

ESTUDO DAS EMISSÕES DE MATERIAL PARTICULADO EM VEÍCULO LEVE COM MOTOR CICLO OTTO DE INJEÇÃO DIRETA *FLEX FUEL*

Luiz Henrique Cruz Vilar¹; Luiz Carlos Daemme²; Renato Penteadó²; Marcelo R. Errera³

¹SENAI-PR

²Institutos Lactec

³Universidade Federal do Paraná

E-mails: luizhcvilar@hotmail.com, luiz.carlos@lactec.org.br; renato@lactec.org.br; merrera@gmail.com

RESUMO

O motor ciclo Otto de injeção direta apresenta a vantagem de um menor consumo de combustível em relação aos motores ciclo Otto de injeção indireta. No entanto tem como inconveniente a emissão de material particulado que se origina a partir da formação de uma mistura não homogênea entre o ar e o combustível no processo de combustão, que depende também da tecnologia utilizada, e é influenciada pela composição do combustível. O material particulado tem influência sobre a saúde humana causando problemas respiratórios. A indústria automotiva brasileira apresentou os primeiros motores de injeção direta *flex fuel* do mundo em 2013. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o nível de emissão de material particulado gerado por um veículo leve equipado com motor de injeção direta. Foram realizados ensaios no veículo em dinamômetro de chassis, conforme normas brasileiras, nos ciclos de condução FTP-75 e HWFET, com gasolina A22 e etanol hidratado de referência (EHR), sendo medidos os seguintes compostos: Total de Hidrocarbonetos (THC), Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Nitrogênio (NO_x), Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Hidrocarbonetos Não Metano (NMHC), Material Particulado (MP) e consumo de combustível. Os resultados demonstraram níveis baixos de emissões de material particulado, e que com o uso do combustível A22 houve um aumento na emissão de material particulado em relação ao etanol hidratado, principalmente quando submetido ao ciclo de condução HWFET. Ficou evidenciado que as características do combustível influenciam nas emissões de material particulado, e que a tecnologia tem como vantagem o baixo nível das emissões dos compostos legislados no Brasil.

ABSTRACT

The Otto cycle direct injection engine has the advantage of lower fuel consumption compared to conventional indirect injection engines. However the disadvantage of such engines is the higher level of particulate matter emissions formed due to an inhomogeneous mixture of air and fuel in the combustion process. The fuel composition and the engine technology play an important role on the particulate matter emissions, as well. Particulate matter affects the human health causing respiratory problems. In the year 2013, the Brazilian automotive industry presented the first flexfuel direct injection engine. The objective of this research was to evaluate the particulate emissions provided by a direct injection flexfuel light-duty vehicle.

Tests were performed over a chassis dynamometer, according to Brazilian Standards, FTP-75 (urban) and HWFET (highway) driving cycles. The vehicle was fuelled with A22 gasoline and hydrous ethanol HER. Total hydrocarbons (THC), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), Non-methane hydrocarbons (NMHC), particulate matter (PM) and fuel consumption were measured. As main conclusion it was observed low levels of particulate emissions. Results increase with A22 fuel compared to HER, especially when subjected to the HWFET driving cycle. Regarding the legislated emissions it was observed that the direct injection engine technology tends to present low emissions levels.

INTRODUÇÃO

Atualmente com a tendência da redução no consumo de combustível pelos veículos e consequente redução nas emissões de CO₂, uma das tecnologias que gradativamente vem ganhando espaço, e evoluiu muito nos últimos 20 anos através de pesquisa e desenvolvimento, são os motores com injeção direta de combustível (DISI – *Direct Injection Spark Ignition*), que podem reduzir o consumo de combustível de 15% a 25% em relação aos motores de injeção indireta (PFI – *Port Fuel Injection*) em cargas parciais [1]. Entretanto os motores DISI podem emitir uma quantidade significativa de material particulado (MP) [2].

A investigação sobre partículas emitidas por motores ciclo Otto DISI vem sendo pesquisada cada vez mais pela área biomédica, cujos resultados apontam para o tamanho da partícula como uma medida toxicológica mais relevante do que a massa total de partículas [3]. Na Europa desde 2009 são aplicadas restrições às emissões de MP em veículos dotados dessa tecnologia [4], e nos EUA serão aplicados limites a partir de 2017 [5].

O presente artigo é resultado do trabalho de conclusão de curso da Pós – Graduação em Motores à Combustão Orientada para Engenharia da Mobilidade da Faculdade de Tecnologia do SENAI – PR (unidades CIC e Boqueirão).

1. MATERIAL PARTICULADO POR MOTORES CICLO OTTO DISI

O MP emitido pelos motores de combustão interna pode surgir a partir de quatro fontes diferentes, os combustíveis, os lubrificantes, o ar e a decomposição de material [3]. Pode-se fazer uma relação direta entre a composição do combustível, composição de lubrificante, e a qualidade e as características da combustão com a geração de material particulado [6].

A formação de MP é precedida pela presença de hidrocarbonetos aromáticos [7], e ocorre através de algumas etapas, que serão descritas nos próximos parágrafos.

