_{\bar{y}_h}^2}{(N_h - 1)(B_h / 1,96)^2 + s_{\bar{y}_h}^2} \quad (1)$$

onde  $N_h$  é o número de automóveis da frota de Belo Horizonte por estrato,  $n_h$  o número de automóveis da amostra por estrato,  $s_{\bar{y}_h}^2$  é a variância da média para cada estrato da amostra.

O tamanho total da amostra ( $n$ ) foi obtido a partir da soma do número de veículos calculados para cada estrato ( $n_h$ ). Os erros de estimação para cada estrato ( $B_h$ ) foram assumidos como sendo iguais a 25% dos limites máximos de emissão de *CO* permitidos para os veículos em uso.

Assim, para os estratos dos veículos fabricados de 1994 a 1996, com limite máximo permitido para *CO* de 3% v/v, o erro de estimação foi de 0,75% v/v e para os estratos dos veículos fabricados de 1997 a 2004, com limite máximo permitido para *CO* de 1% v/v, foi de 0,25% v/v. O tamanho de cada estrato populacional por ano de fabricação foi disponibilizado pelo DETRAN/MG [6], mas somente após a realização das medições os automóveis (unidades amostrais) selecionados aleatoriamente nas vias públicas de Belo Horizonte eram classificados dentro dos estratos. A amostra foi, portanto, pós-estratificada. A Tabela 1 mostra, para cada ano de fabricação, o número de automóveis da frota de Belo Horizonte, o tamanho amostral calculado e o número de automóveis da amostra.

Tabela 1 – Automóveis de Belo Horizonte, tamanho amostral calculado e número de automóveis da amostra por estratos - 2005

Ano de fabricação	<sup>(1)</sup> Automóveis de Belo Horizonte	<sup>(2)</sup> Tamanho amostral	<sup>(2)</sup> Automóveis da amostra
<1994	237.229	66	259
1994	28.175	55	55
1995	38.411	30	79
1996	35.171	14	50
1997	44.316	56	75
1998	35.155	76	80
1999	26.256	48	58
2000	33.789	27	57
2001	40.356	36	65
2002	38.902	52	61
2003	40.323	15	32
2004	56.887	2	29
Total	655.240	426	900

<sup>(1)</sup>[6] <sup>(2)</sup>[7]

Verifica-se, na Tabela 1, que o número mínimo de automóveis calculado para compor cada estrato da amostra foi alcançado. Como o número de automóveis analisados foi pós-estratificação, o total analisado ultrapassou o tamanho amostral para a maioria dos estratos.

As concentrações de *CO* e de *HC* no escapamento dos automóveis foram obtidas utilizando duas unidades de medição, uma fixa e outra móvel, equipadas com analisadores de gases, sensores de rotação e de temperatura do motor, microcomputadores e impressoras. A Figura 1 (a) mostra o rack dos equipamentos da Unidade Fixa do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, a Figura 1 (b) os equipamentos instalados no veículo da Unidade Móvel e a Figura 1 (c) a colocação da sonda de captação de gases no escapamento de um automóvel.

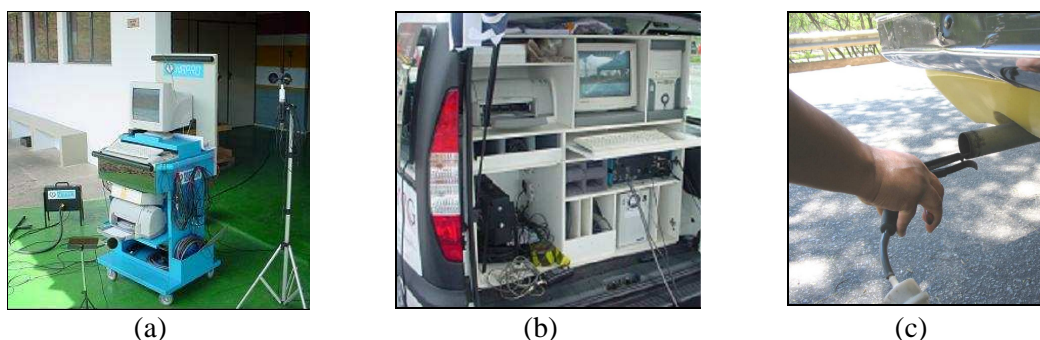


Figura 1 - Equipamentos de medição de emissão veicular das unidades Fixa (a) e Móvel (b) e colocação da sonda de captação de gases no escapamento de um automóvel (c)

As concentrações de *CO* e de *HC* no escapamento dos veículos foram medidas usando analisadores do tipo PC-Multigás. Nesses analisadores, essas concentrações são determinadas pela medição da intensidade de luz absorvida para cada gás para comprimentos de ondas específicos na faixa de radiação do infravermelho. As exatidões dos analisadores para as faixas de concentração de *CO* de 0 a 2% v/v e de 2 a 5% v/v correspondem a  $\pm 0,06\%$  v/v e  $\pm 0,15\%$  v/v, respectivamente. Para faixas de

concentração de *HC* de 0 a 400 ppm e de 400 a 1000 ppm, esses valores são  $\pm 20$  ppm e  $\pm 40$  ppm, respectivamente [8].

As medições foram realizadas com os veículos nas condições de operação estabelecidas pelo CONAMA, em marcha lenta e a 2.500 rpm, na temperatura normal de trabalho do motor. Para medição da velocidade angular do motor foram utilizados medidores de rotação indutivo ou universal com tempo de resposta de 0,5 segundos e exatidão de  $\pm 50$  rpm. As informações: ano de fabricação, ano-modelo, combustível, tipo de veículo e município onde foi licenciado foram obtidas por consulta aos documentos dos veículos.

