



EDSON VIEIRA PAIXÃO

# **Inspeção Veicular: Contribuição do Catalisador**

100/13

**CAMPINAS  
2013**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

EDSON VIEIRA PAIXÃO

## **Inspeção Veicular: Contribuição do Catalisador**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, a área de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Professor Dr. Antônio Celso Fonseca de Arruda

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO  
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO  
ALUNO EDSON VIEIRA PAIXÃO E ORIENTADA  
PELO PROF. DR. ANTÔNIO CELSO FONSECA DE  
ARRUDA



Professor Dr. Antônio Celso Fonseca de Arruda

CAMPINAS  
2013

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

P167i Paixão, Edson Vieira, 1964-  
Inspeção veicular : contribuição do catalisador / Edson Vieira Paixão. –  
Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Antônio Celso Fonseca de Arruda.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Engenharia Mecânica.

1. Veículos - Inspeção. 2. Catalisadores. I. Arruda, Antônio Celso Fonseca  
de, 1948-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia  
Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Inspection and maintenance : catalyst contribution

**Palavras-chave em inglês:**

Inspection and maintenance

Catalysts

**Área de concentração:** Materiais e Processos de Fabricação

**Titulação:** Mestre em Engenharia Mecânica

**Banca examinadora:**

Antônio Celso Fonseca de Arruda [Orientador]

Waldyr Luiz Ribeiro Gallo

Rui de Abrantes

**Data de defesa:** 01-11-2013

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DO PETRÓLEO**

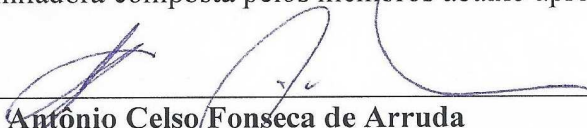
**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

**Inspeção Veicular:  
Contribuição do Catalisador**

Autor: Edson Vieira Paixão

Orientador: Professor Dr. Antônio Celso Fonseca de Arruda

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

  
\_\_\_\_\_  
**Professor Dr. Antônio Celso Fonseca de Arruda**  
FEM - UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
**Professor Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo**  
FEM - UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Rui de Abrantes**  
CETESB

Campinas, 01 de novembro de 2013.

## Resumo

O PROCONVE, programa de controle de emissões de poluentes veiculares brasileiro, instituído em 1986, definiu limites de emissões que são periodicamente atualizados. Ao longo dos anos, a indústria automobilística nacional tem desenvolvido soluções tecnológicas de controle de emissões visando atender aos referidos limites. Desde 1992, o catalisador automotivo é adotado em conjunto com outras soluções nos veículos comercializados no país.

O PROCONVE estabelece, entre outros pontos, que qualquer modelo de veículo comercializado no Brasil deve passar por uma homologação oficial, onde se verifica a conformidade dos valores de emissões de poluentes. Estabelece também que programas de verificação da conformidade dos valores de emissões da frota circulante devem ser verificados em campo. A cidade de São Paulo implementou em 2008, o programa de Inspeção Veicular para todos os veículos de sua frota circulante.

O objetivo desse trabalho é verificar a influência do catalisador automotivo nos resultados da Inspeção Veicular realizada em um veículo representativo da frota circulante. Para isso, o veículo foi devidamente instrumentado e diversos ensaios foram realizados em laboratório, para verificação da eficiência do catalisador.

Concluiu-se que, devido às características do procedimento adotado pela Inspeção Veicular, o catalisador do veículo em questão apresentou baixa eficiência, levando o veículo a ser reprovado na inspeção.

Este estudo deve ser estendido a outros veículos, bem como deve ser desenvolvido o método adotado pela Inspeção Veicular, no sentido de garantir que o catalisador funcione corretamente, durante sua realização.

*Palavras Chave: Catalisador, Inspeção Veicular.*

## **Abstract**

PROCONVE, Brazilian's Vehicle Emission Program, started in 1986, has defined emissions limits, periodically in revision process. Since then, local automotive industry is developing emission control solutions in order to reach these limits. Since 1992 automotive catalyst is adopted with other solutions on local vehicles.

PROCONVE establishes that any vehicle model sold in the country must be certificated by government, when its emissions are verified against legislation limits. It also establishes that fleet emissions conformity should be checked in field. In 2008, São Paulo city implemented its own Inspection Program for its fleet.

The objective here is verify the influence of catalyst in a Inspection procedure adopted by São Paulo city, using a fleet representative vehicle. Emissions tests were performed in a Emissions Laboratory in order to verify catalyst efficiency.

Due to the characteristic of Inspection procedure, the catalyst presented low efficiency and vehicle has been not approved.

This study should be extended to other vehicles and Inspection methods should be improved, in order to guarantee a minimum efficiency temperature for catalyst.

Key Words: Catalyst, Emissions Control

Dedico este trabalho aos meus filhos, que sempre me apoiaram nesta empreitada. Vejo aqui, a prova de que o saber não conhece idade nem momento. Oportunidades aparecem. Cabe a nós reconhecê-las e aproveitá-las.

## **Agradecimentos**

Quero agradecer minha esposa Beatriz pelo incentivo incondicional a este desafio, aos meus pais que me ensinaram o valor do estudo, ao Professor Celso pelo convite e convencimento a voltar ao mundo acadêmico e ao Eng. Stephan que, além de viabilizar minha participação nos estudos preparatórios, me ajudou a desenvolver o tema em questão.



*”A educação é o que sobra depois que gente se esquece do que aprendeu na escola.”*

Albert Einstein

## Lista de Ilustrações

1.1 – Anúncio norte americano de 1974	4
2.1 – Limites do PROCONVE em forma gráfica	11
2.2 – Laboratório de Emissões	18
2.3 – Estação I/M - Cidade de São Paulo	19
2.4 – Ciclo de condução IM-240	23
2.5 – Inspeção Veicular IM-240	24
2.6 – Histórico da frota circulante de veículos leves da cidade de São Paulo	28
2.7 – Frota da cidade de São Paulo dividida pelas fases do PROCONVE	29
2.8 – Emissões totais da frota de veículos da cidade de São Paulo	30
3.1 – Conversor catalítico	32
3.2 – Substrato com diferentes densidades de células	33
3.3 – Tipos de substratos: cerâmicos e metálicos	34
3.4 – Geometrias de substratos cerâmicos	35
3.5 – Conversor catalítico posição “ <i>Close couple</i> ”	36
3.6 – Frasco contendo “ <i>wash-coat</i> ”	38
3.7 – Partes do conversor catalítico	40
3.8 – Curva lambda x eficiência do catalisador	42
3.9 – Sensor de Oxigênio	43
4.1 – Temperatura do catalisador no ciclo ABNT NBR 6601	47
4.2 – Esquema de montagem para ensaio de “ <i>light-off</i> ” de conversor	49
4.3 – Ciclo de emissões segundo norma ABNT NBR 6601	51
4.4 – Dinamômetro de rolos ou chassis	52

4.5 – Dinamômetro de motores	55
4.6 – Dinamômetro de chassis	56
5.1 – Conversor instalado em banco de provas de motores	58
5.2 – “ <i>Light off</i> ” do catalisador do veículo em referência	58
5.3 – Gráfico de “ <i>light off</i> ” de um catalisador novo	59
5.4 – Ensaio de pré-condicionamento segundo norma ABNT NBR 10972	61
5.5 – Medição de CO e THC em marcha lenta conforme ABNT NBR 10972	64
5.6 – Limites de THC para a Inspeção Veicular da cidade de São Paulo	65
5.7 – Limites de CO para a Inspeção Veicular da cidade de São Paulo	66
5.8 – Emissões de THC em ppm	68
5.9 – Emissões de CO em %	72

## Lista de Tabelas

2.1 – Limites do PROCONVE	10
5.1 – Principais características do veículo ensaiado	57
5.2 – Resultados de “ <i>light-off</i> ”	59
5.3 – Resultados de Emissões conforme ABNT NBR 6601	60
5.4 – Cálculo da concentração de CO corrigido segundo procedimento de norma ANBT NBR 10972	62
5.5 – Cálculo da concentração de THC corrigido, baseado em norma ABNT NBR 10972	63
5.6 – Cálculo da concentração de THC corrigido @ 2500 rpm segundo CONAMA 07/93	67
5.7 – Cálculo da concentração de THC corrigido em marcha lenta segundo CONAMA 07/93	68
5.8 – Cálculo da concentração de CO corrigido @ 2500 rpm segundo CONAMA 07/93	70
5.9 – Cálculo da concentração de CO corrigido em marcha lenta segundo CONAMA 07/93	71

## Lista de Abreviaturas e Siglas

### *Letras Gregas*

$\lambda$  - razão de relação A/F ideal pela relação A/F real                      adimensional

.....

### *Abreviações*

**A/F** – Relação entre ar e combustível

**CH<sub>4</sub>** - Metano

**CO** – Monóxido de Carbono

**cpsi** – *Cell per square inches*

**GEE** – Gases de Efeito Estufa

**GNV** - Gás Natural Veicular

**MP** – Material Particulado

**NMHC** – Hidrocarbonetos não Metano

**NO<sub>x</sub>** – Óxidos de Nitrogênio

**OEM** – *Original Equipment Manufacturer*

**PCV** – *Positive Crank Ventilation*

**Pd** – Paládio

**Pt** - Platina

**RCHO** – Aldeídos totais

**Rh** - Ródio

**THC** – Total de hidrocarbonetos

.....

*Siglas*

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas

**AEA** – Associação Brasileira de Engenharia Automotiva

**CARB** - *Califórnia Air Resources Board*

**CETESB** – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

**CONAMA** – Conselho Nacional do Meio Ambiente

**EPA** – *United States Environmental Protection Agency*

**IBAMA** – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

**INMETRO** – Instituto Nacional de Metrologia

**IPT** – Instituto de Pesquisas Tecnológicas;

**MECA** - Manufacturers of Emission Controls Association

**NBR** – Norma Brasileira

**PROCONVE** - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

**RBC** – Rede Brasileira de Calibração

**SAE** – Em tradução livre: Sociedade de Engenheiros Automotivos

.....

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Breve história do controle de emissões de poluentes por veículos	2
2 REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1 O PROCONVE	7
2.2 A Indústria automobilística e o PROCONVE	15
2.2.1 Fase de certificação de um novo veículo	16
2.2.2 Fase de pós - lançamento do veículo	19
2.3 A Experiência internacional do programa I/M	21
2.3.1 O Programa I/M nos Estados Unidos	21
2.3.2 O Programa I/M na Europa	26
2.4 Inventário de emissões de poluentes na cidade de São Paulo	27
2.4.1 Frota circulante de veículos leves da cidade de São Paulo	27
3 INFORMAÇÕES TÉCNICAS	32
3.1 O conversor catalítico	32
3.1.1 Substrato	33
3.1.2 “ <i>Wash Coat</i> ”	37
3.1.3 Encapsulamento do catalisador	38
3.2 Funcionamento do catalisador	41
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	46
4.1 Ensaio realizados	46
4.1.1 Ensaio de eficiência do catalisador	46
4.1.2 Ensaio de Emissões conforme ABNT NBR 6601	49

4.1.3 Ensaio de emissões conforme ABNT NBR 10972	52
4.1.4 Ensaio de emissões conforme Resolução CONAMA 07/93	53
4.2 Equipamentos utilizados nos ensaios	54
4.2.1 Ensaio de motores (“ <i>light-off</i> ”)	54
4.2.2 Ensaio de chassis (emissões de poluentes)	55
4.2.3 Equipamentos auxiliares	56
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1 Caracterização do veículo ensaiado	57
5.2 Ensaio de referência do catalisador	57
5.3 Ensaio de referência do veículo conforme ABNT NBR 6601	60
5.4 Ensaio de emissões conforme ABNT NBR 10972	60
5.5 Ensaio de emissões conforme Resolução CONAMA 07/93	65
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	73
6.1 Conclusões	73
6.2 Sugestões para os próximos trabalhos	75
REFERÊNCIAS	76



# 1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma legislação de emissões própria, baseada em outras legislações internacionais que regulamenta os níveis de emissões de poluentes pelos veículos automotores comercializados no mercado doméstico. Pode-se dividir este controle em duas etapas distintas: Durante o processo de certificação do projeto do veículo e durante o uso pelo consumidor, após seu lançamento no mercado.

O objetivo deste trabalho é verificar a contribuição do catalisador, um dos componentes adotados para o efetivo controle das emissões de poluentes, durante o controle executado na segunda fase. Para isso, simulou-se em laboratório um ensaio de Inspeção Veicular - IM (conforme Resolução CONAMA 07/93), realizado em cidades como Rio de Janeiro e São Paulo e compararam-se os resultados encontrados com outros procedimentos oficiais adotados durante a primeira fase de controle. Esta comparação deve verificar se a metodologia adotada no ensaio IM é seletiva para a o catalisador. Para a realização dos ensaios foi utilizado um veículo representativo da frota circulante, com suas manutenções mecânicas preventivas e corretivas devidamente realizadas.

O que motivou a realização deste trabalho foi verificar se a metodologia adotada pelo referido programa IM (Resolução CONAMA 07/93) é capaz de manter ativo o catalisador do veículo durante a realização da inspeção, quando o motor do veículo não está submetido a carga. Esta condição pode provocar a desativação do componente, aumentando as emissões para a atmosfera e, eventualmente, ultrapassar os limites definidos pela legislação, gerando um resultado “falso negativo”.

## 1.1 Breve História do Controle de Emissões de Poluentes por Veículos

Desde sua invenção no final do século XIX, o automóvel sempre esteve presente na vida do homem. Com a sua popularização, vieram não só a comodidade, mas também os problemas, principalmente para os grandes centros urbanos, tais como congestionamentos e emissão de , poluição e GEE, resultado da queima ineficiente de combustíveis fósseis e renováveis.

O período pós-guerra favoreceu o aparecimento do consumo em massa, devido à oferta de produtos de alta tecnologia desenvolvidos com o know-how adquirido nos combates. Tecnologias limitadas aos artefatos bélicos foram disponibilizadas ao mercado civil, criando uma inédita oferta de produtos e serviços a preços acessíveis. Toda esta tecnologia chegou à indústria automobilística que experimentou uma importante popularização dos automóveis. Grandes e pesados modelos pós-guerra invadiram as ruas e estradas dos Estados Unidos causando, entre outros efeitos, aumento da emissão de poluentes na atmosfera e congestionamentos nos grandes centros urbanos (Mello, Hogan, 2007).

Com a popularização dos automóveis nos Estados Unidos, surgiu a preocupação da sociedade com os efeitos da poluição causada pelo seu uso. Durante os anos 50 e 60, aquele país promoveu estudos sobre as diversas fontes de poluição do ar, resultando em poucas ações práticas para seu controle. Foram ações descentralizadas por serem de origem municipal e, eventualmente, estadual. Com o passar do tempo, novas ações foram tomadas, então a nível estadual e federal, tornando o controle mais uniforme e eficaz (Meca, 2004).

O primeiro controle de emissões de poluentes em um automóvel foi adotado para limitar as emissões de hidrocarbonetos provenientes do sistema de lubrificação do motor, através do uso de um sistema denominado “*PCV*” – *positive crank ventilation*. Este sistema foi utilizado pela primeira vez em toda a linha de modelos da General Motors dos Estados Unidos em 1963 (GM, 2012).

O óleo lubrificante utilizado em motores de combustão interna possui, além da função básica de lubrificar as partes móveis, a de auxiliar na sua refrigeração. Com isso, há uma troca de calor que aquece o fluido a temperaturas típicas entre 100°C e 120°C, provocando geração de gases na parte inferior do motor, devido à evaporação dos resíduos de hidrocarbonetos diluídos no óleo lubrificante, provenientes da contaminação pelo combustível. Os primeiros projetos de motores apresentavam um respiro na parte superior visando aliviar a sobre-pressão gerada por esta evaporação. Porém esta solução causava a emissão de fumos de óleo para a atmosfera, fumos estes, responsáveis pela formação do chamado “*smog*” fotoquímico (Ganesan, 2006).

No Brasil, desde 1978, todos os veículos leves produzidos e comercializados no país devem apresentar zero emissão de gases pelo respiro do Carter (PROCONVE, 1986).

Em 1966, o estado da Califórnia introduziu através do CARB – *Califórnia Air Resources Board* órgão integrante de sua Agência de Proteção Ambiental, a primeira legislação de emissões pelo escapamento nos Estados Unidos. Em 1968, o *EPA – United States Environmental Protection Agency*, Agência Federal de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, estendeu a legislação para todos os estados norte-americanos.

Com a evolução da legislação nos Estados Unidos, surgiu a necessidade de se expandir as áreas de regulamentação, atingindo setores até então independentes. Este foi o caso dos combustíveis, cujas características físico-químicas interferem diretamente na formação da mistura ar/combustível e conseqüente geração de poluentes para a atmosfera.

Até então, a gasolina utilizada naquele e em outros países vinha aditivada com um composto chamado chumbo-tetraetila, cuja função principal era aumentar o número de octanas no combustível, mas trazendo efeitos colaterais danosos para a saúde humana e meio ambiente (Pantaroto, ET AL, 2007). Em tese, quanto maior o número de octanas de um combustível, maior a sua resistência ao fenômeno de detonação. Detonação consiste na auto-ignição da mistura não queimada, isto é, antes da passagem na frente da chama, ocasionando liberação extremamente rápida de grande parte da energia química contida na mistura, causando pressões locais muito altas e a propagação de ondas de pressão de grande amplitude através da câmara de combustão (Lukanin,

1988). Este fenômeno, que ocorre já no final do processo de combustão causa sérios problemas ao motor. Outro fenômeno anormal de combustão é denominado pré-ignição e ocorre dentro da câmara de combustão de um motor de ignição por centelha (ciclo OTTO), quando há uma combustão da mistura ar/combustível antes do tempo correto, podendo acarretar a perfuração do êmbolo. Em casos extremos, gera a quebra do motor. O surgimento da pré-ignição está associado intimamente com a temperatura dentro da câmara de combustão (Terao, 2007).

Para atendimento aos limites previstos na legislação norte americana vigentes a partir de 1974, desenvolveu-se o primeiro conversor catalítico, popularmente chamado apenas de catalisador, introduzido comercialmente em veículos de produção. Este componente, localizado no sistema de exaustão do veículo, facilita a ocorrência de reações químicas específicas em seu interior, auxiliando na redução das emissões de poluentes para a atmosfera. Porém, sua composição é incompatível com o chumbo tetraetila, pois este componente, em contato com os metais ativos presentes no catalisador, o inutiliza permanentemente (Shelef, McCabe, 2000). Desta forma, antes do lançamento dos primeiros modelos equipados com o novo dispositivo de controle de emissões, houve uma campanha das montadoras daquele país para que a indústria do petróleo desenvolvesse outros aditivos antidetonantes inofensivos ao conversor catalítico (UNEP, 1999). A figura 1.1 apresenta um anuncio de venda de veículo modelo 1975 equipado com catalisador.



Figura 1.1: Anúncio norte americano de 1974 – crédito: cardomain

No Brasil, a PETROBRAS retirou o chumbo-tetraetila da gasolina comercializada no país a partir do início dos anos 90, para que fosse viabilizada a utilização dos primeiros conversores catalíticos nos veículos produzidos e comercializados localmente. O composto foi substituído pelo etanol anidro, sendo utilizado eficientemente até os dias atuais. Esta solução, inédita na época, foi adotada posteriormente por diversos outros países, com sucesso (UNEP, 1999).

A partir dos anos 80, os países em desenvolvimento, entre eles o Brasil, presenciaram a incorporação do automóvel na vida do cidadão comum, o que causou um importante incremento da frota circulante nos grandes centros urbanos. Como consequência, as diversas legislações de controle de emissões veiculares evoluíram, acompanhando as tendências das legislações norte americana e europeia. Esta evolução implicou no desenvolvimento de tecnologias capazes de atenderem aos novos limites (IBAMA, 2011), surgindo especificamente no Brasil:

- Sistemas de injeção eletrônica de combustível em substituição ao sistema essencialmente mecânico dos carburadores;
- Sistemas de controle de combustão “*closed-loop*”, cuja função é monitorar a qualidade da combustão através de um sensor de concentração de oxigênio instalado no sistema de exaustão do veículo, ajustando em tempo real, a relação da mistura ar / combustível mais adequada;
- Motores equipados com turbo - compressores, podem ser capazes de aumentar a eficiência termodinâmica do motor, produzindo mais trabalho com mesma quantidade de energia advinda do combustível, através da utilização da energia originalmente dissipada no sistema de exaustão de gases após a combustão da mistura ar/combustível.

Com o aumento da frota circulante, houve um conseqüente aumento da carga de poluentes emitidos na atmosfera. Se por um lado os fabricantes de veículos devem produzir veículos que se enquadrem na legislação de emissão de poluentes, por outro lado, torna-se necessário garantir que tais limites sejam atendidos durante a vida útil do automóvel. Este controle sobre o veículo em uso é chamado de Inspeção Veicular nos Estados Unidos, sendo realizado naquele país desde o início dos anos 90 (CAA, 1990). No Brasil, há dois programas distintos de inspeção da frota circulante ativos no ano de 2013:

- O pioneiro programa foi implementado na cidade do Rio de Janeiro no ano de 1997 e foi batizado de: “Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - Programa de I/M” (INEA, 2012).
- O Segundo programa foi implementado em 2008 na cidade de São Paulo com o nome de “Programa IM – SP”, através do decreto da Prefeitura da cidade de São Paulo. nº 50.232 de 17 de Novembro de 2008.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 O PROCONVE

A história do controle de emissões veiculares pelo escapamento no Brasil iniciou-se com a criação do PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – instituído através da Resolução do CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente - número 18/1986, conselho esse, sob responsabilidade do IBAMA – Instituto Nacional do Meio Ambiente.

