

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DO PROGRAMA DE INSPEÇÃO VEICULAR

Gabriel Murgel Branco^a

Wagner Croce^b

Fábio Cardinale Branco^a

Alfred Szwarc^c

José Mauro Napoleone^d

RESUMO

O presente estudo estima a redução na emissão de poluentes veiculares, propiciada pela inspeção e reparação dos veículos no âmbito do Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso na Cidade de São Paulo - I/M-SP, e quantifica os benefícios resultantes.

Como referência são utilizados os resultados das medições realizadas pela Controlar para a aferição da opacidade do gás de escapamento dos veículos Diesel e da emissão de CO e HC dos veículos com motor do ciclo Otto durante a operação do motor em aceleração livre e em marcha lenta, respectivamente.

Essas medições fazem parte dos procedimentos de inspeção conduzidos rotineiramente para avaliar o estado de manutenção e regulagem dos motores e o cálculo da redução de emissão registrada foi feito com o auxílio de uma metodologia que correlaciona os níveis de emissão dos modelos certificados com as estatísticas das concentrações de poluentes, da capacidade volumétrica e RPM máximas de motor e das quilometragens médias anuais.

Tais correlações permitem avaliar as percentagens de redução das emissões anuais das frotas inspecionadas e são expressas em percentagens equivalentes da frota que seriam retiradas de circulação para produzir o mesmo efeito, traduzindo esse resultado numa linguagem de fácil compreensão pela população em geral.

A quantificação dos benefícios à saúde pública foi feita a partir destes resultados pela equipe do Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental da Faculdade de Medicina da USP (LPAE/FMUSP), e demonstra que o custo das inspeções, distribuído pelo número de vidas salvas pelo Programa I/M, resultam extremamente baixos quando comparados a outros programas de saúde pública.

ABSTRACT

This study estimates the emission reductions induced by the vehicle inspection and repair in the São Paulo City Inspection and Maintenance Program - I/M-SP, and quantifies the benefits resulting therefrom. The references taken were the results of the measurements carried out by CONTROLAR to verify free acceleration exhaust gas opacity of Diesel vehicles and the idle CO and HC emission of vehicles with Otto cycle engine.

These measurements are part of the inspection procedures conducted routinely to assess the state of vehicle maintenance and the calculation of emission reduction was done with the aid of a methodology that correlates the emission levels of type approval certification with the statistics relating to concentrations of pollutants, engine size, maximum RPM of the engine and the annual average mileage.

Such correlations allow assessing the relative reduction of the inspected fleet annual emissions and are expressed as equivalent percentages of the fleet that would to be withdrawn from

^a EnvironMentality – Tecnologia com Controle Ambiental

^b Coordenador do Programa de Inspeção e Manutenção I/M-SP

^c ADS – Tecnologia e Desenvolvimento Sustentável

^d Controlar S.A.

circulation to produce the same effect, translating it into a language easily understood by the general population.

The quantification of public health benefits has been evaluated from these results by the team of the Experimental Air Pollution Laboratory of Faculdade de Medicina, USP (LPAE/FMUSP), and demonstrates that the costs of inspections distributed by the number of lives saved by the I/M-SP Program result extremely low when compared to other public health programs.

1. INTRODUÇÃO

O presente estudo tem por objetivo estimar a redução na emissão anual de material particulado pelos veículos ciclo Diesel, bem como de monóxido de carbono e hidrocarbonetos pelos veículos com motores do ciclo Otto, propiciadas pela inspeção e reparação desses veículos no âmbito do Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso na Cidade de São Paulo - I/M, e quantificar os benefícios ambientais resultantes, como parâmetro gerencial de avaliação da eficácia do Programa.

É importante ressaltar que os padrões de verificação adotados na legislação sobre o I/M, indevidamente chamados de “limites de emissão”, são apenas referências para a comparação relativa entre veículos semelhantes nas mesmas condições de funcionamento. Refletem indiretamente os níveis reais de emissão de poluentes atmosféricos e ruído, estatisticamente representativos para veículos em condições normais de operação e reconhecidos como possíveis de serem atendidos para cada tipo de veículo ou motor associado e para cada ano-modelo sujeito à inspeção, de acordo com o método de avaliação utilizado. Por isso, os resultados das inspeções não devem ser diretamente tomados como avaliação da emissão de poluentes para fins de impactos ambientais, mas servem como balizadores da conformidade da frota e podem ser utilizados como parâmetros de proporcionalidade, como demonstra este trabalho.

Como referência, foram utilizados os resultados das medições realizadas pela Controlar, empresa operadora do I/M-SP, para a aferição da opacidade do gás de escapamento dos veículos Diesel durante a operação do motor em aceleração livre e as medições das concentrações de CO e HC em marcha lenta nos veículos com motor do ciclo Otto. Essas medições fazem parte dos procedimentos de inspeção conduzidos rotineiramente para avaliar o estado de manutenção e regulação dos veículos. O cálculo das emissões anuais e das reduções registradas foi feito com o auxílio de uma metodologia que utiliza correlações estatísticas, desenvolvida a partir da medição de concentrações dos poluentes, e detalhada mais adiante. A quantificação dos benefícios à saúde foi feita complementarmente pela equipe liderada pelo Prof. Paulo Saldiva, do Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental da Faculdade de

Medicina da USP (LPAE/FMUSP), mas apesar de mencionada, a sua metodologia não faz parte do escopo deste trabalho.

2. Fundamentos teóricos referentes aos motores pesados

Os veículos pesados são certificados mediante ensaios de seus motores. A compreensão dos ensaios realizados em motores é muito facilitada pela visualização do “mapa do motor”, que consiste em um gráfico cujos eixos são o torque e a velocidade angular. Embora o torque máximo (plena carga) varie com a velocidade de rotação do motor (RPM), ao se apresentar esses parâmetros em porcentagem dos seus valores máximos obtém-se um gráfico “normalizado”, com a forma de um retângulo, denominado “mapa do motor”, que pode ser utilizado para comparação entre diferentes motores, onde:

- A RPM é representada entre zero (marcha lenta) e 100% (máxima admissível);
- O torque é representado entre -5% (torque de atrito interno do motor) e 100% (máximo valor atingível em cada velocidade angular).

A figura 1 apresenta o mapa de um motor e os pontos de ensaio em cada fase do teste ETC (European Transient Cycle) adotado pelo Conama para homologação da emissão de poluentes por motores no Brasil. Este ensaio reproduz a distribuição estatística que representa a utilização de um veículo pesado em trânsito normal, nas condições de tráfego urbano, rural ou de rodovias secundárias e em autoestrada.

A determinação da emissão dos poluentes controlados (monóxido de carbono – CO, hidrocarbonetos – HC, óxidos de nitrogênio – NOx e material particulado – MP), é realizada através deste ensaio para efeito de certificação de conformidade dos motores. O motor é submetido a diversos regimes de operação em um dinamômetro e a emissão de cada poluente é expressa em *gramas/quilowatt-hora*. Dependendo da necessidade de uso do dado, a emissão também pode ser convertida para *gramas/quilômetro*, entretanto o cálculo desta conversão requer conhecimento de outras variáveis, tanto do motor como do veículo, e é especialmente útil para a elaboração de estimativas anuais de emissão da frota de veículos (inventário de emissões) ¹.