As médias dos resultados das medições das emissões de *CO* e de *HC* da amostra de 900 automóveis licenciados em Belo Horizonte, em marcha lenta e a 2500 rpm, correspondem aos fatores médios de emissão desses gases ( $FE_{CO}$  e  $FE_{HC}$ ) por estratos, ou seja, por ano de fabricação dos automóveis de Belo Horizonte.

Os intervalos de confiança para as médias dos  $FE_{CO}$  e dos  $FE_{HC}$  para a população de cada estrato  $h$  ( $\mu_h$ ) foram calculados, assumindo distribuição de probabilidade normal, conforme equação apresentada por Scheaffer [5], página 102. Os  $FE_{CO}$  e os  $FE_{HC}$ , em marcha lenta e a 2500 rpm, para os automóveis de Belo Horizonte e os respectivos intervalos de confiança são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores médios de emissão de *CO* e de *HC* e intervalos de confiança por ano de fabricação dos automóveis de Belo Horizonte - 2005

Ano de fabricação	Fator de emissão de <i>CO</i> (% v/v)		Fator de emissão de <i>HC</i> (ppm)	
	Marcha lenta	2500 rpm	Marcha lenta	2500 rpm
<1994	4,23 $\pm$ 0,37	3,49 $\pm$ 0,32	570,9 $\pm$ 77,9	332,3 $\pm$ 67,0
1994	2,08 $\pm$ 0,74	1,80 $\pm$ 0,61	365,3 $\pm$ 101,8	215,4 $\pm$ 68,3
1995	1,30 $\pm$ 0,46	0,90 $\pm$ 0,34	248,2 $\pm$ 54,4	149,6 $\pm$ 30,1
1996	0,79 $\pm$ 0,38	0,47 $\pm$ 0,16	225,4 $\pm$ 42,4	133,1 $\pm$ 24,9
1997	0,50 $\pm$ 0,21	0,54 $\pm$ 0,21	163,1 $\pm$ 28,9	119,5 $\pm$ 18,7
1998	0,37 $\pm$ 0,25	0,44 $\pm$ 0,24	143,5 $\pm$ 31,5	102,9 $\pm$ 20,7
1999	0,37 $\pm$ 0,23	0,38 $\pm$ 0,10	165,5 $\pm$ 83,5	94,3 $\pm$ 18,7
2000	0,28 $\pm$ 0,17	0,30 $\pm$ 0,12	144,8 $\pm$ 30,8	98,5 $\pm$ 18,4
2001	0,26 $\pm$ 0,10	0,38 $\pm$ 0,18	139,8 $\pm$ 23,8	119,5 $\pm$ 31,3
2002	0,19 $\pm$ 0,12	0,38 $\pm$ 0,23	165,7 $\pm$ 60,1	134,1 $\pm$ 48,4
2003	0,13 $\pm$ 0,17	0,05 $\pm$ 0,02	91,7 $\pm$ 32,9	75,9 $\pm$ 25,6
2004	0,02 $\pm$ 0,02	0,05 $\pm$ 0,05	74,93 $\pm$ 18,9	69,8 $\pm$ 17,1

Os intervalos de confiança correspondem a uma estimativa para as médias dos fatores de emissão de cada estrato da frota de automóveis de Belo Horizonte, que somente seriam obtidas se todos os veículos da frota fossem analisados.

### 1.1.2 Levantamento de dados de quilometragem percorrida

Durante os trabalhos de medição das emissões de *CO* e de *HC* da amostra da frota de automóveis de Belo Horizonte foi aplicado o questionário padrão aos condutores desses veículos. Assim foram obtidos os dados: quilometragem média semanal percorrida, endereço do condutor e se o mesmo era proprietário do veículo. A quilometragem

acumulada obtida mediante leitura do hodômetro de cada veículo da amostra também foi registrada.

Os dados obtidos por leitura dos hodômetros de 1016 veículos (quilometragem acumulada) e também os obtidos com a aplicação de 766 questionários (quilometragem média semanal) foram analisados. O tamanho das amostras nos dois casos não coincide por terem ocorrido as seguintes situações: veículos que tiveram os valores de quilometragem acumulada registrados, mas o questionário não foi aplicado a seus condutores; o questionário foi aplicado, mas os condutores não eram os proprietários; o questionário foi aplicado, mas o veículo era de uso comercial.

Os dados de quilometragem anual percorrida obtidos mediante consulta aos valores registrados nos hodômetros ( $Q_H$ ) e com a aplicação de questionários ( $Q_Q$ ) aos proprietários dos automóveis de uso particular são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de quilometragem média anual percorrida obtidos por leituras dos hodômetros e por aplicação de questionário

Ano de Fabricação	Hodômetros		Questionário	
	Nº de veículos	$Q_H$	Nº de condutores	$Q_Q$
<1994	377	7.928	321	13.422
1994	63	8.973	48	13.043
1995	87	11.802	71	11.909
1996	63	13.083	46	12.999
1997	85	12.964	58	13.448
1998	85	13.826	58	14.892
1999	49	15.206	34	12.572
2000	53	17.217	33	14.521
2001	50	17.403	28	21.255
2002	49	18.881	34	13.650
2003	32	18.899	20	26.081
2004	23	22.455	15	18.269
Total	1016	-	766	-

Inicialmente foram analisados apenas os dados de quilometragem percorrida dos veículos que tinham informações nas duas bases (hodômetros e questionário). Dessa forma, foram analisadas as informações referentes a um total de 665 veículos. Para 101 veículos o questionário foi aplicado, mas os valores dos hodômetros não foram registrados. Os dados de quilometragem média anual percorrida obtidos pelos dois métodos (hodômetros e questionário) para uma amostra de 665 automóveis de Belo Horizonte são apresentados na Figura 2.