O PROCONVE regulamenta as emissões de todos os tipos de veículos automotores, sejam eles leves ou pesados, equipados com motores do ciclo OTTO ou DIESEL, alimentados por Gasolina, Etanol, GNV (Gás Natural Veicular) ou Diesel, utilizados em vias públicas ou fora delas (“*on Road*” e “*off-road*”).

Este trabalho se limitará ao estudo das emissões pelo escapamento dos veículos leves, equipados com motores ciclo OTTO. A citada Resolução define “Veículo Leve” como:

*“VEÍCULO LEVE: veículo rodoviário automotor de passageiros, de carga ou de uso misto, com capacidade para transportar até doze passageiros ou com massa total máxima igual ou inferior a 2800 quilogramas.”*

Após a implantação do PROCONVE em 1986, diversas outras resoluções do CONAMA foram publicadas, acrescentando e regulamentando novas fases, limites e procedimentos deste programa. As principais resoluções, relacionadas aos veículos leves são:

- 003/1989 – Determinação dos limites de emissões de aldeídos;
- 004/1989 – Determinação dos limites de emissões de THC (Hidrocarbonetos Totais) por veículos movidos a etanol;
- 015/1989 – Regulamentação do uso do metanol como combustível veicular;

- 007/1993 – Estabelece a implantação de “Programas de Inspeção e Manutenção para Veículos Automotores em Uso - I/M”;
- 282/2001 – Estabelece requisitos básicos para os conversores catalíticos destinados ao mercado de reposição;
- 315/2002 – Estabelece novas fases do PROCONVE;
- 354/2004 – Estabelece a adoções de sistemas de diagnose OBD (*On Board Diagnose*);
- 415/2009 – Estabelece nova fase do PROCONVE;
- 418/2009 – Estabelece critérios para criação do PCPV – Planos de Controle da Poluição Veicular e do IM – Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso.

Estas resoluções são publicadas com base em legislações internacionais. No caso das emissões pelo escapamento de veículos leves, o programa brasileiro se baseou na legislação dos Estados Unidos definida no *CFR – Code of Federal Regulations* – Título 40 - Parte 86, que define a legislação daquele país para o controle de emissões de poluentes por veículos automotores, sejam eles leves ou pesados (EPA, 2013). Desta forma, a legislação brasileira se norteia pelos procedimentos e ciclos definidos por aquele programa, ajustado para a realidade local, levando-se em conta, entre outros pontos, o combustível utilizado, sistema de medição métrico (ao invés do Imperial, utilizado nos procedimentos originais), condições de uso do veículo, velocidades de trocas de marchas, etc.. A evolução do PROCONVE é resultado de estudos técnicos realizados pela comunidade automotiva do país em instituições técnicas delegadas pelos órgãos federais, estaduais e municipais, a saber:

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- AEA – Associação Brasileira de Engenharia Automotiva;
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo;
- IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis;
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia;
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas;
- SAE – Em tradução livre: Sociedade de Engenharia Automotiva;



- Universidades de Tecnologia e Engenharia do país;
- Outras entidades.

No caso dos veículos leves equipados com motores do ciclo OTTO, as seguintes emissões são regulamentadas:

- Emissões evaporativas: Combustível (THC) evaporado do veículo antes de chegar à câmara de combustão (evaporação pelo reservatório, linhas, galerias e cubas de combustível). Este ensaio é realizado conforme procedimento descrito na norma ABNT NBR 11481 e dividido em duas fases: fria e quente. Na fase fria, o veículo é posicionado dentro de uma câmara hermética após ter seu reservatório de combustível abastecido com 40% de sua capacidade. O reservatório é então, aquecido, visando simular um veículo estacionado ao sol. A concentração de THC dentro do ambiente da câmara é monitorada e registrada durante um período de 60 minutos. Na fase quente, o veículo é posicionado dentro da mesma câmara hermética após a realização de um ciclo em dinamômetro de chassi de, aproximadamente, 18 quilômetros, segundo norma ABNT NBR 6601. Da mesma forma que a fase fria, as concentrações de THC, desta vez provenientes da evaporação de combustível não queimado devido ao aquecimento do motor, é monitorada e registrada pelo mesmo período de 60 minutos. O resultado final do ensaio é dado em gramas de THC evaporado e é resultado da soma das duas fases.
- Emissões pelo escapamento, ou seja, oriundas da combustão do motor. Este ensaio é realizado conforme procedimento descrito na norma ABNT NBR 6601 e está explicado detalhadamente no item 4.1.1. Neste procedimento, as seguintes emissões de poluentes são medidas e os resultados apresentados em g/km:
  - Hidrocarbonetos totais (THC);
  - Hidrocarbonetos não-metano (NMHC);
  - Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>);
  - Monóxido de Carbono (CO);
  - Aldeídos totais (CHO).

Analisadas as diversas resoluções do CONAMA que compõem o PROCONVE, montou-se o quadro da tabela 2.1, que define os limites de emissões de poluentes definidos para cada fase

Ano		1988	1992	1997	2007	2009	2014
	Fase	L1	L2	L3	L4	L5	L6
THC	[g/km]	2,1	1,2	0,3	-	-	-
NMHC	[g/km]	-	-	-	0,16	0,05	0,05
NOx	[g/km]	2,0	1,4	0,6	0,25	0,12	0,08
CO	[g/km]	24,0	12,0	2,0	2,00	2,00	1,30
CHO	[g/km]	-	0,15	0,03	0,03	0,02	0,02
CO ML	[%]	3,0	3,0	0,5	0,50	0,50	0,20

Tabela 2.1: Limites do PROCONVE

Fonte: Resoluções CONAMA 18/86 – 03/89 – 315/02 – 415/09

Com base nos dados da tabela 2.1, criou-se uma representação gráfica dos limites do PROCONVE

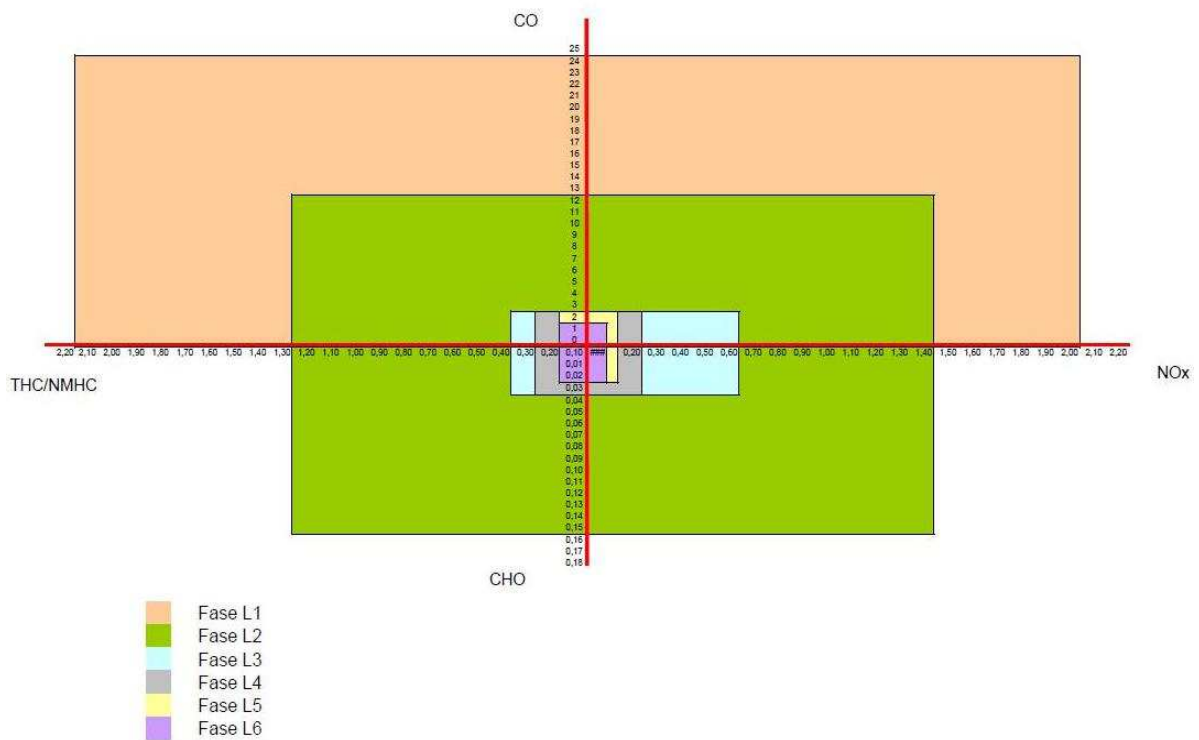


Figura 2.1 Limites do PROCONVE em forma gráfica – Fonte: elaboração própria

As principais fontes e perigos destes poluentes são (MMA, 2011):

- Monóxido de carbono (CO): as emissões de CO resultam da combustão incompleta do carbono contido no combustível. O CO é um gás asfíxiante ;
- Hidrocarbonetos não metano (NMHC): a queima incompleta do combustível no motor gera também emissões de NMHC. A classificação desses compostos abrange toda a gama de substâncias orgânicas presentes in natura nos combustíveis, bem como subprodutos orgânicos derivados da combustão, exceto o metano (CH<sub>4</sub>). São substâncias cancerígenas e precursoras da formação de ozônio (O<sub>3</sub>) no nível troposférico;
- Óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>): grupo de gases altamente reativos, compostos por nitrogênio (N<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>) em quantidades variadas. São formados pela reação de

oxigênio ( $O_2$ ) e nitrogênio ( $N_2$ ) presentes no ar sob condições de alta temperatura e elevada pressão. Juntamente com os hidrocarbonetos não metano (NMHC) e os aldeídos (RCHO), são precursores da formação de ozônio ( $O_3$ ) no nível troposférico. Estes gases são nocivos aos seres vivos;

- Aldeídos (RCHO): o processo de combustão pode levar também à geração de compostos com o radical carbonila. Os mais comuns são o acetaldeído e o formaldeído. Também participam na formação de ozônio ( $O_3$ ) no nível troposférico;

A cada nova fase do PROCONVE, cabe à indústria automobilística encontrar a solução técnica mais adequada para o atendimento aos limites definidos. Assim como os principais programas de controle de emissões de poluentes em vigor no mundo, o PROCONVE não obriga nenhum fabricante ou importador a utilizar qualquer equipamento ou sistema de controle de emissões. O programa se limita a estabelecer os limites máximos permitidos para as emissões de cada poluente controlado, cabendo ao fabricante desenvolver seu sistema de controle mais adequado. Segundo o 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, divulgado em 2011 pelo MMA, as principais evoluções ocorridas a cada nova fase foram:

- Fase L1 - 1988-1991:

Caracterizada pela eliminação dos modelos mais poluentes e aprimoramento dos projetos dos modelos já em produção. Iniciou-se também nesta fase o controle das emissões evaporativas. As principais inovações tecnológicas que ocorreram nesta fase foram:

- Reciclagem dos gases de escapamento para controle das emissões de óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ); injeção secundária do ar no coletor de exaustão para o controle de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (THC);
- Implantação de amortecedor da borboleta do carburador para controle do THC e otimização do avanço da ignição.

- Fase L2 - 1992-1996:

A partir dos limites verificados na Resolução CONAMA nº 18 de 1986, nessa fase investiu-se na adequação de catalisadores e sistemas de injeção eletrônica para uso com mistura de etanol. As principais inovações nos veículos foram:

- A injeção eletrônica de combustível, em substituição aos carburadores convencionais, essencialmente mecânicos;
- Os carburadores assistidos eletronicamente, com maior controle na formação da mistura ar/combustível;
- Conversores catalíticos de oxidação (THC e CO) e três vias (THC, CO e NO<sub>x</sub>).

- Fase L3 - 1997-2004:

Em face da exigência de atender aos limites estabelecidos a partir de 1º de janeiro de 1997, ocorreram reduções significativas em relação aos limites anteriores e o fabricante / importador empregou, conjuntamente, as melhores tecnologias disponíveis para a formação de mistura e controle eletrônico do motor como, por exemplo:

- O sensor de oxigênio (denominado "sonda lambda");
- Conversor catalítico de três vias mais eficientes e com menor contra-pressão dos gases de exaustão;
- Adoção de conversores catalíticos localizados próximos ao coletor de exaustão do motor e resistentes a maiores temperaturas de trabalho.

- Fase L4 - 2005-2008:

Tendo como referência a Resolução CONAMA nº 315 de 2002, a prioridade nesta fase que teve início no ano de 2005 é a redução das emissões de THC e NO<sub>x</sub>, poluentes

precursores da formação de ozônio. Para o atendimento desta fase, se deu o desenvolvimento de motores com novas tecnologias:

- Otimização da geometria da câmara de combustão;
  - Otimização das válvulas de injeção de combustível;
  - Aumento da pressão de injeção de combustível;
  - Conversores catalíticos desenvolvidos para o combustível local.
- Fase L5 - 2009-2013:

Com os limites de emissão da Resolução CONAMA nº 315 de 2002, da mesma forma que na fase L4, a prioridade na fase L5 foi a redução das emissões de THC e NO<sub>x</sub>. De maneira análoga à fase L4, as inovações tecnológicas se deram na otimização da geometria da câmara de combustão e dos bicos, o aumento da pressão de injeção de combustível.

- Fase L6 - a partir de 2014:

Em 2009, o CONAMA, ao aprovar a Resolução nº 415, introduziu a Fase L6 a partir de 2014. A fase L6 estabelece, basicamente, novos limites máximos para a emissão de escapamento de veículos automotores leves novos de passageiros de massa menor ou igual a 1.700 quilogramas e veículos leves comerciais com massa superior a 1.700 quilogramas. Ambas as categorias são para uso rodoviário, e contemplam tanto veículos do ciclo Otto quanto veículos do ciclo Diesel. Para o futuro ainda está prevista a introdução de catalisadores de oxidação, de filtro de particulados e de recirculação de gases em veículos do ciclo Diesel.

A partir da fase L3, que entrou em vigor no mês de Janeiro de 1997 (CONAMA, 1986), qualquer modelo de veículo leve comercializado no país, possui em seu sistema de controle de emissões, pelo menos os seguintes componentes:

- Sistema de injeção eletrônica multiponto: uma válvula injetora de combustível para cada cilindro, possibilitando um melhor controle da relação ar/combustível para cada cilindro e reduzindo as emissões de poluentes para a atmosfera;
- Conversor catalítico de três vias: Reator químico composto de substratos cerâmicos ou metálicos, impregnados com metais do grupo da Platina (Platina, Paládio e Ródio) e montados no sistema de exaustão do veículo. Promovem a reação de oxidação dos compostos THC, CHO e CO, bem como a reação de redução do NO<sub>x</sub>;
- Controle fechado de combustão (“*closed loop*”): através do sensor de oxigênio fabricado a base de Zircônia em contato direto com os gases de exaustão (localizado no sistema de exaustão), a central de controle do motor ajusta continuamente, a relação ar/combustível de cada cilindro para o valor estequiométrico, visando ajustar a janela de funcionamento do conversor catalítico.

Importante ressaltar que, embora este trabalho se dedique ao estudo das emissões em veículos leves, o PROCONVE também estipula limites para os veículos pesados (do ciclo Diesel) a partir da resolução do CONAMA N° 08/1993 e sucedâneas, bem como para as motocicletas e ciclomotores, a partir da resolução do CONAMA, N° 297/2002 e sucedâneas.

## **2.2 A indústria automobilística e o PROCONVE**

O motor de combustão interna que equipa um veículo leve é uma máquina de baixa eficiência energética. Motores atuais conseguem transformar não mais que 30% da energia contida no combustível em trabalho nas rodas motrizes (Lang, 2007). As principais perdas ocorrem em forma de calor no sistema de exaustão, troca térmica com o fluido de refrigeração e perdas mecânicas.

Outra fonte de ineficiência está relacionada ao fato do processo de combustão da mistura ar/combustível não ser completa (Stone, 1999). Uma parcela do combustível, que é formado

basicamente de cadeias de hidrocarbonetos, não é completamente queimada, gerando as emissões de poluentes controlados pelo PROCONVE: Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarbonetos (THC), Aldeídos (CHO), entre outros subprodutos não controlados. No caso do NO<sub>x</sub>, também controlado pelo PROCONVE, sua formação se dá dentro da câmara de combustão e é proporcional à temperatura da chama, bem como sua duração (Benson, Whitehouse, 1979).

Segundo o PROCONVE, o controle de emissões de um veículo leve é dividido em duas etapas distintas:

### **2.2.1 Fase de certificação de um novo veículo**

É a etapa que compreende o desenvolvimento e o lançamento de um novo veículo ou uma nova configuração de um veículo. Em tese, todo novo veículo ou configuração deve passar pelo processo de certificação de seu sistema de controle de emissões (CONAMA, 1986). Este processo consiste em demonstrar ao IBAMA que o veículo atende aos limites definidos pelo PROCONVE, na época de seu lançamento no mercado. Visando otimizar o processo, reduzindo custos e prazos, o fabricante do veículo pode agrupar motores e modelos semelhantes em uma única família. Seguindo critérios específicos, escolhe-se um representante da família e realizam-se os ensaios de certificação neste modelo. Assim, todos os modelos pertencentes àquela família estarão aptos a serem comercializados no mercado. Os principais critérios para agrupamento de uma família de motores ou veículos são (ABNT NBR 14008, 2007):

- a. Tipo de combustível;
- b. Número de cilindros do motor;
- c. Configuração do bloco;
- d. Capacidade volumétrica nominal;
- e. Distância entre centros de cilindros do motor;
- f. Relações de câmbio;
- g. Tipo e posição do conversor catalítico.



O fabricante do veículo deve garantir uma durabilidade mínima de 80.000 km ou 5 anos de uso (o que ocorrer primeiro) para o sistema de controle de emissões que equipa a família de veículos, “desde que o consumidor cumpra com o plano de manutenção definido pelo fabricante.” (CONAMA 18/86). Para comprovação desta durabilidade, o veículo representativo da sua família deve realizar uma rodagem por 80.000 km seguindo um ciclo específico determinado pela norma ABNT NBR 14008. Ensaios de emissões devem ser realizados periodicamente para levantamento do fator de deterioração das emissões. O PROCONVE define ainda procedimentos para “a Certificação de Conformidade da produção com os limites máximos de emissões” através da realização de ensaios de emissões em uma parcela da produção de veículos novos, já incluído aos resultados, o fator de deterioração da família a qual pertence o veículo.

Após a homologação de veículo ou uma nova configuração, o IBAMA emite LCVM – Licença para Uso da Configuração de Veículos ou Motor. De posse da LCVM, o fabricante poderá providenciar o registro do veículo no sistema RENAVAL – Registro Nacional de Veículos Automotores, no DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito, para que o novo modelo seja autorizado a ser comercializado no mercado nacional (CONAMA, 1986).

Os ensaios de homologação são realizados em laboratórios de emissões acreditados pelo INMETRO conforme norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 - Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração, ou reconhecidos pelo IBAMA. Estes ensaios seguem normas definidas pela legislação, a saber:

- ABNT NBR 6601 — Veículos rodoviários automotores leves — Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento;
- ABNT NBR 8689 — Veículos rodoviários automotores leves — Combustíveis para ensaio — Requisitos;
- ABNT NBR 10312 — Veículos rodoviários automotores leves — Determinação da resistência ao deslocamento por desaceleração livre em pista de rolamento e simulação em dinamômetro.

- ABNT NBR 10972 — Veículos rodoviários automotores leves — Medição da concentração de monóxido de carbono no gás de escapamento em regime de marcha lenta — Ensaio de laboratório;
- ABNT NBR 12026 — Veículos rodoviários automotores leves — Determinação de aldeídos e cetonas contidos no gás de escapamento, por cromatografia líquida — Método DNPH;
- ABNT NBR 15598 — Veículos rodoviários automotores leves — Determinação de etanol não queimado contido no gás de escapamento, por cromatografia gasosa — Método de ensaio;
- ABNT NBR 11481 – Veículos rodoviários automotores leves — Medição da emissão evaporativa.

A figura 2.2 apresenta parte de um típico laboratório de emissões, durante a realização do ensaio conforme norma ABNT NBR 6601.



Figura 2.2: Laboratório de Emissões. Fonte: Arquivo SECS

### 2.2.2 Fase de pós - lançamento do veículo:

Nesta fase, cabe ao consumidor seguir as recomendações de uso e manutenção do veículo, visando garantir a normalidade das emissões durante a vida útil do modelo. Para verificação sistêmica do nível de emissões da frota circulante no país, o CONAMA definiu já na criação do PROCONVE em 1986, a necessidade de se inspecionar a referida frota, conforme artigo 3.11 da resolução do CONAMA 18/86

*“As administrações Estaduais e Municipais poderão colocar em prática programas de inspeção e manutenção para veículos automotores em uso, adotando os limites de emissão específicos já estabelecidos em legislação existente ou que venha a ser definidos pelo CONAMA.”*

Esta necessidade foi reforçada pela Resolução do CONAMA número 07/93 que define a implantação de “*Programas de Inspeção e Manutenção para Veículos Automotores em Uso - I/M*”, conforme seu artigo 2:

*“Art. 2º Os Programas de I/M serão implantados prioritariamente, a critério dos órgãos estaduais e municipais competentes, em regiões que apresentem um comprometimento da qualidade do ar, devido às emissões de poluentes pela frota circulante.”*

Para esta verificação, o programa prevê a instalação de postos de inspeção nos centros urbanos. A figura 2.3 ilustra uma típica estação de I/M:.



