



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

ESTUDO DO USO DE MISTURAS DE ETANOL HIDRATADO E GASOLINAS  
AUTOMOTIVAS EM UM MOTOR ASTM-CFR

Rafael Teixeira Chaves

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Marcelo José Colaço  
Orientador: Eng. Nauberto Rodrigues Pinto

RIO DE JANEIRO  
MARÇO DE 2013



ESTUDO DO USO DE MISTURAS DE ETANOL HIDRATADO E GASOLINAS  
AUTOMOTIVAS EM UM MOTOR ASTM-CFR.

Rafael Teixeira Chaves

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

---

Prof. Marcelo José Colaço, D.Sc. (Orientador)

---

Eng. Nauberto Rodrigues Pinto (Orientador)

---

Prof. Albino José Kalab Leiroz, Ph.D.

---

Prof. Helcio Rangel Barreto Orlande, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2013

Teixeira Chaves, Rafael

Estudo do uso de misturas de etanol hidratado e gasolinas automotivas em um motor ASTM-CFR./ Rafael Teixeira Chaves. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

VIII, 59 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo José Colaço, D.Sc.

Orientador: Nauberto Rodrigues Pinto

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Mecânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 50-51.

1. Misturas de Combustíveis. 2. Octanagem. 3. Consumo de Combustível. 4. Emissão de poluentes. I. Colaço, Marcelo José *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Mecânica. III. Título

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família, em especial aos meus pais, Maria da Conceição e Jorge Luiz, e minha irmã Renata por todo apoio ao longo do curso.

Aos meus orientadores, Marcelo José Colaço e Nauberto Rodrigues Pinto, por todos os ensinamentos, tornando possível a realização desse trabalho.

Ao professor Albino J. K. Leiroz pelo auxílio nos testes de emissão de poluentes.

À minha namorada Érika pelas palavras de carinho e apoio em todos os momentos difíceis da minha vida.

Ao pessoal da Daeq, em especial aos amigos Betão, Alcir e Gláucio.

Aos grandes amigos de longa data e aos que fiz ao longo do curso: Abrahão Moutinho, Amanda Quilici, Danielle Reis, Fernando Barra, Filipe Reis, Frederico D'Andrea, Gabriel Mesquita, Gustavo Bittencourt, Gabriel Bezerra, Hyrllan Souza, Ignácio Murta, José Vicente Avellar, Leonardo Soutto, Marcello Camillo, Márcio Barbosa, Maurício Machado, Pedro Henrique Pinna, Poti-Ayrá, Rafael Mendonça, Rafael Miranda, Rodrigo Cochrane, Rodrigo Goi, Ronald Leonardo, Sandro Alves, Thiago Carvalho e a todos os outros que fazem parte da minha vida.

## RESUMO

Neste trabalho é analisado o impacto da adição de etanol hidratado em diferentes proporções nas gasolinas Comum e Premium, ambas do tipo C, em um motor padrão ASTM CFR-F2 utilizado para determinar a octanagem de combustíveis. Foram utilizadas as gasolinas comerciais Comum e Premium, sem adição de etanol hidratado e com proporções de 20%, 30% e 40% de etanol hidratado em volume. As misturas de combustíveis foram efetuadas com o auxílio de um misturador de fluidos *Biomatic*. Testes experimentais foram realizados para se determinar a octanagem MON, consumo e emissão de poluentes dos combustíveis puros e das misturas. Os consumos dos combustíveis foram avaliados variando-se a razão de compressão para cada combustível utilizado.

## ABSTRACT

This study evaluates the impact of hydrous ethanol addition to Type C automotive gasolines (regular and premium) in different proportions on a standard ASTM CFR-F2 engine used to determine octane number of fuels. Both regular and premium gasolines were used without hydrous ethanol and with 20%, 30% and 40% of hydrous ethanol by volume. The fuel blends were made with a *Biomatic* fluid mixer. Experimental tests were conducted to determine the motor octane number (MON), fuel consumption and pollutant emission of the different fuel blends. The fuel consumption tests were evaluated by varying the compression ratio for each fuel used.

# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO .....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABELAS.....	viii
1. Introdução .....	1
2. Revisão Teórica.....	3
2.1. Motores de combustão interna – Ciclo Otto.....	3
2.2. Parâmetros operacionais dos motores alternativos.....	5
2.3. Combustão em motores de ignição por centelha.....	6
2.3.1. Análise estequiométrica da combustão .....	7
2.4. Combustão anormal.....	8
2.5. Octanagem.....	8
2.6. Métodos de medição de octanagem: MON e RON.....	9
2.7. Combustíveis.....	9
2.7.1. Gasolina.....	9
2.7.2. Etanol Combustível.....	10
2.8. Emissões no processo de combustão.....	11
2.8.1. Emissão de NOx .....	13
2.8.2. Emissão de CO.....	13
2.8.3. Emissão de CO2 .....	13
2.8.4. Emissão de aldeídos .....	14
2.8.5. Emissão de hidrocarbonetos.....	14
2.9. Desempenho de motores utilizando misturas de gasolina e etanol .....	14
2.9.1. Os motores Flex .....	15
2.10. Poder calorífico .....	16
3. Descrição do aparato experimental .....	17
3.1. Motor CFR .....	17
3.1.1. Sistema de carburação do motor CFR.....	20
3.2. Analisador de Emissões .....	22
3.2.1. Unidade Analisadora.....	24
3.2.2. Unidade de Controle.....	24
3.2.3. Sonda.....	24
3.3. Combustíveis.....	25

3.3.1.	Combustíveis padrões de referência.....	25
3.3.2.	Gasolinas .....	25
3.3.3.	Etanol .....	26
3.4.	Balança de precisão .....	26
4.	Procedimento Experimental .....	27
4.1.	Propriedades dos combustíveis .....	27
4.2.	Preparo das misturas.....	29
4.3.	Ajuste no carburador do motor CFR .....	31
4.4.	Avaliação do consumo e octanagem de combustível no motor .....	32
	CFR-F2.....	32
4.4.1.	Procedimento para medição do consumo de combustível.....	35
4.5.	Medição das emissões de gases do escapamento .....	37
4.5.1.	Procedimento para ajuste do motor para o teste de emissões.....	37
5.	Resultados .....	38
5.1.	Octanagens dos combustíveis.....	38
5.2.	Consumo absoluto de combustível.....	42
5.3.	Emissão de poluentes .....	44
6.	Tratamento de Dados .....	45
6.1.	Incertezas da massa específica .....	45
6.2.	Incertezas no consumo de combustível .....	47
6.2.1.	Etapa 1: Incerteza da medição do consumo .....	47
6.2.2.	Etapa 2: Conversão para ml/min e propagação da incerteza .....	47
6.2.3.	Etapa 3: Conversão para g/min e propagação da incerteza .....	48
7.	Conclusão.....	49
	Referências bibliográficas .....	50
	APÊNDICE A. Gráficos de Emissões de Gases do Escapamento .....	52
	APÊNDICE B. Tabela de incertezas do consumo: mm/min e mm/s .....	55
	APÊNDICE C. Tabela de incertezas do consumo: ml/min e ml/s .....	56
	APÊNDICE D. Tabela de incertezas do consumo: g/min e g/s .....	57
	APÊNDICE E. Escala do Micrômetro para indicação da Razão de Compressão .....	58



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estágios de operação de um motor quatro tempos de ciclo Otto. (HEYWOOD, 1988) .....	3
Figura 2.2 - Geometria do cilindro, pistão, biela e virabrequim. (Adaptado de HEYWOOD, 1988) .....	5
Figura 2.3 - Pressão do cilindro versus avanço de ignição (HEYWOOD, 1988) .....	7
Figura 2.4 - Curva de emissões típica (HEYWOOD, 1988) .....	12
Figura 3.1 - Motor CFR-F2 .....	17
Figura 3.2 - Knockmeter do motor CFR .....	18
Figura 3.3 - Cilindro e seus componentes (ASTM D2700, 2004).....	19
Figura 3.4 - Sistema do carburador do motor CFR (ASTM D2700, 2004).....	21
Figura 3.5 - Razão ar/combustível para máxima detonação (ASTM D2700, 2004) .....	22
Figura 3.6 - Teste 350XL.....	22
Figura 3.7 - Componentes do analisador de gases .....	23
Figura 3.8 - Sistema de saída de gases para o analisador.....	24
Figura 3.9 – Sonda acoplada ao escapamento do motor CFR.....	25
Figura 3.10 - Balança de precisão do Laboratório de Máquinas Térmicas .....	26
Figura 4.1 - Verificação do teor de álcool anidro na gasolina.....	28
Figura 4.2 - Verificação da massa específica .....	28
Figura 4.3 - Preparo das misturas com a balança e béquer de 4000ml .....	30
Figura 4.4 - Misturador <i>Biomatic</i> .....	31
Figura 4.5 - Recipientes com as misturas formadas .....	31
Figura 4.6 - Reservatório de combustível e visor de vidro do nível de altura da cuba de combustível .....	32
Figura 4.7 - <i>Detonation Meter</i> – Motor CFR-F2.....	34
Figura 4.8 - Escala do nível do reservatório de combustível .....	35
Figura 4.9 - Relógio comparador (micrômetro) que indica altura do cilindro .....	36
Figura 4.10 - Sistema de manivela para variação da altura do cilindro (razão de compressão)..	36
Figura 5.1 - Influência da adição de AEHC na gasolina em relação à octanagem.....	39
Figura 5.2 - Ajuste polinomial da octanagem das Misturas .....	40
Figura 5.3 – Ajuste polinomial sem convergência para o valor de 89,7 do etanol.....	41
Figura 5.4 - Consumo absoluto da gasolina Comum e suas misturas .....	43
Figura 5.5 - Consumo absoluto da gasolina Premium e suas misturas .....	43
Figura 5.6 - Influência do AEHC no aumento do consumo de combustível.....	44