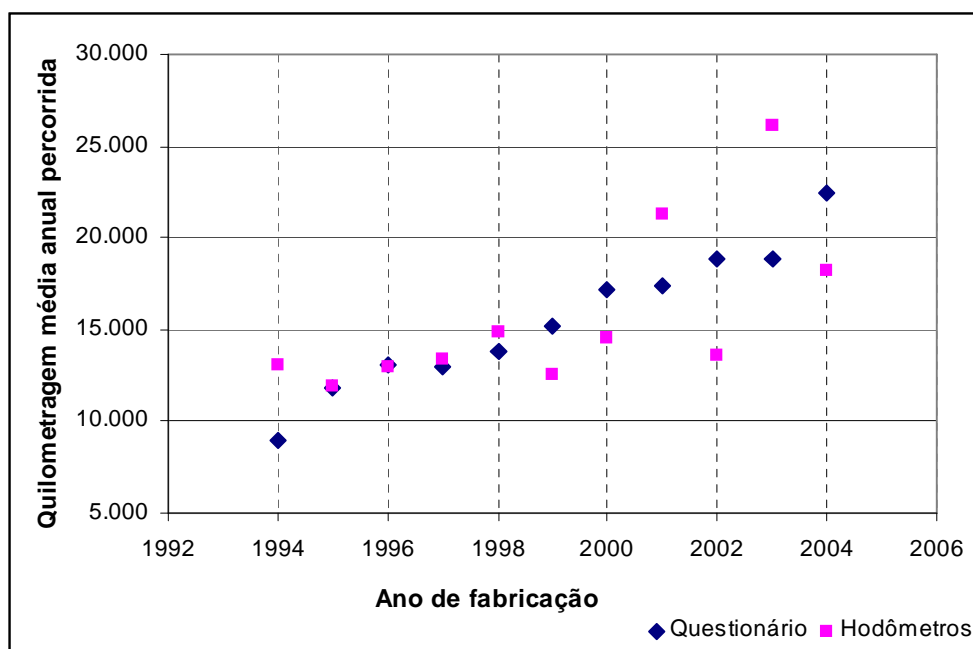


Figura 2 - Dados de quilometragem média anual percorrida obtidos por consulta aos hodômetros e por aplicação do questionário

## 1.2 Análise estatística dos dados para determinação dos $FD$ e dos valores de $Q$

### 1.2.1 Determinação dos $FD_{CO}$ e dos $FD_{HC}$

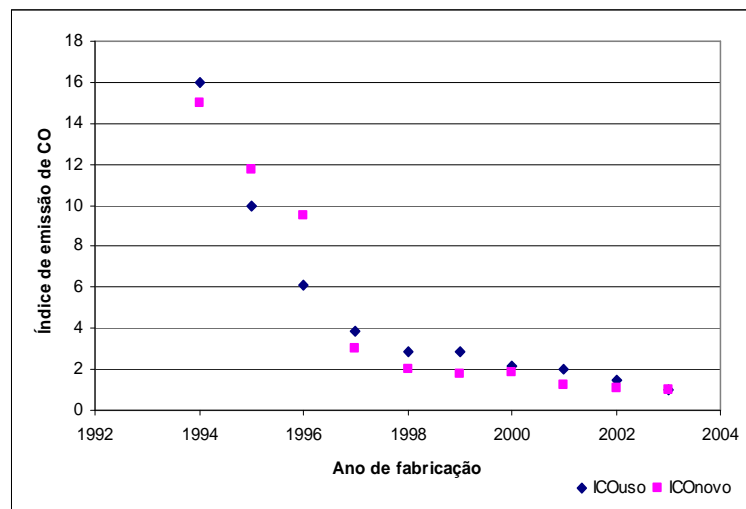
Os fatores de deterioração das emissões de  $CO$  e de  $HC$  com a idade dos automóveis de Belo Horizonte foram determinados mediante análise da relação entre os fatores médios de emissão de  $CO$  e de  $HC$  desses veículos (em uso) e os obtidos nos processos de certificação de veículos novos nacionais disponibilizados pelo IBAMA [2]. Os primeiros foram medidos em unidade de concentração ( $CO$  em %v/v e  $HC$  em ppm) e os segundos fornecidos em gramas por quilômetro.

Para análise da relação entre esses fatores de emissão, foi necessário padronizá-los. Para tal foram utilizados números índices ou simplesmente índices. Para cada uma das séries temporais dos fatores médios de emissão dos veículos em uso e novos, para o período de 1994 a 2003, os *índices* foram obtidos dividindo os fatores médios de emissão de cada ano de fabricação dos veículos pelo fator médio de emissão do ano base. O ano base escolhido foi 2003 uma vez que esses veículos tinham, na época da pesquisa, cerca de um ano de uso e considerou-se que ainda mantinham os fatores médios de emissão de  $CO$  e de  $HC$  conforme saíram de fábrica. Dessa forma criou-se um elo de ligação entre as séries dos fatores médios de emissão dos veículos em uso e novos, pois para os veículos fabricados nesse ano os  $FD$  de  $CO$  e de  $HC$  foram definidos como sendo iguais a um.