No caso do material particulado, poluente emitido predominantemente pelos motores Diesel e que requer grande atenção em função de suas propriedades tóxicas e seu impacto na saúde pública, a maior parcela desta emissão ocorre nos pontos situados na parte superior do gráfico e a forma simplificada de aferir a conformidade de um veículo em uso com as suas especificações originais é através da medição da opacidade máxima dos gases quando o motor passa por esta região do mapa, o que é conseguido mediante a aceleração brusca do motor, enquanto este acelera até a sua RPM máxima.

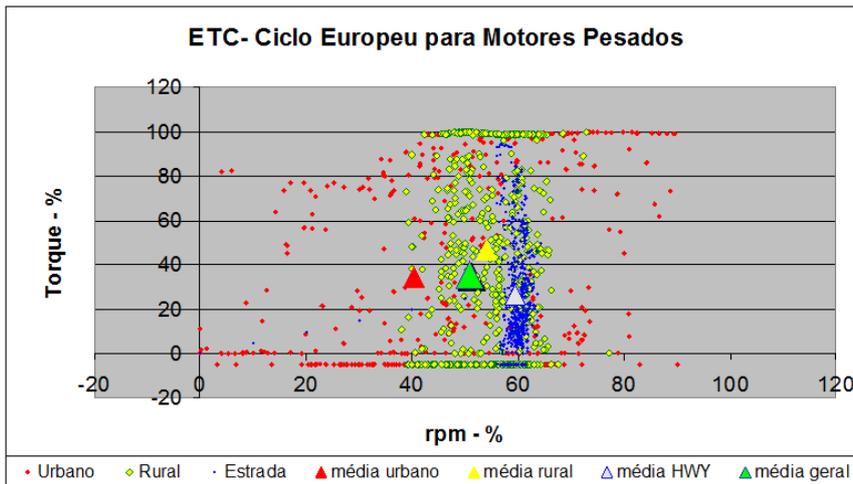


Figura 1 – Mapa de um motor Diesel no ensaio transiente de emissões

Este ensaio, chamado de “aceleração livre”, utiliza a inércia do motor como carga durante o movimento transitório em que o motor, inicialmente em marcha lenta, é acelerado brusca e totalmente, assegurando que a injeção de combustível seja a máxima permitida pelo sistema de alimentação, até que a rotação atinja a RPM de “máxima livre”, quando o débito de combustível é reduzido automaticamente pelo próprio sistema de injeção do motor. Desta forma, o motor percorre uma sucessão de regimes de trabalho próximos do máximo torque disponível em cada uma das velocidades angulares possíveis (plena carga), sendo que o resultado do ensaio é dado pela máxima opacidade registrada durante o período de aceleração. A figura 2 indica uma “trajetória” dos regimes de funcionamento do motor durante o ensaio, comparada a outras opções de ensaio utilizados em Programas I/M, como o Acceleration Simulation Mode - ASM – da Califórnia, o sensoriamento remoto – SR, o ensaio de ruído na condição parado e os ensaios em marcha lenta e a 2500RPM sem carga para motores do ciclo Otto. É importante observar que o ensaio ASM não representa bem as condições de máxima emissão de fumaça (que ocorrem nas condições de plena carga), embora seja realizado em dinamômetro, porque o veículo é ensaiado em carga parcial.

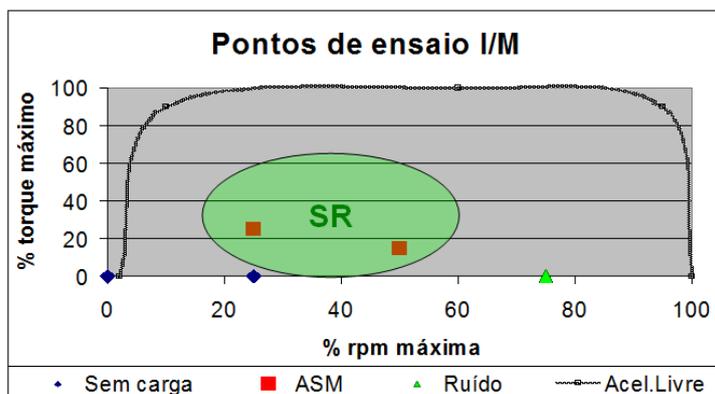


Figura 2 – Curva de opacidade durante uma aceleração livre

Como as condições de carga e rotação do motor são diferentes nos ensaios em dinamômetro e na aceleração livre, não é possível a conversão precisa dos resultados de um ensaio para o outro. No entanto, para um mesmo modelo de motor há correlação entre eles, pois o estado de manutenção e regulagem do motor exerce influência em ambos.

O valor de referência para a aferição da regulagem do motor é determinado durante o processo de certificação pelo ensaio ETC, mediante a realização de um ensaio adicional de aceleração livre com o motor na sua calibração original. Este valor, com tolerâncias definidas em Norma para levar em conta a dispersão que normalmente ocorre na linha de produção do motor e variações de altitude a que o veículo pode estar exposto, é o padrão máximo de verificação admissível na inspeção veicular.

2.1. Correlação entre a opacidade e a massa de particulados numa dada medição

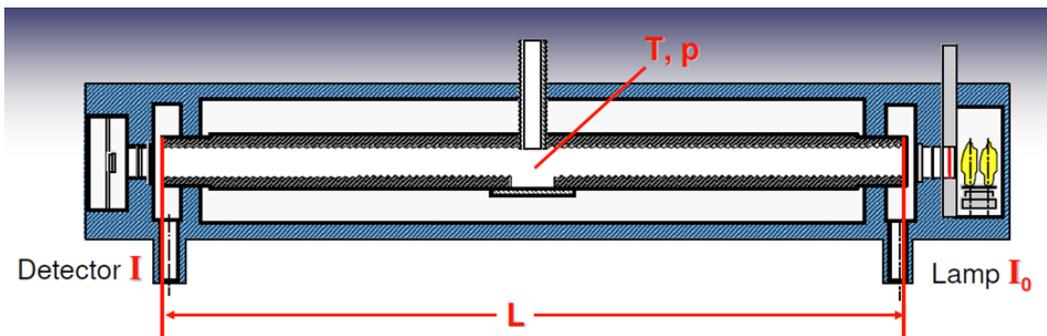
De acordo com a lei de Beer-Lambert, na qual se baseiam os opacímetros de uso corrente, a concentração de partículas é proporcional à absorvância luminosa do gás de escapamento, ou à sua opacidade medida em m^{-1} .

A opacidade é a medida da extinção de luz (absorção + difração) em uma coluna de fumaça, dada pela seguinte equação:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-k \cdot L} = \left(1 - \frac{N}{100}\right)$$

onde: I_0 = Intensidade da luz incidente
 I = Intensidade da luz com fumaça
 N = Opacidade (%)
 k = Coeficiente de absorção (m^{-1})
 L = Comprimento de medição (m)

Desta equação é possível converter a opacidade N no coeficiente de absorção k e vice versa, como representado na figura 3, para um opacímetro com comprimento ótico de 43 centímetros na câmara de amostragem. Como mostra a figura 3, o gás de exaustão do motor, devidamente condicionado, entra pelo centro da coluna de medição e sai pelas suas extremidades, arrastado por uma corrente de ar que assegura o comprimento preciso do feixe luminoso que atravessa o gás, bem como a constante limpeza das lentes que compõe o sistema ótico de detecção.