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Tabela produção de autoveículos por tipo e combustíveis em 2010 (Anfavea, 2010) .....	1
Tabela 2.1 - Principais constituintes do ar seco (HEYWOOD, 1988) .....	8
Tabela 2.2 - Limites máximos de emissão de poluentes para veículos automotores leve de passageiros - PROCONVE.....	12
Tabela 2.3 - Propriedades de combustíveis (HEYWOOD, 1988).....	16
Tabela 3.1 - Especificações do motor ASTM CFR-F2 .....	20
Tabela 3.2 – Dados técnicos do analisador de gases (TESTO INC. 2003) .....	23
Tabela 4.1 - Misturas de gasolina Comum e Premium (ambas do tipo C) e AEHC realizadas ..	27
Tabela 4.2 - Propriedades dos combustíveis utilizados.....	29
Tabela 4.3 - Formação das misturas de AEHC e gasolina Comum .....	30
Tabela 4.4 - Formação das misturas de AEHC e gasolina Premium.....	31
Tabela 4.5 - Condições Operacionais dos testes - Temperaturas .....	32
Tabela 4.6 - Variação automática do avanço de ignição com mudança de altura do cilindro.....	33
Tabela 4.7 - Eletrônica do motor para a gasolina Comum e suas misturas .....	33
Tabela 4.8 - Eletrônica do motor para a gasolina Premium e suas misturas .....	34
Tabela 5.1 - Octanagem da gasolina comum e suas misturas .....	38
Tabela 5.2 - Octanagem da gasolina Premium e suas misturas.....	39
Tabela 5.3 – Tabela de regra da mistura – Valores de octanagem MON calculadas .....	42
Tabela 6.1 - Massas específicas dos combustíveis.....	46
Tabela 6.2 - Propriedades da gasolina comum e suas misturas com incertezas .....	46
Tabela 6.3 - Propriedades da gasolina Premium e suas misturas com incertezas .....	46

# 1. Introdução

O desenvolvimento de motores Flex, bicombustíveis, que aceitam diferentes misturas de etanol e gasolina, tem avançado cada vez mais e mostram ser uma tendência mundial. O Brasil possui esta tecnologia, e conta com a maior frota de veículos Flex do mundo. A Tabela 1.1 relaciona a produção de veículos por tipo e combustíveis em 2010, demonstrando a superioridade na produção de veículos Flex em relação aos outros combustíveis. Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea) no Brasil, mais de 80% dos veículos produzidos em 2010 possuem motores com a tecnologia Flexfuel, podendo operar com etanol, gasolina e misturas de ambos os combustíveis em qualquer proporção (ANFAVEA, 2012). Tal dado revela a grande importância de se estudar os efeitos produzidos pelas diferentes misturas de álcool e gasolina nos motores de ciclo Otto.

**Tabela 1.1 - Tabela produção de autoveículos por tipo e combustíveis em 2010 (Anfavea, 2010)**

	TOTAL
GASOLINA	660.182
<b>FLEX FUEL</b>	<b>2.625.092</b>
DIESEL	358.760
TOTAL	3.644.034

No Brasil, adota-se também a adição de etanol anidro à gasolina, (PORTARIA MAPA Nº 678, DE 31.8.2011 - DOU 1.9.2011, fixa em vinte por cento o percentual obrigatório de adição de etanol anidro combustível à gasolina, a partir da zero hora do dia 1º de outubro de 2011) como aditivo de aumento da octanagem e presença de oxigenado para redução de emissões de poluentes, resultando na gasolina do tipo C (comum, aditivada e premium) encontrada nos postos de combustíveis. A adição do etanol é uma alternativa ao chumbo tetraetila que ao ser usado em carros dotados de catalisadores no sistema de escape resulta no acúmulo das células cerâmicas pelo metal, ocasionando entupimento e perda de potência. Além disso, o chumbo é um componente cancerígeno.

A busca por motores menos poluentes e pela utilização de combustíveis renováveis também incentiva outros países a adotarem a adição de etanol na gasolina,

tornando-se necessário o estudo do comportamento dessas misturas nos motores e seus efeitos em relação ao consumo de combustível e emissão de poluentes.

O interesse no uso de biocombustíveis, como o etanol, é dado não só pela redução dos gases do efeito estufa, mas também pela redução da dependência do uso de combustíveis fósseis. Os biocombustíveis podem ser utilizados em motores dedicados a estes combustíveis, em motores adaptados (convertidos) ou utilizados em misturas com outros combustíveis como o álcool anidro misturado à gasolina.

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da adição de etanol hidratado em gasolinas comerciais no desempenho de um motor de combustão interna de ignição por centelha, monocilíndrico, padrão ASTM CFR, normalmente utilizado para avaliar a octanagem de combustíveis. Foram feitos testes experimentais para medir o consumo de combustível absoluto, a octanagem MON e emissão de poluentes. Foram utilizadas as gasolinas Comum e Premium e o etanol hidratado. Para os testes, foram preparadas misturas de gasolinas com adição de 20%, 30% e 40% de etanol hidratado em volume para comparação de resultados.

## 2. Revisão Teórica

### 2.1. Motores de combustão interna – Ciclo Otto

Os motores de combustão interna já datam mais de cem anos e sua história ainda continua sendo escrita, dado o seu constante desenvolvimento, seja aplicado a veículos como meio de transporte, grupos como geração de energia elétrica e aplicações industriais como motobombas e motosserras.

Esses motores são máquinas térmicas que produzem trabalho mecânico através da energia química pela queima ou oxidação do combustível dentro da câmara de combustão.

Nicolaus Otto implementou as ideias de Beau de Rochas e construiu em 1876 o motor de combustão interna com ignição por centelha de quatro tempos, cujo ciclo até hoje é conhecido como ciclo Otto. A maioria dos motores alternativos (de êmbolo) opera com o ciclo de quatro-tempos, que são divididos em admissão, compressão, expansão e exaustão. Esse ciclo pode ser visualizado na figura 2.1 que representa os quatro tempos do motor.

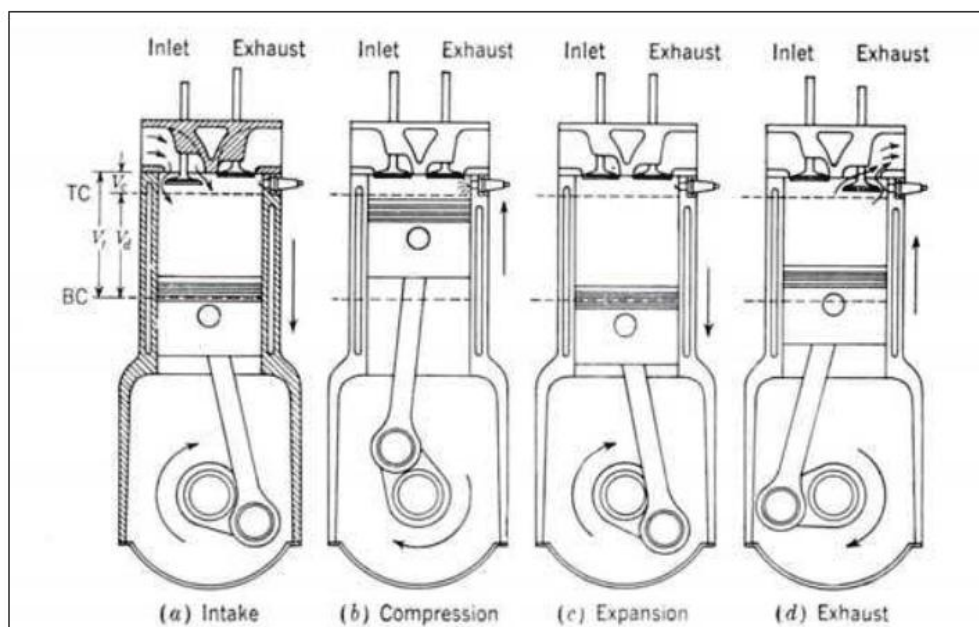


Figura 2.1 - Estágios de operação de um motor quatro tempos de ciclo Otto. (HEYWOOD, 1988)

- **Admissão:** Inicia com o pistão próximo ao ponto morto superior e termina no ponto morto inferior, onde a mistura ar-combustível é aspirada, dada a diferença entre a pressão atmosférica e a do sistema de admissão. A válvula de admissão se mantém aberta enquanto a de exaustão se mantém fechada. O pistão é impulsionado para baixo pelo virabrequim.
- **Compressão:** A mistura dentro do cilindro é comprimida, tendo tanto a pressão quanto a temperatura aumentadas. As válvulas de admissão e escape se mantêm fechadas durante esse estágio. Antes do ponto morto superior, a combustão é iniciada pela descarga elétrica da vela de ignição, havendo um aumento de pressão.
- **Expansão:** Começa no ponto morto superior e acaba no ponto morto inferior, onde a alta temperatura e alta pressão empurram o pistão para baixo, fazendo o virabrequim rodar, fornecendo a força necessária ao motor. Esse é o único estágio que efetivamente produz trabalho. Ambas as válvulas encontram-se fechadas.
- **Exaustão:** Os gases provenientes da combustão deixam o cilindro. O pistão no ponto morto inferior se desloca até o ponto morto superior com a válvula de escape aberta e de admissão fechada. Após esse estágio, o ciclo se repete.

Nos motores de combustão interna com ignição por centelha, ar e combustível são geralmente misturados no sistema de alimentação através de um carburador ou injeção eletrônica para então a mistura ser admitida na câmara de combustão. Segundo HEYWOOD (1988), entre 10 e 40 graus do virabrequim antes do ponto morto superior no estágio de compressão, há a descarga elétrica na vela de ignição e o processo de combustão se inicia. Para cada motor há um avanço ótimo de ignição que garante um torque máximo.

## 2.2. Parâmetros operacionais dos motores alternativos

A figura 2.2 apresenta um arranjo simplificado de um pistão conectado a um sistema biela-manivela, o qual se desloca dentro de um cilindro.

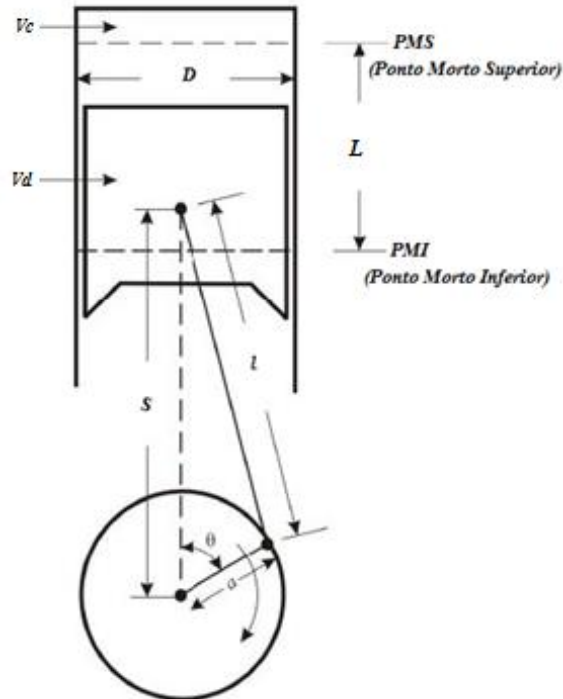


Figura 2.2 - Geometria do cilindro, pistão, biela e virabrequim. (Adaptado de HEYWOOD, 1988)

Nesta figura,  $PMS$  é o ponto morto superior,  $PMI$  é o ponto morto inferior,  $l$  é o comprimento da biela,  $D$  é o diâmetro do pistão,  $L$  é o curso,  $a$  é o raio do virabrequim,  $V_c$  é o volume da câmara e  $V_d$  é o volume deslocado.