Figura 2.3: Estação I/M – Cidade de São Paulo. Fonte: Controlar

A primeira fase está implementada, funcionando de forma estruturada e satisfatória, conforme tabela 2.1 já apresentada anteriormente. Os fabricantes de veículos automotores do país atendem aos requisitos solicitados pela legislação, através dos diversos laboratórios de emissões espalhados pelo país, contabilizando em 2013, 15 unidades. (INMETRO, 2012). O programa de emissões brasileiro é reconhecido internacionalmente e, devido à singularidade dos combustíveis nacionais, o país é pioneiro no controle de emissões de poluentes em veículos movidos a etanol hidratado, tais como Aldeídos totais (CHO) e álcool não queimado (ENQ). Os Ensaio de certificação são coordenados nacionalmente pela CETESB (com a devida delegação do IBAMA), que conta com um corpo de técnicos capacitados a acompanhar e analisar todas as atividades pertinentes ao processo de certificação de um novo veículo.

A Segunda fase, ainda está em implantação, sendo que a primeira experiência bem sucedida surgiu apenas em 1997, quando o governo do Estado do Rio de Janeiro, por meio de convênio de cooperação técnica entre a FEEMA e o DETRAN-RJ, lançou o “Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - Programa de I/M” (INEA, 2012). Esta experiência iniciou-se na região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro e se estendeu posteriormente para todo o estado. A verificação das emissões segundo a Resolução do CONAMA 07/93 iniciou-se apenas nos veículos de serviço (caminhões, ônibus, taxis, utilitários), abrangendo os veículos particulares (veículos leves e motocicletas) a partir de 2008. Esta inspeção é obrigatória para todos os veículos fabricados a partir de 1998 e, em caso de reprovação, não é permitido seu licenciamento anual.

Em 2008, a Prefeitura da cidade de São Paulo, através do Decreto Municipal nº 50.232, regulamentou o “Programa I/M-SP”. Assim como o pioneiro serviço do Governo do Estado do Rio de Janeiro, o programa paulistano é baseado na Resolução do CONAMA 07/93.

O fato de ambos os programas se basearem em uma resolução publicada em 1993, restringe seus resultados. Naquele ano, o PROCONVE estava em sua segunda fase (L2), quando sistemas mecânicos de controle do motor como carburadores e carburadores eletrônicos, ainda eram amplamente utilizados (MMA, 2011). Em duas décadas, a indústria automobilística nacional se beneficiou das tecnologias disponibilizadas pelos fornecedores de equipamentos e sistemas de controle motor, disseminando a utilização de auxílios eletrônicos, bem como de novas tecnologias

de pós-tratamento dos gases de exaustão. Isto se deu devido a dois principais fatores: abertura do país para as importações de máquinas e equipamentos e a implantação das novas fases do PROCONVE. Apesar desta grande evolução tecnologia da indústria, o método de medição descrito na Resolução 07/93 não foi devidamente atualizada.

A frota circulante média de veículos leves no estado de São Paulo é de, aproximadamente, 12 anos (CETESB, 2013). Desta forma, é correto afirmar que o método descrito pela Resolução 07/93 seria eficiente para verificar nos níveis das emissões de poluente de apenas parte da frota circulante. Neste caso, da frota mais antiga. Tecnologias implementadas nos veículos após a publicação da referida Resolução deveriam contar com diferentes metodologias de ensaio devidamente atualizadas.

## **2.3 A experiência internacional do programa I/M**

### **2.3.1 O programa I/M nos Estados Unidos**

O programa adotado pelos Estados Unidos é denominado de “*Enhanced I/M*”. É um programa coordenado pelo EPA, mas realizado pela maioria dos estados daquele país. Este programa está em constante desenvolvimento e pode ser dividido em três fases principais, tendo cada uma, procedimentos específicos para verificação do nível de emissões de poluentes da frota circulante daquele país (CFR, 2013):

- Veículos fabricados até 1986: Ensaio realizado no veículo com o motor funcionando sem carga e em regime de marcha lenta. Este procedimento é similar ao adotado atualmente pela legislação brasileira. É um procedimento que verifica as emissões de THC e CO com o motor funcionando sem carga, o que limita a verificação do sistema de emissões do veículo. O NOx não é verificado, pois este poluente é gerado com o aumento da temperatura

dentro da câmara de combustão e este aumento se dá quando o veículo é submetido a cargas parciais e totais (Benson, Whitehouse, 1979). Outro ponto vulnerável deste procedimento é a relativa facilidade em fraudar o ensaio, através de ajustes nas condições do motor que afete seu desempenho e dirigibilidade, características não verificadas neste procedimento. Após a aprovação no ensaio de emissões, o veículo tem suas características originais restabelecidas. Esta fraude é chamada de “*ajustar para passar e reajustar depois*” (Branco, ET AL, 2012). Este método exige que o consumidor se desloque até um posto de inspeção para realização do procedimento. O equipamento utilizado é um analisador de três gases (THC, CO e CO<sub>2</sub>), um tacômetro para medição da rotação do motor e ferramentas manuais para eventuais desmontagens parciais do motor, visando acessar os pontos de medição;

- Veículos fabricados entre 1986 a 1996: São submetidos ao ensaio IM-240 É uma evolução do ensaio anterior, onde o veículo é ensaiado sobre um dinamômetro de rolos similar ao utilizado em laboratório. Este ensaio foi desenvolvido pelo EPA e é adotado pela maioria dos estados daquele país. A grande diferença em relação à metodologia anterior está relacionada à faixa de carga aplicada ao motor do veículo. Neste procedimento, o dinamômetro aplica cargas similares às encontradas em vias de rolamento, aproximando-se das características do ensaio de emissões realizado em laboratório e aproximando a inspeção das condições normais de uso do veículo. Como o próprio nome diz, tem a duração de 240 segundos (4 minutos) onde o THC, CO e NO<sub>x</sub> são verificados (Cagle, Probst 1997). O veículo é ensaiado com seu motor à temperatura normal de funcionamento. Esta condição otimiza o funcionamento do catalisador (equipamento comumente encontrado nos modelos de veículos fabricados a partir de 1986), que é mantido em operação térmica pela carga aplicada ao veículo durante a realização do ensaio. Neste tipo de inspeção, o dinamômetro deve ser ajustado para cada modelo de veículo. Utiliza-se a inércia equivalente ao seu peso, bem como sua resistência ao rolamento. O veículo deve ser conduzido conforme um ciclo específico, demonstrado no gráfico da figura 2.4.

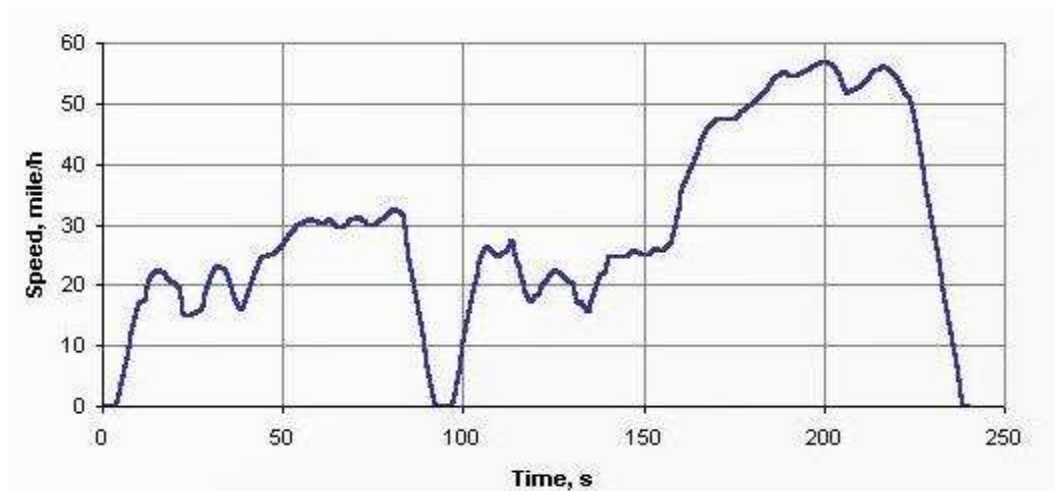


Figura 2.4: Ciclo de condução IM-240. Fonte: dieselnet.com

Diversos parâmetros são registrados durante a realização do ensaio: distância percorrida, velocidade a cada segundo, concentrações dos gases de exaustão – CO, CO<sub>2</sub>, THC e NO<sub>x</sub>, etc. Cálculos são realizados e o resultado é fornecido após o ensaio (EPA, 2000).

Apesar deste procedimento verificar as emissões de poluentes em condições de carga, ainda é passível de fraudes. Neste caso, os equipamentos utilizados são mais complexos, consistindo de um dinamômetro de rolos com a respectiva estrutura para ancoragem segura do veículo, uma bancada de analisadores de 4 ou 5 gases (THC, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e eventualmente, O<sub>2</sub>), sistema de exaustão com medição do volume de gás e computador para cálculo das emissões em regime transientes durante a acelerações e desacelerações do motor (Gordon, 2012). A área destinada aos ensaios é maior que a anterior, exigindo propriedades e investimentos maiores. A figura 2.5 mostra uma típica estação de Inspeção IM 240.



Figura 2.5 – Inspeção Veicular IM -240. Fonte: Gordon-Darby

- Veículos fabricados a partir de 1996: Verificação pelos códigos de falha OBDII. OBD é a sigla em inglês de “*On Board Diagnosis*”, ou, numa tradução livre para o português, “Diagnose no veículo durante seu uso”. Com o advento dos sistemas de gerenciamento eletrônico dos motores, os fabricantes de veículos desenvolveram rotinas de verificação das condições de funcionamento do conjunto motor/veículo, informando ao condutor as eventuais avarias presentes nos sistemas de injeção, elétrico, admissão, exaustão, arrefecimento, etc. através de luzes spia localizadas no painel de instrumentos. Não havia padronização e cada fabricante possuía sua própria estratégia. Em 1996, após estudos conjuntos entre os fabricantes de veículos e o governo norte-americano, os diversos sistemas foram padronizados e sua rotina regulamentada (de La Torre, 2002), surgindo o sistema OBD. Através de um dispositivo de diagnose, ligado a um conector elétrico padronizado, é possível verificar todas as falhas presentes e passadas na memória de avarias



do veículo. Esta memória é protegida contra fraude e retém os dados até que um sistema autorizado faça os devidos reparos e efetue a eliminação da memória de erros. O sistema tornou-se confiável a ponto de ser utilizado pela maioria dos estados norte-americanos durante as inspeções previstas no programa I/M daquele país. Isto só se tornou possível, graças aos esforços do governo para torná-lo padrão.

No Brasil, este sistema está em desenvolvimento desde 2007 e recebe o nome de OBD Br2. Este sistema pode verificar diversos componentes (sensores e atuadores) do sistema de controle de emissões do veículo, tais como (MMA, 2006):

- Sensores de Oxigênio;
- Sensores de temperatura do ar
- Sensores de temperatura da água de refrigeração;
- Sensores de vazão mássica do ar;
- Sensores de detonação;
- Atuadores de marcha lenta;
- Válvulas injetoras;
- Válvulas EGR;
- Conversores catalíticos;
- Bobinas de ignição;
- Etc.

Este método não exige área de ensaio e o veículo pode ser inspecionado em qualquer lugar, desde que se tenha um sistema eletrônico que permita o acesso aos dados (Rastreador OBD). É utilizado em conjunto com os outros procedimentos anteriores, complementando-os com sucesso.

### **2.3.2 - O programa I/M na Europa**

O programa de I/M no continente Europeu iniciou-se em 1977, apenas para veículos comerciais. Após diversas atualizações, houve a inclusão de veículos particulares a partir de 1996. A frota europeia possui veículos leves de passageiros movidos a motores ciclo OTTO e ciclo DIESEL. A motocicletas não estão incluídas na inspeção.

A metodologia empregada pela comunidade europeia é similar à utilizada na primeira fase do programa norte americano e, conseqüentemente, similar à adotado pela Resolução do CONAMA 07/93. Os veículos leves de passageiros são inspecionados com o motor em marcha lenta, sem carga. Apenas o CO é medido e o limite varia em função do ano de fabricação do veículo ensaiado. Rastreamento de avarias via sistema de diagnose OBD são adotados em veículos equipados com aquele sistema.

O grande diferencial em relação aos outros programas de inspeção está no caráter preventivo do programa adotado pela comunidade europeia. Incentivos fiscais são oferecidos aos proprietários de veículos antigos, de forma a facilitar e promover a renovação da frota circulante. Manter um veículo antigo em condições de uso é menos atrativo que substituí-lo por um veículo novo. (Palmgren, 2004)

Outra diferença encontrada no programa adotado pela comunidade europeia em relação ao utilizado pelos Estados Unidos está na sua finalidade. Enquanto o programa norte americano visa correlacionar estatisticamente as emissões de poluentes mensuradas nas inspeções com os valores encontrados em laboratório, o programa europeu verifica o estado geral de manutenção do veículo. Uma vez este esteja com sua manutenção em dia, supõe-se que seu nível de emissões de poluentes deverá estar dentro dos padrões (Branco, ET AL, 2012).

## **2.4 – Inventário de emissões de poluentes na cidade de São Paulo**

### **2.4.1 Frota circulante de veículos leves da cidade de São Paulo**

O IBAMA, em conjunto com a Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental, Departamento de Mudanças Climáticas e Gerência de Qualidade do Ar, elaborou 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, editado em Janeiro de 2011. Segundo a página IV- Apresentação, deste relatório, seus dados:

*“apresenta as emissões de 1980 a 2009 e as projeções até 2020 dos poluentes regulamentados pelos programas PROCONVE e PROMOT: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos não-metano (NMHC), aldeídos (RCHO) e material particulado (MP); além dos gases de efeito estufa, dióxido de carbono (CO2) e metano (CH4)”.*

Conforme já visto, um dos fatores responsáveis pela evolução da tecnologia utilizada nos veículos atuais é a necessidade de se controlar as emissões de poluentes gerados durante seu uso. Apesar disso, a massa total de poluentes emitidos na atmosfera deve ser monitorada, uma vez que a frota circulante nos grandes centros urbanos cresce com a popularização do automóvel como meio de transporte (MMA, 2011).

A partir dos dados disponibilizados no Inventário e no Anuário da Indústria Automobilística da ANFAVEA - 2009, estimou-se a evolução da frota circulante de veículos leves na cidade de São Paulo ao longo das últimas décadas. Estes dados foram segmentados por fase do PROCONVE. Cabe observar que a quantidade real de veículos que compõem a frota circulante é de difícil definição, uma vez que os números oficiais nem sempre estão disponíveis e não são plenamente confiáveis, devido à limitada rastreabilidade do sistema. Assim, este levantamento tem caráter qualitativo, visando demonstrar as principais tendências ao longo do período estudado. A figura 2.6 apresenta uma série histórica estimada da frota circulante de veículos leves da cidade de São Paulo, a partir dos dados disponíveis.

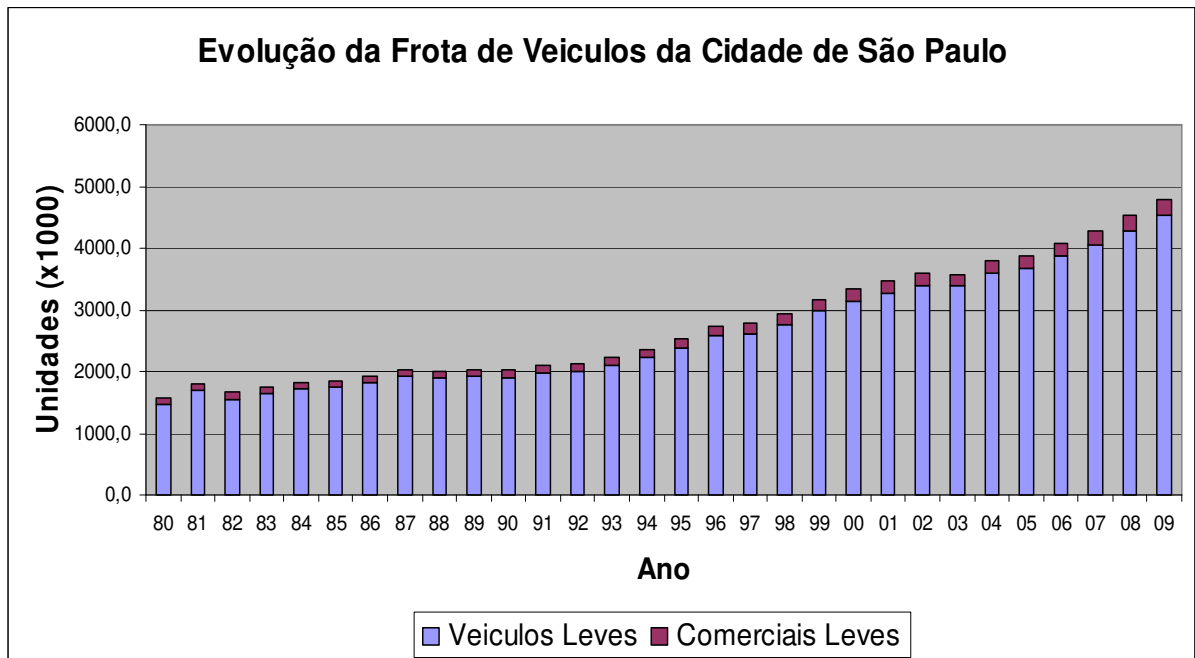


Figura 2.6: Histórico da frota circulante de veículos leves da cidade de São Paulo

Fonte: elaboração própria com base em dados do MMA, IBGE e ANFAVEA.

Pela análise da figura 2.6, pode-se verificar uma tendência de crescimento da frota ao longo dos anos, passando de 1,57 milhões de unidades em 1980, para 4,79 milhões de unidades em 2009. Um crescimento aproximado de 200 % em 29 anos, ou uma média anual aproximada de 4%. Nota-se também uma maior taxa de crescimento a partir 1993, quando a taxa anual média passou a 4,8%. Simplificando os cálculos, esta taxa de crescimento implica em duplicar a frota em questão a cada 14 anos, aproximadamente.

A partir dos dados fornecidos pela tabela 2.1 e figura 2.1, pode-se montar o gráfico da figura 2.7, onde a frota foi segmentada por fase do PROCONVE. Devido ao início deste programa se dar no ano de 1986 e a série histórica iniciar-se no ano de 1980, nota-se uma grande participação de veículos pré-PROCONVE na primeira metade do gráfico

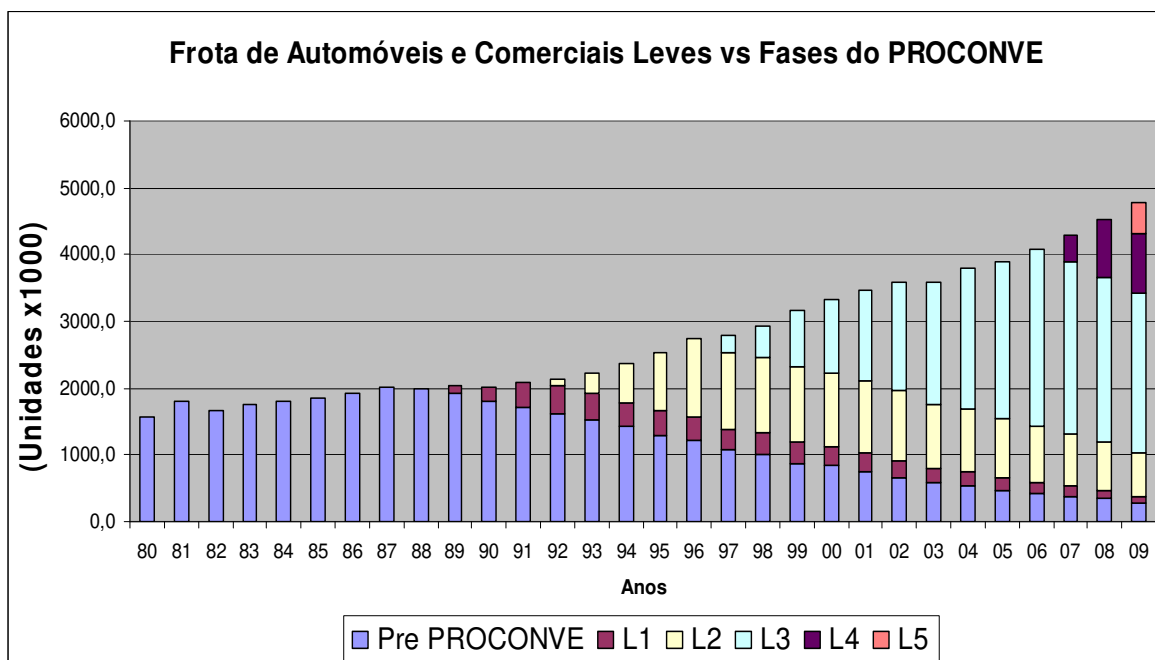


Figura 2.7: Frota da Cidade de São Paulo dividida pelas fases do PROCONVE.