Fonte: AVL

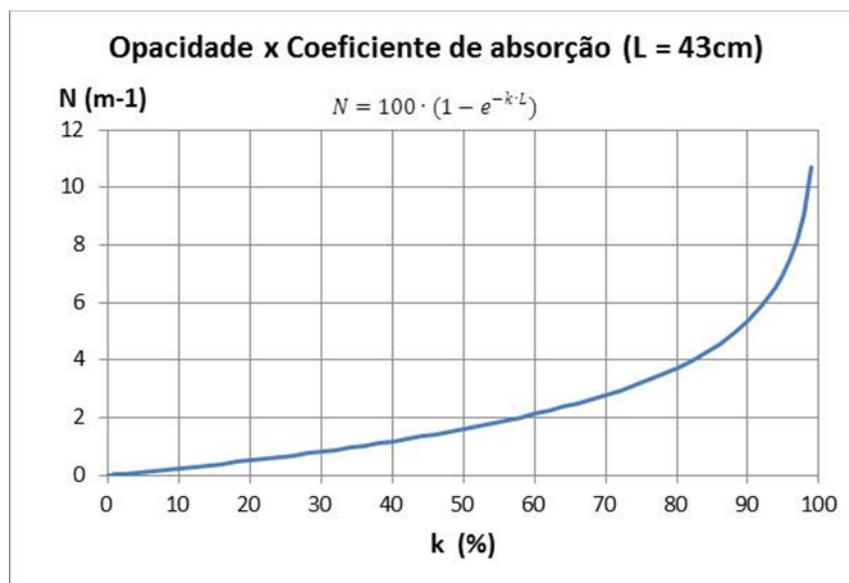
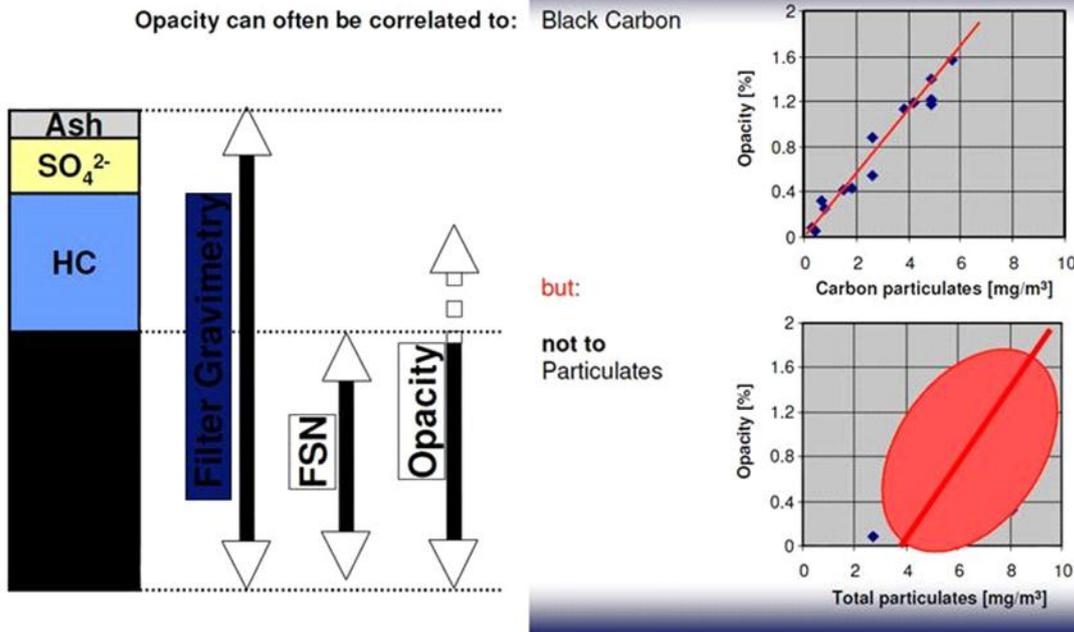


Figura 3 – Correlação entre opacidade e coeficiente de extinção de luz

A AVL, tradicional fabricante de instrumentos de medição de gases gerados por motores de combustão, mostra em seus estudos que a proporcionalidade entre a opacidade e a massa de particulados é muito segura para a parcela de carbono elementar (fuligem ou “black carbon”). Outros componentes, tais como cinzas e sulfatos, podem interferir nos resultados, mas são materiais mais claros, mais dependentes do combustível e menos da manutenção do motor. A influência dos hidrocarbonetos (partículas líquidas, fumaça azul etc.) é mais intensa, porém depende dos compostos presentes nos gases (óleo lubrificante, umidade etc.), ou seja, depende de sua absorvância e sua densidade.

Opacity / Soot / Particulates



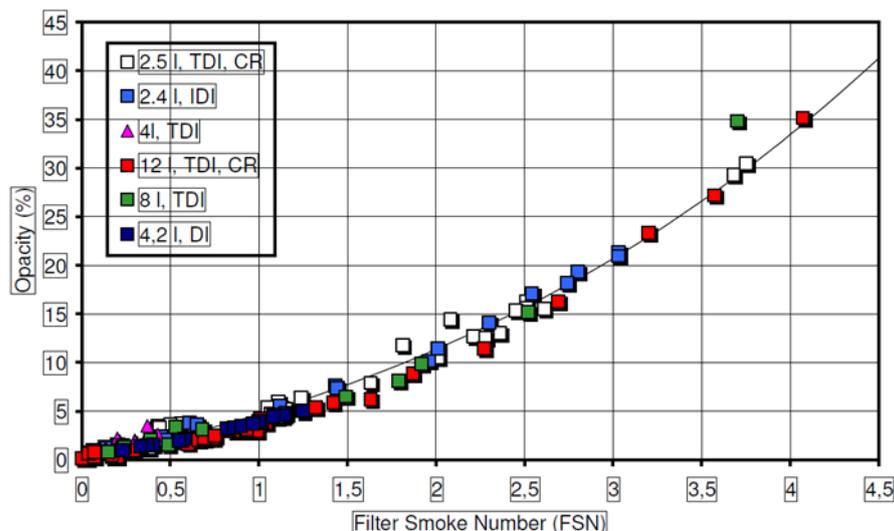
Fonte:AVL

Figura 4 – Correspondências entre opacidade, fuligem e particulados

As características da medição da opacidade possibilitam o uso desse método para a inspeção de veículos em uso, que é comparativa, pois a fuligem é a maior parte da composição do material particulado e, também, é a parcela que mais interessa monitorar na inspeção, porque depende diretamente do estado de manutenção e da regulagem do motor.

A experiência também mostra que há uma excelente correlação entre a massa de partículas de carbono e a amostragem de fumaça em filtro com a medição do seu enegrecimento - FSN (Filter Smoke Number – escala Bacharach ou Bosch)². A correlação entre as medidas de opacidade e o FSN observada pela AVL, é apresentada na figura 5 para diversos tipos de motores Diesel, com injeção direta de aspiração natural (DI), ou turboalimentados (TDI), injeção indireta (IDI), common rail (CR) e com cilindradas entre 2,4 e 12 litros. Esta figura indica que os processos de medição das partículas de carbono são bastante repetitivos e apresentam uma mesma correlação com a opacidade, independentemente do tipo e tamanho do motor. Geralmente é dada preferência à medição de opacidade por ser muito mais rápida e permite a avaliação de regimes transitórios³.

² Uma medição FSN necessita de 30 segundos de amostragem, enquanto que os opacímetros possuem resposta de 0,1 segundo para 90% da variação do sinal.