A razão de compressão é relacionada com o volume da câmara e o volume deslocado da seguinte forma:

$$\text{Razão de compressão } r_c = \frac{\text{volume máximo do cilindro}}{\text{volume mínimo do cilindro}} = \frac{V_c + V_d}{V_c} \quad (2.1)$$

Valores típicos de razão de compressão valem 15:1 para o combustível GNV, 12,5:1 para o etanol e 9:1 para a gasolina.

O volume do cilindro pode ser relacionado de forma geométrica, para qualquer posição  $\theta$  do eixo de manivelas:

$$V(\theta) = V_c + \frac{\pi D^2}{4} (l + a - s) \quad (2.2)$$

Onde o valor de  $s$  pode ser relacionado com o ângulo da seguinte forma

$$s(\theta) = a \cos \theta + (l^2 - a^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \quad (2.3)$$

### 2.3. Combustão em motores de ignição por centelha

O processo de combustão é uma reação rápida e exotérmica que ocorre em fase gasosa da mistura ar-combustível, onde o oxigênio é um dos reagentes, e é um dos processos que controla a potência, eficiência e emissão de poluentes dos motores.

Em motores convencionais de ignição por centelha, ar e combustível são misturados no sistema de admissão, que então são admitidos através da válvula de admissão para dentro dos cilindros onde são também misturados com gases residuais e então comprimidos. Em condições normais de operação, a combustão é iniciada um pouco antes do final do estágio de compressão através da descarga elétrica da vela de ignição. Uma frente de chama turbulenta tem seu início dado pela ignição, que se propaga até alcançar as paredes da câmara de combustão, onde é extinta.

A combustão tem seu início antes do final do estágio da compressão e continua até a parte inicial do estágio de expansão tendo seu término depois do ponto no ciclo onde há o pico de pressão.

O avanço de ignição (para antes do ponto morto superior) resulta em mudanças no comportamento do motor. Há um avanço ótimo que garante o máximo torque, o qual depende de cada motor e das condições de operação. A figura 2.3 a seguir demonstra a variação do avanço da ignição com as máximas pressões resultantes no cilindro, para um motor típico.

Com o aumento do avanço de ignição, ou seja, a ocorrência da ignição provocada pela vela de ignição para antes do ponto morto superior, o trabalho aumenta. Com a diminuição do avanço, ou seja, o tempo de ignição para mais próximo do ponto morto superior, há uma diminuição no trabalho resultante devido à diminuição no pico de pressão (HEYWOOD, 1988).



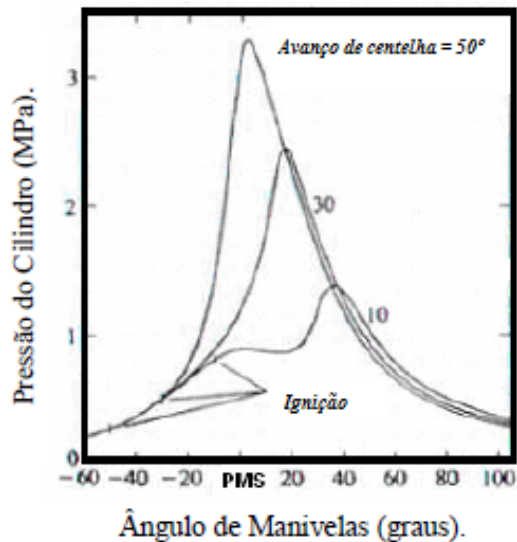
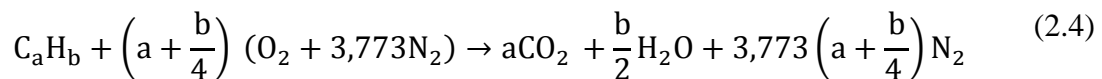


Figura 2.3 - Pressão do cilindro versus avanço de ignição (HEYWOOD, 1988)

### 2.3.1. Análise estequiométrica da combustão

O oxidante mais usado em processos de combustão é o ar, pois é de grande disponibilidade. O ar estequiométrico é a quantidade mínima de ar necessária para a combustão completa do combustível. A equação 2.4 demonstra a combustão completa do combustível.



Admitindo-se que a combustão seja completa, todo carbono do combustível é queimado a  $CO_2$ , todo hidrogênio a  $H_2O$  e todo enxofre (quando houver) é queimado a  $SO_2$ . Caso haja oxigênio insuficiente, a combustão será incompleta. A combustão incompleta gera monóxido de carbono (CO) e material particulado que é composto de partículas de carbono.

É prática comum usar mais ar do que a quantidade estequiométrica em processos de combustão para aumentar as chances de ocorrência de combustão completa ou para controlar a temperatura da câmara de combustão. O excesso de ar é caracterizado pela quantidade de ar acima da estequiométrica e uma quantidade de ar menor do que a estequiométrica é denominada deficiência de ar. (ÇENGEL & BOYLES, 2006).

A tabela 2.1 indica os principais constituintes do ar seco e suas características que são importantes para o cálculo da estequiometria da combustão.

**Tabela 2.1 - Principais constituintes do ar seco (HEYWOOD, 1988)**

<b>Gás</b>	<b>ppm por volume</b>	<b>Peso molecular</b>	<b>Fração molar</b>	<b>Razão molar</b>
O <sub>2</sub>	209.500	31,998	0,2095	1
N <sub>2</sub>	780.900	28,012	0,7905	3,773
Ar	9.300	39,948	-----	-----
CO <sub>2</sub>	300	44,009	-----	-----
<i>Air</i>	1.000.000	28,962	1,0000	4,773

## **2.4. Combustão anormal**

A combustão anormal resulta em mau-funcionamento do motor e em casos severos pode ocasionar sua quebra, pois provoca a combustão espontânea da mistura ar-combustível, antes da descarga elétrica da vela de ignição. Os dois principais tipos de combustão anormal são a autoignição e a ignição de superfície.

A autoignição ou “batida de pino” é resultado do uso de um combustível com octanagem inferior à recomendada, ou a utilização de um avanço de ignição inadequado, resultando em um som característico e vibração do motor devido à propagação de ondas de pressão de grandes amplitudes e aumento da pressão. Esse fenômeno pode ser controlado diminuindo o avanço de ignição para diminuir a máxima pressão do ciclo ou utilizando-se combustível de maior octanagem.

A ignição de superfície é proveniente de pontos quentes na câmara de combustão que podem ser devido à utilização da vela de ignição com grau térmico incorreto, válvulas superaquecidas ou depósitos de carbono que ficam incandescentes com o aumento da pressão e temperatura, resultando na ignição fora do tempo correto. Podem ocorrer antes da descarga elétrica da vela (pré-ignição) ou depois (pós-ignição). O maior problema é resultado da pré-ignição devido à tendência dos pontos quentes ficarem cada vez mais quentes, levando a um aumento excessivo da pressão, podendo levar a um dano no pistão (HEYWOOD, 1988).

## **2.5. Octanagem**

Índice de octano ou octanagem é a medida do desempenho antidetonante de um combustível, ou seja, a habilidade do combustível resistir à detonação quando posto em alta pressão e temperatura na câmara de combustão do motor. Quanto maior a

octanagem, maior a resistência do combustível em resistir à detonação. Esse número faz equivalência com a resistência à detonação da mistura de iso-octano e do n-heptano, onde o iso-octano representa 100 de octanagem e o n-heptano 0 de octanagem. Uma mistura contendo 50% de iso-octano e 50% de n-heptano em volume representa a 50 de octanagem.

Existem dois métodos de ensaio de laboratório usados para se medir a octanagem. Um método resulta no *Research octane number (RON)*; o outro resulta no *Motor octane number (MON)*.

## **2.6. Métodos de medição de octanagem: MON e RON**

O método MON é determinado pela norma ASTM D2700 utilizando um motor padrão CFR (*Cooperative Fuel Research*) fabricado pela DRESSER-WAUKESHA. Esse método simula o motor em condições severas de funcionamento, como em uma ultrapassagem ou subida de ladeira. A rotação utilizada nos testes é de 900 rpm.

O método RON é determinado pela norma ASTM D2699 também utilizando o mesmo motor, porém simulando em condições normais de funcionamento. Neste método, o motor CFR utiliza a rotação de 600 rpm.

O Brasil utiliza o IAD (índice antidetonante) que corresponde à média aritmética dos valores obtidos nos métodos RON e MON.

No estudo em questão somente foi utilizado o método MON devido à sua maior severidade, representando melhores condições para a caracterização dos resultados.

## **2.7. Combustíveis**

Os motores de ciclo Otto atuais utilizam, em sua maioria, gasolina, etanol ou GNV (gás natural veicular) como combustíveis, que são a fonte de energia primária do motor liberada no processo de combustão.

### **2.7.1. Gasolina**

A gasolina é um combustível derivado do petróleo, utilizada principalmente em motores quatro tempos de ciclo Otto e é composta por uma mistura complexa de

hidrocarbonetos mais leves do que os do óleo diesel. Produtos oxigenados também fazem parte de sua composição, mas em quantidades muito inferiores (quando se trata da gasolina pura sem adição de etanol anidro), assim como o enxofre, nitrogênio e metálicos.

Sua obtenção é dada pelo refino do petróleo, processo este compreendendo diversas etapas ou dentre as mais gerais, a destilação que é uma separação física onde o nafta e o gasóleo são aproveitados para a produção da gasolina.

No Brasil, suas especificações são regulamentadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP (RESOLUÇÃO ANP Nº 57, DE 20.10.2011 - DOU 21.10.2011), onde se especifica dois tipos de gasolinas comercializadas no país, a “comum” que possui índice antidetonante mínimo de 87 e a “Premium” que possui índice antidetonante mínimo de 91 devendo ser utilizada em veículos de alto desempenho (com razão de compressão maior que 10:1). Devido à legislação vigente, a gasolina deve receber adição de álcool anidro, denominando-se gasolina do tipo C. A gasolina do tipo A não possui adição de álcool anidro e não se destina ao consumidor final, somente às distribuidoras.