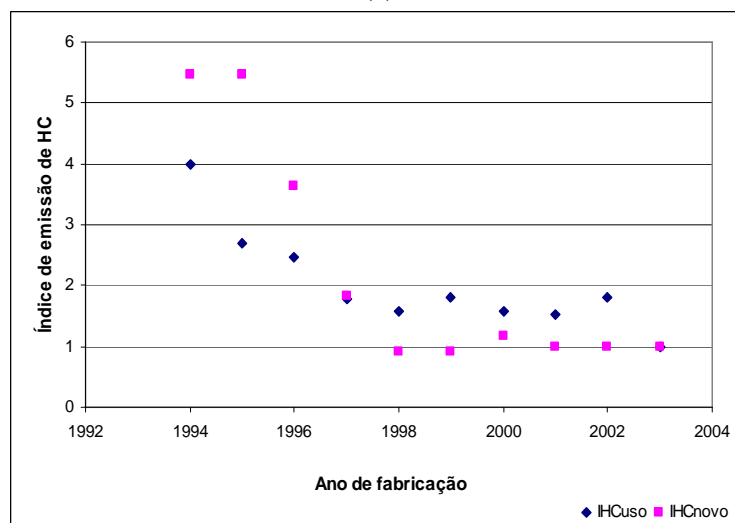
A análise dos  $FE$  dos veículos leves em uso e novos foi realizada para cada ano de fabricação para o período correspondente a 10 anos, período mínimo para utilização na elaboração de inventários de emissão veicular de Belo Horizonte. Também foi considerado que a definição de um modelo para a variação dos  $FD$  para os veículos leves só se justifica a partir da implementação efetiva de tecnologias para redução das emissões para atendimento às metas do PROCONVE que tiveram início em 1992. Considerou-se

também que depois de percorridos 100.000 km, o que equivale a cerca de 7 anos de uso do veículo, os *FD* de *CO* e de *HC* tendem a ficar constantes. Portanto a definição dos *FD* para os 10 anos mais recentes possíveis atendeu aos objetivos da pesquisa.

As séries temporais dos fatores de emissão de veículos novos nacionais foram utilizadas como referência por estarem sob influência apenas da evolução tecnológica ao longo dos anos. Os índices de *CO* e *HC* dos veículos em uso de Belo Horizonte ( $ICO_{uso}$  e  $IHC_{uso}$ ) e dos veículos novos nacionais ( $ICO_{novo}$  e  $IHC_{novo}$ ) são apresentados nos Gráficos (a) e (b) da Figura 3.



(a)



(b)

Figura 3 - Índices de emissão de *CO* (a) e de *HC* (b) dos automóveis de Belo Horizonte (concentrações observadas) e dos veículos novos nacionais [2].

A Figura 3 (a) mostra a tendência de redução significativa dos índices de emissão de *CO*, sendo mais acentuada antes de 1997, tanto para as emissões dos veículos novos, quanto para os veículos em uso. Interessante observar que em 1997 teve início a Fase L-III do PROCONVE que reduziu o limite máximo de emissão de *CO* dos veículos novos de 12g/km para 2g/km [9]. Nesse ano, as montadoras tiveram de empregar, além de

catalisadores, tecnologias para formação de mistura e controle eletrônico do motor. Pode-se verificar uma influência mais direta na degradação das emissões com o tempo de uso dos veículos fabricados até 1996, ou seja, aqueles com mais de 7 anos de uso. Para esses veículos há maiores diferenças entre os *ICO* dos veículos em uso e os *ICO* dos veículos novos. Esse fato sugere uma maior influência do uso/manutenção com o aumento da idade dos veículos que se mostra mais acentuada para os veículos fabricados até 1996.

Pode-se verificar na Figura 3 (b) que os *IHC* dos veículos em uso de Belo Horizonte e dos veículos novos nacionais, decrescem com a diminuição da idade dos veículos. Verifica-se para *HC*, da mesma forma que para *CO*, uma aproximação entre os índices de emissão de veículos em uso e novos para os veículos fabricados a partir de 1997.

Foi considerado que as reduções nos valores dos *FE* dos veículos novos a cada ano ocorreram exclusivamente devido às melhorias no processo de fabrica. Dessa forma, as variações percentuais dos *FE* de *CO* e de *HC* dos veículos novos fabricados no ano (*t*) em relação aos veículos novos fabricados ano seguinte (*t + 1*), tendo o ano 2003 como base para essa análise, foram calculadas pela Equação (2):

$$Var_{novo} = (FE_{novot} - E_{novot+1})/FE_{novot+1} \quad (2)$$

onde,  $Var_{novo}$  é a variação anual dos *FE* dos veículos novos,  $FE_{novot}$  é o *FE* dos veículos novos no ano *t* e  $FE_{novot+1}$  é o *FE* dos veículos novos no ano seguinte (*t + 1*).

Considerou-se ainda que o *FE* dos veículos em uso de Belo Horizonte, fabricados no ano (*t*), é igual ao *FE* desses veículos fabricados no ano seguinte (*t + 1*), acrescido das emissões correspondentes às alterações no projeto de fabricação e à deterioração das emissões com o tempo de uso dos veículos, a cada ano, conforme representado pela Equação (3):

$$FE_{usot} = FE_{usot+1} + E_{fab} + E_{det} \quad (3)$$

sendo  $FE_{usot}$  e  $FE_{usot+1}$  os *FE* dos veículos em uso de Belo Horizonte no ano *t* e no ano seguinte *t+1*, respectivamente, e  $E_{fab}$  e  $E_{det}$  as parcelas de emissão correspondentes às alterações de fabrica e à deterioração das emissões, a cada ano, respectivamente.