A nucleação é o processo que consiste na adição de pequenos radicais de hidrocarbonetos, até alcançarem uma dimensão suficiente para formar um núcleo de partícula com diâmetro que varia de 1 a 2 nm. Nestas dimensões estas partículas não contribuem significativamente para a massa total de MP, porém têm grande influência na produção final de MP [8].

O crescimento superficial é uma etapa onde ocorre adição de massa na superfície da partícula por hidrocarbonetos em fase gasosa, geralmente acetileno e hidrocarbonetos aromáticos

policíclicos (PAH – *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*). Ocorre simultaneamente com a nucleação, não sendo possível distinguir entre o final da nucleação e o começo do crescimento superficial [8].

A coagulação, outra das etapas, é um fenômeno físico que por colisão de duas partículas primárias gera uma partícula resultante cuja massa é a soma das massas de ambas as partículas iniciais. Portanto neste processo ocorre a redução do número de partículas formadas, mas com o aumento do tamanho das partículas, porém a massa total das partículas se mantém durante a coagulação [8].

A oxidação do carbono pertencente a uma partícula ocorre inicialmente com a adsorção do composto oxidante, que pode ser o oxigênio ou radical hidroxila (OH), e após a reação de oxidação ocorre a desorção do produto oxigenado. Devido à microestrutura formada, tipo grafite, as partículas adotam uma grande resistência à oxidação [8].

O MP pode conter frações de sulfatos, que podem existir como partículas geradas em um processo de nucleação ou adsorvido à superfície das partículas maiores agregadas. O enxofre presente deriva do combustível e lubrificante. A legislação determina limites máximos de enxofre em sua composição e sua presença contribui para uma fração de MP [4].

Os processos de formação de poluentes nos motores DISI diferem dos já conhecidos motores PFI. A variável determinante dos motores PFI é a relação ar-combustível, e nos motores DISI, além da relação ar-combustível, tem grande importância a diferença entre o momento da injeção do combustível e o momento em que ocorre a centelha de ignição, principalmente em condições de carga estratificada [9].

Dentre os diversos poluentes, o MP vem sendo associado ao aumento, em idosos e crianças, de internações e mortes por doenças cardiovasculares e respiratórias [10].

O MP inalável, com dimensão inferior a 10 μm e, mais recentemente 2,5 μm , é apontado como um dos poluentes mais frequentemente relacionados com danos à saúde [11].

A primeira medida restritiva para as emissões de MP por parte dos motores DISI foi proposta em 2008 no EURO 5a [12] e efetivamente aplicada em 2009, com limite de 5 mg/km [4]. O valor foi reduzido com a entrada do EURO 5b, em setembro de 2011, para de 4,5 mg/km. Com a entrada do EURO 6, em setembro de 2014, o limite para massa de partículas continua a ser de 4,5 mg/km, porém entrou em vigor um limite para o número de partículas emitidas, tendo um valor máximo de $6,0 \times 10^{11}/\text{km}$ [13].

No Brasil, o Ministério do Meio Ambiente, por meio do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, IBAMA, define as diretrizes e aplicabilidade das legislações de emissões veiculares. O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, PROCONVE, foi instituído em 1986 e define as referências técnicas a serem seguidas para certificação de veículos, inclusive os procedimentos necessários para execução dos ensaios [9].

O PROCONVE não limita as emissões de MP de veículos leves equipados com motores de ciclo Otto.

Verificou-se que 96% de todo MP emitido em 2012 pelo setor de transporte rodoviário vem o diesel, contra apenas 4% da gasolina C [14].

Os primeiros veículos com motor ciclo Otto DISI *flex-fuel* do mundo são comercializados no Brasil desde 2013 [15], e a partir desta inovação tecnológica se tornou pertinente avaliar o comportamento destes veículos em relação aos seus níveis de emissões de MP com os combustíveis: etanol hidratado (EHR) e a gasolina A22, que são comercializados no Brasil.

2. METODOLOGIA

O Brasil adotou como padrão para ensaios em veículos leves o ciclo de condução da legislação americana, o FTP-75 (*Federal Test Procedure*) [16], regulamentado pelo CFR 40 (*Code of Federal Regulations*). O ciclo FTP-75 consiste de três seções de teste, uma fase transitória fria, uma fase estabilizada e outra fase transitória quente, que representa as velocidades reais medidas nos EUA em ruas de Los Angeles durante o tráfego cotidiano [17].

A norma brasileira que padroniza estes ensaios é a ABNT NBR 6601 [18]. Outro ciclo de condução que representa uma condição de uso do veículo em estrada para determinação de consumo de combustível e emissões é o HWFET (*High Way Fuel Economy Test*), e a norma brasileira para este ensaio é a ABNT NBR 7024 [19]. Consiste de uma simulação onde o veículo é conduzido por 16,47 km durante 765s, com uma velocidade média de 77,7 km/h, e diferentemente do ciclo FTP-75, o motor do veículo é aquecido para iniciar o ensaio e não ocorre nenhuma parada durante todo o ciclo.

A figura 1 apresenta o ciclo de emissões urbano com suas principais características.