### **2.7.2. Etanol Combustível**

O etanol é uma substância pura, composta por um único tipo de molécula ( $C_2H_5OH$ ); o álcool etílico hidratado combustível (AEHC) diferencia-se do anidro (AEAC) por possuir em torno de 4% em volume de água na sua composição. O etanol anidro é utilizado para a formação da gasolina C, pois assim evita a separação de fases dada pela presença da água. No Brasil, utiliza-se o etanol da cana-de-açúcar, ao contrário de outros países que produzem o álcool etílico a partir do milho (Estados Unidos da América) ou beterraba e trigo (países da Europa).

Segundo a resolução ANP Nº 7, de 9.2.2011, o etanol combustível no Brasil é destinado aos motores de ciclo Otto. É especificado sob a forma de álcool etílico anidro combustível, que é destinado ao distribuidor para ser misturado à gasolina tipo A para a formação da gasolina tipo C, e de álcool etílico hidratado combustível, que é destinado para a venda ao consumidor final nos postos revendedores.

## 2.8. Emissões no processo de combustão

Os motores de ignição por centelha e os motores por compressão (diesel) são as maiores fontes de poluição urbana. Nos motores de ignição por centelha, os gases de escapamento, que são produtos da combustão da mistura ar-combustível, contêm óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, hidrocarbonetos e dióxido de carbono, onde suas quantidades dependem do projeto de cada motor e das condições de funcionamento.

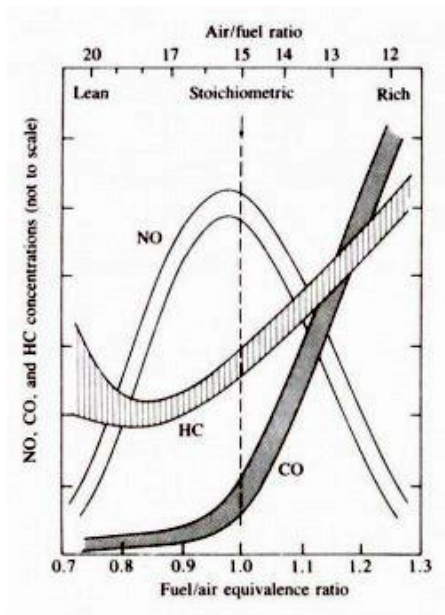
O uso do etanol combustível aumenta substancialmente as emissões de aldeídos, que ainda não possuem regulamentação no Brasil. O enxofre contido no diesel e na gasolina é queimado e produz óxidos de enxofre, como o  $\text{SO}_2$  e o  $\text{SO}_3$  que em contato com a água formam a chuva ácida.

Alguns fatores de funcionamento do motor implicam em mudanças no processo de emissão de poluentes. Quanto maior a temperatura dos gases queimados, maior a taxa de formação de óxido nítrico (NO), segundo HEYWOOD (1988).

O monóxido de carbono que também é formado no processo de combustão, varia com a razão ar-combustível, onde uma mistura rica (mais combustível do que ar), ou seja, possui oxigênio de forma insuficiente para queimar completamente todo o carbono no combustível para formar  $\text{CO}_2$ , tem a emissão de CO aumentada.

Durante a compressão e combustão, o aumento da pressão no cilindro força parte da mistura ar-combustível para as folgas entre o topo do pistão e o cilindro, onde a chama não consegue alcançar e, ao ser eliminada, aumenta a emissão de hidrocarbonetos não queimados. Outra fonte de hidrocarbonetos é o filme de óleo deixado nas paredes dos cilindros e pistão, que absorve e libera hidrocarbonetos antes e depois da combustão respectivamente (HEYWOOD, 1988)

Uma das mais importantes variáveis na determinação das emissões em um motor com ignição por centelha é a razão combustível/ar, como mostrada na figura 2.4, onde as formas das curvas demonstram a complexidade no controle das emissões.



**Figura 2.4 - Curva de emissões típica (HEYWOOD, 1988)**

No Brasil existem os Programas de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE (automóveis) e PROMOT (motocicletas) que fixam limites máximos de emissão de poluentes, com prazos e estabelecendo exigências tecnológicas para os veículos automotores sejam eles nacionais ou importados. Esses programas foram criados pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) com o objetivo de controlar e reduzir a contaminação atmosférica por veículos automotores. Na tabela 2.2 é possível observar os limites impostos para emissão de certos poluentes em duas diferentes fases do programa.

**Tabela 2.2 - Limites máximos de emissão de poluentes para veículos automotores leve de passageiros - PROCONVE**

POLUENTES	LIMITES	
	Fase L-5	Fase L-6 <sup>(1)</sup>
	Desde 1º/1/2009	A partir de 1º/1/2014
monóxido de carbono (CO em g/km)	2,00	1,30
hidrocarbonetos (HC em g/km)	0,30 <sup>(2)</sup>	0,30 <sup>(2)</sup>
hidrocarbonetos não metano (NMHC em g/km)	0,05	0,05
óxidos de nitrogênio (NOx em g/km)	0,12 <sup>(3)</sup> ou 0,25 <sup>(4)</sup>	0,08
material particulado <sup>(4)</sup> (MP em g/km)	0,05	0,025
aldeídos <sup>(3)</sup> (CHO g/km)	0,02	0,02
emissão evaporativa (g/ensaio)	2,0	1,5 <sup>(6)</sup> ou 2,0 <sup>(5)(6)</sup>
emissão de gás no cárter	nula	Nula

- (1) Em 2014 -> para todos os novos lançamentos  
A partir de 2015 -> para todos os veículos comercializados
- (2) Aplicável somente a veículos movidos a GNV;
- (3) Aplicável somente a veículos movidos a gasolina ou etanol;
- (4) Aplicável somente a veículos movidos a óleo diesel;
- (5) Aplicável aos ensaios realizados em câmara selada de volume variável
- (6) Aplicado a todos os veículos a partir de 1º/1/2012

### **2.8.1. Emissão de NO<sub>x</sub>**

Designa-se por NO<sub>x</sub> o somatório de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) que são os dois componentes mais emitidos em processos de combustão. As quantidades de NO formadas superam as de NO<sub>2</sub>, porém quando o NO é lançado na atmosfera, é rapidamente transformado em NO<sub>2</sub>.

A alta temperatura nas câmaras de combustão, alta pressão, razão ar-combustível, duração da combustão e a utilização de combustíveis com teores de nitrogênio contribuem para a alta formação de NO, que é um poluente que forma chuva ácida e é um precursor das reações fotoquímicas que levam a formação do *smog* (CARVALHO & LACAVA, 2003).

### **2.8.2. Emissão de CO**

O monóxido de carbono é resultado da combustão incompleta, normalmente gerado quando o motor trabalha com mistura de combustível rica, ou seja, mais combustível do que ar, resultando em oxigênio insuficiente para transformar todo o carbono em CO<sub>2</sub>. Como a relação de sua emissão é diretamente ligada à razão ar-combustível, representa ineficiência da combustão e perda química. Vale ressaltar que mesmo na combustão estequiométrica haverá liberação de CO, porém em menor quantidade.

Segundo CARVALHO & LACAVA (2003), o monóxido de carbono é um gás tóxico e inodoro, levando a morte dependendo da concentração.

### **2.8.3. Emissão de CO<sub>2</sub>**

Resultado da combustão estequiométrica ou pobre e da oxidação total do CO em CO<sub>2</sub>, é um dos gases que absorve radiação infravermelha contribuindo para o aumento

do efeito estufa, pois retém essa radiação na atmosfera (CARVALHO & LACAVA, 2003).

#### **2.8.4. Emissão de aldeídos**

WILLARD (1995) diz que o maior problema ao se utilizar álcool combustível é a formação de aldeídos que causam irritações nos olhos e vias respiratórias. É produto da combustão incompleta e a ampliação da porcentagem de etanol em volume na gasolina implicaria em seu aumento.

#### **2.8.5. Emissão de hidrocarbonetos**

Segundo HEYWOOD (1988), níveis de hidrocarbonetos não queimados no escapamento de um motor de ignição por centelha encontram-se na faixa de 1000 a 3000 ppm, representando de 1 a 2 por cento do combustível. Segundo CARVALHO & LACAVA (2003), parte do combustível em fase gasosa ou na forma líquida (em gotículas), assim como metano e acetileno que são hidrocarbonetos de menor peso molecular, representam os hidrocarbonetos não queimados. BHR (1972) mostrou que a emissão de CO e hidrocarbonetos não queimados possuem a mesma relação em relação à eficiência do motor onde o controle de emissão de CO afeta de mesma maneira a emissão de hidrocarbonetos.

CARVALHO & LACAVA (2003) ainda ressaltam a similaridade nos meios de emissão de CO e hidrocarbonetos contrastando com a emissão de NOx, visto que os parâmetros de influência de suas emissões atuam de formas divergentes, como é visto na figura 2.4 anteriormente apresentada na página 12.

Alguns hidrocarbonetos são cancerígenos e quando chegam a atmosfera causam irritação e mau cheiro.

### **2.9. Desempenho de motores utilizando misturas de gasolina e etanol**

As propriedades físicas do etanol promovem benefícios quando adicionado à gasolina devido a sua alta octanagem e seu alto calor de vaporização. Aumentar a octanagem é importante por possibilitar o uso de motores com maiores razões de



compressão e assim maior eficiência. Sua composição oxigenada reduz a emissão de gases nocivos à saúde.

Estudos têm sido elaborados em diversos países relacionando misturas de gasolina e etanol para que haja um melhor entendimento do comportamento do biocombustível em relação às emissões de poluentes em motores automotivos de ciclo Otto.

MELO *et al.*(2011) testaram a adição de etanol hidratado na gasolina comercial, com 25% de álcool anidro, nas proporções de 30%, 50% e 80% em um motor Flex de ciclo Otto. O consumo específico (kg/kWh) aumentou assim como a emissão de CO<sub>2</sub>, conforme se adicionou etanol à gasolina. A eficiência térmica também aumentou com a adição de etanol na gasolina. Houve uma redução nas emissões de monóxido de carbono (CO) devido ao etanol possuir oxigênio em sua composição, favorecendo a formação de dióxido de carbono CO<sub>2</sub>.

### **2.9.1. Os motores Flex**

Os motores Flex funcionam com qualquer mistura de etanol hidratado e gasolina. Para isso os bicos injetores de combustível possuem maior vazão e maior controle do tempo de abertura devido ao menor poder calorífico do álcool e a necessidade de se trabalhar com uma proporção maior de combustível/ar quando utilizado misturas com álcool.