Desconsiderando o último termo da Equação (3), que corresponde às emissões causadas por deterioração/manutenção dos veículos ( $E_{det}$ ), tem-se o fator de emissão estimado para os veículos em uso ( $FE_{est}$ ), quando novos, em unidade de concentração (%v/v). Considerando que a parcela de alteração da emissão de fábrica ( $E_{fab}$ ) pode ser obtida aplicando-se a variação percentual dos fatores médios de emissão de veículos novos a cada ano ( $Var_{novo}$ ) aos fatores médios de emissão dos veículos em uso fabricados no ano seguinte ( $FE_{usot+1}$ ) chega-se à Equação (4):

$$FE_{est} = FE_{usot+1} + Var_{novo} \cdot FE_{usot+1} \quad (4)$$

Assim, para o cálculo do  $FE_{est}$  foi considerado apenas o aumento das emissões dos veículos em um determinado ano (*t*) em relação ao veículo mais novo, fabricado no ano seguinte (*t+1*), devido as alterações de fábrica, ou seja, é o fator de emissão que o veículo teria caso não houvesse deterioração do motor e do sistema de exaustão com o tempo de

uso. Dessa forma, foram geradas duas séries temporais de  $FE$  estimados para  $CO$  e para  $HC$  para os veículos quando novos em unidades de concentração. As variações anuais dos  $FE$  de  $CO$  e de  $HC$  dos veículos novos e os  $FE$  estimados para  $CO$  e para  $HC$  para os veículos quando novos são mostrados na Tabela 4.

Os  $FD$  são definidos como sendo os valores, em porcentagem, relativos aos aumentos dos  $FE$  de um poluente com o tempo de uso dos veículos em relação aos  $FE$  dos veículos quando novos. Portanto, podem ser obtidos através da razão entre os  $FE$  dos veículos em uso, fabricado no ano  $t$ , e os  $FE$  desses veículos quando novos, ao sair da fábrica no ano  $t$  [9].

Tabela 4 - Variações anuais dos  $FE$  dos veículos novos e respectivos  $FE$  estimados para os veículos em uso ao sair de fábrica

Ano de fabricação	$Var_{FE_{CO\ novo}}$	$FE_{CO\ est}$ (% v/v)	$Var_{FE_{HC\ novo}}$	$FE_{HC\ est}$ (ppm)
1994	0,28	1,66	0,00	248,2
1995	0,24	0,98	0,50	338,1
1996	2,17	1,58	1,00	326,1
1997	0,50	0,56	1,00	289,3
1998	0,14	0,42	0,00	165,5
1999	-0,04	0,27	-0,23	111,4
2000	0,52	0,40	0,18	165,2
2001	0,12	0,21	0,00	165,7
2002	0,08	0,14	0,00	91,7
2003		0,13		91,7

Inicialmente foram calculados os valores correspondentes às razões entre os fatores médios de emissão de  $CO$  e de  $HC$  dos veículos em uso ( $FE_{uso}$ ) e os fatores de emissão estimados para  $CO$  e  $HC$  para esses veículos quando novos ( $FE_{est}$ ) em função da idade dos veículos. Como o objetivo da pesquisa é avaliar a tendência principal de comportamento da deterioração das emissões com a idade dos veículos, esses valores foram suavizados. O método de Suavização Exponencial de Holt foi utilizado por ser indicado para séries curtas que apresentam tendências. Os valores obtidos para  $FE_{uso}/FE_{est}$  para  $CO$  e para  $HC$ , em função da idade dos veículos, e os valores suavizados que definiram os  $FD$  de  $CO$  e de  $HC$  para os automóveis de Belo Horizonte são apresentados nos gráficos da Figura 4 e na Tabela 5.

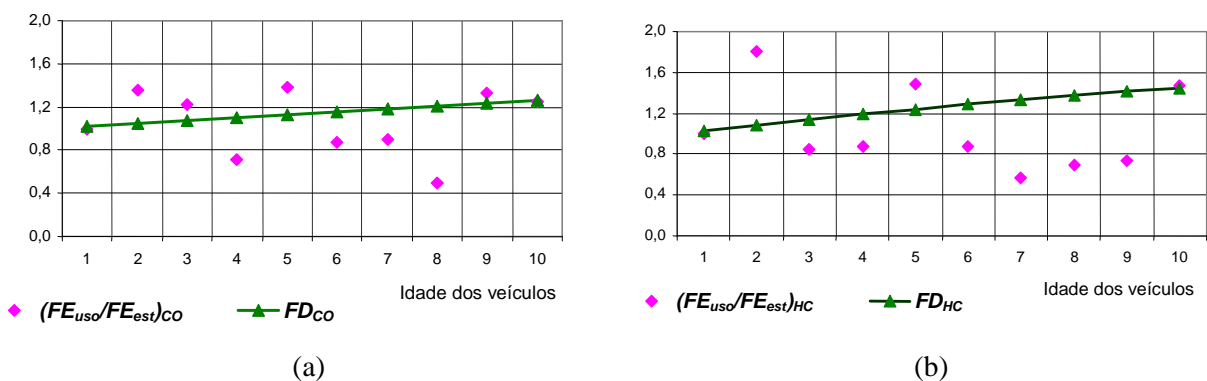


Figura 4 - Razão entre  $FE_{uso}$  e  $FE_{est}$  para  $CO$  (a) e para  $HC$  (b) e os respectivos  $FD$  definidos para os automóveis de Belo Horizonte

Tabela 5 – Fatores de deterioração ( $FD$ ) de  $CO$  e de  $HC$  em função da idade dos automóveis de Belo Horizonte

Idade (anos)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$FD_{CO}$	1,01	1,04	1,06	1,10	1,12	1,15	1,18	1,21	1,24	1,26
$FD_{HC}$	1,03	1,10	1,14	1,19	1,24	1,29	1,34	1,37	1,41	1,45