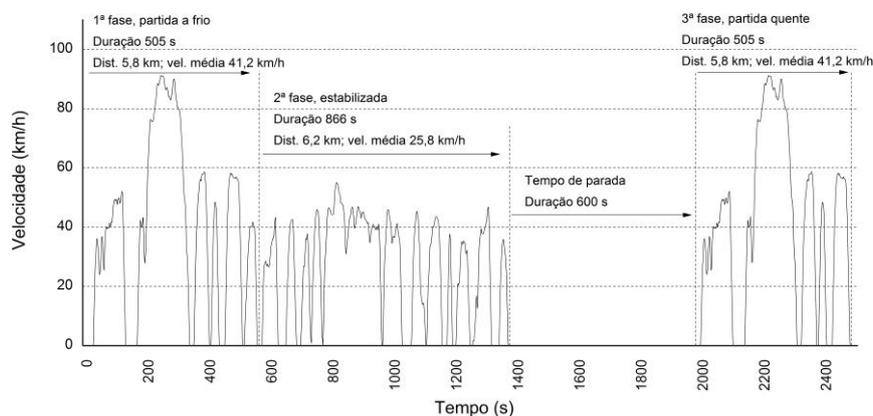


Figura 1: Ciclo de condução urbana de velocidade em função do tempo – regido pela NBR 6601.

Na figura 2 pode-se observar o perfil de velocidade em função do tempo do ciclo estrada. O ciclo possui duas fases, sendo uma inicial que deve ser iniciada em até três horas após o final do ensaio de emissões da NBR 6601, com objetivo de pré-condicionamento do veículo e uma segunda fase, idêntica a primeira, onde são efetuadas as coletas das emissões.

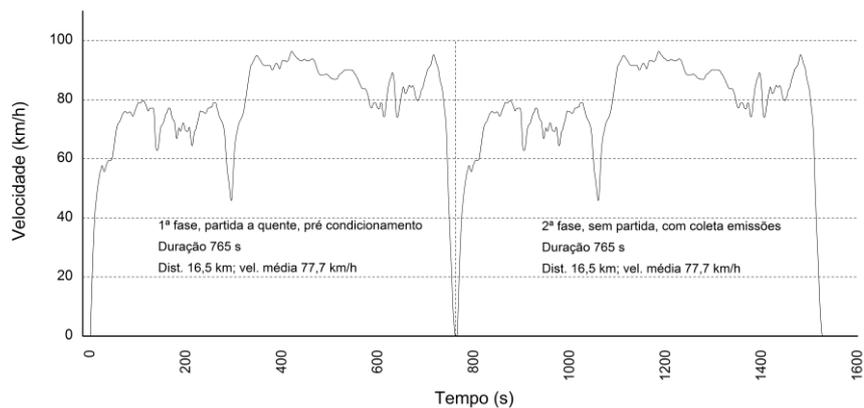


Figura 2: Ciclo de condução estrada de velocidade em função do tempo – regido pela NBR 7024.

Durante a realização dos ciclos de condução foram coletados os gases do escapamento do veículo utilizando-se um amostrador de volume constante equipado com túnel de diluição total. Os compostos regulamentados (THC, CO, CO₂, NO_x e CH₄) foram quantificados, e de acordo com sua concentração, massa total amostrada e distâncias percorridas nos testes foram determinados os níveis de emissão dos componentes legislados. Através da quantidade total de carbono emitida foi realizado o cálculo do consumo de combustível.

Os ensaios dos ciclos de condução FTP-75 e HWFET foram realizados no LEME (Institutos Lactec – Laboratório de Emissões Veiculares), localizado na cidade de Curitiba, sendo utilizado um veículo leve com motor do ciclo Otto de injeção direta *flex fuel*, homologado pela fase L-5 do PROCONVE, e suas características estão expostas na Tabela 1. O veículo empregado nos testes possuía quilometragem inicial de 1800 km, equipado com motor com sistema de comando de válvulas variável, tanto para a admissão quanto para o escapamento, possibilitando o uso de *Exhaust Gas Recirculation* (EGR) interna.

Tabela 1: Dados do veículo [20].

Veículo ano	2013
cilindrada	2,0 l
sistema de injeção	direta
pressão de combustível	180 bar
alimentação de ar	aspirado
formação de mistura	<i>wall-guided</i>
tipo de mistura	homogênea
combustível	<i>flex fuel</i>
relação ar-combustível	$\lambda=1$
transmissão	automática
Nº de marchas	6

Os testes foram conduzidos utilizando-se combustíveis de referência de acordo com a norma NBR 8689 [21] e a Resolução ANP (Agência Nacional de Petróleo) N° 40, de 25/10/2013 [22], e Resolução ANP N° 23, de 06/07/2010 [23], para a gasolina A22, com teor de enxofre de 17,2 ppm, e a Resolução ANP N° 7, de 21/02/2013 [24], para o etanol hidratado EHR.

Foram realizados quatro ensaios com o veículo abastecido com A22 e outros quatro ensaios com EHR, onde se aplicou o ciclo de condução FTP-75 para simulação de uso urbano. Com o mesmo número de ensaios aplicou-se o ciclo de condução HWFET para uma simulação de uso em estrada. As medições das emissões e consumo foram obtidas conforme as normas NBR 6601 e NBR 7024.