Além das proteções das partes internas contra corrosão (como a bomba de combustível), é a parte eletrônica que torna o motor capaz de trabalhar com as diferentes misturas de combustíveis. O controle eletrônico sofreu aumento na capacidade de processamento, possibilitando a correção da mistura ar/combustível mais rapidamente através do sensor de oxigênio localizado no escapamento do motor (sonda lambda) que informa à central eletrônica, em forma de sinal elétrico, para que a mesma faça correção da mistura estequiométrica e permita a mudança do ponto de ignição, junto a um sensor de detonação, para onde resulte a maior pressão possível sem que ocorra detonação (ABRAHAM *et al*, 2010).

No caso do motor CFR utilizado no experimento, o qual é carburado, o ajuste ocorreu somente na altura de cuba do carburador que altera a razão ar-combustível de forma bastante limitada, sendo esse o único ajuste utilizado no motor dentro do

procedimento padrão. O avanço de ignição do motor CFR utilizado foi o automático com a altura do cilindro, ou seja, variando com a razão de compressão.

## 2.10. Poder calorífico

O poder calorífico é a energia que está contida no combustível e varia dependendo das quantidades de hidrogênio e carbono. Como o carbono possui energia interna específica menor que o hidrogênio, quanto maior a quantidade de carbono, menor o poder calorífico e quanto maior a quantidade de hidrogênio maior o poder calorífico. O valor do poder calorífico é um índice de quantidade de energia para os combustíveis.

Segundo HEYWOOD (1988), o poder calorífico de um combustível é a grandeza do calor da reação à pressão constante ou volume constante a uma temperatura padrão para uma combustão completa por unidade de massa de combustível.

Quando os produtos da combustão possuem água no estado líquido, a entalpia de combustão é chamada de Poder Calorífico Superior. Se a água dos produtos de combustão encontra-se no estado gasoso, a entalpia de combustão é chamada de Poder Calorífico Inferior.

Em cálculos de eficiências de máquinas térmicas deve-se considerar somente o poder calorífico inferior (PCI) devido à alta temperatura dos gases de combustão, onde a água se encontra no estado de vapor.

Como o álcool possui oxigênio na composição de sua molécula, possui o poder calorífico menor que o da gasolina. Isso acontece pois o oxigênio aumenta o peso da molécula, porém não produz energia. A tabela 2.3 relaciona a gasolina e o etanol com suas principais propriedades.

**Tabela 2.3 - Propriedades de combustíveis (HEYWOOD, 1988)**

<b>Combustível</b>	<b>Peso Molecular</b>	<b>Calor de Vaporização (kJ/kg)</b>	<b>Massa Específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>PCI (MJ/kg)</b>	<b>(A/F)s</b>	<b>(F/A)s</b>	<b>MON</b>
Gasolina	~110	350	720-780	44	14,6	0,0685	82-89
Etanol	46.07	840	785	26,9	9,00	0,111	89

### 3. Descrição do aparato experimental

Nesta seção serão apresentados os equipamentos e acessórios utilizados para a realização dos experimentos do trabalho em questão.

#### 3.1. Motor CFR

O motor CFR (*Cooperative Fuel Research*) é utilizado para medir a octanagem de combustíveis de forma mais precisa, sendo sua concepção basicamente a mesma desde 1920. Através da combustão do combustível e da medição da detonação é possível obter a octanagem, com base em padrões de funcionamento dados por normas da ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

O modo pesquisa ou RON (Research Octane Number) é dado pela norma ASTM D2699 e o modo motor (Motor Octane Number) é dado pela norma ASTM D2700. O motor utilizado no experimento é o CFR-F2 (*Motor Method Octane Unit*), produzido pela Dresser-Waukesha em 1973, podendo ser observado na figura 3.1. É um motor carburado de quatro tempos, ciclo Otto, e possui razão de compressão variável por mecanismos simples, podendo variar de 4:1 até 18:1, não sendo necessários ajustes de válvulas, pois a geometria de alavancas permite uma autorregulagem. Suas especificações são descritas na tabela 3.1 na página 20.



Figura 3.1 - Motor CFR-F2

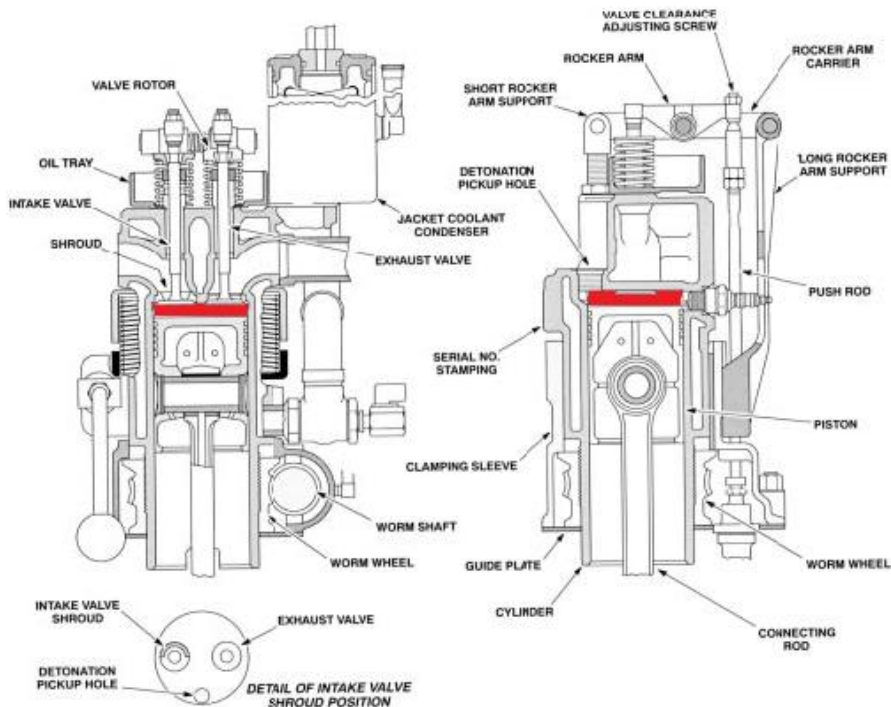
A refrigeração do motor é feita pelo sistema de recirculação com termossifão com arrefecimento na camisa. Possui também sistema de múltiplas cubas de

combustíveis com válvula seletora para fornecer o combustível através de um giclê individual e um venturi único no carburador. O sistema de admissão de ar possui controle de temperatura e umidade. O volante do motor é conectado por correias a um motor elétrico síncrono utilizado tanto para dar a partida no motor CFR quanto para manter a rotação constante.

O CFR utiliza sistema eletrônico de medição da detonação com o sensor acoplado na câmara de combustão para medir a intensidade da detonação que é visualizada através do *knockmeter*, representado na figura 3.2.



**Figura 3.2 - Knockmeter do motor CFR**



**Figura 3.3 - Cilindro e seus componentes (ASTM D2700, 2004)**

Com a figura 3.3 é possível observar que a câmara de combustão do motor CFR possui seção transversal retangular, com a vela de ignição situada na extremidade lateral. Na prática observa-se que o funcionamento do motor com razões de compressão baixas para o padrão de motores atuais registra um alto índice de detonação. Esse fato ocorre devido ao formato da câmara e à geometria da posição da vela.

A frente de chama tem seu início na vela de ignição e se propaga pela câmara de combustão. Como a vela está situada na lateral, antes da frente de chama alcançar a mistura ainda não queimada, essa mistura sofre compressão e aumento de temperatura, levando à autoignição da massa restante, resultando em uma combustão anormal devido à rápida liberação de energia e oscilações de pressão de alta frequência ocasionando o ruído metálico e vibração que é registrada no *knockmeter* e sentida em um sensor na própria câmara de combustão do motor CFR.

Segundo HEYWOOD (1988), uma câmara de combustão com vela central resultaria no dobro de área e velocidade de frente de chama em relação à vela lateral e quanto maior a área e velocidade de frente de chama maior a massa que entra na zona de frente de chama, resultando em uma maior eficiência de queima e diminuindo o fenômeno de autoignição.

Em motores atuais, a evolução do formato da câmara de combustão e da posição da vela (em alguns casos até duas velas por cilindro) proporciona melhor combustão da mistura podendo-se utilizar maiores razões de compressão, favorecendo a diminuição do consumo de combustível, aumento da potência e da eficiência térmica do motor.

**Tabela 3.1 - Especificações do motor ASTM CFR-F2**

ITEM	DESCRIÇÃO
Motor	CFR-F2 (Motor Method Octane Rating Unit) de ferro fundido conectado através de correias a um motor elétrico síncrono para absorção de potência para manter a rotação constante
Tipo de cilindro	Ferro fundido de câmara retangular com refrigeração a água na camisa do cilindro
Tipo de Pistão	Ferro fundido de cabeça plana
Alimentação	Através de carburador com ajuste limitado da relação ar/combustível
Número de cilindros	1 (monocilíndrico)
Diâmetro do Pistão	82,55 mm
Curso do Virabrequim	114,3 mm
Volume Deslocado	611,7 cm <sup>3</sup>
Avanço de ignição	Automática variável de acordo com a razão de compressão

### 3.1.1. Sistema de carburação do motor CFR

O fornecimento da mistura ar/combustível para o motor é feito através de um carburador simples, demonstrado pela figura 3.4. Os motores CFR podem ter três ou quatro cubas de combustíveis acopladas ao carburador.

No motor do estudo em questão há três cubas, onde para as medições somente uma foi utilizada para diminuir variações nos resultados.