Para correlacionar o ano de fabricação com o tempo de uso dos veículos considerou-se que os fabricados em 2004 tinham menos de 1 ano de uso e os fabricados em 2003, em média, 1 ano de uso. A Figura 4(a) e Tabela 5 mostram que os  $FD_{CO}$  são, em média, iguais a 1,01 para os veículos com 1 ano de uso, 1,10 para os com 4 anos de uso e 1,26 para os com 10 anos de uso. Os  $FD_{CO}$  dos veículos com até 2 anos de uso são, em média, inferiores a 1,04, ou seja, o aumento médio das emissões de  $CO$  por esses veículos é inferior a 4%. Os veículos com 10 anos de uso emitem, em média, 26% a mais do que quando foram fabricados. Quanto aos  $FD_{HC}$ , verifica-se, na Figura 4(b) e na Tabela 5, um aumento nas emissões de cerca de 3% para os veículos com 1 ano de uso, 19% com 4 anos de uso e atingem 45% para os com 10 anos de uso. O  $FD_{HC}$  (1,45) foi 15% maior que o  $FD_{CO}$  (1,26) para os veículos com cerca de 10 anos de uso.

### 1.2.2 Determinação dos dados de quilometragem média anual percorrida

Para análise comparativa dos dados de quilometragem percorrida para cada ano de fabricação os valores obtidos com a aplicação do questionário ( $Q_Q$ ) foram subtraídos dos valores obtidos mediante leitura dos hodômetros ( $Q_H$ ) definindo a variável diferença ( $Dif$ ). Foi então feito o teste de média para a variável  $Dif$ , assumindo Distribuição Normal e nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%. Para a probabilidade de significância ( $p^*$ ) menor que 0,05, a hipótese nula ( $H_0: \mu = 0$ ) era rejeitada, ou seja, as informações obtidas via questionário e via hodômetro foram consideradas diferentes. Os resultados dos testes de média são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados dos testes de média para  $Dif(Q_Q - Q_H)$  por ano de fabricação dos automóveis de Belo Horizonte

Ano de fabricação	Nº automóveis	Diferença Média	Desvio padrão	$p^*$
<1994	258	-5131	14066	0,0000
1994	41	-3633	14423	0,1100
1995	65	-1034	13818	0,5500
1996	41	-1759	25198	0,6600
1997	54	-1637	14008	0,3900
1998	56	-1673	11532	0,2800
1999	31	256	11223	0,9000
2000	31	3748	12434	0,1000
2001	28	-4729	18575	0,1900
2002	30	708	9799	0,7000
2003	17	-8558	17085	0,0550
2004	13	65	21268	0,9900

Os resultados dos testes de média indicaram que os valores de quilometragem anual percorrida, por ano de fabricação, para os veículos fabricados de 1994 a 2004, obtidos

pelos dois métodos podem ser, em média, considerados equivalentes. As diferenças das médias para cada ano de fabricação podem ser consideradas nulas ( $p^* > 0,05$ ). Assim, para os veículos fabricados nesse período pode-se utilizar qualquer uma das séries de dados (hodômetros ou questionário) para representar a quilometragem anual percorrida pela frota de veículos leves do ciclo Otto em uso de Belo Horizonte. Já para os veículos fabricados antes de 1994 as diferenças das médias não podem ser consideradas nulas ( $p^* < 0,05$ ).

Para os veículos fabricados antes de 1994 considerou-se que os dados obtidos dos registros dos hodômetros seriam menos confiáveis, uma vez que, provavelmente, esses veículos já tinham rodado mais de 100.000 km. Porém, a heterogeneidade da série e os altos valores de  $Q$  encontrados para os veículos fabricados antes de 1994 indicaram a existência de veículos de uso comercial, que não foram identificados como tal, e a possibilidade de que alguns entrevistados desconheciam essa informação. Dessa forma, para cálculo da quilometragem média anual percorrida pelo grupo de veículos fabricados até 1993 os valores de quilometragem semanal percorrida acima de 500 km por semana foram desconsiderados. O valor encontrado considerando os dados de quilometragem referentes a 285 veículos foi 9.464 km/ano.

Para os veículos fabricados de 1994 a 1998 verificou-se a tendência dos dados do questionário serem subestimados embora, em média, as informações obtidas pelos dois métodos sejam equivalentes. Para os veículos fabricados de 1999 a 2004 foi observada a tendência oposta, ou seja, os dados de quilometragem média anual obtidos via hodômetros são menores que os informados via questionário. O importante é que essas informações em média se equivalem.

Para as quilometragens dos veículos fabricados em 2003 e 2004, para os quais o número de veículos da amostra foi menor que 20, foi aplicado também o teste não-paramétrico de *Wilcoxon* para medianas. Os resultados do teste para esses veículos indicaram que não há evidências para rejeitar a hipótese nula de que as quilometragens obtidas pela leitura dos hodômetros e pelo questionário são equivalentes, conforme mostrado da Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados dos testes de *Wilcoxon* para igualdade das medianas de  $Dif(Q_O - Q_H)$  para os automóveis de Belo Horizonte

Ano de fabricação	Nº veículos	Estatística de teste	$P^*$	Mediana estimada
2003	17	41	0,098	-5386
2004	13	44	0,944	-318,5

Considerando a equivalência dos dados de quilometragem percorrida por ano de fabricação para os veículos fabricados de 1994 a 2004, foi necessário escolher os valores a serem definidos para a frota em estudo. Para tal, observou-se que, no conjunto, a série temporal obtida via questionários apresentou maior variabilidade dos dados, ou seja, é menos homogênea. Também foi considerado que o número total de observações obtidas por consulta aos hodômetros (1016 veículos) foi maior que as obtidas via questionário (766 veículos).

Pelo exposto, concluiu-se pela utilização dos dados de quilometragem média anual percorrida obtidos via hodômetros para os veículos fabricados no período de 1994 a 2004 e dos obtidos por aplicação de questionários para o grupo de veículos fabricados até 1993.