Fonte: AVL

Figura 5 – Correlação entre as medições de fuligem em filtro e por opacidade

A equivalência das medições de opacidade e a concentração de fuligem foram determinadas experimentalmente e tabuladas³ pelo MIRA, sendo adotadas internacionalmente como referência. Estas tabelas foram transformadas em equações usando técnicas de regressão, resultando numa equação linear para a conversão da opacidade medida em m^{-1} para mg/Nm^3 de gás de escapamento (nas condições normais de pressão e temperatura), válida para opacímetros com comprimento ótico de 43cm, na temperatura de 75°C, conforme segue:

$$\text{Concentração (mg/Nm}^3\text{)} = 147,509 * k(m^{-1}) \quad (\text{Eq.1})$$

Esta equação representa a fuligem ou carbono elementar (CE), que constitui a maior parte do material particulado (65% a 75%).

2.2. Correlação entre a emissão em aceleração livre e nos ciclos de ensaio para certificação de conformidade

Como mencionado, a homologação de veículos Diesel é feita com base em ensaios em dinamômetro, com o motor submetido a cargas variáveis de forma a certificar que o projeto tecnológico atende às exigências ambientais. Após aprovação nesses testes, o motor é submetido ao ensaio de aceleração livre, no qual é determinado o limite de opacidade a ser aplicável ao modelo de motor em questão.

Desta forma, o pico de opacidade em aceleração livre determinado pelo fabricante é também homologado como um padrão específico para as inspeções e regulagens durante a vida útil do veículo, sendo uma referência

para avaliação do seu estado de manutenção e regulagem. Assim, pode-se admitir que opacidades acima do padrão máximo especificado para o modelo de motor podem corresponder a emissões de material particulado acima dos respectivos limites de emissão. Esta correlação pode ser observada comparando-se os padrões certificados pelo IBAMA (e fornecidos à Controlar) para os motores anteriores a 2007, como indicado na figura 6.

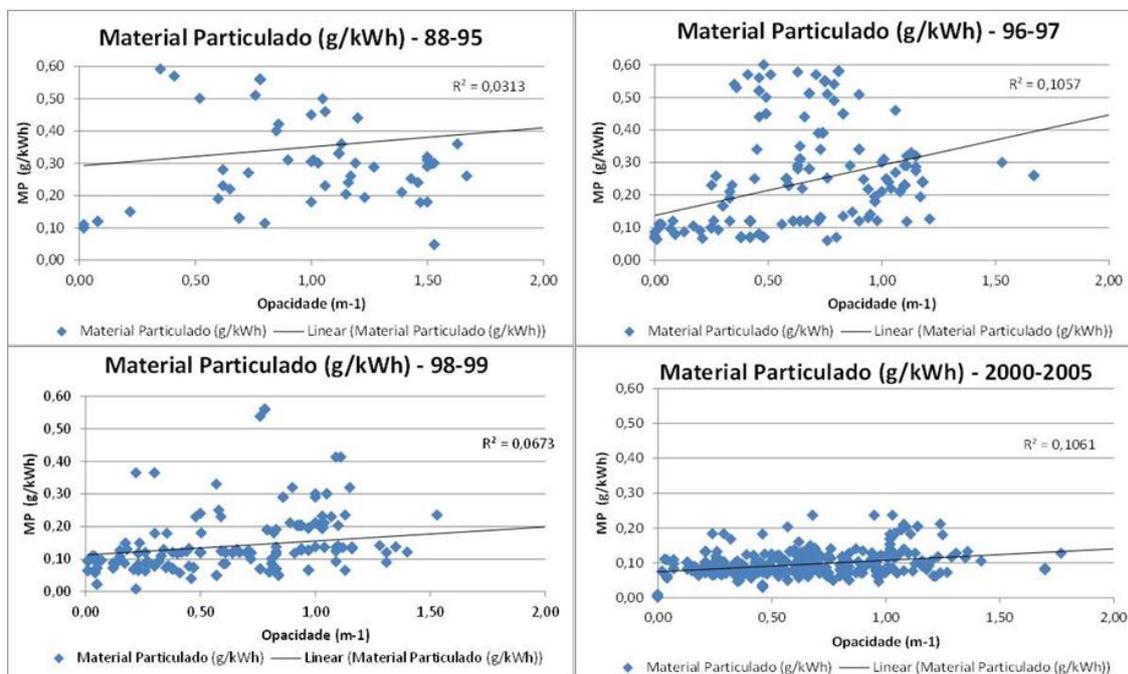


Figura 6 – Correlações observadas entre a opacidade em aceleração livre e a emissão em massa de material particulado em motores Diesel

Portanto, verifica-se que para um dado padrão tecnológico há uma dependência entre estes parâmetros, porém com baixo índice de correlação estatística. Este fato impede a conversão generalizada da opacidade em aceleração livre na emissão em massa de material particulado coletado em filtros e determinada gravimetricamente, enquanto o motor é ensaiado em dinamômetro nos ciclos transiente e estabilizado (ETC e ESC – European Stabilized Cycle ou método dos 13 pontos), também utilizados para certificação de conformidade de emissões e homologação.

Por outro lado, esta correlação depende da estratégia de calibração do motor e da limitação dos picos de fumaça e pode ser muito melhorada se realizada individualmente para cada modelo de motor. A figura 7 apresenta um gráfico da opacidade medida em um motor pesado, de padrão Euro 2, no ensaio ETC.

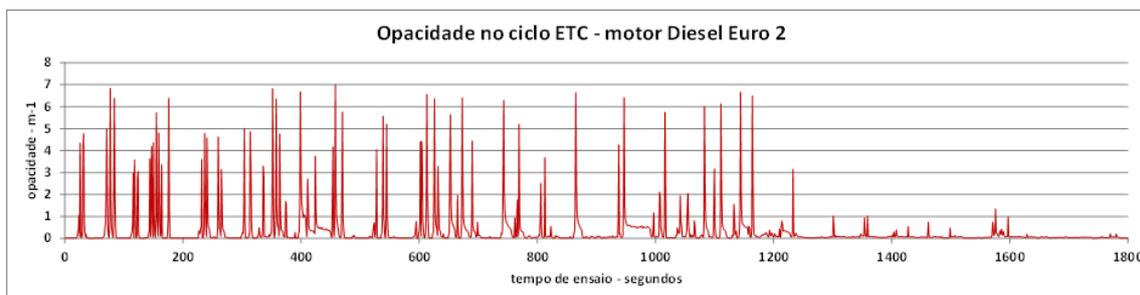


Figura 7 – Curva de opacidade durante um ensaio ETC

Embora os picos de opacidade acima de $2,0 \text{ m}^{-1}$, que é o padrão máximo especificado para este motor, tenham ocorrido em apenas 4,5% do tempo de ensaio, estes corresponderam a 53% da massa total de material particulado emitida no ensaio. Ordenando-se os resultados de opacidade deste ensaio em ordem crescente, constata-se que o valor acumulado (integração da curva) da massa de particulados é praticamente proporcional ao valor da opacidade.

Diante destas constatações, e considerando que as práticas de manutenção para correção da fumaça de um motor Diesel focalizam a limitação dos picos de opacidade, é seguro admitir que há uma proporcionalidade entre as variações em massa dos picos de fuligem constatados em aceleração livre e as variações da emissão média de material particulado do mesmo veículo, em ciclos de ensaio padronizados e, conseqüentemente, sob utilização normal.

Esta correlação não é única para todos os modelos de motor e não permite a conversão da emissão em aceleração livre no fator absoluto de emissão do veículo em g/km. Entretanto, a variação observada entre a primeira e a última inspeção num dado motor pode ser considerada como parâmetro de proporcionalidade para a estimativa da variação da emissão de particulados, em massa, especialmente se considerada em termos estatísticos.