Como o MP emitido continua reagindo com o ar ambiente, esta condição é simulada na sala de ensaios, onde o foi utilizado um amostrador de volume constante, CVS (*Constant Volume Sampler*), com um túnel de diluição total a fim de diluir o gás de escapamento com ar ambiente. A dimensão do túnel de diluição total permite um fluxo turbulento e a mistura total entre o gás de escapamento e o ar de diluição antes do ponto de coleta da amostra, onde há dois filtros (primário e secundário), compostos de fibra de vidro recobertos com fluorcarbono. Uma fração da mistura dos gases de escapamento e ar de diluição é retirada de maneira contínua e passa através dos filtros. Dessa maneira o MP presente no fluxo fica depositado nos filtros. A massa retida é calculada comparando-se a massa dos filtros antes e após o ensaio.

Para determinação da massa de MP presente nos filtros foi utilizada uma balança CAHN C35 de resolução de 1µg. Todos os trabalhos de condicionamento e pesagem foram feitos em uma sala com ambiente controlado, com a temperatura entre 20°C e 30°C e umidade do ar entre 30% e 70%, conforme NBR 6601.

De posse dos resultados das amostras dos gases de escapamento do veículo o primeiro tratamento dos valores foi à detecção de *outliers*, que são valores dispersos das amostras, que muito provavelmente não pertençam ao mesmo conjunto de resultados. Segundo Lopes [25] antes de se interpretar uma série de resultados obtidos a partir de uma ou mais amostras, é necessário verificar a existência de valores que possam ser considerados como *outliers*.

O método utilizado para detecção de *outliers* foi o teste de Dixon que tem por objetivo identificar valores afastados da amostra e segundo Borges [26] tem a vantagem de não ser necessário o conhecimento da estimativa do desvio padrão.

O teste de Dixon, ou teste-Q, é um dos métodos para avaliar valores considerados suspeitos de pertencerem de uma população. O valor Q de Dixon é definido como a relação entre a diferença existente entre o valor suspeito e o valor mais próximo a este e a diferença entre o maior e o menor valor do conjunto de medidas [27].

A estatística utilizada é dada através da tabela de Dixon onde são encontrados os valores críticos, mostrados na Tabela 2, que são comparados com os valores retirados da amostra obedecendo ao seguinte procedimento:

1. Ordenar os dados amostrais em ordem crescente;
2. Calcular o valor de Q, para um conjunto de dados $3 < n < 7$, através da equação 1 para o valor menor do conjunto de valores e a equação 2 para valor maior;

$$Q_{\text{calculado}} = \frac{X_2 - X_1}{X_n - X_1} \text{ (equação 1)}$$

$$Q_{\text{calculado}} = \frac{X_n - X_{n-1}}{X_n - X_1} \text{ (equação 2)}$$

onde:

$Q_{\text{calculado}}$ é o valor Q para o menor e maior valor do conjunto de dados analisado;

X_1 é o primeiro valor da sequência;

X_2 é o segundo valor da sequência;

X_n é o último valor da sequência;

X_{n-1} é o penúltimo valor da sequência.

3. O valor de $Q_{\text{calculado}}$ é comparado com o valor de Q_{tabelado} , valor crítico da tabela de Dixon, para o nível de confiança desejado. Caso este não seja maior que o tabelado o valor suspeito é mantido caso contrário é rejeitado Nesta análise foi optado por um nível de confiança de 95%. A tabela 2 apresenta os valores de Q para um nível de confiança de 95%.

Tabela 2: Valores críticos de Q, nível de confiança 95% [25].

n	3	4	5	6	7	8	9	10
Q_{95}	0,970	0,829	0,710	0,625	0,568	0,526	0,493	0,466

Utilizou-se uma ferramenta estatística para análise de variância, a ANOVA (*Analysis of Variance*), que tem por objetivo comparar a igualdade entre as médias das amostras [28]. A ferramenta ANOVA foi aplicada a todos os compostos amostrados, que foram o Total de Hidrocarbonetos (THC), Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Nitrogênio (NO_x), Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4), Hidrocarbonetos Não Metano (NMHC), Material Particulado (MP), e consumo, para verificar se todos os valores das emissões entre os combustíveis diferem.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As emissões dos compostos mensurados estão representadas na Tabela 3 e Tabela 4. Observou-se que as emissões de MP aumentaram no ciclo HWFET, com valores mais significativos com combustível A22.

As tabelas com os resultados dos ensaios apresentam a média, o desvio padrão (DP) e a comparação da análise de variância ANOVA que indica se houve ou não diferença entre os tratamentos. Como exemplo, a Tabela 3, na emissão de MP entre o ciclo FTP-75 e HWFET, ambos utilizando combustível A22, as emissões de MP são diferentes e maiores para o ciclo HWFET em relação ao FTP-75.

Tabela 3: Emissões com A22.