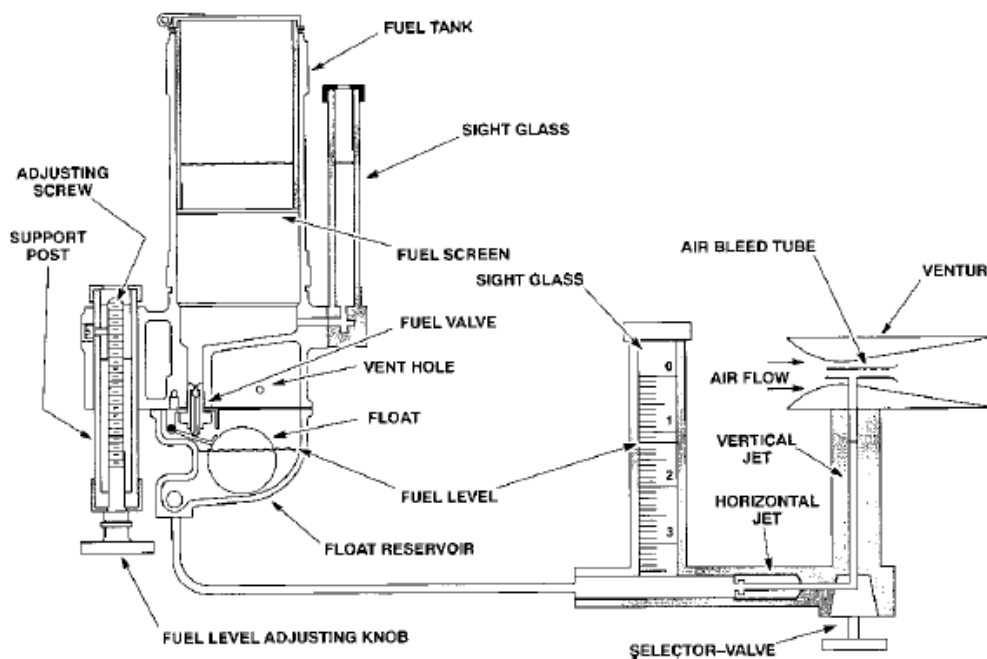


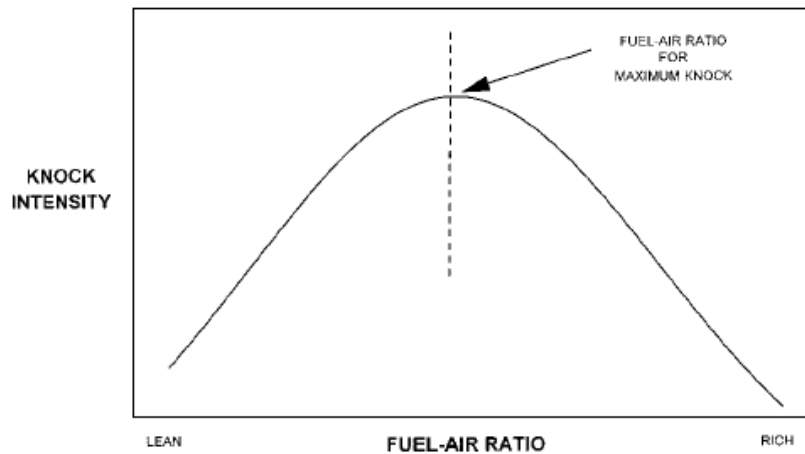
Figura 3.4 - Sistema do carburador do motor CFR (ASTM D2700, 2004)

A razão ar/combustível pode ser ajustada de forma limitada, através do dispositivo de ajuste do nível de combustível (*fuel level adjusting knob*). Elevando-se o nível de combustível, aumenta-se a passagem de combustível, ou seja, enriquece-se a mistura. Esse ajuste é necessário quando se utiliza misturas de etanol e gasolina, como feito no experimento do trabalho.

O enriquecimento da mistura foi utilizado devido ao etanol utilizar razão ar/combustível estequiométrica menor do que a gasolina.

Como o ajuste da mistura ar/combustível é limitado devido ao sistema simples de regulagem de nível de altura de cuba do carburador do motor, não foi possível utilizar misturas com mais de 50% de AEHC em volume na gasolina do tipo C, pois não se conseguiu atingir a proporção ar/combustível adequada para a mistura, ocorrendo falha na combustão devido ao motor trabalhar com mistura pobre.

O ajuste do nível de combustível é essencial para melhorar a combustão e consequentemente atingir a mistura que causa a máxima condição de detonação (figura 3.5).



**Figura 3.5 - Razão ar/combustível para máxima detonação (ASTM D2700, 2004)**

Por se tratar de um carburador simples, este possui uma boia do carburador que é responsável por manter a alimentação de combustível constante através da manutenção do nível de combustível na cuba do carburador. Caso o nível de combustível diminua, a boia libera a agulha que permite a passagem de mais combustível. Quando o nível sobe, a boia sobe e empurra a agulha, impedindo a passagem de combustível.

O sistema de carburação possui um Venturi que é responsável por aumentar a velocidade do ar, sendo que este possui fluxo de ar constante. O aumento da velocidade cria diferenças de pressões obrigando a mistura a passar pelo difusor (*air bleed tube*) que é um componente que restringe a passagem de ar, e através do arrasto aerodinâmico ocorre a pulverização do combustível.

### **3.2. Analisador de Emissões**

O analisador utilizado para trabalho em questão é do modelo Testo 350 XL, ilustrado pela figura 3.6.



**Figura 3.6 - Testo 350XL**



O Texto 350XL é composto basicamente por três componentes principais, unidade analisadora, unidade de controle e sonda, representados pela figura 3.7.



**Figura 3.7 - Componentes do analisador de gases**

A tabela 3.2 apresenta dados como a precisão, resolução e faixa de medição de alguns dos gases analisados pelo TEXTO 350XL.

**Tabela 3.2 – Dados técnicos do analisador de gases (TESTO INC. 2003)**

Sensor	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
Precisão	±0,8%	±0,8%	±5% ppm (100 a 1999,9 ppm)  ±10% ppm (2000 a 3000 ppm)  ±5 ppm (0 a 99 ppm)
Resolução	0,1%	0,01%	1 ppm
Faixa de medição	0 a 25	0 a 100	0 a 3000 ppm

Para que a sonda captasse os gases do escapamento, foi necessário acoplar um tubo controlado por válvula na saída do escapamento do motor como pode ser visto na figura 3.8. Quando a válvula encontra-se aberta, há a liberação de gases provenientes da saída do escapamento do motor para o tubo permitindo a análise dos poluentes com o aparelho Testo.



**Figura 3.8 - Sistema de saída de gases para o analisador**

### **3.2.1. Unidade Analisadora**

A unidade analisadora contém sensores, bombas, baterias, eletrônicos, filtros, memórias e todos os componentes necessários para a medição dos gases de combustão e suas análises. O equipamento é capaz de medir  $O_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$  e  $HC$ .

### **3.2.2. Unidade de Controle**

A unidade de controle exibe todas as medições de gases de combustão dados através da unidade analisadora assim como todos os diagnósticos do equipamento e informação operacional.

### **3.2.3. Sonda**

A sonda remove amostra de gás quente e transporta para a caixa analisadora. Possui um termopar integrado para a medição da temperatura do gás de combustão. Na figura 3.9 é possível observar a sonda acoplada ao escapamento do motor CFR no teste de emissão de gases.



**Figura 3.9 – Sonda acoplada ao escapamento do motor CFR**

### **3.3. Combustíveis**

Foram utilizados combustíveis padrões de referência para o ajuste da eletrônica do motor, e então para os testes utilizaram-se misturas de gasolina Comum e Premium do tipo C com etanol, na proporção de 20, 30 e 40% em volume de etanol nas gasolinas.

#### **3.3.1. Combustíveis padrões de referência**

Combustíveis padrões de referência são aqueles que podem ser usados para obter informações adicionais das condições operacionais do motor. São eles: iso-octano, n-heptano, tolueno e quaisquer misturas entre eles.

Foi utilizado o combustível padrão de referência 85 (85% em volume de iso-octano e 15% em volume de n-heptano) para o ajuste da eletrônica do motor para a gasolina comum e o combustível padrão de referência 92 (92% em volume de iso-octano e 8% em volume de n-heptano) para a ajuste da eletrônica para o uso da gasolina Premium.

#### **3.3.2. Gasolinas**

As gasolinas utilizadas foram a gasolina Comum e a gasolina Premium, ambas do tipo C. A gasolina comum foi adquirida no Posto BR – Auto Posto Várzea do Méier (Méier-RJ) e a gasolina Premium foi adquirida no Posto BR – Vila Velha (Méier – RJ)

### 3.3.3. Etanol

O álcool etílico hidratado combustível foi comprado no Posto BR – Auto Posto Várzea do Méier (Méier-RJ).

### 3.4. Balança de precisão

A figura 3.9 representa a balança de precisão utilizada para a medição das massas de combustíveis utilizados nos testes, da marca *Adventurer Ohaus*, modelo ARD110 com capacidade máxima de 4100g e mínima de 5g, com precisão de medição de 0,1g.

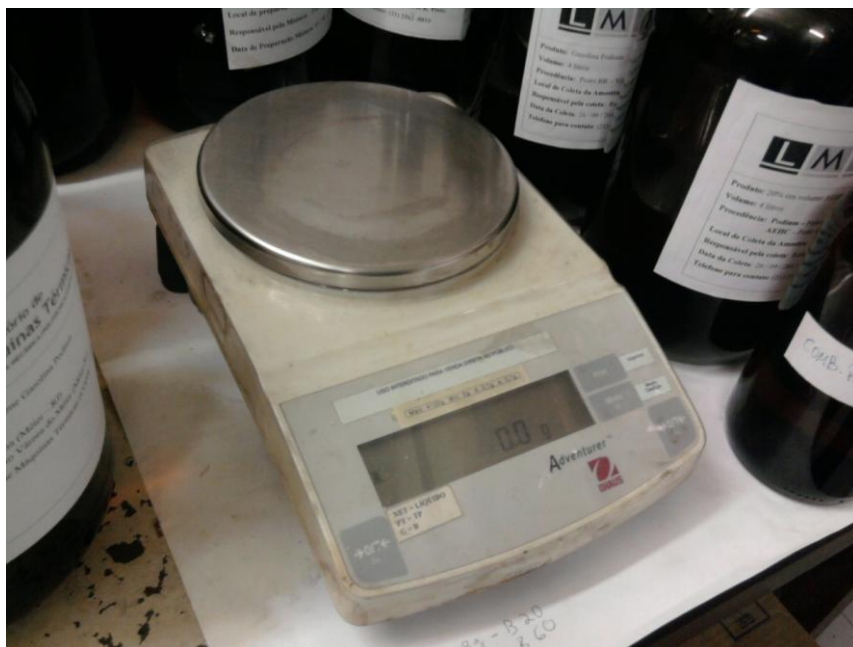


Figura 3.10 - Balança de precisão do Laboratório de Máquinas Térmicas

## 4. Procedimento Experimental

Para início dos testes, foram adquiridos os combustíveis AEHC, gasolina Comum e gasolina Premium, ambas do tipo C. Todos os combustíveis foram comprados em postos de gasolina da BR-Petrobras. Foram feitos testes de quantidades de álcool anidro nas gasolinas e de massas específicas de todos os combustíveis.