Fonte: elaboração própria com base em dados do MMA, IBGE e ANFAVEA

Analisando a figura 2.7, conclui-se:

- Há uma efetiva renovação da frota circulante de veículos leves (automóveis e comerciais leves) na cidade de São Paulo;
- A fase do PROCONVE que apresenta a maior proporção de veículos ao final da série histórica é a fase L3, devido ao longo período de vigência, de 1997 a 2007;
- A participação de veículos Pré-PROCONVE na frota circulante da cidade de São Paulo tende a ser nula a partir do ano de 2009;

A partir dos dados da figura 2.7, ponderaram-se os limites de cada fase do PROCONVE com os valores da frota circulante, obtendo-se o gráfico representado na figura 2.8, onde a curva representa a massa total de THC, CCO e NO<sub>x</sub> emitidos na atmosfera ao longo do período estudado. Para a confecção do gráfico representado na figura 2.8, as seguintes premissas foram consideradas:

- Veículos novos tendem a apresentar valores de emissões de poluentes abaixo dos limites da legislação. Porém, devido ao envelhecimento do sistema de pós-tratamento de emissões (fator de deterioração), estes valores tendem a aumentar e, eventualmente, ultrapassarem os respectivos limites, no final de sua vida útil. Desta forma, as emissões médias de um modelo de veículo ao longo de sua vida útil foram calculadas pelos limites da fase do PROCONVE do qual o referido modelo pertence.
- Conforme a figura 2.1, o PROCONVE limita as emissões de poluentes em “g/km”. Isto significa que um veículo pode emitir na atmosfera uma certa quantidade de massa de poluente por cada quilômetro que percorre em via pública. Com base nos dados presentes no 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, de 2011, considerou-se uma quilometragem anual média de 12.000 km, independente do ano de fabricação. Como exemplo, um veículo fabricado em 1997 já teria percorrido 144.000 km até o ano de 2009.

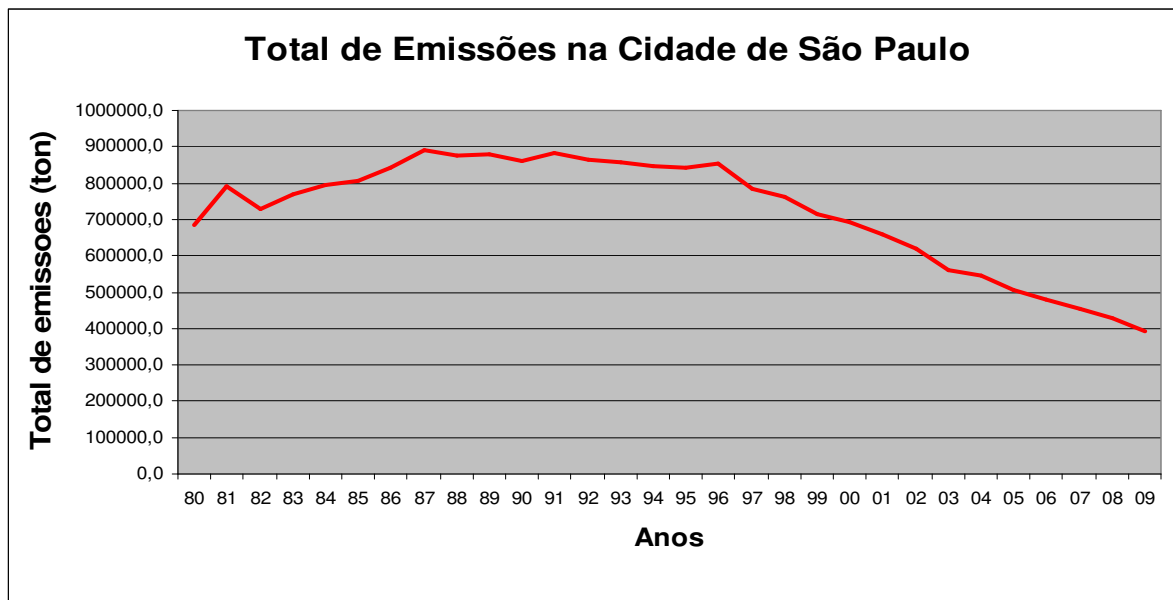


Figura 2.8: Emissões totais da frota de veículos da Cidade de São Paulo  
 Fonte: elaboração própria com base em dados do MMA, IBGE e ANFAVEA

Pela análise da figura 2.8, conclui-se que, apesar da frota circulante de veículos leves da cidade de São Paulo estar aumentando no período 1993-2009 a uma taxa anual média de 4,8%, o nível de emissões se reduz no mesmo período a uma taxa média de 5,0%. Entretanto, há diversas variáveis que interferem nesta conclusão:

- Nível e qualidade da manutenção mecânica e elétrica do veículo ao longo de sua vida útil;
- Qualidade do combustível utilizado;
- Quilometragem percorrida;
- Tipo de uso do veículo (urbano, rural, marginais, rodovias);
- Forma de condução;
- Tipo de sistema de pós-tratamento de emissões adotado;
- Outros.

Para um efetivo controle dos níveis de emissões da frota circulante, deve-se utilizar de programas de inspeções veiculares nos grandes centros urbanos, visando restringir a circulação de veículos que apresentem níveis de emissões em desconformidade com a legislação, até que estes sejam devidamente reparados.

Assim, qualquer iniciativa neste sentido será bem-vinda. Entretanto, deve-se verificar se a estratégia adotada nos programas de inspeção é compatível com o nível tecnológico da frota a ser inspecionada. Para ilustrar este fato, verificar-se-á a contribuição do catalisador na inspeção veicular adotada pela Prefeitura da cidade de São Paulo, presente na frota circulante em modelos fabricados a partir do ano de 1992.

## 3 INFORMAÇÕES TÉCNICAS

### 3.1 O conversor catalítico

O Conversor Catalítico, ou conhecido comercialmente como catalisador automotivo, surgiu no Brasil no início dos anos 90, quando a fase L2 do PROCONVE entrou em vigor a partir de Janeiro de 1992 (Bravo, 2006).

A partir da terceira fase do PROCONVE iniciada em Janeiro de 1997, todos os fabricantes adotaram injeção eletrônica com circuito fechado ( sensor de oxigênio ), multi-ponto ( uma válvula injetora para cada cilindro) e catalisador de três vias (para oxidação do THC e CO e redução do  $\text{NO}_x$ ), como solução técnica compatível com os limites previstos. A figura 3.1 apresenta o corte de um típico conversor catalítico utilizado nos veículos leves equipados com motores do ciclo OTTO.



Figura 3.1: Conversor catalítico – Fonte: motorsa



O conversor apresentado na figura 3.1 é composto de um suporte cerâmico revestido com metais ativos que são responsáveis pela catálise propriamente dita. A seguir, descrevem-se seus principais componentes:

### 3.1.1 Substrato

É o suporte para o catalisador. É composto de canais paralelos (células) cuja principal finalidade é otimizar sua área superficial, promovendo o contato dos gases de exaustão com os metais ativos. A típica densidade de células de substratos utilizados em veículos do PROCONVE fase L5 é de 600 cpsi (células por polegada quadrada - sistema imperial), o que significa em torno de 93 células por  $\text{cm}^2$ . Apesar disso, existem no mercado, substratos com até 1200 cpsi (190 células por  $\text{cm}^2$ ). A típica espessura da parede da célula é de 4,3 milésimos de polegada (0,109 mm), chegando a 2,5 milésimos de polegada (0,064 mm) (Shinichi, Seiji, 1999). A figura 3.2 apresenta a montagem didática de um substrato com diferentes densidades de células.

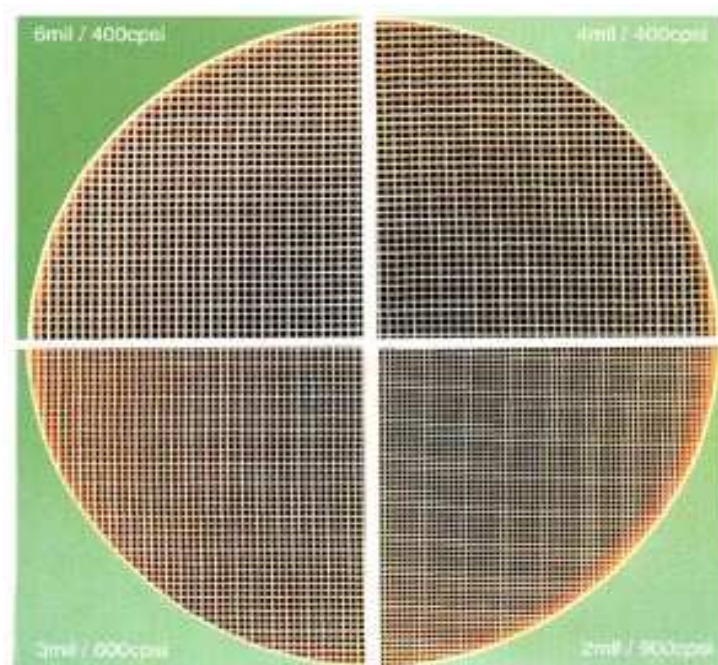


Figura 3.2: Substrato com diferentes densidades de células.

Fonte NGK Ceramics

O substrato deve possuir características compatíveis com a sua utilização, tais como seu formato, material de construção, posição no veículo, resistência térmica e mecânica, etc. Desta forma, as principais características de um substrato são:

- **Material do substrato:** normalmente varia entre cerâmico e metálico. O cerâmico, fabricado a partir de cordierita de magnésio (Silva ET AL, 2009) é mais utilizado pelo seu custo mais baixo, facilidade de produção e impregnação de metais ativos. Porém, acrescenta uma contrapressão maior ao sistema de exaustão do veículo e possui uma menor resistência a choques mecânicos. Já o metálico, de maior custo, é utilizado em aplicações cujo desempenho do veículo é prioridade, onde a contrapressão no sistema de exaustão deve ser minimizada, devido à necessidade de maior vazão neste tipo de aplicação. Geralmente utilizado em veículos de alta performance equipados com motores sobrealimentados. A figura 3.3 mostra dois substratos metálicos entre dois cerâmicos.

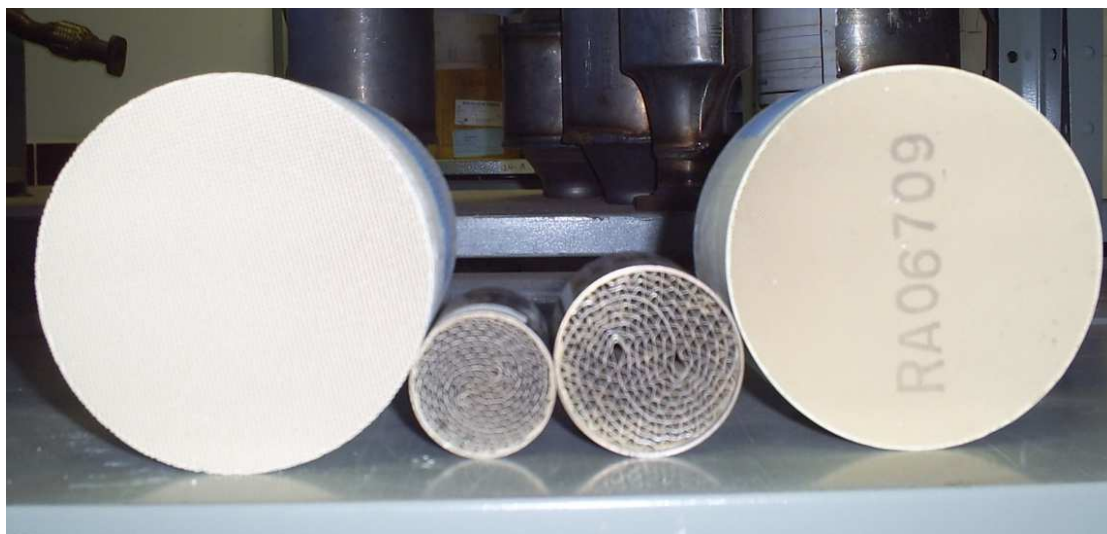


Figura 3.3: Tipos de substratos: cerâmicos e metálicos. Fonte: Umicore

- **Secção transversal:** Varia entre formas circulares, ovais, trapezoidais, etc., de acordo com a necessidade de posicionamento do conversor no sistema de exaustão do veículo. É definido durante a fase de projeto do veículo e mantido durante sua vida útil, uma vez que sua alteração implica em altos custos de ferramental do sistema de exaustão e do assoalho do veículo. A forma circular é a mais utilizada por diversas razões (dieselnet, 2004):

- Facilidade de encapsulamento com a carcaça metálica;
- Otimização de fluxo;
- Custo.

Devido às características específicas de construção, o formato cilíndrico é o utilizado na construção de substratos metálicos. A figura 3.4 mostra diversas formas geométricas de substratos cerâmicos.



Figura 3.4: Geometrias de substratos cerâmicos – Fonte: Umicore

- Posicionamento no veículo: O posicionamento do conversor catalítico no veículo deve ser definido durante seu projeto. Seu posicionamento influi na definição dos parâmetros de controle eletrônico do motor. Alterar a posição do conversor após a definição da calibração de controle motor significa a necessidade de um novo desenvolvimento. Basicamente o conversor pode ser posicionado imediatamente após o coletor de exaustão (“Close Couple”), no assoalho do veículo (“Under Body”), ou em ambos. A princípio, quanto mais próximo do coletor de exaustão, maior a eficiência de conversão dos gases poluentes em gases não

poluentes. Porém neste caso, maior será a sua temperatura de trabalho e, conseqüentemente, maior será seu valor de contrapressão, o que influi diretamente no rendimento volumétrico do motor e na sua calibração.

Os primeiros catalisadores automotivos utilizados no Brasil apresentavam um limite de temperatura máxima de trabalho abaixo de 1.000°C. Esta limitação impedia o uso do conversor em posições mais próximas do coletor de exaustão do motor, onde temperaturas acima de 1000°C podem ocorrer. Isto implicou em um uso de conversores maiores e com grandes cargas de metais, visando atender aos limites impostos na época (dieselnet, 2004).

As indústrias de catalisadores desenvolveram ao longo dos anos, novas tecnologias de catálise, aumentando consideravelmente a eficiência de conversão bem como a temperatura máxima de trabalho. Desta forma, os conversores foram se aproximando do coletor de exaustão e atualmente o seu posicionamento imediatamente após o coletor, tornou-se tendência nos novos projetos. Este posicionamento reduz o tempo de aquecimento do conversor e a conseqüente redução das emissões. A figura 3.5 mostra um típico conversor posicionado próximo ao coletor de exaustão do motor.



Figura 3.5: Conversor Catalítico posição “Close Couple”. Fonte: Umicore

### 3.1.2 “Wash-Coat”

O substrato puro é composto de material inerte que não interfere nas reações químicas. Para que as reações ocorram, é preciso que o substrato receba uma ou mais camadas de “*wash-coat*”, que contém componentes químicos capazes de distribuir uniformemente os metais ativos na sua superfície. É um preparado líquido à base de alumina e contém sais de metais ativos do grupo da Platina (Pt, Pd, Rh) que favorecem as reações químicas desejadas para as reações de redução e oxidação dos gases poluentes. O processo de aplicação do “*wash-coat*” no substrato cerâmico ou metálico deve ser de grande precisão, de maneira homogênea em toda sua superfície e na quantidade exata. Além disso, as características físico-químicas do “*wash-coat*”, tais como PH e viscosidade, devem ser controladas durante todo o processo, visando evitar que células sejam bloqueadas por excesso de produto e garantir sua perfeita aderência ao substrato visando suportar as condições de uso do catalisador.

Além de ser o veículo responsável pela adequada aplicação dos metais sobre a superfície do substrato o “*wash-coat*” também é responsável pelo aumento da área superficial, graças ao componente alumina presente em sua composição. A área superficial é a área de contato dos gases de exaustão provenientes do motor com os metais ativos e deve ser otimizada para garantir máxima eficiência do conversor.

Devido às características termomecânicas de um motor de combustão interna, os gases de exaustão são expelidos da câmara de combustão com alta temperatura e velocidade. O tempo de permanência do gás de exaustão dentro do catalisador é chamado de “Velocidade Espacial”, cuja unidade é “ $h^{-1}$ ”. Para exemplificar, uma velocidade espacial de 100.000  $h^{-1}$  significa que passará pelo catalisador, um volume de gás de exaustão equivalente a 100.000 vezes o seu volume, por hora. Ou, aproximadamente, 28 vezes o seu volume, por segundo. Ou seja, a cada 36 milissegundos há uma completa troca de gases de exaustão dentro do catalisador. Este é o intervalo de tempo disponível para que o catalisador promova as reações de redução e oxidação dos gases de exaustão. Para informação, motores do ciclo OTTO modernos podem apresentar valores de velocidade

espacial de até  $200.000 \text{ h}^{-1}$ . Desta forma, o “*wash-coat*” possui um papel fundamental na otimização da área superficial (Granados, ET AL., 2005).

Um catalisador que equipa um veículo PROCONVE fase L5, com volume de 1 litro, possui uma área superficial de aproximadamente  $15.000 \text{ m}^2$ , ou dois campos de futebol profissional (Umicore, 2007). A figura 3.6 apresenta um recipiente contendo “*wash-coat*”.



Figura 3.6: Frasco contendo “*wash-coat*”. Fonte: Umicore

### 3.1.3 Encapsulamento do catalisador

No caso do catalisador com substrato cerâmico, o encapsulamento é responsável pela sua proteção termomecânica. Durante a sua vida útil, o catalisador está exposto a diversas situações adversas:

- Intempéries do tempo;
- Choques térmicos (poças d'água, chuva, enxurradas);
- Vibrações causadas pelo próprio motor e condições da pista de rolamento;
- Choques contra objetos (pedras, lombadas).

Durante o encapsulamento, o substrato cerâmico é envolvido em uma manta termo expansível à base de vermiculita que garante proteção e fixação do substrato dentro do conjunto. Sua estrutura possui uma camada de moléculas de água que intercala as camadas de alumínio e silício na estrutura do mineral, a qual responde pelo seu elevado índice de expansão. Essas moléculas de água, quando aquecidas, de forma rápida, a temperaturas elevadas, transformam-se em correntes de ar quente e causam aumento no volume do mineral. Esse processo é chamado de expansão térmica (Ugarte, ET AL, 2005).

O conjunto substrato / manta então é encapsulado por uma carcaça metálica. A pressão de encapsulamento deve ser controlada para que não haja ruptura do substrato, por esmagamento ou falta de simetria (dieselnet, 2004).

Durante os primeiros quilômetros rodados pelo veículo, o conversor catalítico se aquece pela ação dos gases de exaustão, provocando a expansão da manta. Como ela possui vermiculita em sua composição, esta se expande de maneira permanente, fixando eficientemente o substrato à carcaça metálica.

Novos projetos de encapsulamento têm substituído a manta cerâmica termo expansível por mantas cerâmicas comuns, de menor custo, pois as tolerâncias menores de fabricação dos substratos aliadas ao melhor controle dimensional do encapsulamento metálico dispensam a necessidade da expansão permanente da vermiculita para ajustar as eventuais folgas durante o processo de fabricação do conversor.

O encapsulamento propicia ainda, a conexão do catalisador com o sistema de exaustão do veículo, através dos cones de entrada e saída que ajustam os diferentes diâmetros do sistema de exaustão.

No caso de substratos metálicos, o encapsulamento se resume aos cones de entrada e saída, que são soldados diretamente ao corpo do substrato.

O encapsulamento tem ganhado maior importância no projeto do veículo. A distribuição de fluxo dentro dos canais do substrato que sustenta o “*wash-coat*”, afeta:

- Eficiência do catalisador;
- Tempo de aquecimento do conversor;
- Contrapressão do sistema catalisador / conversor;
- Volume do substrato adotado.

A figura 3.7 apresenta um conversor catalítico em corte.

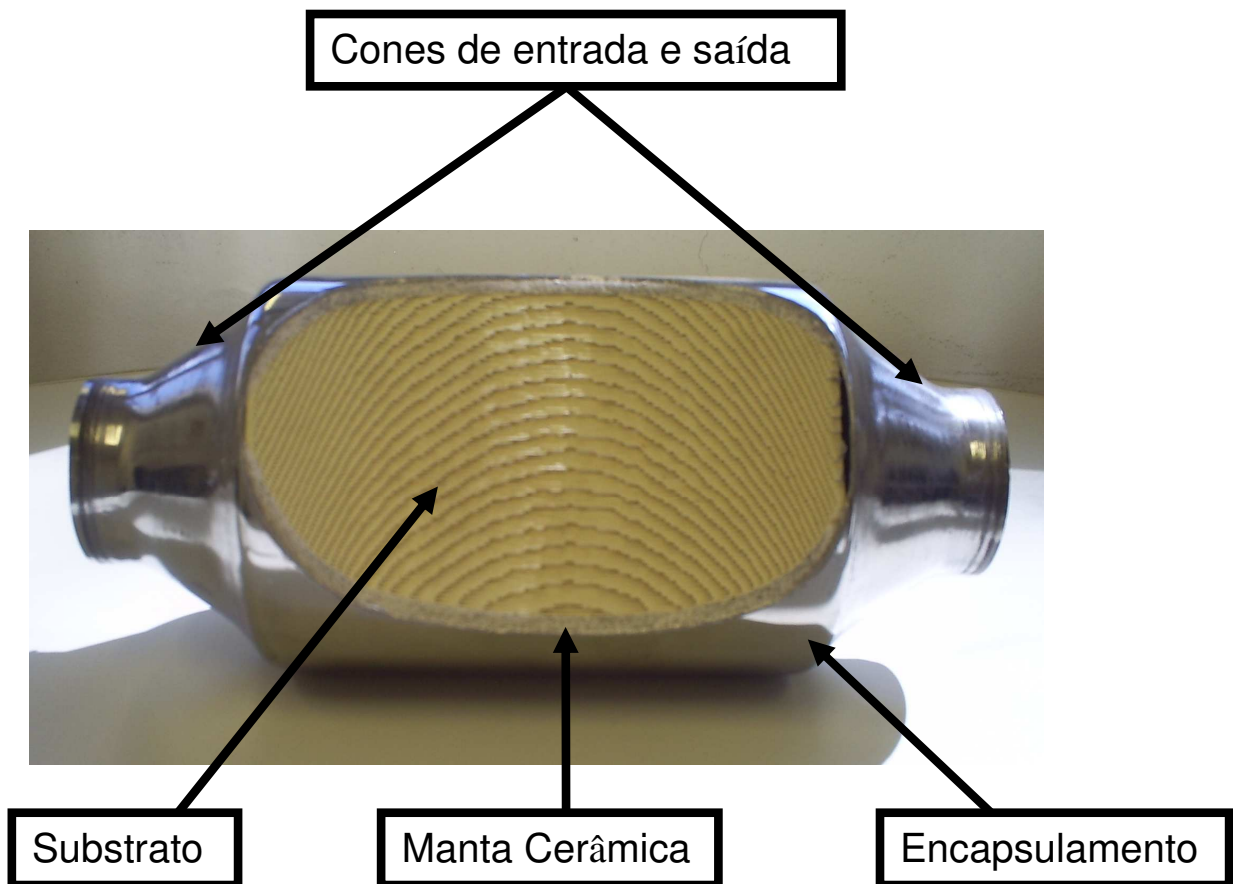
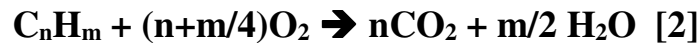
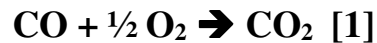


Figura 3.7: Partes do conversor catalítico. Fonte: Umicore



### 3.2 Funcionamento do catalisador

O catalisador automotivo é um reator químico e, como tal, sua principal função é reduzir a energia de ativação de reações químicas desejáveis, acelerando suas ocorrências. Ele reduz a energia de ativação através da redução da temperatura mínima em que estas ocorram. Um catalisador utilizado na fase PROCONVE L5, torna-se ativo a partir dos 250°C, promovendo reações de oxidação do THC e CO e de redução do NO<sub>x</sub>. Nesta temperatura, as principais reações (simplificadas) que começam a ocorrer no interior dos seus canais são (Cahtterjee, ET AL, 2001):



Analisando as reações acima, percebe-se que o oxigênio está presente em todas elas. As reações [1] e [2] são reações de oxidação e são facilitadas quando há excesso de Oxigênio no interior do catalisador. Esta condição ocorre quando a relação ar / combustível formada pelo sistema de alimentação do motor apresenta excesso de ar (e conseqüente falta de combustível) e é chamada comumente de “mistura pobre” (pobre em combustível). Em contrapartida, a reação [3] é uma reação de redução e é facilitada quando há falta de Oxigênio no interior do catalisador, com excesso de combustível e é comumente chamada de “mistura rica”. (Udrón, ET AL, 2002).