Emissões no ciclo FTP-75 com A22 [g/km]								Consumo km/L
	THC	CO	NO _x	CO ₂	CH ₄	NMHC	MP	
Média	0,010	0,244	0,015	180,208	0,002	0,008	0,00065	12,039
DP	0,001	0,008	0,002	0,727	0,001	0,001	0,00019	0,049
Emissões no ciclo HWFET com A22 [g/km]								Consumo km/L
	THC	CO	NO _x	CO ₂	CH ₄	NMHC	MP	
Média	0,006	0,151	0,025	127,437	0,002	0,004	0,00239	17,030
DP	0,002	0,017	0,016	0,868	0,000	0,002	0,00083	0,117
	THC	CO	NO _x	CO ₂	CH ₄	NMHC	MP	Autonomia
ANOVA	≠ <	≠ <	=	≠ <	=	≠ <	≠ >	≠ >

A tabela 4 apresenta as emissões regulamentadas e de MP com uso de EHR. Observa-se que a emissão de álcool não queimado (ANQ) presente na parcela de NMHC não foi descontada conforme previsto na legislação e normatizado pela NBR 15598.

Tabela 4: Emissões com EHR.

Emissões no ciclo FTP-75 com EHR [g/km]								Consumo km/L
	THC	CO	NO _x	CO ₂	CH ₄	NMHC	MP	
Média	0,020	0,394	0,009	172,547	0,011	0,010	0,00052	8,364
DP	0,002	0,037	0,006	1,086	0,001	0,001	0,00036	0,056
Emissões no ciclo HWFET com EHR [g/km]								Consumo km/L
	THC	CO	NO _x	CO ₂	CH ₄	NMHC	MP	
Média	0,003	0,283	0,024	122,401	0,001	0,001	0,00075	11,793
DP	0,001	0,010	0,008	0,346	0,001	0,001	0,00009	0,032
	THC	CO	NO _x	CO ₂	CH ₄	NMHC	MP	Autonomia
ANOVA	≠ <	≠ <	=	≠ <	≠ <	≠ <	=	≠ >

Uma comparação das emissões de MP entre o ciclo FTP-75 e HWFET com gasolina A22 e outra com EHR é apresentada na Figura 3 e Figura 4 respectivamente. Os gráficos de comparação entre dois ciclos de condução apresentam a média de emissão de MP e a barra de erros é referente ao desvio padrão dos três ensaios realizados para cada ciclo de condução.

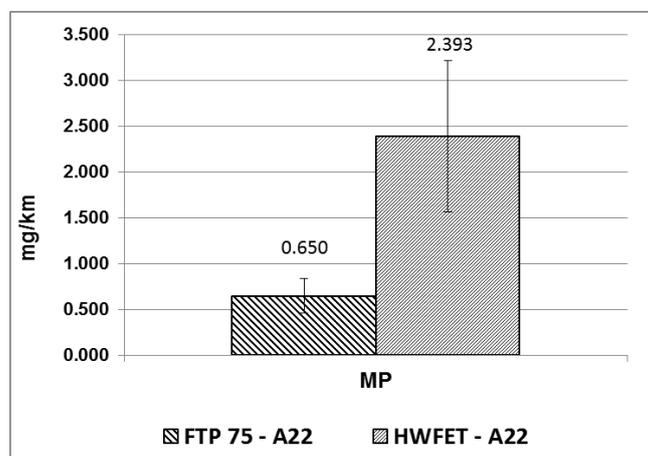


Figura 3: Emissões de MP com A22.

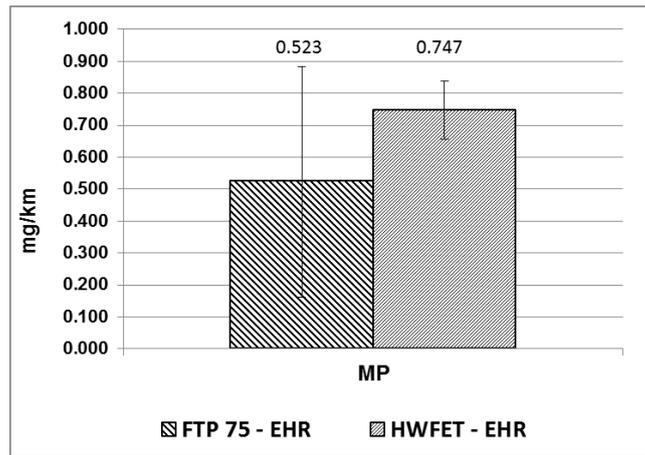


Figura 4: Emissões de MP com EHR.

A diferença dos resultados entre ambos os ciclos estudados pode ser explicado pelo uso de tecnologias de tratamento dos poluentes e calibração do motor. A Figura 5 trás a dispersão dos valores encontrados entre MP e NO_x , pois no controle das taxas de emissões de NO_x pode-se utilizar o recurso do EGR interno, que por sua vez reduz a temperatura de combustão e a concentração de oxigênio na câmara de combustão. Segundo Ostapiuk; Daemme; Penteadó [29], o EGR, em contra partida, pode influenciar negativamente nas emissões de MP com a baixa eficiência na oxidação do mesmo. Possivelmente a influência do EGR é distinta para cada combustível avaliado.