Para o cálculo desta variação, a opacidade “k” foi convertida e expressa como “pico de emissão em massa” na condição de aceleração livre, mediante o emprego da seguinte fórmula, como uma referência da emissão de material particulado:

$$kMP_{massa}(mg/s) = C \left(\frac{mg}{m^3} \right) * \frac{cil(l)}{1000} * \frac{rpm}{2*60s} \quad (\text{Eq.2})$$

onde: kMP_{massa} = constante de proporcionalidade da emissão de particulados em mg/s

C = concentração de partículas em mg/m^3

cil = cilindrada em litros

RPM = rotação máxima livre do motor

A concentração “C” é calculada individualmente para a primeira e a última inspeção de cada veículo, através da equação (1) exposta anteriormente,

sendo acrescentada ao banco de dados como um novo parâmetro do veículo inspecionado.

Por não ser um dado registrado sistematicamente no cadastro de veículos, um levantamento realizado pela internet nos sítios de fabricantes de veículos e motores Diesel indicou que a capacidade volumétrica do motor de cada classe de veículo é bem representada pelos seguintes valores:

- 3 e 4 litros para veículos leves;
- 4 e 6 litros para ônibus e caminhões;
- 10 litros para caminhões-trator.

Com base neste levantamento e nas estatísticas da RPM máxima livre, obtidas das inspeções de 2011, os diferentes tipos de veículos foram agrupados e determinados os parâmetros característicos do produto “RPM*volume do motor”, para as diferentes categorias, mostradas na figura 8.

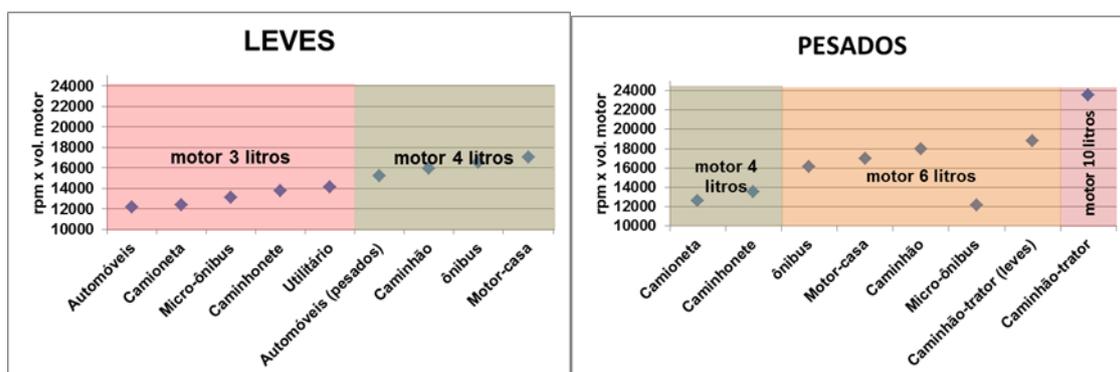


Figura 8 – Classificação conforme o tamanho do motor e a RPM máxima

Este recurso viabiliza o cálculo do fator kMP_{massa} em bases comparáveis para todas as categorias de veículos, de forma a estimar a variação da emissão de material particulado pela frota, ponderada por tipo e ano de fabricação. Para isso, considera que as médias dos resultados expressos em kMP_{massa} da primeira inspeção (inicial) e da última inspeção (final) no caso dos veículos reinspecionados, e a redução da emissão da frota é dada por:

$$R (\%) = (MP_{inicial} - MP_{final}) / MP_{inicial} \quad (Eq.3)$$

Onde: R = redução da emissão anual da parcela da frota considerada;

$MP_{inicial}$ = média de kMP_{massa} inicial por categoria e ano de fabricação

MP_{final} = média de kMP_{massa} final por categoria e ano de fabricação

Aplicando-se os valores desta redução aos valores de inventário de emissão de veículos, para cada grupo de veículos de mesma categoria e ano de fabricação, a redução da emissão anual dessa parcela da frota é dada por:

$$RE_{anual} = R(\%) * N * FE_{cert} * FD_{normal} * km_{anual} \quad (Eq.4)$$

Onde: RE_{anual} = redução da emissão anual média de referência em g/ano;

N = número de veículos na categoria e ano de fabricação considerados

FE_{cert} = Fator de Emissão certificado pelo IBAMA em g/km^f

FD_{normal} = Fator de deterioração normal de um veículo em boas condições de manutenção

km_{anual} = quilometragem média anual

Calculada desta forma, a redução da emissão anual média em massa é uma referência calculada em g/ano que pode ser associada às emissões finais, estimada na mesma base, e ambas podem ser somadas entre veículos de categorias e idades diferentes, o que permite avaliar a frota como um todo. Seu valor absoluto não é o mais importante, mas a sua variação percentual é fundamental para a estimativa dos “fatores de deterioração” decorrentes da manutenção deficiente dos veículos em circulação e indica o efeito do I/M-SP sobre o “estado da frota” num dado momento, em decorrência da manutenção induzida pelo Programa.

3. Fundamentos teóricos referentes aos veículos leves e motocicletas

Diferentemente dos veículos pesados, nos quais somente o motor é ensaiado, os veículos leves e os motocicletas são certificados para um dado limite de emissão independentemente da capacidade volumétrica do motor, da sua velocidade angular e da sua potência. Por isso, neste caso não será necessário ponderar os resultados das inspeções por outros fatores para reduzi-los a uma mesma base de comparação entre modelos diferentes, como foi feito para os veículos pesados.

A determinação da emissão dos poluentes controlados (monóxido de carbono – CO, hidrocarbonetos – HC e óxidos de nitrogênio – NOx), para efeito de certificação de conformidade de veículos leves e motocicletas, é realizada

^f No caso de veículos pesados, os fatores de emissão são proporcionais aos valores certificados para os motores (em kWh, publicados pela CETESB em seu relatório anual de qualidade do ar) e ao consumo de combustível médio atribuído a cada classe de veículo, com base no Inventário Nacional de Fontes Móveis, elaborado pela EnvironMentality para o MMA em 2007.

através do ensaio do veículo completo operando num dinamômetro de rolos e seguindo um ciclo de condução padronizado, cujas velocidades são representativas do uso urbano normal. O veículo é submetido a diversos regimes de operação e a emissão de cada poluente é expressa em gramas/quilômetro. Essa forma de representação da emissão, além de ser de fácil compreensão, é especialmente útil para a elaboração de estimativas anuais de emissão da frota de veículos (inventário de emissões)⁴ e uso em modelos de poluição do ar.

Complementarmente ao ensaio em dinamômetro, normalmente é também realizado o ensaio de CO e HC em marcha lenta, que é uma referência da conformidade do motor com as suas especificações originais. Como é de conhecimento da comunidade técnica especializada em motores veiculares, a regulagem e a manutenção do motor afetam o seu funcionamento em toda a gama de regimes de carga, sendo que a marcha lenta, por ser o regime mais crítico em termos de estabilidade, é considerado um indicador apropriado de problemas de manutenção. Adicionalmente, tanto no ciclo padronizado como na utilização urbana, os regimes de funcionamento do motor mais frequentes são a marcha lenta e os regimes intermediários com cargas baixas no motor, isto é, com acelerações baixas. A figura 9 mostra o histograma levantado numa amostragem de 12 dias no trânsito da cidade de São Paulo, onde se pode observar que 32% do tempo os veículos funcionam em torno da marcha lenta e 55% com acelerações entre $-0,2$ e $+0,2$ m/s^2 , portanto com o motor sem cargas⁵.