Define-se como  $\lambda$  – lambda, a razão entre a relação ar/combustível ideal e a relação ar/combustível real, ou seja:

$$\lambda = \frac{A / F_i}{A / F_r}$$

Onde:

$\lambda$  é o valor de lambda;

$A/F_i$  é a relação ar / combustível ideal (estequiométrica);

$A/F_r$  é a relação ar / combustível real.

$\lambda$  igual a 1,000 significa relação A/F estequiométrica.  $\lambda$  menor que 1,000 significa relação A/F real é inferior à ideal, ou relação A/F com mais combustível que o necessário (“mistura rica”). Pelo mesmo raciocínio,  $\lambda$  maior que 1,000, significa relação A/F superior à ideal (“mistura pobre”).

Com base nas informações acima, pode-se traçar uma curva de eficiência de conversão do catalisador para cada poluente, em função do valor de lambda. A figura 3.8 apresenta esta curva para um típico catalisador (Bosch, 2011).

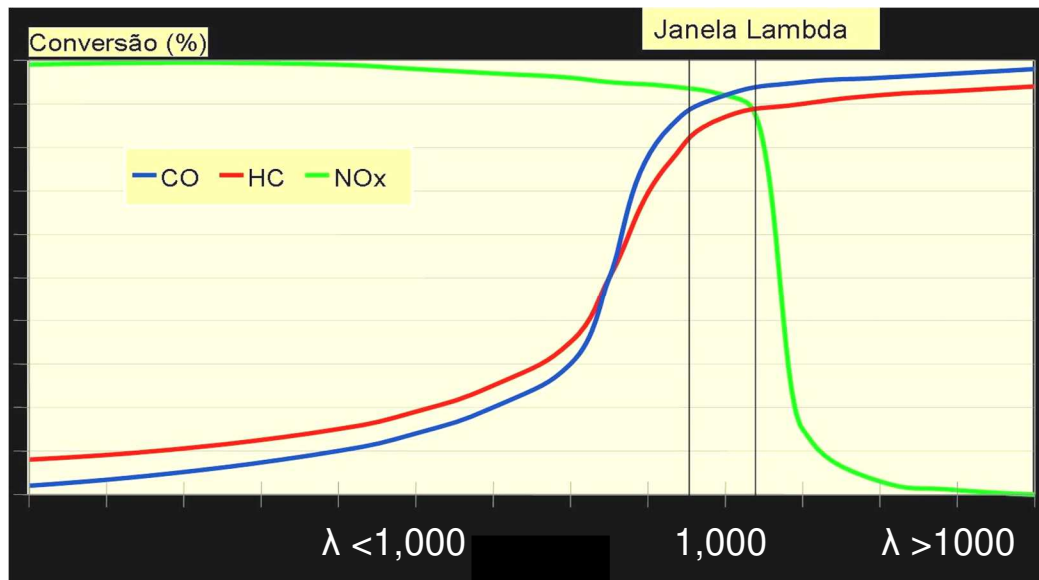


Figura 3.8: Curva lambda x eficiência do catalisador. Fonte: Bosch.

Pela análise da figura 3.8 confirma-se que o ambiente “pobre” ( $\lambda > 1,000$ ) é favorável às reações de oxidação dos poluentes THC e CO, pois com excesso de Oxigênio, há alta eficiência de conversão destes poluentes. Da mesma forma, ambiente “rico” ( $\lambda < 1,000$ ) é favorável à reação de redução do NO<sub>x</sub>, pois com falta de Oxigênio, há alta conversão de NO<sub>x</sub>.

A figura 2.1 mostra o controle de três poluentes: THC, CO e NO<sub>x</sub>. Desta forma, o catalisador deve trabalhar na região de maior eficiência para estes três gases. Pelo gráfico representado na figura 3.8, esta região situa-se em  $\lambda = 1,000$ . Assim, é preciso manter sua “janela de lambda” o mais próximo possível do estequiométrico ( $\lambda = 1,000$ ). Este controle da relação ar/combustível é realizado pelo módulo de controle do sistema de alimentação do veículo com o auxílio do sensor de sensor de Oxigênio, comercialmente chamado de sonda lambda.

O sensor de Oxigênio foi desenvolvido nos anos 60. (Bosch, Handbook, 2011) Ele passou a equipar comercialmente os veículos dotados de sistema de injeção eletrônica de combustível nos anos 80. A figura 3.9 mostra um típico sensor de Oxigênio, ou Sonda Lamba.

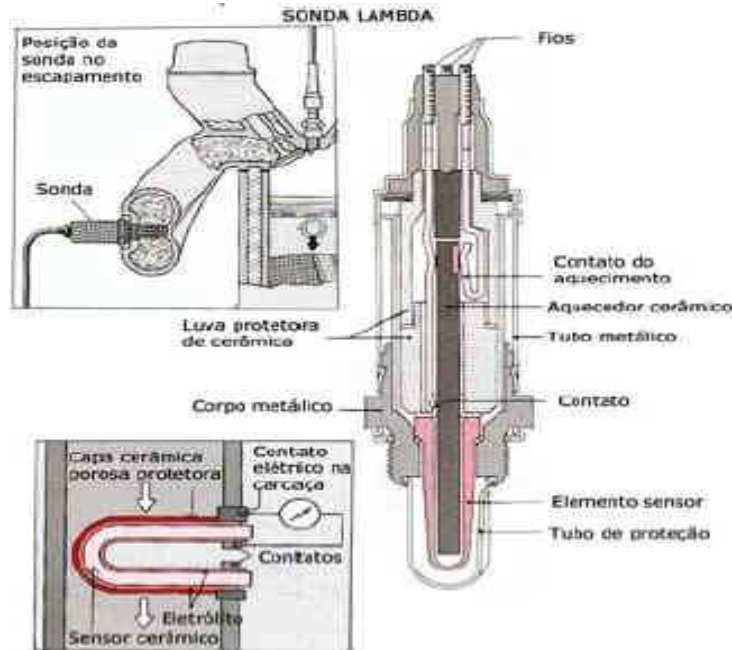


Figura 3.9: Sensor de Oxigênio. Fonte: [www.aalcar.com](http://www.aalcar.com).

O sensor de Oxigênio é composto de dois elementos impregnados com óxidos de Zircônio. A montagem do sensor é feita de tal forma que um dos elementos fique em contato com a atmosfera, enquanto que o outro fique em contato com os gases de exaustão. O óxido de Zircônio possui a propriedade de gerar uma diferença de potencial elétrico quando em contato com o Oxigênio. Assim, o arranjo descrito permite mensurar a quantidade do Oxigênio no gás de

exaustão, em função da diferença de potencial gerada entre as placas, que será proporcional à diferença de concentrações (Bosch, 2011). Indiretamente, através da concentração de Oxigênio, pode-se monitorar em tempo real, a relação ar/combustível fornecida pelo sistema de alimentação, de combustível, possibilitando correções para a condição prevista no mapa de mistura ar/combustível do motor.

O Catalisador tem potencial para manter sua eficiência durante toda a vida útil do veículo. Porém, este comportamento pode ser comprometido devido a diversos fatores (Silva, 2008):

- Consumo de óleo lubrificante: Todo motor de combustão interna consome óleo lubrificante, seja pelo sistema de “*blow-by*”, seja pela passagem de vapores de óleo através dos anéis vedadores de pistão, ou retentores de válvulas. Óleo lubrificante contém diversos componentes químicos ativos, entre eles, o Fósforo que envenena irreversivelmente o catalisador, reagindo com seus elementos ativos, tornando-os inertes;
- O sistema de ignição do motor, responsável pela geração de centelha nas velas de ignição, envelhece e ocasiona falhas características denominadas “*miss firing*”, que seria a perda da centelha na vela. Quando isso ocorre, a mistura ar/combustível presente na câmara de combustão não é queimada e sai pelo sistema de exaustão através da válvula de escape, oxidando-se dentro do substrato, graças à ação do catalisador. Esta reação é extremamente exotérmica (geração de calor), o que provoca um aumento importante da temperatura do substrato e, em casos extremos, seu derretimento. (fenômeno de “*melting*”). Quando o derretimento se dá por completo, forma-se uma massa de substrato impermeável, provocando importante aumento da contrapressão no sistema de exaustão do veículo, o que pode, em casos extremos, motivar a quebra mecânica do motor. Quando eventualmente este derretimento não é completo, a eficiência do catalisador fica comprometida, sem que o consumidor perceba. O mesmo efeito pode ocorrer se o sistema elétrico do veículo for alterado, através de um aumento da carga elétrica, devido à instalação de dispositivos elétricos não homologados pelo fabricante.

- O catalisador é sensível à qualidade do combustível. Combustíveis contaminados podem provocar danos irreversíveis ao catalisador, seja através de envenenamento, onde os contaminantes reagem irreversivelmente com os metais ativos, seja por provocar “melting”; Da mesma forma, aditivos para combustível e para óleo lubrificante devem ser desenvolvidos para não afetarem o funcionamento do catalisador.

## **4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

De posse do veículo, seu conversor catalítico foi retirado e instrumentado. Realizou-se então, a caracterização do catalisador através de ensaios de eficiência de conversão dos gases THC, CO e NO<sub>x</sub>.

Após o ensaio de eficiência, o catalisador foi remontado no veículo e este, então, foi ensaiado conforme as seguintes normas e procedimentos:

- Norma ABNT NBR 6601 - Veículos rodoviários automotores leves - Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento;
- Norma ABNT NBR 10972 - Veículos rodoviários automotores leves – Medição da concentração de monóxido de carbono no gás de escapamento em regime de marcha lenta. Ensaio de laboratório;
- Resolução CONAMA 7/93 que serviu de base para o Decreto nº 50.232, da Prefeitura Municipal de São Paulo.

### **4.1 – Ensaio realizados**

#### **4.1.1 Ensaio de eficiência do catalisador**

Segundo ensaios específicos realizados em um laboratório de emissões, um catalisador automotivo, quando novo, torna-se reativo a partir de 250°C. Como o ensaio previsto na norma ABNT NBR 6601 inicia-se com o catalisador à temperatura ambiente, há um intervalo de tempo

desde a partida do motor, até que ele atinja sua temperatura de funcionamento. Para aplicações do tipo “*close couple*”, este intervalo de tempo está em torno de 45 segundos. Soluções do tipo “*under body*” apresentam um intervalo de tempo em torno de 50~60 segundos, devido à maior distância entre o motor e o conversor. Esta característica influi diretamente no nível de emissões de um veículo. A análise de resultados de ensaios de emissões realizados em veículos fase PROCONVE L5, mostra que, aproximadamente 90% das emissões geradas totais ocorrem no primeiro minuto, justamente pelo fato do catalisador ainda não estar ativo. O gráfico representado na figura 4.1 ilustra os primeiros segundos do ensaio conforme ciclo ABNT NBR 6601, de um veículo fase PROCONVE L5, equipado com catalisador montado na posição “*close couple*”. As duas linhas representam a velocidade do ciclo (preto) e a temperatura do catalisador, medida a 25 mm de sua face de entrada (azul).

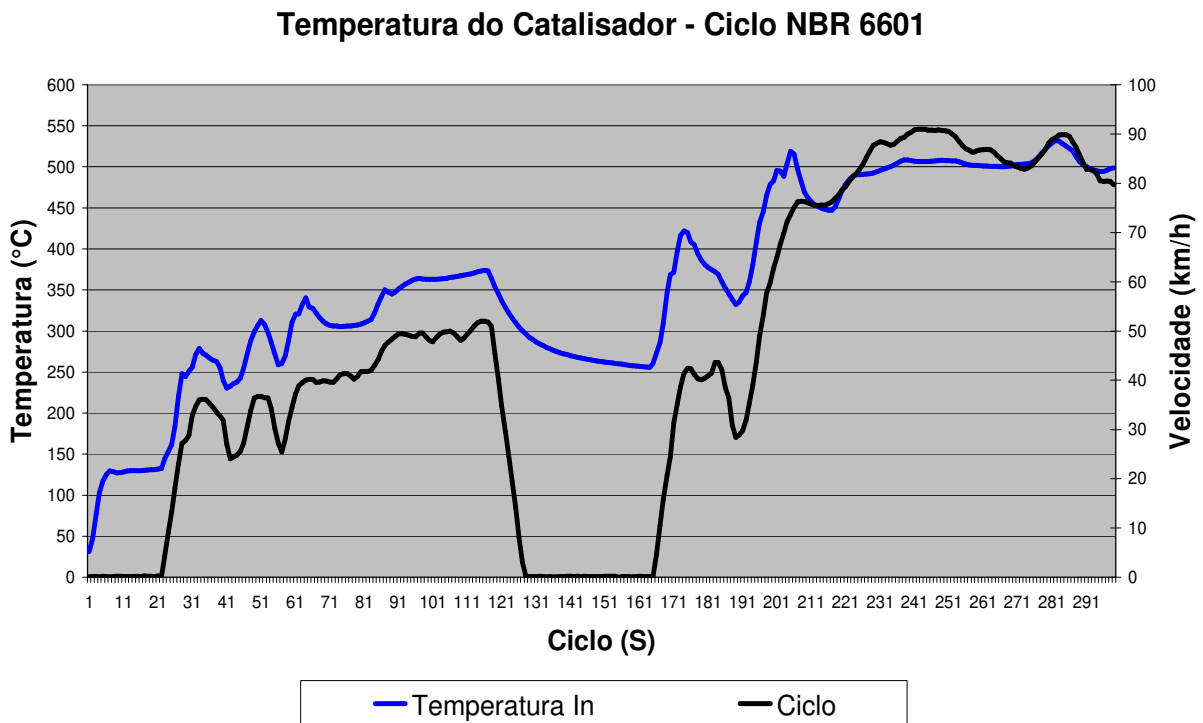


Figura 4.1: Temperatura do Catalisador no ciclo ABNT NBR 6601.

Fonte: Elaboração própria.

A figura 4.1, mostra que o catalisador atingiu sua temperatura de ativação por volta dos 45 segundos após a partida do motor. Esta temperatura é chamada de “*light off*” do catalisador e por definição, é a temperatura em que o catalisador converte 50% das emissões de um determinado poluente (eficiência de 50% de conversão).

Os fabricantes de catalisadores possuem procedimentos específicos que definem estas temperaturas de “*light off*”. São realizados em um banco de ensaios de emissões equipado com um dinamômetro de motores devidamente preparado e instrumentado.

É importante ressaltar que cada poluente regulamentado (THC, CO e NO<sub>x</sub>) apresenta uma temperatura específica de “*light off*”. A formulação de um catalisador pode ser otimizada para atender cada um desses três poluentes.

O procedimento de “*light off*” é útil para se verificar as condições do catalisador ao longo de sua vida útil, uma vez que, com o seu envelhecimento, as temperaturas de “*light off*” tendem a subir, aumentando o intervalo de tempo necessário para se atingir a eficiência de conversão necessária durante o ciclo de emissões.

Um dos procedimentos de ensaio para determinação das temperaturas de “*light off*” consiste em passar os gases de exaustão de um motor padrão em condições controladas e estabilizadas através de um trocador de calor (líquido / gás) antes de enviá-los ao catalisador. Desta forma, é possível variar a temperatura de entrada do gás de exaustão no catalisador, por meio da variação da eficiência do trocador de calor, mantendo as demais condições de funcionamento do motor inalteradas, tais como rotação, carga e relação ar / combustível da mistura. Linhas de amostragem de gás, bem como termopares para medição de temperaturas, são posicionadas nas posições pré e pós-conversor. Assim, é possível registrar os dados durante o ensaio de “*light-off*”.

A figura 4.2 ilustra esquematicamente o layout do ensaio de “*light-off*” realizado em um banco de ensaios de emissões.



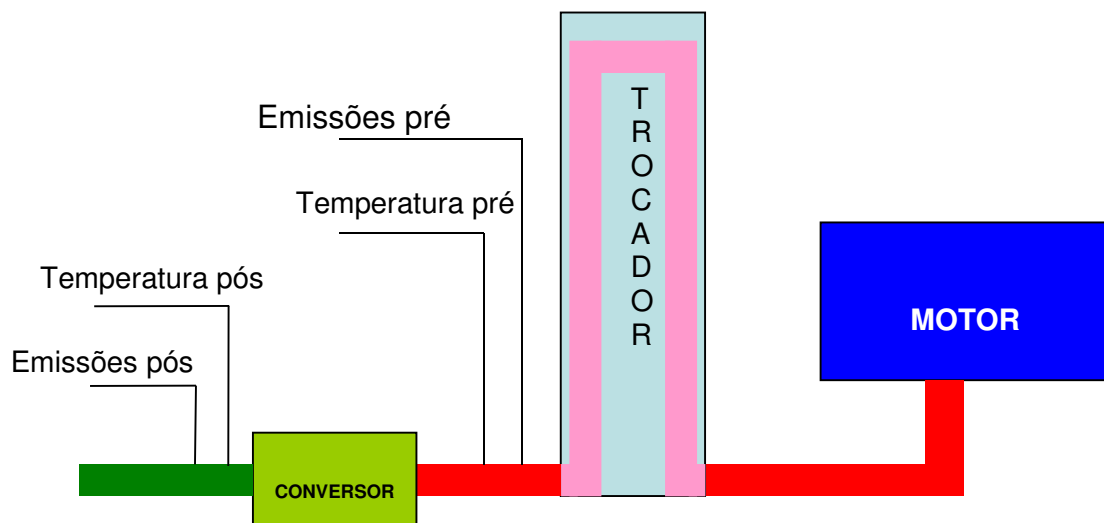


Figura 4.2: Esquema de montagem para ensaio de “*light-off*” de conversor. Fonte: Elaboração própria.

#### 4.1.2 – Ensaio de Emissões conforme ABNT NBR 6601

O objetivo de se realizar um ensaio de referência no veículo escolhido é quantificar suas emissões de poluentes para compará-las com a correspondente fase do PROCONVE, de forma a verificar se ainda atende aos requisitos da legislação.

O ensaio definido pela norma ABNT NBR 6601 tem uma duração aproximada de 40 minutos e inicia-se com uma partida a frio do motor do veículo. É preciso realizar sua correta preparação que consiste em abastecê-lo com combustível padrão, conforme norma ABNT NBR 8689. Então submetê-lo a uma pré-rodagem conforme o mesmo ciclo de emissões a que será submetido durante o ensaio propriamente dito. Este pré-funcionamento é necessário para garantir que o motor funcione corretamente com o combustível padrão. O veículo então deve permanecer em repouso, com seu motor desligado por um período mínimo de 12 horas e máximo de 36 horas, em um ambiente com temperatura e umidade relativa do ar controladas. Isto é importante para se garantir

um equilíbrio térmico de todos os seus componentes, tais como: sistema de exaustão (incluindo o catalisador), bloco do motor, pistões, velas, etc., bem como o óleo lubrificante e o líquido de arrefecimento, se aplicável. O controle das condições iniciais do ensaio visa favorecer a sua repetitividade. O item 5 da referida norma descreve o ensaio:

#### **“5- Execução do ensaio**

*Este ensaio é realizado para determinar a emissão em massa de hidrocarbonetos totais e não metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio, enquanto o veículo simula uma viagem média, em área urbana. O ensaio completo em dinamômetro de chassi consiste em dois ciclos, sendo um com partida a frio e o outro com partida a quente, com intervalo de  $(10 \pm 1)$  min entre eles. O resultado é a média ponderada entre os ciclos de partida a frio e a quente apresentado em g/km de cada gás analisado. O ciclo de partida a frio é dividido em duas fases. A primeira fase, representando a fase "transitória" da partida a frio, termina ao final da desaceleração que é programada para ocorrer aos 505 s do ciclo. A segunda fase, representando a fase "estabilizada", consiste na conclusão do ciclo de ensaio, inclusive o desligamento do motor. Da mesma maneira, o ciclo de partida a quente consiste em duas fases. A primeira fase, representando a fase "transitória" da partida a quente, termina também com o final da desaceleração aos 505 s, enquanto que a segunda fase do ciclo de partida a quente, representando a fase "estabilizada" é idêntica a segunda fase do ciclo de partida a frio, não sendo, portanto executado, é considerado na ponderação os valores obtidos na fase estabilizada da partida a fria. O gás coletado do veículo é diluído em ar, de modo a se obter uma vazão total constante. Uma alíquota desta mistura é coletada também em vazão constante e armazenada para a análise. As massas das emissões são determinadas através das concentrações finais da amostra e do volume total da mistura obtido em cada fase do ensaio.” (ABNT NBR 6601: 2012, p. 20)*

As principais características do ciclo são:

- Início do ciclo com o veículo à temperatura controlada;
- Duração total: 2476 segundos (41 minutos e 16 segundos);

- Distância teórica total percorrida: 17,8 km;
- Velocidade média: aproximadamente 37 km/h;
- Velocidade máxima: aproximadamente 95 km/h.