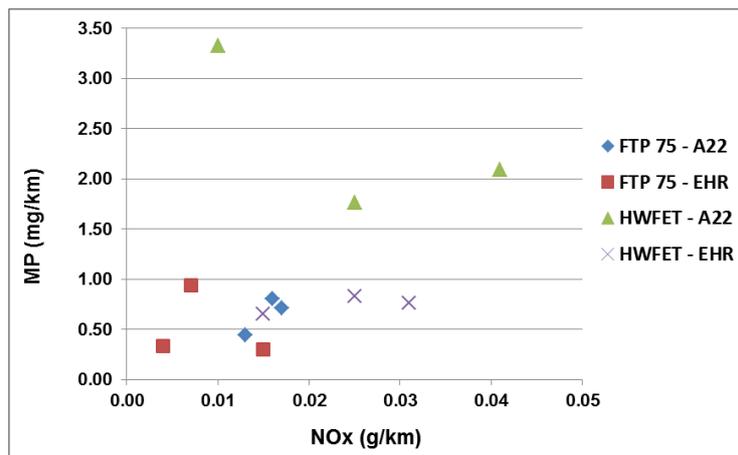


Figura 5: Dispersão dos resultados entre MP e NO_x .

Na Tabela 5 e Tabela 6 os resultados comparativos entre os dois tipos de combustíveis estudados são apresentados, sendo evidenciada uma redução dos níveis de emissões de MP com a utilização do EHR.

Tabela 5: Emissões no ciclo FTP-75.

Emissões no ciclo FTP-75 com A22 [g/km]								Consumo km/L
	THC	CO	NO _x	CO ₂	CH ₄	NMHC	MP	
Média	0,010	0,244	0,015	180,208	0,002	0,008	0,00065	12,039
DP	0,001	0,008	0,002	0,727	0,001	0,001	0,00019	0,049
Emissões no ciclo FTP-75 com EHR [g/km]								Consumo km/L
	THC	CO	NO _x	CO ₂	CH ₄	NMHC	MP	
Média	0,020	0,394	0,009	172,547	0,011	0,010	0,00052	8,364
DP	0,002	0,037	0,006	1,086	0,001	0,001	0,00036	0,056
								Autonomia
ANOVA	≠ >	≠ >	=	≠ <	≠ >	=	=	≠ <

Tabela 6: Emissões no ciclo HWFET.

Emissões no ciclo HWFET com A22 [g/km]								Consumo km/L
	THC	CO	NO _x	CO ₂	CH ₄	NMHC	MP	
Média	0,006	0,151	0,025	127,437	0,002	0,004	0,00239	17,030
DP	0,002	0,017	0,016	0,868	0,000	0,002	0,00083	0,117
Emissões no ciclo HWFET com EHR [g/km]								Consumo km/L
	THC	CO	NO _x	CO ₂	CH ₄	NMHC	MP	
Média	0,003	0,283	0,024	122,401	0,001	0,001	0,00075	11,793
DP	0,001	0,010	0,008	0,346	0,001	0,001	0,00009	0,032
								Autonomia
ANOVA	=	≠ >	=	≠ <	=	≠ <	≠ <	≠ <

As Figuras 6 e 7 apresentam as diferenças na emissão de material particulado entre os combustíveis A22 e EHR nos ciclos estudados.

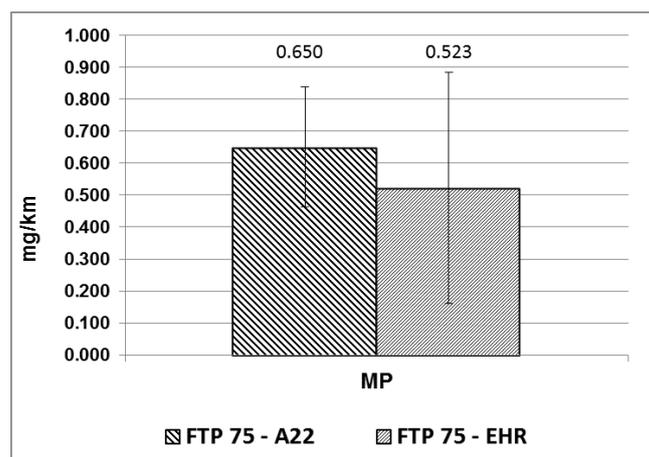


Figura 6: Emissões de MP no ciclo FTP-75.

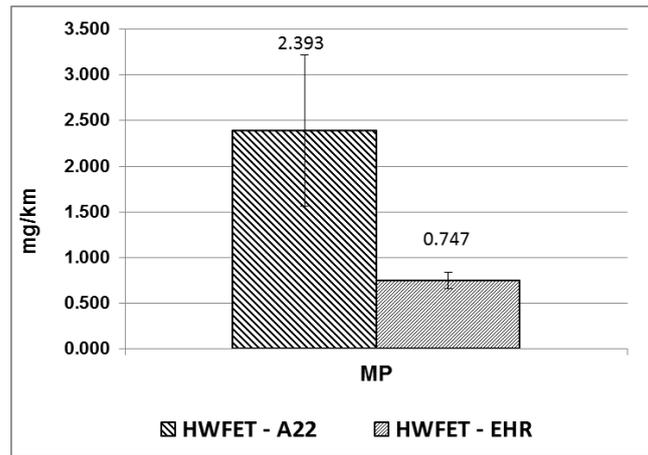


Figura 7: Emissões de MP no ciclo HWFET.