Foram preparados quatro litros de cada combustível para os experimentos, compreendendo as gasolinas e suas misturas com etanol para serem ensaiadas no motor CFR, relacionadas na tabela 4.1.

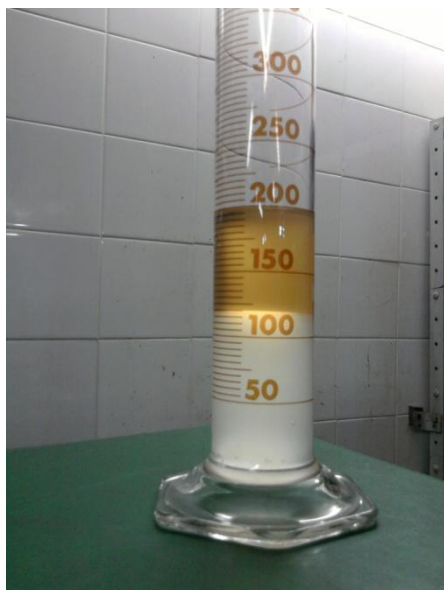
**Tabela 4.1 - Misturas de gasolina Comum e Premium (ambas do tipo C) e AEHC realizadas**

80% Gasolina Comum e 20% AEHC	80% Gasolina Premium e 20% AEHC
70% Gasolina Comum e 30% AEHC	70% Gasolina Premium e 30% AEHC
60% Gasolina Comum e 40% AEHC	60% Gasolina Premium e 40% AEHC

### 4.1. Propriedades dos combustíveis

Por lei, o percentual de álcool anidro na gasolina pode variar de 18% a 25% (Medida Provisória 532, de 28/04/2011), sendo o percentual exato dado pela Portaria 678 de 31/08/2011, do Ministério De Estado Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que aprova a fixação do percentual obrigatório de adição de etanol anidro combustível à gasolina em 20%, a partir da zero hora do dia 1º de outubro de 2011.

Foram calculadas as porcentagens de álcool anidro contidas nas gasolinas adicionando-se água e agitando as misturas, para que o álcool e a água formassem uma única fase, separando-se da gasolina, podendo ser observado na figura 4.1. Esperou-se dois dias para que houvesse a completa separação de fases. O resultado encontrado foi de 19% de álcool anidro para as duas gasolinas.



**Figura 4.1 - Verificação do teor de álcool anidro na gasolina**

Depois, determinou-se a massa específica de cada um desses combustíveis puros, utilizando-se a balança de precisão e uma proveta de 500 ml, cujo procedimento é apresentado na figura 4.2. A balança teve seu valor zerado para a massa da proveta. Encheu-se a proveta com 500 ml de combustível e com a massa registrada na balança foi possível calcular a massa específica (g/ml).



**Figura 4.2 - Verificação da massa específica**

A massa específica da gasolina não é especificada pela ANP, porém é possível encontrar a faixa de 718,0 a 775,0 g/L para as gasolinas tipo C encontradas nos postos do Brasil segundo a BR Distribuidora. A massa específica do álcool etílico hidratado combustível é dada pela RESOLUÇÃO ANP N° 7, DE 9.2.2011 de 805,0 a 811,0 g/L.

O valor da massa específica da gasolina Comum mostrou-se ser bem próximo ao valor da massa específica da gasolina Premium. Já o álcool etílico hidratado combustível possui uma massa específica de valor 8,6% maior que as gasolinas. A tabela 4.2 relaciona os combustíveis com as massas específicas encontradas e seus limites especificados.

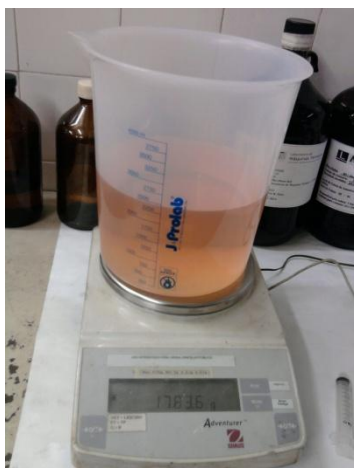
**Tabela 4.2 - Propriedades dos combustíveis utilizados**

<b>Combustível</b>	<b>Massa específica encontrada (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Limites da Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Gasolina Comum	743,0 ± 4,5	718,0 - 755,0
Gasolina Premium	743,2 ± 4,5	718,0 - 755,0
AEHC	806,6 ± 4,8	805,0 - 811,0

## **4.2. Preparo das misturas**

Para a formação de 4 litros das misturas, o foi adotado o seguinte procedimento:

1. Calculou-se o percentual em volume de cada combustível.
2. Depois, esse percentual foi convertido para o valor em massa, através da massa específica obtida anteriormente em testes, para a formação da mistura, tendo em vista a precisão da balança ser maior que a do recipiente (0,1g e 0,3 ml respectivamente).
3. Então, o recipiente (béquer) foi preenchido com o valor em massa dos combustíveis, com o uso da balança, elaborando-se as misturas de 20%, 30% e 40% de AEHC em volume na Premium e na Comum.



**Figura 4.3 - Preparo das misturas com a balança e béquer de 4000ml**

Foi utilizado um béquer de 4000 ml, onde seu peso sem combustível foi zerado na balança e adicionou-se AEHC e gasolina (ainda na balança), a fim de realizar a mistura na propor o exata (figura 4.3).

O procedimento foi feito para as seis diferentes misturas e as massas específicas das misturas foram calculadas com base no percentual de cada combustível nela presente. Os recipientes das misturas são mostrados na figura 4.5. A mistura dos combustíveis foi feita através do misturador *Biomatic*, observado na figura 4.4, onde cada mistura foi agitada durante 2 minutos.

A seguir, seguem as tabelas utilizadas nas forma es das misturas, onde foram feitos quatro litros de cada.

**Tabela 4.3 - Forma o das misturas de AEHC e gasolina Comum**

	<b>Gasolina Comum</b>	<b>20% AEHC / 80% Comum</b>	<b>30% AEHC / 70% Comum</b>	<b>40% AEHC / 60% Comum</b>
<b>Massa de Comum (g)</b>	2972,0	2377,6	2080,4	1783,2
<b>Massa de AEHC (g)</b>		645,3	967,9	1290,6
<b>TOTAL (g)</b>	<b>2972,0</b>	<b>3022,9</b>	<b>3048,3</b>	<b>3073,8</b>
<b>Volume de Comum (mL)</b>	4000	3200	2800	2400
<b>Volume de AEHC (mL)</b>		800	1200	1600
<b>TOTAL (mL)</b>	<b>4000</b>	<b>4000</b>	<b>4000</b>	<b>4000</b>
<b>Massa específica (g/L)</b>	<b>743,0</b>	<b>755,7</b>	<b>762,1</b>	<b>768,4</b>



Tabela 4.4 - Formação das misturas de AEHC e gasolina Premium

	Gasolina Premium	20% AEHC / 80% Premium	30% AEHC / 70% Premium	40% AEHC / 60% Premium
Massa de Premium (g)	2972,8	2378,2	2080,9	1783,7
Massa de AEHC (g)		645,3	967,9	1290,6
TOTAL (g)	2972,8	3023,5	3048,8	3074,3
Volume de Premium (mL)	4000	3200	2800	2400
Volume de AEHC (mL)		800	1200	1600
TOTAL (mL)	4000	4000	4000	4000
Massa específica (g/L)	743,2	755,9	762,2	768,6



Figura 4.4 - Misturador *Biomatic*



Figura 4.5 - Recipientes com as misturas formadas

### 4.3. Ajuste no carburador do motor CFR

O carburador do motor possui regulagem somente na relação ar-combustível que pode ser alterada de forma limitada através do parafuso de ajuste de nível de combustível da cuba, subindo ou descendo a altura do carburador. A cuba e o visor de nível podem ser visualizados na figura 4.6. Nos testes essa altura foi selecionada para cada combustível onde o valor representasse o maior índice de detonação, procedimento adotado da norma ASTM D2700. O venturi do carburador utilizado possui tamanho de garganta de 9/16" (14,3 mm) e passagem de ar constante, sendo selecionado de acordo

com altitude de onde o motor CFR está instalado, segundo a norma ASTM D2700. Foi utilizado o mesmo tamanho de venturi para todos os testes do experimento.



Figura 4.6 - Reservatório de combustível e visor de vidro do nível de altura da cuba de combustível

#### 4.4. Avaliação do consumo e octanagem de combustível no motor CFR-F2

Para uma melhor padronização dos parâmetros operacionais do motor para os testes, foram adotados parâmetros da máquina com base na norma ASTM D2700, que é utilizada para a determinação da octanagem MON de combustíveis. Esses parâmetros indicaram a rotação do motor a ser utilizada, assim como temperatura de admissão de ar, temperatura de formação de mistura ar, óleo e água (tabela 4.5) e avanço de ignição automático relacionado à altura do cabeçote (tabela 4.6) que foram utilizados para a medição do consumo e octanagem.

Tabela 4.5 - Condições Operacionais dos testes - Temperaturas

PARÂMETROS	TEMPERATURAS
Água	(212 ± 1)°F
Óleo	(115 ± 1)°F
Ar de admissão	(118 ± 1)°F
Mistura	(326 ± 1)°F

**Tabela 4.6 - Variação automática do avanço de ignição com mudança de altura do cilindro**

<b>Altura do cilindro</b>	<b>Avanço de ignição °APMS</b>
0,825	26
0,773	25
0,721	24
0,669	23
0,617	22
0,565	21
0,513	20
0,461	19
0,408	18
0,356	17
0,304	16
0,252	15
0,200	14

As incertezas das temperaturas acima são representadas pela metade da menor divisão da escala de cada marcador de temperatura, visto que os marcadores são analógicos. A rotação utilizada foi de 900rpm para seguir os parâmetros da norma em questão.

Para o ajuste da eletrônica do motor, o combustível padrão de referência 85 foi adotado em razão de testar a gasolina comum tipo C, que possui octanagem mínima de 82, segundo o método MON, dada pela Resolução ANP N° 57, de 20.10.2011 - DOU 21.10.2011.

Esse combustível foi utilizado para, a partir da posição do relógio comparador na altura de 0,552 pol. dada pela norma ASTM D2700 que representa a octanagem 85, na relação ar/combustível para máxima detonação, ajustar o *Detonation Meter* (tabela 4.7) com base na indicação 50 do indicador de batimento. O combustível padrão de referência 85 é formado pela mistura de 85% em volume de iso-octano e 15% em volume de n-heptano. Portanto, para a gasolina Comum e suas misturas, a eletrônica do motor foi ajustada conforme a tabela 4.7.