A figura 4.3 representa graficamente o ciclo.

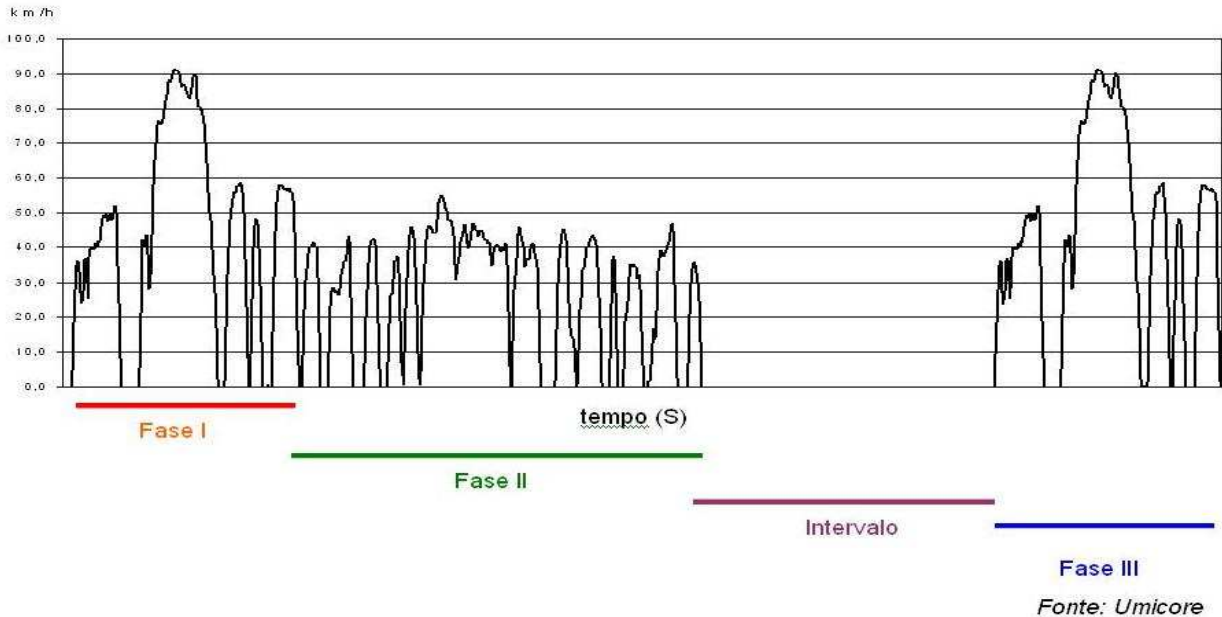


Figura 4.3: Ciclo de emissões segundo norma ABNT NBR 6601.

Fonte: elaboração própria com base nos dados da referida norma

O ensaio é realizado sobre um dinamômetro de chassis. As rodas motrizes do veículo devem ser posicionadas sobre os rolos, e a carroceria fixada ao chassi do equipamento, visando não permitir sua movimentação durante a realização do ensaio. Os eixos dos rolos são interligados a um motor elétrico, conectado a um computador. Este computador gerencia um aplicativo capaz de simular as forças que o veículo estaria sujeito em uma típica via de rolamento. Para executar o ensaio, um técnico deve dirigir o veículo sobre o dinamômetro de rolos, acompanhando o ciclo de condução pré-determinado, o qual é gerado em um monitor localizado à frente do veículo. Este procedimento visa minimizar a variabilidade de resultados durante a realização de uma série de ensaios realizados. A figura 4.4 mostra um dinamômetro de rolos ou chassis.

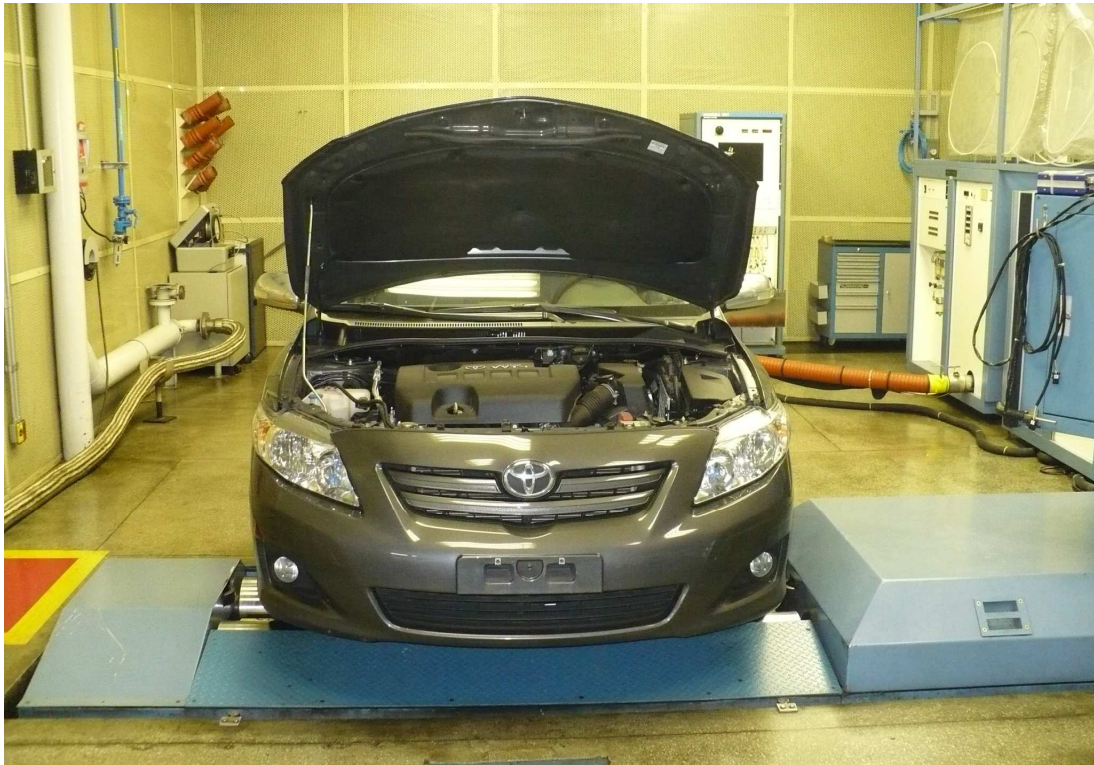


Figura 4.4: Dinamômetro de rolos ou chassis. Fonte: Umicore

#### **4.1.3 Ensaio de emissões conforme ABNT NBR 10972**

O procedimento de ensaio previsto na norma ABNT NBR 10972, é resumido pelos seus itens 5.4.1 a 5.4.3:

*“5.4.1 O veículo deve ser submetido ao ciclo de condução dinamométrico, conforme ABNT NBR 6601, de modo a permitir que o motor e a transmissão de força e movimento no veículo atinjam as condições térmicas do ensaio.*

*5.4.2 Imediatamente após o procedimento, conforme 5.4.1 conectar o sistema de amostragem, caso já não esteja conectado, ver 4.2, acelerar o motor para uma velocidade angular entre 2000 rpm e 3000 rpm, sem carga, que deve ser mantida pelo menos por 15 s e, a seguir, retornar ao regime de marcha lenta.*

*5.4.3 No regime de marcha lenta, efetuar as leituras das concentrações do monóxido de carbono e dióxido de carbono por 10 s após a estabilização das leituras. Simultaneamente, fazer a leitura da velocidade angular do motor. Estas leituras devem ser registradas.”*

(ABNT NBR 10972:2010, p. 4)

Pelo exposto acima, o ciclo de condução previsto na norma ABNT NBR 6601 é utilizado na preparação do ensaio de medição de CO que é o único gás analisado neste procedimento em regime de marcha lenta. Ao se utilizar sempre o mesmo ciclo de preparação para o ensaio, verifica-se uma maior repetitividade nos resultados.

Após a fase de preparação conforme ciclo ABNT NBR 6601, o procedimento de medição do CO em marcha lenta é realizado em, aproximadamente, 5 minutos.

#### **4.1.4 Ensaio de emissões conforme Resolução CONAMA 07/93**

O método definido pela Resolução do CONAMA 07/93 prevê:

- Verificação visual das condições mecânicas do veículo;
- Descontaminação do óleo do cárter através de uma aceleração livre a 2500 RPM, por no mínimo, 30 segundos;
- Medição das emissões de THC e CO @ 2500 +/- 200 RPM;
- Medição das emissões de THC e CO em marcha lenta;
- Repetição do procedimento em caso de necessidade.

Notam-se algumas diferenças entre o procedimento acima e o definido pela norma ABNT NBR 10972. A referida Resolução não define a forma de condicionamento do veículo (aquecimento do motor), sendo que o anexo II, item 3, prevê:

*“II.3. Os centros de inspeção deverão ser adequadamente dimensionados e possuir sistema de múltiplas linhas de inspeção de modo a evitar interrupções das atividades e filas com tempo de espera superior a 30 minutos.”*

Assim, a ausência de uma padronização na preparação do veículo para a medição das emissões, pode gerar uma maior variação dos resultados em relação ao correspondente ensaio em laboratório (ABNT NBR 10972).

Outra diferença básica entre os dois métodos está no conteúdo da medição, uma vez que a Resolução CONAMA 07/93 prevê medições em marcha lenta e a 2500 rpm dos gases CO e THC, enquanto que a norma ABNT NBR 10972 que prevê medição apenas em regime de marcha lenta e somente do gás CO.

## **4.2 Equipamentos utilizados nos ensaios**

Os principais equipamentos utilizados para a realização dos diversos ensaios que suportam este trabalho são:

### **4.2.1 Ensaio de motores (“light off”)**

- Dinamômetro elétrico marca Schenck, modelo W130;
- Trocador de calor líquido – gás fabricado pela Umicore AG – (Alemanha);
- Termopares tipo “K” de 3,0 mm de diâmetro, marca Ecil;
- Bancada de analisadores dos gases: THC, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub>, marca Horiba, série 200.

A figura 4.5 apresenta o dinamômetro de motores utilizado.



Figura 4.5 – Dinamômetro de motores – Fonte: Umicore

#### 4.2.2 Ensaio de chassis (emissões de poluentes)

- Dinamômetro de Chassis marca Horiba, modelo CDC 900;
- Automação da empresa AVL-PEUS, modelo GEM 201L;
- Termopares tipo “K” de 1,5 mm de diâmetro, marca Ecil;
- Bancada de analisadores dos gases: THC CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub>, marca Horiba, série 200.

A figura 4.6 apresenta o dinamômetro de chassis utilizado na realização dos ensaios de emissões.



Figura 4.6 – Dinamômetro de chassi – Fonte: Umicore

#### 4.2.3 Equipamentos auxiliares

- Analisador portátil de CO, CO<sub>2</sub>, marca Horiba, modelo MEXA 324J;
- Analisador de THC ABB 41/24-106-1 EM;
- Elevador de automóvel, duas colunas para instrumentação do veículo;
- Ferramentaria para serviços de instrumentação das amostras.

Nota: Todos os equipamentos de medição utilizados na realização dos ensaios foram calibrados segundo Sistema de qualidade baseado na ISO TS 16.949, com padrões rastreáveis RBC.



## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1 Caracterização do veículo ensaiado

O veículo utilizado neste trabalho apresenta sua manutenção básica realizada conforme especificações do fabricante e possui as seguintes características principais:

Ano de Fabricação	2003
Fase do PROCONVE	L3
Combustível	Gasool A22 [1]
Motorização	2.0 L – 8V
Quilometragem	157.134 km

Tabela 5.1: Principais características do veículo ensaiado

[1] – Conforme norma ABNT NBR 8689

### 5.2 Ensaio de referência do catalisador

O conversor catalítico originalmente instalado no veículo (OEM) foi removido do sistema de exaustão, tendo suas extremidades flangeadas e posteriormente instrumentado para a medição das temperaturas de “*light-off*”, conforme procedimento descrito no item 4.1.1.

A figura 5.1 mostra o conversor instalado no banco de provas de motores preparado para o ensaio de “*light-off*”, com toda a instrumentação devidamente instalada.



Figura 5.1: Conversor instalado em banco de provas de motores. Fonte: Umicore

A figura 5.2 apresenta graficamente o resultado do ensaio de “light off” realizado no catalisador retirado do veículo.

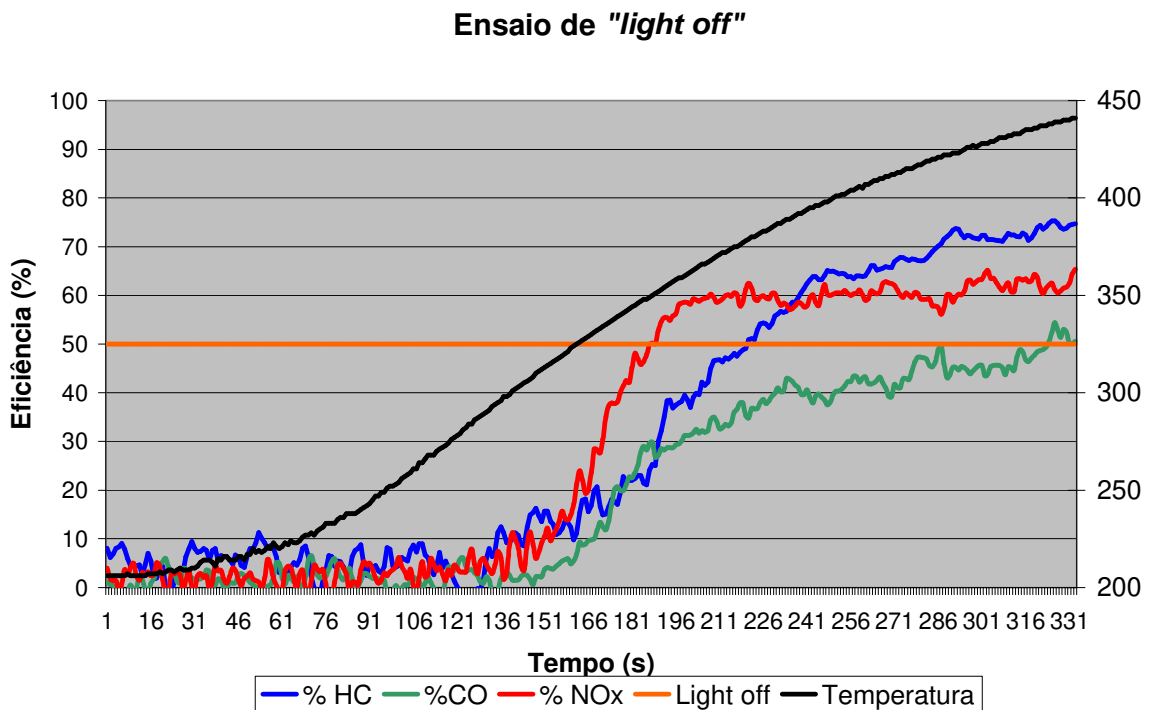


Figura 5.2: “Light off” do catalisador do veículo em referência. Fonte: Elaboração própria

Utilização dos dados do gráfico: a partir da linha laranja, que representa o ponto de “*light-off*” (50% de eficiência), encontra-se o ponto de interseção com a curva e eficiência de cada gás (THC – “azul”, CO – “verde”, NO<sub>x</sub> – “vermelha”). Traça-se então, uma linha vertical até o ponto de interseção com a linha “preta” (temperatura). Esta é a temperatura de “*light-off*” do gás.

Poluente	Temperatura de “ <i>light-off</i> ” [°C]
THC	385
CO	435
NO <sub>x</sub>	350

Tabela 5.2: Resultados de “*light-off*”. Fonte: Elaboração própria

Para efeito de comparação, a figura 5.3 apresenta o mesmo ensaio de “*light-off*” para um catalisador com tecnologia semelhante, porém sem uso. Nota-se que as temperaturas de “*light-off*” são consideravelmente mais baixas (em torno de 270°C para os três gases medidos).

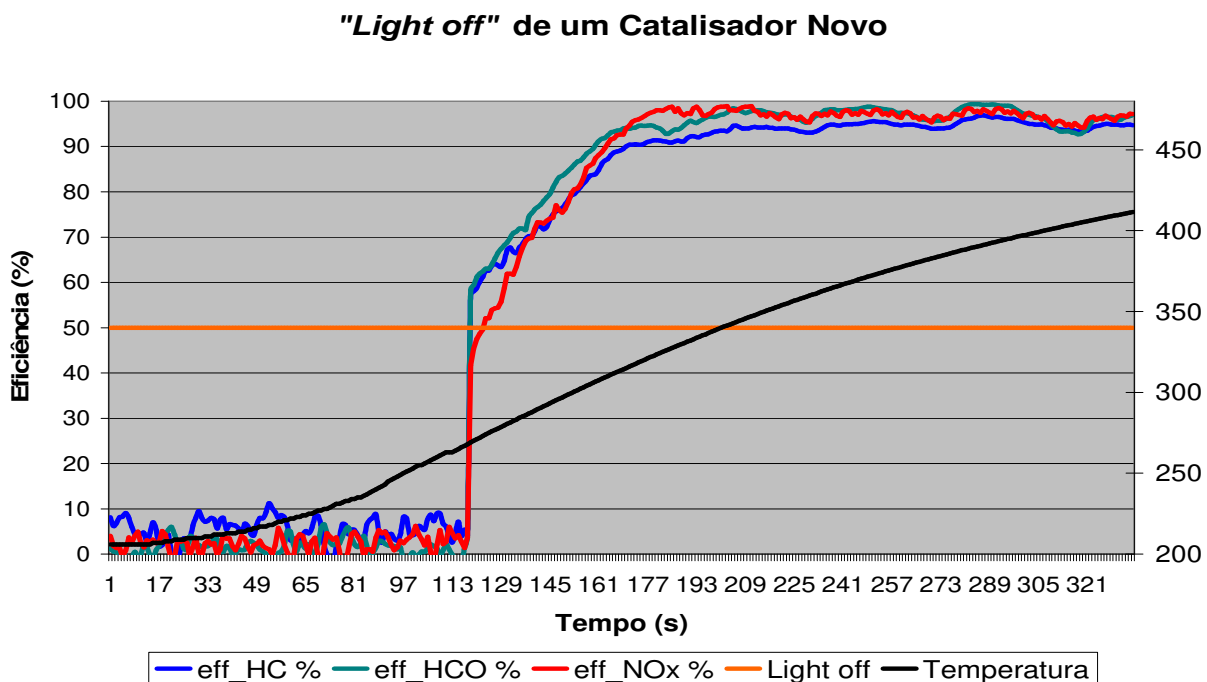


Figura 5.3: Gráfico de “*light off*” de um catalisador novo. Fonte: Elaboração própria

### 5.3 Ensaio de referência do veículo conforme ABNT NBR 6601

Após a caracterização do catalisador, o mesmo foi remontado no veículo e foram realizados dois ensaios de emissões conforme Norma ABNT NBR 6601.

A tabela 5.3 apresenta a média dos resultados referentes aos dois ensaios executados conforme metodologia de cálculo descrita na norma ABNT NBR 6601. A última coluna apresenta os limites de emissões definidos pelo PROCONVE para o ano modelo do veículo.

<b>Poluente</b>	<b>Emissão (g/km)</b>	<b>Limite L3 (g/km)</b>
THC	0,201	0,30
CO	1,298	2,00
NOx	0,157	0,60

Tabela 5.3: Resultados de Emissões conforme ABNT NBR 6601

Pela análise dos resultados, conclui-se que o veículo atende aos limites da legislação ao qual foi projetado, após rodagem de 157.000 quilômetros. Conforme já registrado, a Resolução do CONAMA, 18/86 define que o fabricante do veículo deve garantir os níveis de emissões por, no mínimo, 80.000 km ou 5 anos de uso.

### 5.4 Ensaio de emissões conforme ABNT NBR 10972

Para efeito de comparação da funcionalidade do catalisador durante a simulação em laboratório de uma Inspeção Veicular, primeiramente ensaiou-se o veículo conforme norma ABNT NBR 10972 que seria o procedimento em laboratório correspondente ao realizado pelos programas I/M implantados em São Paulo e Rio de Janeiro.

A figura 5.4 representa a fase de pré-condicionamento do veículo. Nota-se a evolução da temperatura na entrada do conversor catalítico (linha “azul”), bem com o as emissões em tempo real de THC e CO (linhas “verde” e “vermelha”, respectivamente).