Na gasolina A22 existem compostos aromáticos, que segundo Price; *et al* [30], são conhecidos por apresentarem um significativo potencial para a formação de carbono sólido, onde as moléculas de combustível são decompostas termicamente e atômica e rearranjadas em estruturas policíclicas. Isto resulta na nucleação de partículas.

A gasolina A22 utilizada apresentava um teor de enxofre de 17,2 ppm, e Eastwood [3] cita que o enxofre presente no combustível durante o processo de combustão forma sulfetos que podem ser adsorvidos nas partículas na fase de nucleação. Esses sulfetos podem continuar a reagir consumindo um oxidante, como por exemplo, a hidroxila (OH) que deixa de oxidar outros compostos como o acetileno. Segundo Stiesch [7], o acetileno juntamente com os compostos aromáticos participam do processo de crescimento superficial da partícula, sendo o enxofre presente no combustível um elemento de formação de MP.

Maricq, *et al* [31] relatam que uma mistura de etanol à gasolina até 20% tem um impacto mínimo na emissão de MP, porém em uma mistura acima de 45% de etanol ocorre uma redução significativa nas emissões. Ainda conforme citado por Price; *et al* [30], o tipo de combustível tem maior efeito sobre as emissões de MP, seguido da relação ar-combustível, tempo de injeção e ponto de ignição.

A Tabela 7 apresenta uma comparação entre os níveis das emissões legisladas avaliadas, e as restrições impostas pela legislação atual do PROCONVE, à fase L-6.

Tabela 7: Emissões legisladas – dados PROCONVE [32].

POLUENTES	LIMITES PROCONVE L-6	EMISSIONES COM A22	EMISSIONES COM EHR
monóxido de carbono (CO em g/km)	1,30	0,244	0,394
hidrocarbonetos (THC em g/km)	0,30 ⁽¹⁾	0,010	0,020
hidrocarbonetos não metano (NMHC em g/km)	0,05	0,008	0,010
óxidos de nitrogênio (NOx em g/km)	0,08	0,015	0,009
material particulado (MP em g/km)	0,025 ⁽²⁾	0,00065	0,00052

(1) Aplicável somente a veículos movidos a GNV.

(2) Aplicável somente a veículos movidos a óleo diesel.

Obs. Para veículos DISI na Europa vigora o limite de emissão de 0,0045 g/km de MP.

O motor ciclo Otto de injeção direta *flex fuel* estudado demonstra ter um potencial favorável com relação às emissões de poluentes. Apesar do veículo ser homologado pela fase L-5 do PROCONVE, apresentou resultados abaixo dos limites da fase L-6.

Conforme citado anteriormente os resultados de NMHC desse estudo não contemplam a dedução da parcela de ANQ emitido durante o ensaio, prática regulamentada pela legislação atual.

CONCLUSÃO

Diante dos resultados apresentados, os níveis de emissões de MP foram impactados pela composição do combustível utilizado, sendo que o EHR se mostrou mais eficaz, com uma redução de 19,5% no ciclo FTP-75 e 68,9% no ciclo HWFET, em relação à gasolina A22. Os precursores da maior formação de MP foram possivelmente os compostos aromáticos e o teor de enxofre presentes na gasolina A22.

No ciclo de condução HWFET ocorreram níveis mais elevados de emissões de MP em relação ao ciclo FTP-75, principalmente com o uso da gasolina A22, que, neste caso, variou de 0,65 mg/km no ciclo FTP-75, contra 2,39 mg/km no ciclo HWFET. Com o uso de EHR, a variação das emissões não foi muito significativa. No ciclo FTP-75 foi de 0,52 mg/km e no HWFET foi de 0,75 mg/km. Possivelmente tanto o tipo de combustível como o uso de EGR influenciaram na formação de MP.

O motor, ciclo Otto de injeção direta *flex fuel*, L-5, apresentou vantagens sobre as emissões dos compostos legislados pelo PROCONVE, sendo que os resultados estiverem abaixo dos valores da fase L-6, mais restritiva, demonstrando o potencial desta tecnologia no que tange aos poluentes atmosféricos legislados.

Uma das maiores preocupações atuais quanto à emissão de material particulado, além da massa emitida, é o tamanho das partículas. Assim sugere-se que estudos futuros abordem essa temática em veículos *flex fuel* dotados dessa tecnologia.

Esses resultados limitam-se à amostra utilizada neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos Institutos LACTEC, em especial ao corpo técnico do LEME pela realização dos testes de laboratório que possibilitaram a elaboração desse estudo.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo incentivo recebido com a aplicação da Lei 8010/90 nos Laboratórios do LACTEC-LEME.

REFERÊNCIAS

- [1] BAUMGARTEN, Carsten. **Mixture Formation in Internal Combustion Engines**. Berlin: Springer, 2006.
- [2] ZHAO, F.; LAI, M.-C.; HARRINGTON, D. L. **Automotive Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines**. Elsevier, 2000.