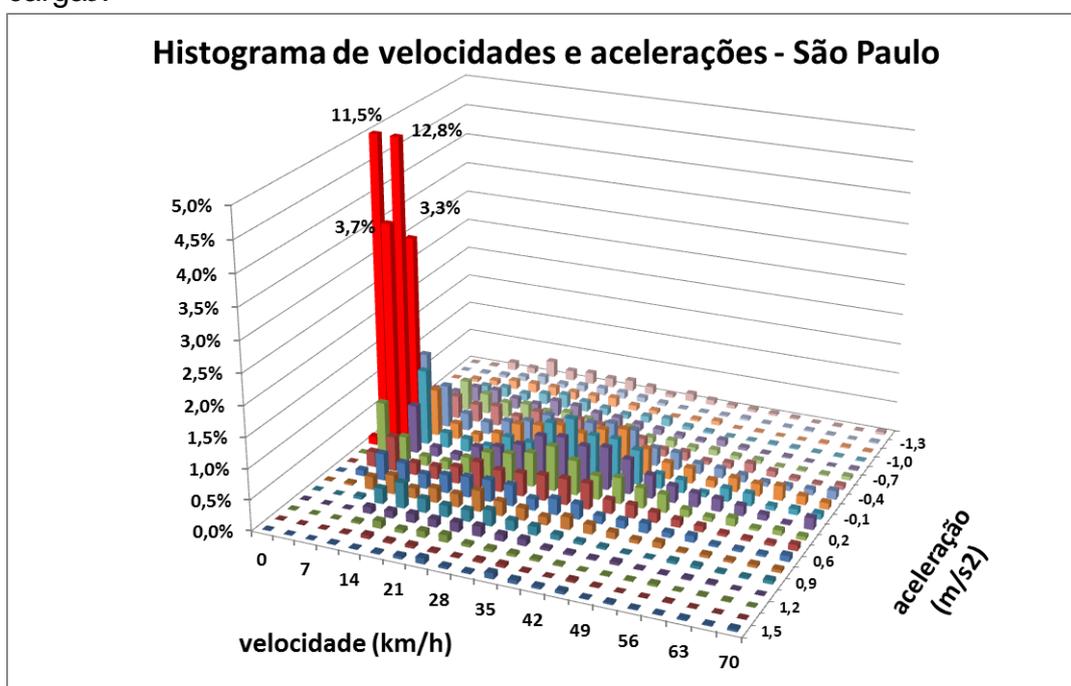


Figura 9 - Distribuição estatística de velocidades e acelerações amostradas por GPS no tráfego de São Paulo

Diante da importância dos regimes do motor sob carga reduzida no comportamento médio do veículo e considerando que as práticas de manutenção induzida pelo I/M-SP para correção da emissão em marcha lenta afetam os demais regimes de funcionamento do motor, é esperado que as variações nas concentrações de CO e HC em marcha lenta sejam refletidas nos correspondentes fatores médios de emissão do veículo, em gramas por quilômetro rodado, medido em ciclos de ensaio padronizados e, conseqüentemente, sob utilização normal.

Tal hipótese também é suportada pelo fato de que os defeitos mais grosseiros identificados em marcha lenta se estendem aos demais regimes proporcionalmente, como por exemplo, a falta ou inoperância de um conversor catalítico ou as falhas de sensores e bicos de injeção.

Esta correlação não é a mesma para todos os modelos de motor e não permite a conversão da emissão em marcha lenta diretamente no fator absoluto de emissão do veículo em g/km. Entretanto, a variação observada entre a primeira e a última inspeção em motores com características tecnológicas semelhantes pode ser considerada como parâmetro de proporcionalidade para a estimativa da variação da emissão de CO e HC, em massa, especialmente se consideradas em termos estatísticos.

Da mesma forma como foi demonstrado para a emissão de MP, no caso dos motores Diesel a variação das médias dos resultados das emissões de CO e HC, relativas à primeira inspeção (inicial) e à última inspeção (final) no caso dos veículos reinspecionados, permite estimar a redução destas emissões da frota, para cada categoria de veículo e ano de fabricação, dada por:

$$R_{CO} (\%) = (CO_{inicial} - CO_{final}) / CO_{inicial} \quad (Eq.5)$$

$$R_{HC} (\%) = (HC_{inicial} - HC_{final}) / HC_{inicial} \quad (Eq.6)$$

Onde: R = redução da emissão anual da parcela da frota considerada;

$CO_{inicial}$ e $HC_{inicial}$ = médias de CO e HC na inspeção inicial por categoria e ano de fabricação

CO_{final} e HC_{final} = médias de CO e HC na inspeção final por categoria e ano de fabricação

Aplicando-se os valores desta redução aos valores de inventário de emissão de veículos, para cada grupo de veículos de mesma categoria e ano de fabricação, a redução da emissão anual dessa parcela da frota é dada por:

$$RE_{anual} = R(\%) * N * FE_{cert} * FD_{normal} * km_{anual} \quad (Eq.4)$$

Onde: RE_{anual} = redução da emissão anual média de referência em g/ano;

N = número de veículos na categoria e ano de fabricação considerados

FE_{cert} = Fator de Emissão de CO e de HC certificados em g/km

FD_{normal} = Fator de deterioração normal para CO e para HC de um veículo em boas condições de manutenção

km_{anual} = quilometragem média anual

Calculadas desta forma, as reduções das emissões anuais médias em massa são referências estimadas em g/ano que podem ser associadas às emissões finais estimadas nas mesmas bases e ambas podem ser somadas entre veículos de categorias e idades diferentes, o que permite avaliar a frota como um todo. Seus valores absolutos não são os mais importantes, mas as suas variações percentuais são fundamentais para a estimativa dos “fatores de deterioração” decorrentes da manutenção deficiente dos veículos em circulação e indicam o efeito do I/M-SP sobre o “estado da frota” num dado momento, em decorrência da manutenção induzida pelo Programa.

4. Estimativa dos benefícios ambientais

A partir das médias das emissões anuais de MP, CO e HC, estimadas para as inspeções inicial e final, por categoria e ano de fabricação, admitidas como parâmetros de proporcionalidade entre as medições na inspeção e a emissão dos veículos no ciclo de ensaio ou na utilização normal do veículo, os benefícios ambientais do I/M-SP podem ser estimados através do cálculo das reduções dessas estimativas anuais em massa, de acordo com os seguintes passos:

- a) Cálculo das médias das concentrações do poluente considerado, medidas na primeira inspeção (INICIAIS) de todos os veículos inspecionados, independentemente de serem aprovados, reprovados ou rejeitados, por ano de fabricação e tipo de veículo;
- b) A emissão dos veículos rejeitados por motivos diretamente relacionados com emissão alta é assumida como sendo igual à média dos reprovados. Quando a rejeição é motivada por itens não diretamente ligada à emissão, o valor é assumido como sendo a média geral, cujos valores são conhecidos;
- c) Cálculo das médias dos resultados das inspeções FINAIS (última inspeção), por ano de fabricação e tipo de veículo. Os veículos aprovados

na primeira inspeção também são incluídos nas médias finais, pois eles apresentam o mesmo resultado antes e depois da inspeção;

- d) Cálculo da emissão anual FINAL, em massa, de cada frota (todos os veículos APÓS as inspeções), por ano de fabricação e tipo de veículo, dada pelo produto do número de veículos pelo fator de emissão certificado e pelo fator normal de deterioração e pela quilometragem anual, característicos da cada grupo;
- e) Cálculo da emissão anual INICIAL, em massa, de cada frota (todos os veículos ANTES das inspeções), dada pela emissão FINAL calculada em “c” acrescida das diferenças percentuais das médias INICIAL e FINAL determinadas em “a” e “b”, ANTES e DEPOIS da inspeção
- f) Cálculo das percentagens de redução da emissão anual em massa, expressas em “veículos equivalentes”, isto é o número de veículos que fariam o mesmo efeito ambiental se fossem retirados das ruas, para cada ano de fabricação e tipo de veículo.