As quilometragens médias anuais percorridas obtidas por consultas aos hodômetros foram analisadas como sendo uma série temporal. Por se tratar de uma série curta, cujos valores apresentam tendência de crescimento com a diminuição da idade dos veículos, foi utilizada a técnica de suavização de Holt. A série temporal foi suavizada utilizando o Software SPSS. As constantes de suavização  $\alpha$  e  $\delta$  que tornaram mínima a soma dos erros quadráticos de previsão foram 0,29 e 0,18, respectivamente. Assim as interferências foram minimizadas e a tendência principal de comportamento da série foi indicada, conforme mostrado na Figura 5.

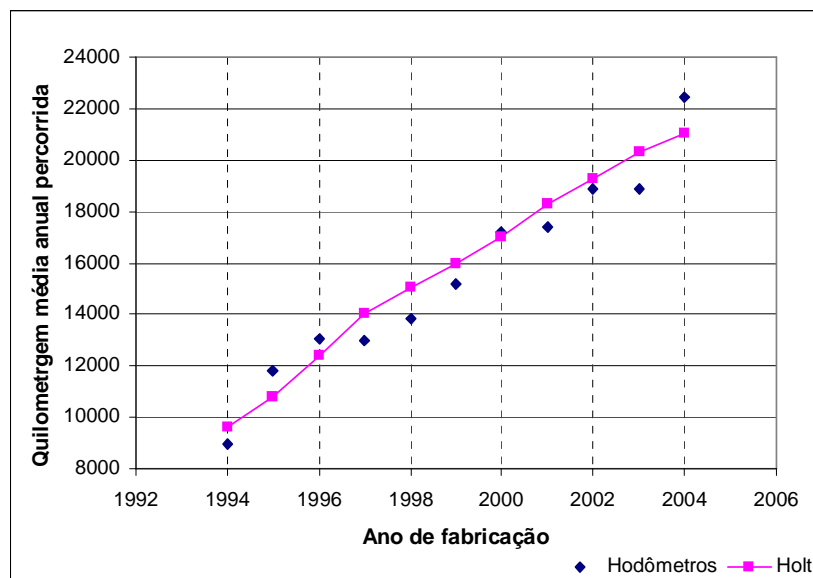


Figura 5 - Séries de dados de quilometragem média anual percorrida obtidos via hodômetros e suavizados pela técnica de Holt

Os valores de quilometragem média anual percorrida por ano de fabricação dos veículos leves de uso particular de Belo Horizonte definidos neste trabalho, para o período de 1994 a 2004, são, portanto, os obtidos mediante leitura dos hodômetros dos veículos e suavizados mediante aplicação da técnica de suavização exponencial de Holt. Esses dados, assim como a quilometragem média anual percorrida para o grupo de veículos fabricados até o ano de 1993, são apresentados na Tabela 8.

Os valores quilometragem média anual percorrida determinados nesta pesquisa para os veículos leves de Belo Horizonte, considerando que os fabricados em 2004 tinham menos de 1 ano de uso, os fabricados em 2003 tinham, em média, 1 ano e os fabricados em 1994 tinham 10 anos de uso, foram comparados aos obtidos para a frota de veículos leves de São Paulo em 1982 [4], conforme mostrado na Figura 6.

Tabela 8 - Quilometragem média anual percorrida para os automóveis de Belo Horizonte

Ano de fabricação	Quilometragem média anual
1994	<b>9647</b>
1995	<b>10765</b>
1996	<b>12433</b>
1997	<b>14022</b>
1998	<b>15061</b>
1999	<b>15984</b>
2000	<b>16999</b>
2001	<b>18315</b>
2002	<b>19255</b>
2003	<b>20331</b>
2004	<b>21026</b>

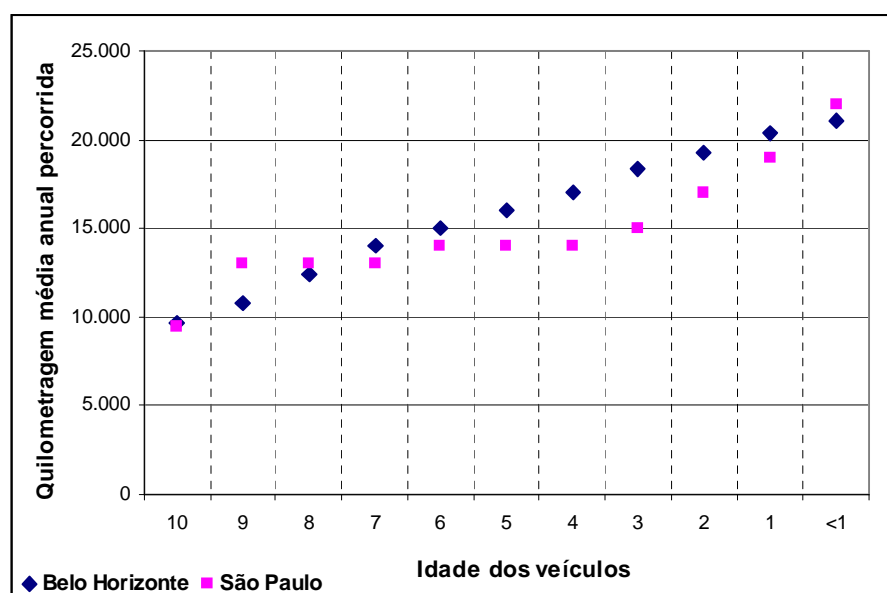


Figura 6 - Quilometragem média anual percorrida para os veículos leves de Belo Horizonte e de São Paulo [4]

Conforme pode ser verificado na Figura 6, os dados de quilometragem média anual percorrida determinados para os automóveis de Belo Horizonte apresentaram a mesma ordem de grandeza dos valores obtidos para os automóveis de São Paulo em 1982[4]. A análise desses dados indica que a série temporal desse parâmetro não varia muito de um centro urbano para outro e também não variou significativamente nas duas últimas décadas.