- [3] EASTWOOD, Peter. **Particulate Emissions from Vehicles**. John Wiley & Sons, 2008.
- [4] DIMOU, Iason. **Particulate matter emissions from a DISI engine under cold-fast-idle conditions for ethanol-gasoline blends**. 2011. Tese de Doutorado. Massachusetts Institute of Technology.
- [5] MARICQ, M. Matti; SZENTE, Joseph J.; ADAMS, Jack; TENNISON, Paul; RUMPSA, Todd. Influence of mileage accumulation on the particle mass and number emissions of two gasoline direct injection vehicles. **Environmental science & technology**, v. 47, n. 20, p. 11890-11896, 2013.
- [6] VAN BASSHUYSEN, Richard; SCHÄFER, Fred. **Internal combustion engine handbook**. SAE Technical Paper, 2004.
- [7] STIESCH, Gunnar. **Modeling Engine Spray and Combustion Processes**. Springer, 2010.
- [8] DESANTES, José M.; GONZÁLEZ, Francisco Payri (Ed.). **Motores de combustión interna alternativos**. Universidad Politécnica de Valencia, 2011.
- [9] BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Blucher, 2012.
- [10] FREITAS, C. U.; PEREIRA, Luiz Alberto Amador; SALDIVA, P. H. N. Vigilância dos Efeitos na Saúde Decorrentes da Poluição Atmosférica: Estudo de Factibilidade. **CETESB, São Paulo**, 2002.
- [11] BRAGA, Alfesio; PEREIRA, Luiz Alberto Amador; SALDIVA, Paulo Hilário Nascimento. Poluição atmosférica e seus efeitos na saúde humana. **Trabalho apresentado no evento de sustentabilidade na geração e uso de energia, UNICAMP**, v. 18, 2002.
- [12] MARTINS, Jorge. **Motores de Combustão Interna**. Publindústria, 2011.
- [13] PIOCK, Walter; HOFFMANN, Guy; BERNDORFER, Axel; SALEMI, Patrick; FUSSHOELLER, Bernd. **Strategies towards meeting future particulate matter emission requirements in homogeneous gasoline direct injection engines**. SAE Technical Paper, 2011.
- [14] IBAMA. **Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários**. Janeiro, 2014.
- [15] SHARP, Bob. Injeção direta com etanol, nova experiência. **Engenharia automotiva e aeroespacial**. SAE Brasil, ano 14, nº58, abril/março 2014.
- [16] DAEMME, L. C.; PENTEADO, R.; MELO, T. C. Comparativo entre as metodologias tradicionais de medição de emissões veiculares com a técnica FTIR. **Simpósio internacional de Engenharia Automotiva–SIMEA, XX**, 2012.
- [17] BOSCH, Robert. **Manual de tecnologia automotiva**. Edgard Blucher, 2005.
- [18] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Veículos rodoviários automotores leves – Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento**: NBR 6601. Rio de Janeiro, 2012.
- [19] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Veículos rodoviários automotores leves – Medição do consumo de combustível – Método de ensaio**: NBR 7024. Rio de Janeiro, 2010.
- [20] SHARP, Bob. Injeção direta com etanol, nova experiência. **Engenharia automotiva e aeroespacial**. SAE Brasil, ano 14, nº58, abril/março 2014.
- [21] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Veículos rodoviários automotores leves - Combustíveis para ensaio - Requisitos**: NBR 8689. Rio de Janeiro, 2012.
- [22] ANP - Agência Nacional de Petróleo. Gasolina tipo C S50. **Resolução ANP N° 40**, de 25/10/2013.
- [23] ANP - Agência Nacional de Petróleo. Etanol anidro de referência. **Resolução ANP N° 23**, de 06/07/2010.

- [24] ANP - Agência Nacional de Petróleo. Etanol hidratado combustível. **Resolução ANP N° 7**, de 21/02/2013.
- [25] LOPES, Paulo Afonso. Estatística Aplicada à Análise de Resultados de Ensaios de Proficiência na Avaliação de Laboratórios. **ANVISA, Instituto Adolpho Lutz**, 2003.
- [26] BORGES, Renata Martins Horta. Introdução à validação de métodos. **Brasília: Coordenação Geral de Credenciamento–CGCRE/Inmetro–Divisão de Credenciamento de Laboratórios–Dicla**, 2006.
- [27] DE OLIVEIRA, Elcio Cruz. Comparação das diferentes técnicas para a exclusão de “outliers”. 2008.
- [28] DAEMME, L. C. **Estudo da emissão de aldeídos em motocicletas**. 2012. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)–Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento-LACTEC, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia–PRODETEC. Curitiba.
- [29] OSTAPIUK, Igor Faust; DAEMME Luiz Carlos; PENTEADO Renato. Material particulado em motores otto de injeção direta – Uma revisão atualizada da literatura. **Simpósio internacional de Engenharia Automotiva–SIMEA, XXII**, v.1, n.2, 2014.
- [30] PRICE, Philip; STONE, Richard; COLLIER, Tony; DAVIES, Marcus. **Particulate matter and hydrocarbon emissions measurements: comparing first and second generation DISI with PFI in single cylinder optical engines**. SAE Technical Paper, 2006.
- [31] MARICQ, M. Matti; SZENTE, Joseph J.; JAHR, Ken. The impact of ethanol fuel blends on PM emissions from a light-duty GDI vehicle. **Aerosol Science and Technology**, 46.5: 576-583, 2012.
- [32] IBAMA. **Manual PROCONVE PROMOT**. 3ª edição, 2011.