Os valores estimados em “e” podem ser também agrupados para cada grupo de veículos de interesse (por fase do PROCONVE, toda a frota etc.), e novas percentagens de redução média podem ser estimadas de acordo com “f” para cada um.

5. Benefícios ambientais estimados em São Paulo no exercício de 2011

O I/M-SP induziu a manutenção corretiva em proporções de 10% a 50% dos veículos inspecionados, dependendo do tipo e idade dos mesmos, produzindo variações significativas nas médias das concentrações medidas. A figura 10 apresenta dois exemplos dos mais abrangentes para as emissões de fumaça (opacidade) e de CO, ambas em concentração do poluente nos gases de escapamento. É notória a redução de emissão atingida em veículos em todas as idades. No caso da opacidade, ficou evidente a capacidade de se retornar o veículo reprovado aos níveis de emissão dos veículos aprovados.

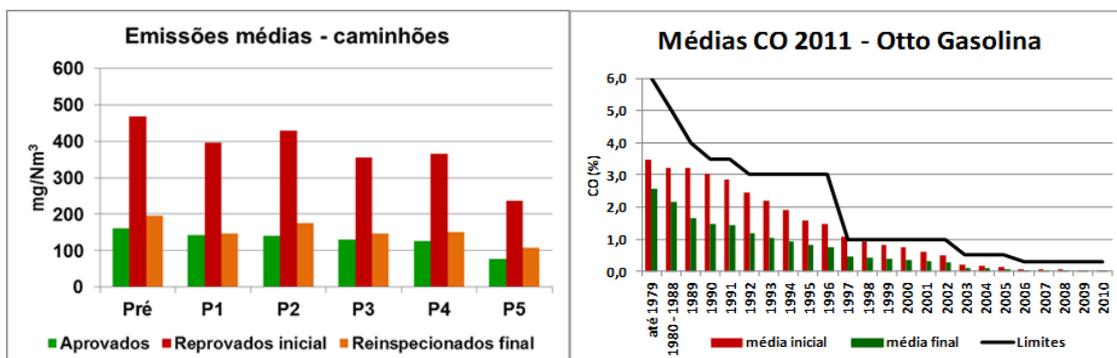


Figura 10 – Médias de concentração nos gases de escapamento

Aplicando os conceitos desenvolvidos neste trabalho, foram estimados os benefícios ambientais de todas as categorias, tipos de combustível e idades de veículos, por ano de fabricação, dos quais as figuras 11, 12 e 13 apresentam exemplos para ilustração deste trabalho. Agrupando-se os dados por fase do PROCONVE, os mesmos dados podem ser visualizados de forma comparativa entre a emissão estimada antes e depois das inspeções, conforme mostrado nos gráficos da direita.

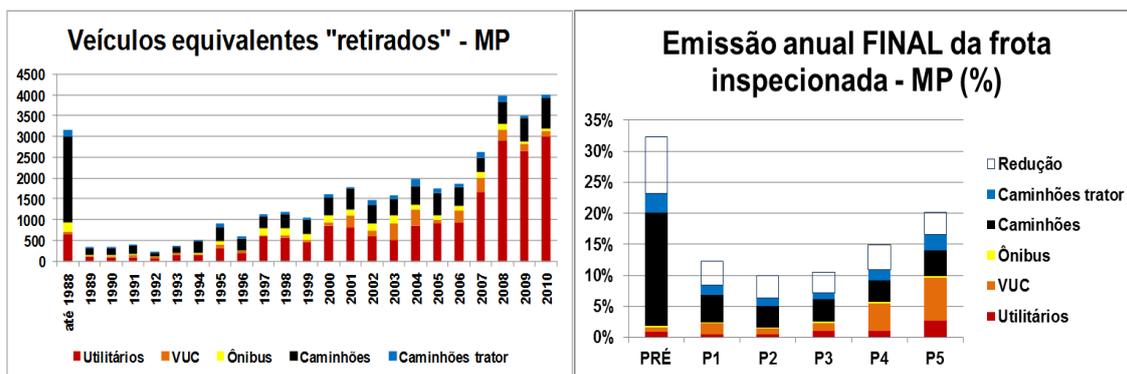


Figura 11 – Reduções de material particulado pelos veículos Diesel

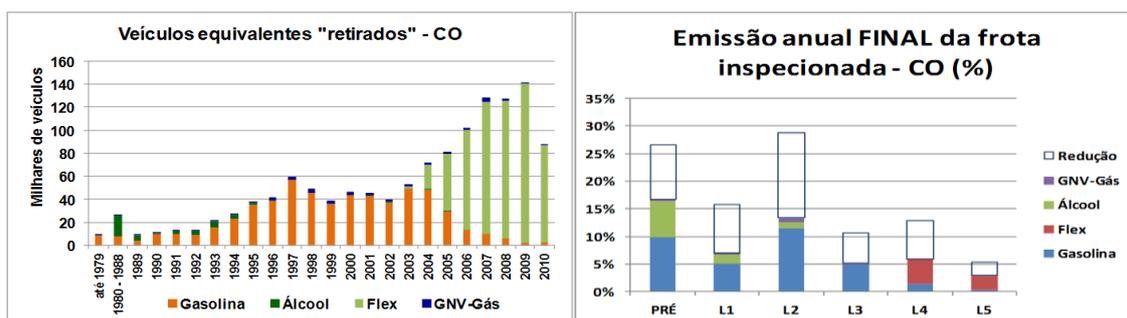


Figura 12 – Reduções de CO pelos veículos leves do ciclo Otto

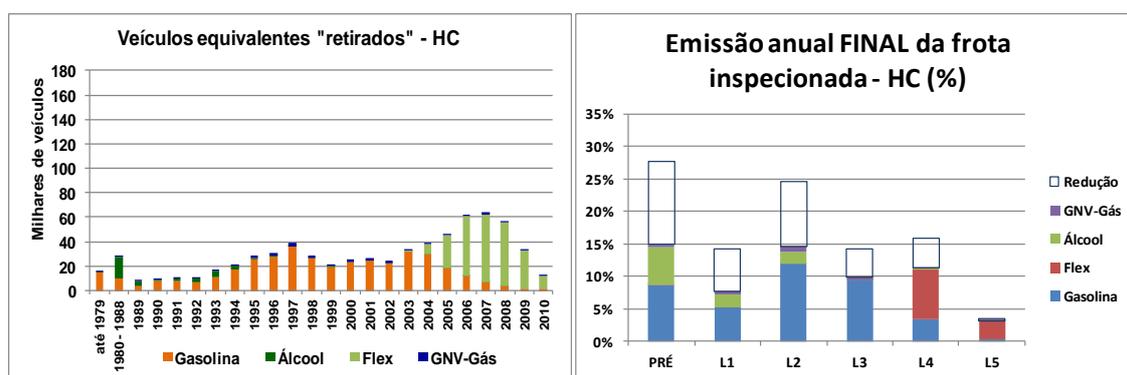


Figura 13 – Reduções de HC pelos veículos leves do ciclo Otto

Finalmente, as estimativas dos benefícios ambientais do Programa I/M-SP podem ser totalizadas em percentagem de redução ou em veículos equivalentes, conforme mostrado nas tabelas a seguir:

Tabela 1 - Reduções de emissão

	CO	HC	MP
Otto	49%	39%	
Motociclos	34%	42%	
Diesel			28%

Tabela 2 - Número de veículos retirados da frota para produzir o mesmo efeito

	CO	HC	MP
Otto	1.285.000	741.800	
Motociclos	87.000	107.300	
Diesel			36.300

A partir da redução de 28% da emissão de MP na frota Diesel inspecionada, determinada de acordo com a metodologia desenvolvida neste trabalho, da concentração média de 28,1µg/m³ de MP na atmosfera e da participação da frota diesel estimada em 40% das emissões totais de MP, a equipe do LPAE da Faculdade de Medicina da USP estimou as reduções da concentração de material particulado na atmosfera da Região Metropolitana de São Paulo - RMSP resultantes do I/M-SP, bem como, os benefícios à saúde pública no Município de São Paulo - MSP e também aqueles estendidos à região da mesma bacia aérea, como mostrado a seguir⁶.

O referido estudo focalizou três cenários básicos para o Município e para a RMSP, considerando que o consumo de óleo diesel no Município de São Paulo é metade do consumo total da Região Metropolitana⁷:

1. Admitiu que a frota inspecionada corresponde a 75% da frota circulante registrada no município de São Paulo, o que diminui a redução para 21% na frota do município e 10,5% sobre a frota total da RMSP;
2. Admitiu que a frota inspecionada corresponde à totalidade da frota paulistana, o que corresponde à metade da frota da RMSP, o que equivale a 14% de redução média na região;
3. Avaliou o que acontecerá quando a RMSP também implantar o Programa de I/M.

Com base nestes cenários, os resultados calculados são apresentados nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Benefícios do I/M-SP para a qualidade do ar

CENÁRIO DE CONTRIBUIÇÃO NA BACIA AÉREA	REDUÇÃO EMISSÃO			QUEDA MP _{2,5} µg/m ³
	INSPEC	MSP	RMSP	
#1- Apenas frota inspecionada (75% da circulante)	28%	21%	10,5%	1,18
#2- Inspeção de toda a frota circulante no MSP	28%	28%	14%	1,57
#3-Inspeção de toda a frota circulante na RMSP	28%	28%	28%	3,15

Tabela 4 – Benefícios do Programa I/M para a saúde pública

CENÁRIO DE CONTRIBUIÇÃO NA BACIA AÉREA	QUEDA MP _{2,5} µg/m ³	IMPACTO (número/ano)				ECONOMIA TOTAL (milhares de US\$)	
		MORTES		INTERNAÇÕES		MSP	RMSP
		MSP	RMSP	MSP	RMSP		
#1- Apenas frota inspecionada (75% da circulante)	1,18	379	584	894	1.515	51.360	79.499
#2- Inspeção de toda a frota circulante no MSP	1,57	504	778	1.190	2.016	68.300	105.904
#3-Inspeção de toda a frota circulante na RMSP	3,15	1.011	1.560	2.388	1.045	137.007	212.357

6. Conclusões

A metodologia desenvolvida neste trabalho permitiu avaliar a redução da emissão anual de material particulado, monóxido de carbono e hidrocarbonetos das frotas inspecionadas pelo I/M-SP a partir das medições de opacidade em aceleração livre e de CO e HC em marcha lenta e a 2500RPM, mediante os seguintes passos:

- conversão das medições de opacidade para a concentração de partículas no gás de escapamento de motores Diesel;
- determinação de uma referência para a variação da emissão de MP em massa nas condições de aceleração livre, correlacionável com a variação da emissão de MP em massa nas condições de utilização normal do veículo através da quilometragem anual, do volume do motor e da RPM máxima;
- determinação das variações das concentrações de CO e HC no gás de escapamento, medidas em marcha lenta e a 2500RPM na frota de veículos com motor do ciclo Otto;
- estimativa do benefício ambiental do I/M-SP através de cálculo de inventário das variações de emissão detectadas, com base nos fatores de emissão de certificação de tipo dos motores brasileiros, na estatística de quilometragem anual e nas condições de utilização normal do veículo.

Complementarmente, o método produziu subsídios robustos para a estimativa dos benefícios sociais do Programa em termos de saúde e economia em internações hospitalares e redução do número de mortes em decorrência da poluição do ar, o que é objeto de estudo específico desenvolvido pela Faculdade de Medicina da USP, o qual permite concluir que os municípios vizinhos já estão sendo beneficiados pela inspeção do Município de São Paulo e recomenda que o I/M seja estendido a todos os municípios da RMSP, o que trará benefícios adicionais, inclusive ao município de São Paulo. O estudo demonstra ainda que cada morte evitada custou diretamente aos munícipes que pagaram pelas inspeções apenas US\$ 6.900,00, o que é um dos custos mais baixos para programas de saúde pública, enquanto que a economia produzida no sistema de saúde é dez vezes maior.

Bibliografia

- ¹ Branco, G.M.; Ryan, J.J.; Branco, F.C. - IMPACTO AMBIENTAL DA FROTA DIESEL ATÉ 2030 - ESTUDO DE CASO: RMSP - XIII Congresso e Exposição Internacionais de Tecnologia da Mobilidade - SAE BRASIL 2004 - 16 de novembro de 2004 – São Paulo – Brasil.
- ² Westlund, A. - Measuring and Predicting Transient Diesel Engine Emissions – Licentiate thesis; KTH CICERO; Department of Machine Design - Royal Institute of Technology – Stockholm – 2009.
- ³ DX250 SMOKEMETER PROGRAM UK MOT 2002 - Conversion chart for k, HSU, FSN and mg/m³, extracted from MIRA Report No. 1965/10, Nuneaton Warwickshire, UK - 1965, AG Dodd and Z. Holubecki.
- ⁴ Branco, G.M. e Branco, F.C. - INVENTÁRIO DE FONTES MÓVEIS: análise prospectiva e retrospectiva dos benefícios do PROCONVE para a qualidade do ar desde 1980 a 2030 – São Paulo – Março de 2007.
- ⁵ Branco, G.M. e Branco, F.C. - ANÁLISE DA REPRESENTATIVIDADE DOS CICLOS DE ENSAIO PADRONIZADOS PARA A CIDADE DE SÃO PAULO – AEA – São Paulo - Maio 2008
- ⁶ André, P. A. de - Redução estimada da emissão de poluentes pelo programa de inspeção veicular em veículos diesel e seu impacto em saúde – Oficina sobre Meio ambiente urbano e uso da ciência na definição de políticas públicas – Medicina USP / Instituto Nacional de Análise Integrada de Risco Ambiental (INAIRA – CNPq/FAPESP) – 11/junho/2012.
- ⁷ <http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/302.pdf> - Anuário Estatístico de Energéticos por Município no Estado de São Paulo 2010 - Secretaria de Energia do Estado de São Paulo – 2012.