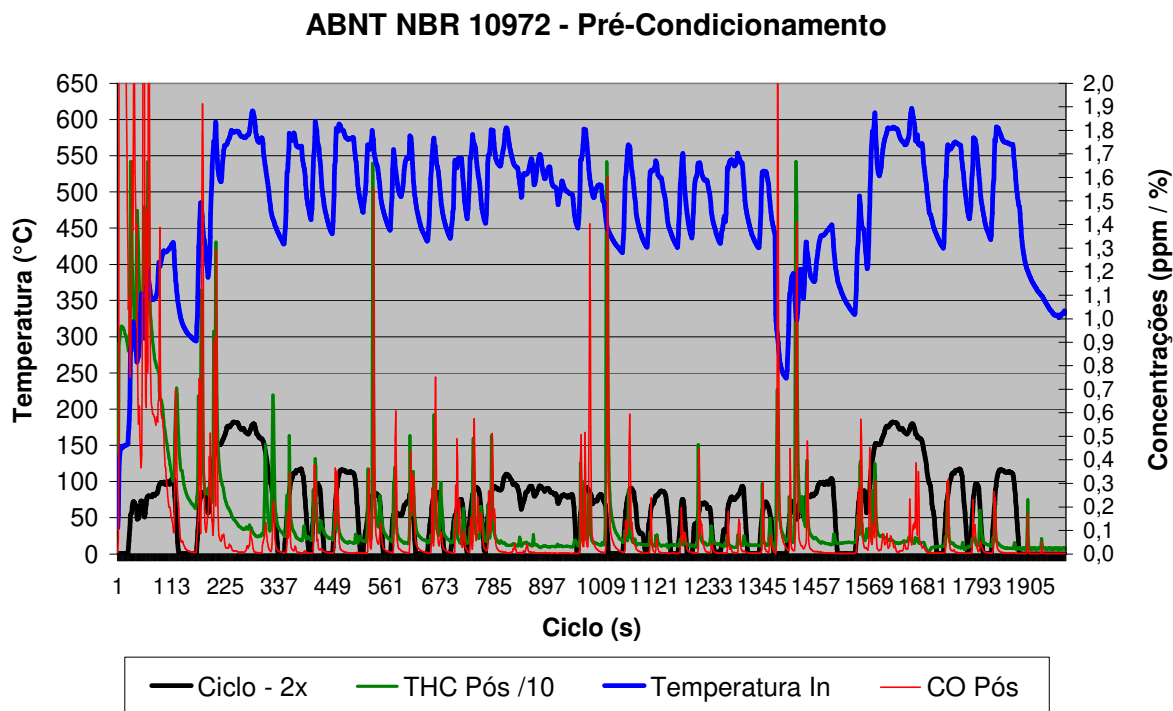


Figura 5.4: Ensaio de pré-condicionamento segundo norma ABNT NBR 10972

Fonte: Elaboração própria

Analisando-se o gráfico representado na figura 5.6, verifica-se que as emissões de THC e CO variam em função das diferentes cargas do motor presentes nos quatro modos de condução do ciclo: marcha lenta, aceleração, velocidade estabilizada e desaceleração. Verifica-se ainda que, após os primeiros segundos do ciclo, as emissões de THC e CO apresentam uma importante redução nos valores, redução essa, ocasionada pelo aquecimento do catalisador e conseqüente incremento de sua eficiência de conversão.

Após a fase de pré-condicionamento, procedeu-se às medições de CO (em %). Apesar da referida norma não prever, mediu-se também as emissões de THC (em ppm – partes por milhão).

De acordo com o item 6.1 da referida norma, é necessário calcular a concentração real de CO através do seguinte procedimento:

“O cálculo de concentração real de monóxido de carbono é dado pela seguinte fórmula:

$$CO_c = \frac{(CO_m + 15,0)}{(CO_m + CO_{2m})}$$

Onde

$CO_c$  é a concentração corrigida de monóxido de carbono, expressa em % de volume;

$CO_m$  é a concentração medida de monóxido de carbono, expressa em % de volume;

$CO_{2m}$  é a concentração medida de dióxido de carbono, expressa em % de volume;”

(ABNT NBR 10972: 2010, p. 5)

Após o ciclo ABNT NBR 6601, coletou-se durante 30 segundos as concentrações de CO e CO<sub>2</sub>, de forma a obter a leitura corrigida. Os valores estão representados na tabela 5.4.

Tempo [s]	CO <sub>m</sub> [%]	CO <sub>2m</sub> [%]	Fator	CO <sub>c</sub> [%]	Tempo [s]	CO <sub>m</sub> [%]	CO <sub>2m</sub> [%]	Fator	CO <sub>c</sub> [%]
1	0,0023	13,2759	1,1297	0,0026	16	0,0023	13,7939	1,0873	0,0025
2	0,0026	13,4726	1,1132	0,0028	17	0,0023	13,8119	1,0858	0,0025
3	0,0028	13,5783	1,1045	0,0031	18	0,0029	13,5344	1,1081	0,0032
4	0,0029	13,6317	1,1001	0,0032	19	0,0023	13,6191	1,1012	0,0026
5	0,0025	13,6635	1,0976	0,0027	20	0,0026	13,7808	1,0883	0,0028
6	0,0023	13,6916	1,0954	0,0025	21	0,0028	13,8906	1,0797	0,0030
7	0,0023	13,7082	1,0940	0,0026	22	0,0029	13,9470	1,0753	0,0031
8	0,0026	13,7197	1,0931	0,0028	23	0,0025	13,9838	1,0725	0,0026
9	0,0028	13,7463	1,0910	0,0030	24	0,0023	13,9972	1,0715	0,0024
10	0,0029	13,7425	1,0913	0,0032	25	0,0023	14,0267	1,0692	0,0025
11	0,0023	13,7484	1,0909	0,0025	26	0,0026	14,0581	1,0668	0,0027
12	0,0026	13,7435	1,0912	0,0028	27	0,0028	14,0894	1,0644	0,0030
13	0,0028	13,7621	1,0897	0,0030	28	0,0029	14,1460	1,0602	0,0031
14	0,0029	13,7769	1,0886	0,0032	29	0,0028	14,0673	1,6889	0,0030
15	0,0025	13,7842	1,0880	0,0027	30	0,0028	14,1569	1,0595	0,0030

Tabela 5.4 – Cálculo da concentração de CO corrigido segundo procedimento de norma ANBT NBR 10972 – Elaboração própria

Em relação à medição e cálculo da concentração de THC, procurou-se ajustar o procedimento utilizado em campo para a sua correta realização.

Existe uma diferença técnica no princípio de funcionamento dos analisadores de THC utilizados em laboratório (cujo princípio de medição é por ionização de chama) e em campo (cujo princípio de medição é por infravermelho). No caso do analisador utilizado em laboratório, emprega-se o Propano ( $C_3H_8$ ) como gás de referência ao passo que no analisador de campo utiliza-se o Hexano ( $C_6H_{14}$ ). Desta forma, os resultados encontrados nos ensaios em laboratório devem ser ajustados para o Hexano. Consultando o manual de referência do analisador *ABB 41/24-106-1 EM* utilizado em laboratório, encontra-se na página 43 o fator de “1.02” para a correção da leitura de Hexano, quando calibrado com Propano. Desta forma, montou-se a tabela 5.5 combinando-se os dois fatores de correção.

Tempo [s]	THC <sub>m</sub> [ppm]	Fator Dil.	Fator Hex	THC <sub>c</sub> [ppm]	Tempo [s]	THC <sub>m</sub> [ppm]	Fator Dil.	Fator Hex	THC <sub>c</sub> [ppm]
1	70,66	1,1297	1,0200	81,42	16	60,37	1,0873	1,0200	66,95
2	79,66	1,1132		90,44	17	60,37	1,0858		66,86
3	85,71	1,1045		96,56	18	64,50	1,0806		71,09
4	88,95	1,1001		99,82	19	71,20	1,0837		78,70
5	60,48	1,0976		67,71	20	79,70	1,1081		90,08
6	60,37	1,0954		67,45	21	88,95	1,1012		99,91
7	70,66	1,0940		78,86	22	70,66	1,0883		78,44
8	79,66	1,0931		88,81	23	79,66	1,0797		87,72
9	85,71	1,0910		95,38	24	85,71	1,0753		94,00
10	88,95	1,0913		99,01	25	88,95	1,0725		97,31
11	70,66	1,0909		78,63	26	60,48	1,0715		66,10
12	79,66	1,0912		88,66	27	60,37	1,0692		65,83
13	85,71	1,0897		95,27	28	70,66	1,0668		76,89
14	88,95	1,0886		98,77	29	79,66	1,0644		86,48
15	60,48	1,0880		67,12	30	85,71	1,0602		92,68

Tabela 5.5 – Cálculo da concentração de THC corrigido, baseado em norma ABNT NBR 10972  
Fonte: Elaboração própria

Para melhor visualização, a figura 5.5 representa o gráfico da fase final do ensaio, a partir da terceira fase do ciclo ABNT NBR 6601, apresentando a temperatura na entrada do conversor catalítico, a concentração de CO em % e a concentração de THC em ppm, devidamente corrigidos.

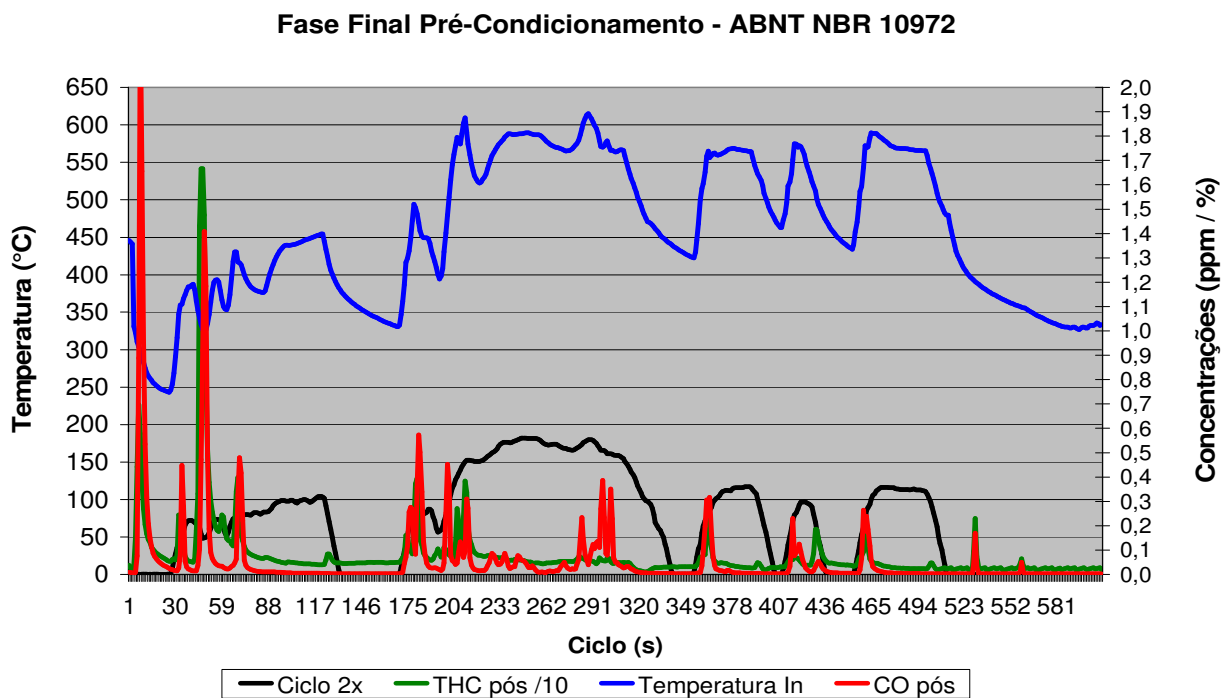


Figura 5.5: Medição de CO e THC em marcha lenta conforme ABNT NBR 10972.

Fonte: Elaboração própria

A partir dos gráficos representados nas figuras 5.4 e 5.5, pode-se concluir:

- A temperatura na entrada do catalisador varia em função da carga do motor com aumento da temperatura durante o período de acelerações (maior carga) e redução nas desacelerações e períodos de marcha lenta, quando a carga no motor é mínima;
- Após a última desaceleração do ciclo ABNT NBR 6601, mede-se CO e THC conforme item 5.4.2 da norma ABNT NBR 10972. Há uma aceleração a 2500 RPM, por 30 segundos, retorno à condição de marcha lenta, estabilização e as medições de CO e THC.



- Neste ensaio, o valor médio da concentração de CO foi de 0,002% (ou 20 ppm) para um limite especificado no PROCONVE de 0,5% (ou 5.000 ppm). Desta forma, o veículo foi aprovado neste ensaio;
- As emissões de THC apresentaram um valor médio de 84 ppm. O PROCONVE não define limite para este poluente, segundo esta metodologia de ensaio.

### 5.5 Ensaio de emissões conforme Resolução CONAMA 07/93

A legislação em vigor define limites máximos de concentração de poluentes em função do ano de fabricação do veículo. Os limites permitidos para as emissões de THC são os descritos na figura 5.6 e os de CO, na figura 5.7.

VEÍCULOS A GASOLINA / ÁLCOOL / FLEX E GNV				
TABELA 2 - LIMITES MÁXIMOS DE EMISSÃO DE HC <sub>combustível</sub> EM MARCHA LENTA E A 2500RPM PARA VEÍCULOS COM MOTOR DO CICLO OTTO:				
ANO DE FABRICAÇÃO	HC <sub>combustível</sub> EM MARCHA LENTA E A 2500RPM			
	GASOLINA	ÁLCOOL	FLEX	GÁS NATURAL
Todos até 1979 <sup>(a)</sup>	700	1100	-	700
1980 - 1988	700	1100	-	700
1989	700	1100	-	700
1990 - 1991	700	1100	-	700
1992 - 1996 <sup>(b)</sup>	700	700	-	700
1997 - 2002	700	700	-	700
2003 a 2005	200	250	200	500
2006 em diante	100	250	100	500

OB.S. PARA OS CASOS DE VEÍCULOS QUE UTILIZAM COMBUSTÍVEIS LÍQUIDO E GASOSO, SERÃO CONSIDERADOS OS LIMITES DE CADA COMBUSTÍVEL

Figura 5.6: Limites de THC para a Inspeção Veicular da cidade de São Paulo:

Fonte: Controlar

VEÍCULOS A GASOLINA / ÁLCOOL / FLEX E GNV				
TABELA 1 - LIMITES MÁXIMOS DE EMISSÃO DE CO <sub>CORREIDO</sub> EM MARCHA LENTA E A 2500RPM PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES COM MOTOR DO CICLO OTTO:				
ANO DE FABRICAÇÃO	LIMITE DE CO <sub>CORREIDO</sub> (%)			
	GASOLINA	ÁLCOOL	FLEX	GÁS NATURAL
Todos até 1979 <sup>(a)</sup>	6,0	6,0	-	6,0
1980 - 1988	5,0	5,0	-	5,0
1989	4,0	4,0	-	4,0
1990 - 1991	3,5	3,5	-	3,5
1992 - 1996 <sup>(b)</sup>	3,0	3,0	-	3,0
1997 - 2002	1,0	1,0	-	1,0
2003 a 2005	0,5	0,5	0,5	1,0
2006 em diante	0,3	0,5	0,3	1,0

OBS. PARA OS CASOS DE VEÍCULOS QUE UTILIZAM COMBUSTÍVEIS LÍQUIDO E GASOSO, SERÃO CONSIDERADOS OS LIMITES DE CADA COMBUSTÍVEL.

Figura 5.7: Limites de CO para a Inspeção Veicular da cidade de São Paulo:

Fonte: Controlar

Os valores realçados correspondem aos limites referentes ao ano de fabricação do veículo em questão (2003).

A resolução CONAMA 07/93 não estipula nenhum procedimento especial para pré-condicionamento do veículo. O consumidor dirige-se até uma estação I/M e realiza as medições. Para simulação em laboratório deste aquecimento do veículo, o mesmo foi conduzido durante os primeiros 300 segundos da primeira fase do ciclo adotado pela norma ABNT NBR 6601. A condução desta fase do ciclo garante objetivamente a estabilização térmica do conjunto mecânico, incluindo do catalisador. Assim, conduzir o veículo sobre o rolo por um tempo ou distâncias maiores não melhorará a eficiência do sistema de controle de emissões do veículo.

Após este aquecimento, o motor foi desligado por um intervalo de tempo de cinco minutos visando simular a espera em fila para realização do ensaio (como já visto, o item II.3 da referida resolução, uma espera de até 30 minutos é aceitável). Em visita ao posto de I/M Barra Funda, da Prefeitura da cidade de São Paulo, constatou ser prática comum o desligamento do motor na espera em fila.

Após o período de cinco minutos, voltou-se a funcionar o motor simulando o início do ensaio de inspeção e procedeu-se à medição das emissões @ 2500 RPM e marcha lenta. Todas as aquisições de concentrações de gases poluentes, velocidade do veículo, temperatura na entrada do catalisador, rotação do motor, etc., foram realizadas pelo sistema de automação presente na bancada de chassis (AVL-PEUS, modelo GEM 201L)

Embora a Resolução CONAMA 07/93 não detalhe a metodologia de medição, utilizou-se o mesmo método aplicado ao ensaio segundo ABNT NBR 10972, fixando-se o intervalo de medição em 30 segundos. As tabelas 5.6 e 5.7 apresentam os resultados de medição de THC @ 2500 rpm e marcha lenta, respectivamente, devidamente corrigidos. A figura 5.8 representa o gráfico das emissões de THC durante este procedimento.

Tempo [s]	THC <sub>m</sub> [ppm]	Fator Dil.	Fator Hex	THC <sub>c</sub> [ppm]	Tempo [s]	THC <sub>m</sub> [ppm]	Fator Dil.	Fator Hex	THC <sub>c</sub> [ppm]
1	429,76	1,0899	1,02	477,78	16	409,76	1,0956	1,02	457,92
2	432,14	1,0885		479,82	17	411,38	1,0946		459,32
3	428,38	1,0890		475,82	18	413,88	1,0952		462,33
4	425,04	1,0888		472,04	19	414,96	1,0957		463,77
5	423,95	1,0889		470,86	20	414,34	1,0957		463,07
6	423,89	1,090		471,27	21	414,33	1,0948		462,69
7	422,16	1,0909		469,75	22	409,52	1,0959		457,76
8	419,36	1,0909		466,63	23	403,39	1,0969		451,31
9	419,53	1,0921		467,31	24	403,05	1,0941		449,77
10	420,16	1,0894		466,87	25	401,19	1,0926		447,11
11	421,71	1,0901		468,90	26	393,00	1,0931		438,18
12	419,63	1,0940		468,28	27	387,24	1,0944		432,28
13	415,57	1,0955		464,34	28	389,60	1,0953		435,27
14	414,27	1,0945		462,50	29	391,40	1,0987		438,62
15	411,66	1,0953		459,91	30	391,65	1,0982		438,70

Tabela 5.6 – Cálculo da concentração de THC corrigido @ 2500 rpm segundo CONAMA 07/93.  
Fonte: Elaboração própria

Tempo [s]	THC <sub>m</sub> [ppm]	Fator Dil.	Fator Hex	THC <sub>c</sub> [ppm]	Tempo [s]	THC <sub>m</sub> [ppm]	Fator Dil.	Fator Hex	THC <sub>c</sub> [ppm]
1	440,60	1,0899	1,02	489,83	16	339,07	1,0956	1,02	378,92
2	432,09	1,0885		479,76	17	334,44	1,0946		373,42
3	419,83	1,0890		466,33	18	332,59	1,0952		371,52
4	408,82	1,0888		454,02	19	329,26	1,0957		367,98
5	401,54	1,0889		445,98	20	328,62	1,0957		367,27
6	395,23	1,0900		439,41	21	325,63	1,0948		363,63
7	387,27	1,0909		430,92	22	319,48	1,0959		357,12
8	378,24	1,0909		420,87	23	327,37	1,0969		366,26
9	370,34	1,0921		412,52	24	324,05	1,0941		361,61
10	363,75	1,0894		404,2	25	316,03	1,0926		352,21
11	358,79	1,0901		398,94	26	316,14	1,0931		352,49
12	354,25	1,0904		395,31	27	314,86	1,0944		351,47
13	348,22	1,0955		389,09	28	313,52	1,0953		350,26
14	348,89	1,0945		389,50	29	318,12	1,0987		356,50
15	346,26	1,0953		386,85	30	322,03	1,0982		360,71

Tabela 5.7 – Cálculo da concentração de THC corrigido em marcha lenta segundo CONAMA 07/93. Fonte: Elaboração própria

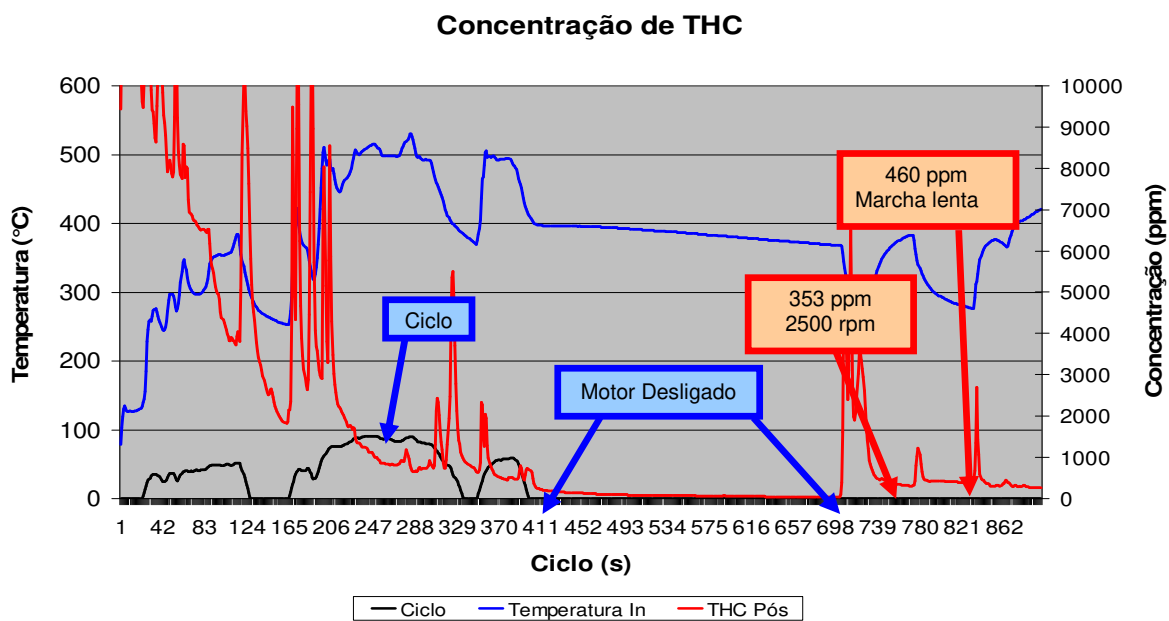


Figura 5.8: Emissões de THC em ppm. Fonte: Elaboração própria

Analisando-se a figura 5.8, verifica-se:

- O conversor atingiu sua temperatura de “*light-off*” durante a fase de aquecimento do veículo, quando a temperatura no catalisador atingiu um temperatura máxima de cerca de 520°C;
- O veículo foi desligado após a fase de aquecimento, por 5 minutos, simulando a espera na fila da Inspeção;
- O motor foi religado, sendo realizada a descontaminação do óleo do cárter @ 2500 RPM, onde percebe-se um pico de emissão de THC, com um máximo de 6500 ppm;
- Após a descontaminação, estabilizou-se a rotação do motor @ 2500 rpm e registraram-se as medições de THC pelo intervalo de tempo de 30 segundos, fornecendo uma leitura média de 353 ppm;
- A mesma metodologia foi utilizada nas medições de THC no regime de marcha lenta, fornecendo uma leitura média de 460 ppm.