## CONCLUSÕES

Os resultados mostram que, para os veículos com cerca de 3 anos de uso, não ocorre degradação significativa nas emissões dos veículos leves do ciclo Otto de Belo Horizonte em relação às emissões originais de fábrica [2]. Para os veículos com cerca de 10 anos de uso os

fatores de deterioração das emissões de *CO* chegaram a cerca de 1,26, ou seja, apresentaram, em média, 26% de aumento nos fatores médios de emissão de *CO* de fábrica.

Para hidrocarbonetos, os fatores de deterioração das emissões se mostraram em geral mais altos do que para monóxido de carbono. Esse fator atingiu cerca de 10% para veículos com 2 anos de uso e foi aumentando até o valor de 45% com 10 anos de uso.

A metodologia de determinação dos fatores de deterioração de *CO* e de *HC* mostrou-se eficiente, gerando valores consistentes com os esperados, e possibilita sua utilização para definição de fatores de deterioração em regiões com Programas de Inspeção de Emissão Veicular implantados.

Para determinar fatores de deterioração das emissões, melhor seria acompanhar o uso de um grupo de veículos desde o momento em que saem de fábrica e assim determinar o fator médio de deterioração das emissões após 10 anos de uso, por exemplo. Os custos e dificuldades inerentes a esse tipo de estudo (longitudinal) fazem com que sua execução seja rara.

No estudo aqui apresentado, foi proposta uma abordagem alternativa ao estudo longitudinal, uma vez que os dados disponíveis para Belo Horizonte referem-se a um estudo do tipo transversal, ou seja, executado em um determinado instante do tempo. Ainda que essa abordagem, **planejamento semi-painel** [10], apresente várias aproximações, pois diferentes veículos estão sujeitos a diferentes tipos de uso e manutenção ao longo do tempo, os resultados obtidos, em termos médios, apresentaram-se coerentes com os valores encontrados na bibliografia internacional.

Acredita-se que parte da deficiência do planejamento semi-painel tenha sido compensada pela utilização de um grupo de comparação (emissões dos veículos ao sair de fábrica) e pela precisão no planejamento da amostragem, pois, em virtude do nível de confiança e erro de estimação estabelecidos previamente, obteve-se uma amostra representativa da frota de Belo Horizonte, cujo tamanho, 641 veículos, dificultaria a utilização de um experimento do tipo longitudinal.

As quilometragens médias anuais percorridas por ano de fabricação dos veículos leves em uso de Belo Horizonte obtidas mediante respostas dos questionários foram representativas dos veículos fabricados até 1993. Para a série temporal dos veículos fabricados de 1994 a 2003 optou-se, para cada ano de fabricação dos veículos, pelas quilometragens médias anuais obtidas via hodômetro. A metodologia desenvolvida para análise desses dados mostrou-se eficiente, sendo os resultados consistentes com os encontrados na literatura.

A atual dimensão da importância da redução das emissões de poluentes atmosféricos relacionadas ao aquecimento global evidenciou a inexistência de índices básicos como os aqui estudados. Com o crescente aumento do interesse pela questão das mudanças climáticas, observa-se maior demanda, em nível mundial, de informações relativas a inventários de emissões, em especial, dos gases de efeito estufa emitidos pelos veículos automotores.

Há de se considerar que os modelos de inventário devem ser alimentados com dados locais, consistentes, coletados de forma coordenada para que possam refletir as especificidades da região em estudo. Espera-se que os parâmetros obtidos nesta pesquisa possam contribuir para

o refinamento de inventários de emissão veicular de Belo Horizonte e para formação do banco de dados de parâmetros de referência para elaboração de inventários nacionais.

## REFERÊNCIAS

- [1] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6601. **Veículos rodoviários automotores leves – Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e dióxido de carbono no gás de escapamento.** Rio de Janeiro, 2001.
- [2] IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Fatores médios de emissão de veículos leves novos.** Disponível em: [www.ibama.gov.br/proconve/home.htm](http://www.ibama.gov.br/proconve/home.htm). Acesso em: 22 de junho de 2006.
- [3] USEPA – United States Environmental Protection Agency -. **Mobile source emission factors.** Ann Arbor Laboratory. New York, 1985.
- [4] CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Inventário de emissão veicular: metodologia de cálculo.** São Paulo, 1994.
- [5] SCHEAFFER, R. L.; MENDENHALL, W.; OTTI, L. **Elementary survey sampling.** 4<sup>th</sup> ed. Boston: PWS-Kent, 1990.
- [6] DETRAN/MG – Departamento de Trânsito de Minas Gerais. **Caracterização da frota de veículos automotores de Belo Horizonte.** Belo Horizonte, 2005.
- [7] DUTRA, E. G. **Projeto Inspeção Veicular: capacitação e avaliação inicial.** Belo Horizonte. Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM. Belo Horizonte, 2005.
- [8] DUTRA, E. G. **Metodología teórico experimental para determinação de parâmetros básicos para elaboração de inventários de emissão de veículos leves do ciclo Otto.** 160f Tese (Doutorado em engenharia mecânica na área de calor e fluidos), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.
- [9] IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores – PROCONVE/PROMOT.** Brasília, 2004.
- [10] De VAUS, D.A. **Formulating and clarifying research questions.** Chapter 3 IN: *Survey in Social Research.* London: George Allen & Unwin, 1986, p.27-46.