Comparando-se os valores registrados com os valores definidos pela figura 5.6, para um veículo fabricado em 2003 (200 ppm), conclui-se que este veículo apresenta uma grande probabilidade de ser reprovado na Inspeção Veicular da cidade de São Paulo. Percebe-se que a temperatura na entrada do catalisador apresenta tendência de redução durante a parada do motor (pela figura 5.8, a temperatura passa de 397°C para 367°C), mas sofre redução importante quando o motor é religado, devido ao fluxo de gás de exaustão em temperatura inferior ao do catalisador, chegando à temperatura mínima de 267°C, inferior às temperaturas de “*light off*” de THC e CO que foram determinadas pela figura 5.2, respectivamente em 385°C e 435°C.

A mesma análise foi feita para as emissões de CO. As tabelas 5.8 e 5.9 apresentam os resultados de medição de CO @ 2500 rpm e marcha lenta, respectivamente, devidamente corrigidos.

Tempo [s]	CO <sub>m</sub> [%]	CO <sub>2m</sub> [%]	Fator	CO <sub>c</sub> [%]
1	0,0196	13,7620	1,0898	0,0214
2	0,0172	13,7795	1,0885	0,0187
3	0,0156	13,7742	1,0889	0,0169
4	0,0143	13,7764	1,0887	0,0156
5	0,0133	13,7753	1,0888	0,0145
6	0,0123	13,7614	1,0899	0,0134
7	0,0115	13,7498	1,0908	0,0125
8	0,0107	13,7501	1,0908	0,0116
9	0,0098	13,7352	1,0920	0,0107
10	0,0091	13,7689	1,0894	0,0099
11	0,0085	13,7600	1,0901	0,0093
12	0,0079	13,7104	1,0940	0,0087
13	0,0075	13,6926	1,0954	0,0082
14	0,0070	13,7043	1,0945	0,0077
15	0,0068	13,6944	1,0953	0,0074
16	0,0064	13,6907	1,0956	0,0070
17	0,0060	13,7028	1,0946	0,0066
18	0,0058	13,6964	1,0951	0,0063
19	0,0056	13,6897	1,0957	0,0062
20	0,0053	13,6897	1,0957	0,0058
21	0,0051	13,7007	1,0948	0,0055
22	0,0049	13,6872	1,0959	0,0053
23	0,0047	13,6751	1,0969	0,0051
24	0,0049	13,7102	1,0940	0,0053
25	0,0052	13,7284	1,0926	0,0057
26	0,0048	13,7222	1,0931	0,0053
27	0,0043	13,7059	1,0944	0,0047
28	0,0041	13,6946	1,0953	0,0045
29	0,0040	13,6527	1,0987	0,0043
30	0,0038	13,6591	1,0981	0,0042

Tabela 5.8 – Cálculo da concentração de CO corrigido @ 2500 rpm segundo CONAMA 07/93.  
Fonte: Elaboração própria

Tempo [s]	CO <sub>m</sub> [%]	CO <sub>2m</sub> [%]	Fator	CO <sub>c</sub> [%]
1	0,0044	13,7620	1,0899	0,0048
2	0,0042	13,7795	1,0885	0,0046
3	0,0041	13,7742	1,0890	0,0044
4	0,0039	13,7764	1,0888	0,0043
5	0,0038	13,7753	1,0889	0,0041
6	0,0037	13,7614	1,0900	0,0040
7	0,0036	13,7498	1,0909	0,0039
8	0,0035	13,7501	1,0909	0,0038
9	0,0034	13,7352	1,0921	0,0038
10	0,0034	13,7689	1,0894	0,0037
11	0,0033	13,7600	1,0901	0,0036
12	0,0033	13,7104	1,0940	0,0036
13	0,0032	13,6926	1,0955	0,0035
14	0,0032	13,7043	1,0945	0,0035
15	0,0031	13,6944	1,0953	0,0034
16	0,0031	13,6907	1,0956	0,0034
17	0,0031	13,7028	1,0946	0,0033
18	0,0030	13,6964	1,0952	0,0033
19	0,0030	13,6897	1,0957	0,0033
20	0,0030	13,6897	1,0957	0,0033
21	0,0029	13,7007	1,0948	0,0032
22	0,0029	13,6872	1,0959	0,0032
23	0,0029	13,6751	1,0969	0,0032
24	0,0029	13,7102	1,0941	0,0032
25	0,0029	13,7284	1,0926	0,0032
26	0,0029	13,7222	1,0931	0,0031
27	0,0028	13,7059	1,0944	0,0031
28	0,0028	13,6946	1,0953	0,0031
29	0,0028	13,6527	1,0987	0,0031
30	0,0028	13,6591	1,0982	0,0031

Tabela 5.9 – Cálculo da concentração de CO corrigido em marcha lenta segundo CONAMA 07/93. Fonte: Elaboração própria

A figura 5.9 representa o gráfico das emissões de THC durante este procedimento.

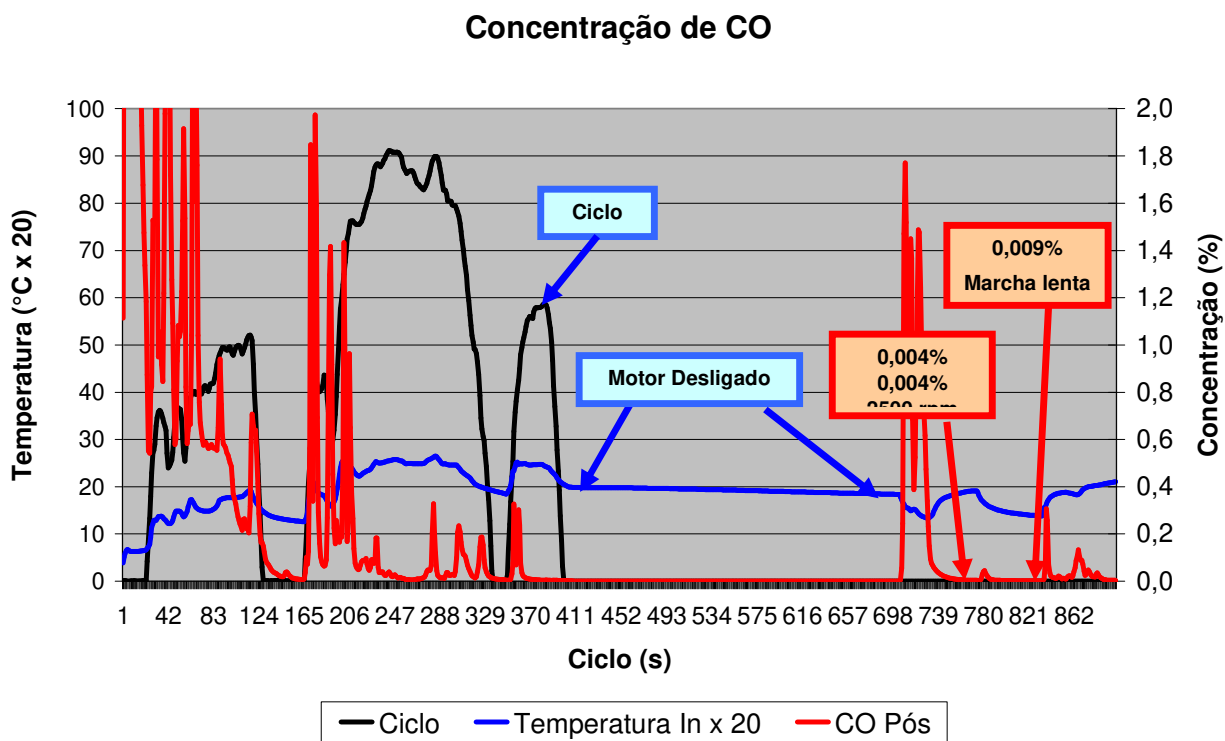


Figura 5.9: Emissões de CO em %. Fonte: Elaboração própria

Pela análise da figura 5.9, pode-se concluir que o veículo apresentou valores de CO @ 2500 RPM de 0,004% (40 ppm) e CO em marcha lenta de 0,009% (90 ppm), para um limite estipulado de 0,500% (5000 ppm).

Embora a temperatura de “*light-off*” do catalisador para o CO seja superior a 400°C, há conversão suficiente deste gás na temperatura do ensaio para atender o limite da legislação. A robusta calibração do sistema de injeção do veículo também favorece o atendimento aos limites legais.

Veículos com alta quilometragem, mesmo com manutenções preventivas realizadas tendem a apresentar maiores variações das emissões de THC em relação às emissões de CO. Isto se explica devido ao desgaste natural do motor, favorecendo o aumento de folgas internas, o que aumenta o seu fluxo de “*blow-by*”.



## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

### 6.1 Conclusões

A legislação de controle de emissões brasileira está ativa. A certificação de novos modelos segue uma metodologia implementada desde a criação do PROCONVE em 1986 e já passou por diversas fases desde então. Especificamente em relação aos veículos leves equipados com motores do ciclo OTTO, o controle das emissões da frota circulante iniciou-se em 2008 em dois grandes centros urbanos: Rio de Janeiro e São Paulo. A metodologia empregada baseia-se em resolução do CONAMA de 1993 e não foi devidamente atualizada, pois o procedimento empregado no ensaio de Inspeção Veicular – I/M não verifica o sistema de controle de emissões do veículo em condições de carga e nem as emissões de NO<sub>x</sub>;

Apesar do aumento considerável da frota circulante no país, o inventário de emissões de poluentes pelo escapamento tem mostrado que o volume total emitido está controlado, o que atesta que o objetivo principal do PROCONVE está sendo atingido;

O veículo ensaiado em laboratório atendeu aos limites da legislação à qual foi projetado. Isto demonstra que o veículo escolhido apresentou um projeto robusto de controle de emissões de poluentes. Apesar disso, quando foi submetido à simulação de um ensaio I/M, o mesmo foi reprovado, devido à baixa temperatura de operação do catalisador;

Caso o procedimento adotado pela inspeção Veicular seja o único disponível, este deve garantir que o catalisador se mantenha aquecido a uma temperatura acima de sua temperatura mínima de trabalho. Veículos equipados com catalisadores localizados abaixo do assoalho (“*under body*”), como é o caso do veículo utilizado no estudo, apresentam maior dificuldade de aquecimento e manutenção da temperatura de trabalho.

O fato do veículo ter sido reprovado na simulação do ensaio de I/M, não significa que seria reprovado na inspeção real. Este trabalho visa demonstrar que a falta de condições de controle

necessárias ao correto aquecimento do catalisador pode determinar a aprovação ou não no ensaio. Este fato foi demonstrado durante a realização do ensaio conforme norma ABNT NBR 10972, onde as condições de controle estão presente.

A experiência internacional sinaliza o uso de metodologia diferente da empregada no Brasil, dependendo da tecnologia adotada no veículo. Países como Estados Unidos utilizam ensaios com cargas parciais, utilizando dinamômetros de rolos, similares aos empregados em ensaios de certificação dos veículos em laboratório.

A partir de 2007, o Brasil padronizou o sistema de diagnose OBD BR2 que poderia ser utilizado durante o procedimento I/M, como complemento a este, aumentando a eficácia da Inspeção, pois é capaz de informar se o catalisador apresenta o desempenho mínimo exigido pela legislação, independentemente do resultado no ensaio de I/M.

## 6.2 Sugestões para próximos trabalhos

Aumento da amostragem: Este trabalho estudou apenas um veículo, considerado representativo da frota circulante. Uma maior amostragem deve ser ensaiada para confirmação dos resultados;

Variação das condições de ensaio: O ensaio em laboratório foi realizado em condições controladas de temperatura (24°C) e umidade (55%), utilizando-se combustível padrão (Gasool A22). Condições não controladas podem influenciar nos resultados e devem ser estudadas em um futuro trabalho;

Ensaio em veículo alimentado a Etanol Hidratado: É sabido que um motor alimentado por combustível Etanol hidratado (AEHC) gera menor temperatura de combustão, o que afeta diretamente a eficiência do catalisador. Estudos posteriores devem ser realizados neste sentido;

Evolução do procedimento de ensaio: Estudos devem ser realizados para garantir que o catalisador atinja sua temperatura mínima de trabalho, durante a realização da Inspeção Veicular.

Utilização de um veículo equipado com sistema de diagnose OBD Br2 para comparação do funcionamento do catalisador, mesmo que não passe na inspeção conforme CONAMA 07/93.

Desenvolvimento de sistema de monitoramento não invasivo da temperatura do catalisador visando verificar seu efetivo funcionamento durante o ensaio de I/M.

## REFERÊNCIAS

ABB Automation Products GmbH, **Manual de técnico do analisador Multi-FID 41/24-106 EM**, 2004. p.1-8

ANFAVEA, **Anuário da Indústria Automobilística**, São Paulo, 2009. p.48-78

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **Norma NBR 6601:2012** - Veículos rodoviários automotores leves - Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento, de 18 de Setembro de 2012. 49p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **Norma NBR 8689:2012** - Veículos rodoviários automotores leves — Combustíveis para ensaio — Requisitos, de 02 de Setembro de 2008. 4p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **Norma NBR 10972:2010** - Veículos rodoviários automotores leves – Medição da concentração de monóxido de carbono no gás de escapamento em regime de marcha lenta. Ensaio de laboratório, de 10 de Junho de 2010. 5p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **Norma NBR 14008: 2007** - Veículos rodoviários automotores leves - Determinação do fator de deterioração das emissões de gases durante o acúmulo de rodagem, de 10 de Dezembro de 2007. p.3-4

Benson R.S.; Whitehouse N. D. - **Internal Combustion Engine**, Pergamon, Oxford, 1979. 201p.

Branco, G. M.; Szwarc, A.; Branco, F. C. **Programa Ambiental de Inspeção e Manutenção Veicular – Princípios, Fundamentos e Procedimentos de Teste**, AEA 2012. p.45-47

Bravo, C. A. F. **Estudo de Catalisadores Automotivos frente ao Envenenamento com Enxofre**. 2006. 213p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CAA - **Clean Air Act Amendments** of 1990. 104 Stat. 2468. p.101-549

Cagle, G. and Probst, C. **Changing I/M Performance Objectives**, SAE Technical Paper 970810, 1997, doi:10.4271/970810, 13p.

Cahtterjee, D.; Deutshmann, O.; Warmatz, J. **Detailed Surface Reaction Mechanism in a Three-way Catalyst**, Heidelberg University, 2001 ,119, 371-384

CARB – **Califórnia Air Resources Board**, disponível em <http://www.arb.ca.gov/html/brochure/history.htm>, acessado em 13 de Julho de 2013

CETESB – **PCPV – Plano de Controle de Poluição Veicular do Estado de São Paulo**, 2013, 42p.

CFR - Title 40 - **Data analysis and reporting**, Chapter I - Subchapter C - Part 51 - Subpart S - Section 51.366, 2013

EPA – Environmental Protection Agency. **Code of Federal Regulations – Title 40, Part 86**,2013;

**Dieselnet**, 2004 disponível em [http://www.dieselnet.com/tech/cat\\_conv.php#methods](http://www.dieselnet.com/tech/cat_conv.php#methods), acessado em 13 de Julho de 2013

Freire de Mello, L.; Hogan, D J. **População, consumo e meio ambiente. In: Hogan, D J. (org). Dinâmica populacional e mudança ambiental: cenários para o desenvolvimento brasileiro**. Campinas: NEPO-UNICAMP, 2007. P. 59-72

Ganesan, V. **Internal Combustion Engines**, editado pela Tatá Mc Graw-Hill, 2006, p. 495-538

GM **HeritageCenter**, 2012 disponível em: <http://www.gmheritagecenter.com/> acessado em 14 de Julho de 2013;

**Gordon-Darby, Inc**, 2012 disponível em <http://www.gordon-darby.com/#History>, acessado em 15 de Setembro de 2013;

Granados, M.; Galisteo, F. **Modification of a three-way catalyst washcoat by aging: A study along the longitudinal axis.** Appl. Surf. Sci, 2006, p. 8442-8450

Horiba Instruments Incorporated. **Manual técnico do analisador Mexa 324J – Automotive Emission Gás Analyzer**, 2002, 37p.

INEA – RJ. **Programa de Inspeção e Manutenção de veículos em Uso – I/M**, 2011, disponível em <http://www.inea.rj.gov.br/fma/programa-im.asp>, acessado em 22 de Setembro de 2013;

INMETRO. **Ensaio de Proficiência em Emissões Veiculares - 4ª Rodada – Relatório Final - N° 002/12 – Rev. 01**, 2012, 24p.

LANG, F. **Máquinas térmicas à combustão interna de Otto e de Diesel**, 2006, 4 p.;

LUKANIN, V. N. **Motores de combustión interna**. Moscou: Ed. Mir, 1988, 384 p.

MECA - **Manufacturers of Emission Controls Association**, 2004, disponível em ([http://www.meca.org/galleries/default-file/Makino\\_presentation.pdf](http://www.meca.org/galleries/default-file/Makino_presentation.pdf)), acessado em 18 de agosto de 2013;

Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução número 18/86** de 6 de Maio e 1986;

Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução número 07/93** de 31 de Agosto de 1993;

Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução número 354/04** de 13 de Dezembro de 2004;

Ministério do Meio Ambiente, **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**, 2011;

Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA **Instrução normativa Nº 126**, de 24 de Outubro de 2006;

Mohallem N.; Viana M.; Silva R. **Automotive Catalysts: Performance, Characterization and Development**, 2011. p. 347-364

Oliveira, J.; Ugarte, J.; Sampaio, J.; França, S. **Vermiculita**, CETEM – Centro de Tecnologia Mineral – Ministério de Processos Mineraiis, 2005. p. 677-679

Palmgren, F. **Comparison of the EU and US Experiences with respect to Controlling Emissions from High Emitting Vehicles**, 2004. p.7-9

Prefeitura da cidade de São Paulo. **Decreto nº 50.232** de 17 de Novembro de 2008;

Ribeiro D.; Montani, S.; Cardoso, A.; Zotin, F. **Estudo da Desativação Térmica e Química de Catalisadores Automotivos Comerciais**, 2009. p. 2-4

Robert Bosch GmbH. **Automotive Handbook** – SAE store, 2011. p. 438-454

Shelef, M.; McCabe. **Catalysis Today** | Vol 62, Iss 1, 2000. p. 17-48, (25 September, 2000);

Shinichi, K.; Sheiji, H. **High Cell Density and Thin Wall Substrate for Higher Conversion Ratio Catalyst**, SAE Paper Number: 1999-01-0268, 1999;

Silva, R. A. **Estudo das características morfológicas, texturais e estruturais dos catalisadores automotivos**, 2008. p. 170-174

Stone, R. **Introduction to Internal Combustion Engines**, editado pela Society of Automotive Engineers, Inc – SAE USA, 1999. p. 231-273

TERAO, K. **Irreversible phenomena: ignitions, combustions and detonation waves**. Berlim Heidelberg: Springer Verlag, 2007. p. 283-295

Texas Department of Public Safety. **OBDII Inspection Guide** – DKC De la Torre Klausmeier Consulting, Inc, 2002, 20 p.

Udron L.; Hackel M.; Schaub G.; Turek, T. **Catalysis of Reduction and Oxidation Reactions for Application in Gas Particle Filters**, 2002. p. 1-2

UNEP. United Nations Environmental Program. **Phasing lead out of gasoline: An examination of policy approaches in different countries**, 1999. 14 p.

Pantaroto, H.; Vieira, M.;Figueiredo, P. **A Eliminação do Chumbo na Gasolina**, 2007. 6 p.