**Tabela 4.7 - Eletrônica do motor para a gasolina Comum e suas misturas**

<b>Ajuste da eletrônica (<i>Detonation meter</i>)</b>	
<i>Meter Reading:</i>	5,46
<i>Spread:</i>	1,9
<i>Time Constant</i>	3

Para a gasolina Premium e suas misturas, foi utilizado o combustível padrão de referência 92 para os ajustes necessários da eletrônica, como na tabela 4.8. De acordo com a BR Distribuidora, a gasolina Premium BR possui octanagem IAD de 95 octanas e como esse valor representa a média dos valores MON e RON, o combustível padrão de referência 92 foi escolhido por estimar a octanagem mais próxima do valor MON para o ajuste da eletrônica. A partir da posição do relógio comparador na altura de 0,452 pol. dada pela tabela A6.3 que representa a octanagem 92, da norma ASTM D2700, na relação ar/combustível para máxima detonação, ajustar o *Detonation Meter*, ilustrado na figura 4.7, com base na indicação 50 do sensor de detonação. O combustível padrão de referência 92 é formado por 92% em volume de iso-octano e 18% em volume de n-heptano.

**Tabela 4.8 - Eletrônica do motor para a gasolina Premium e suas misturas**

<b>Ajuste da eletrônica (<i>Detonation meter</i>)</b>	
<i>Meter Reading:</i>	4,86
<i>Spread:</i>	1,9
<i>Time Constant</i>	3



**Figura 4.7 - *Detonation Meter* – Motor CFR-F2**

#### 4.4.1. Procedimento para medição do consumo de combustível

O consumo de combustível foi determinado utilizando-se o visor de vidro transparente com escala mostrada na figura 4.8 e um cronômetro. O procedimento adotado para todas as análises dos consumos foi a de marcar o tempo com o cronômetro para que o nível de combustível descesse 20 mm na escala adotada, tendo então o consumo em mm/min.

Para que o consumo pudesse ser avaliado em função do volume, foi feito um teste para saber quantos mililitros representavam cada mm da escala. Para isso, inseriu-se uma quantidade de combustível com seu valor em massa medido na balança de precisão, e com o valor da massa específica foi possível verificar que 20 mm equivalem a 70,6 ml.

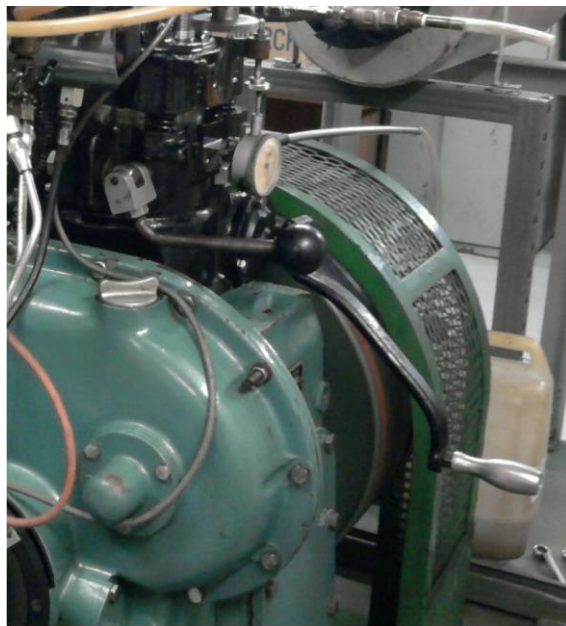


Figura 4.8 - Escala do nível do reservatório de combustível

Para cada mistura de combustível, foi feita análise do consumo para diferentes razões de compressão do motor. Variando a altura do cilindro, através do sistema de manivela visto na figura 4.10, varia-se também a razão de compressão. A altura do cilindro é indicada por um relógio marcador de escala micrométrica podendo ser visto na figura 4.9 e através da tabela de número 36 do livro *Annual Book of ASTM Standard: Test Method for rating motor fuels* é verificada a razão de compressão para cada marcação do relógio comparador.



**Figura 4.9 - Relógio comparador (micrômetro) que indica altura do cilindro**



**Figura 4.10 - Sistema de manivela para variação da altura do cilindro (razão de compressão)**

## **4.5. Medição das emissões de gases do escapamento**

Para a medição das emissões dos gases do escapamento do motor CFR foi utilizado o analisador de gases Testo 350XL com a sonda acoplada ao escapamento do motor. Os pontos utilizados para a medição das emissões foram os mesmos da medição da octanagem MON de cada combustível. As condições operacionais do motor foram mantidas de acordo com a norma ASTM D2700.

### **4.5.1. Procedimento para ajuste do motor para o teste de emissões**

A metodologia dos pontos das octanagens foi utilizada por resultarem nas mesmas condições padrões operacionais do motor, como rotação em 900 rpm, mesmas temperaturas de admissão e mistura e mesmo nível de detonação tendo em vista que para o teste de octanagem, os combustíveis devem manter a leitura do mostrador detonação (*knockmeter*) em  $50 \pm 2$  divisões da escala.

Para manter essa leitura do *knockmeter*, a razão ar/combustível foi alterada para cada combustível de forma a resultar na máxima detonação através do ajuste da altura de cuba (quanto menor o valor da altura de cuba, maior o enriquecimento da mistura) e então a altura do cilindro foi ajustada de forma a manter esse valor de leitura. O avanço de ignição é ajustado de acordo com altura do cilindro de forma automática no motor.

As temperaturas de admissão e mistura possuem resistências elétricas que podem ser controladas para manterem os valores desejados de temperatura. Ao se aumentar a concentração de etanol hidratado na gasolina, foi possível verificar uma queda na temperatura de mistura sendo necessário aumentar o valor da resistência para que temperatura mantivesse de valor padrão de funcionamento. O etanol possui maior calor de vaporização (energia necessária para passar para o estado gasoso) do que a gasolina e como o combustível líquido evapora na corrente de ar a ser carregada para o motor, a vaporização retira calor do ar, retirando energia e diminuindo ainda mais a temperatura de mistura.

## 5. Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados dos experimentos das octanagens, dos consumos absolutos de combustíveis e das emissões de poluentes.

Para os testes foi determinado um valor máximo de 40% em volume de etanol a ser adicionado nas gasolinas, devido ao fato do motor apresentar falhas na combustão (*misfire*) quando utilizado um valor de 50% em volume de etanol.

Como a potência do motor durante os testes não foi medida, não é possível calcular o consumo específico, sendo possível somente calcular o consumo absoluto de combustível.

### 5.1. Octanagens dos combustíveis

O etanol também é conhecido por ser um aditivo de octanagem da gasolina por ter um alto poder antidetonante e ao mesmo tempo não ter os malefícios causados pelo chumbo tetraetila (CTE), possuindo ainda a vantagem de ser um combustível renovável.

Para a avaliação da octanagem das misturas, foi utilizado o método MON (*Motor Octane Number*), com base na norma ASTM D2700 e o motor CFR-F2.

As octanagens medidas dos combustíveis sem adição de etanol hidratado foram de 81,2 e 89,1 para a gasolina Comum e gasolina Premium respectivamente, confirmando a superioridade da resistência à detonação da gasolina Premium em relação a Comum.

As tabelas 5.1 e 5.2 indicam as octanagens para os diferentes combustíveis utilizados.

**Tabela 5.1 - Octanagem da gasolina comum e suas misturas**

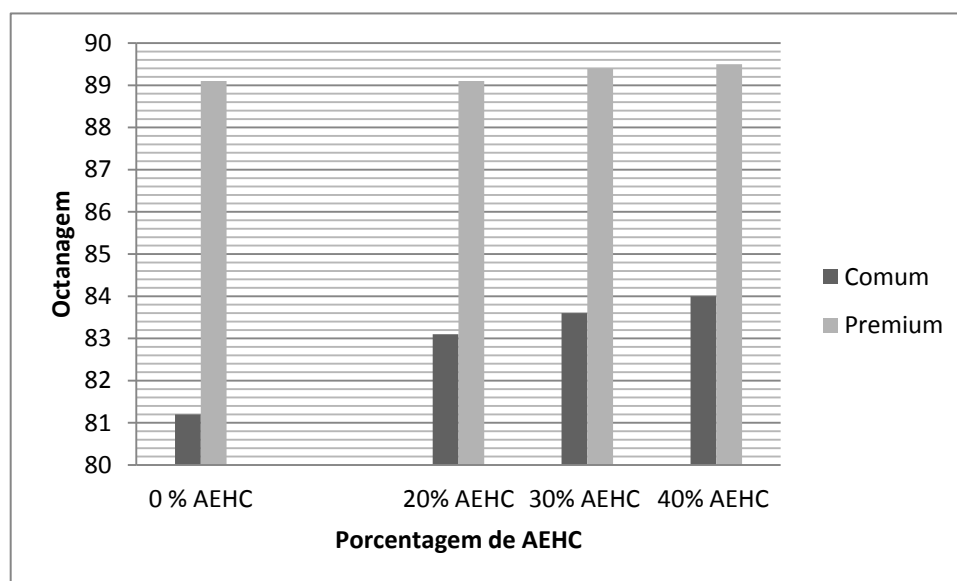
<b>Combustível</b>	<b>Octanagem MON</b>
Gasolina Comum	81,2
20% AEHC 80% Comum	83,1
30% AEHC 70% Comum	83,6
40% AEHC 60% Comum	84,0



**Tabela 5.2 - Octanagem da gasolina Premium e suas misturas**

<b>Combustível</b>	<b>Octanagem MON</b>
Gasolina Premium	89,1
20% AEHC 80% Premium	89,1
30% AEHC 70% Premium	89,4
40% AEHC 60% Premium	89,5

A gasolina comum tem octanagem 81,2 e com adição de 40% de etanol em volume, sua octanagem passou para 84,0. A gasolina Premium com octanagem de 89,1 passou a ter 89,5 com adição de 40% de etanol em volume. Apesar de ambas as gasolinas apresentarem aumento de octanagem com o aumento da adição de etanol, tal fato foi mais acentuando na gasolina Comum por ter octanagem bem inferior à do etanol. Portanto, a adição de álcool tem influência maior na comum, como pode ser observado na figura 5.1. MUHARREM *et al* (2010) citam que a octanagem MON do etanol é de 89,7, valor muito próximo ao valor MON de 89,1 da Premium.



**Figura 5.1 - Influência da adição de AEHC na gasolina em relação à octanagem**

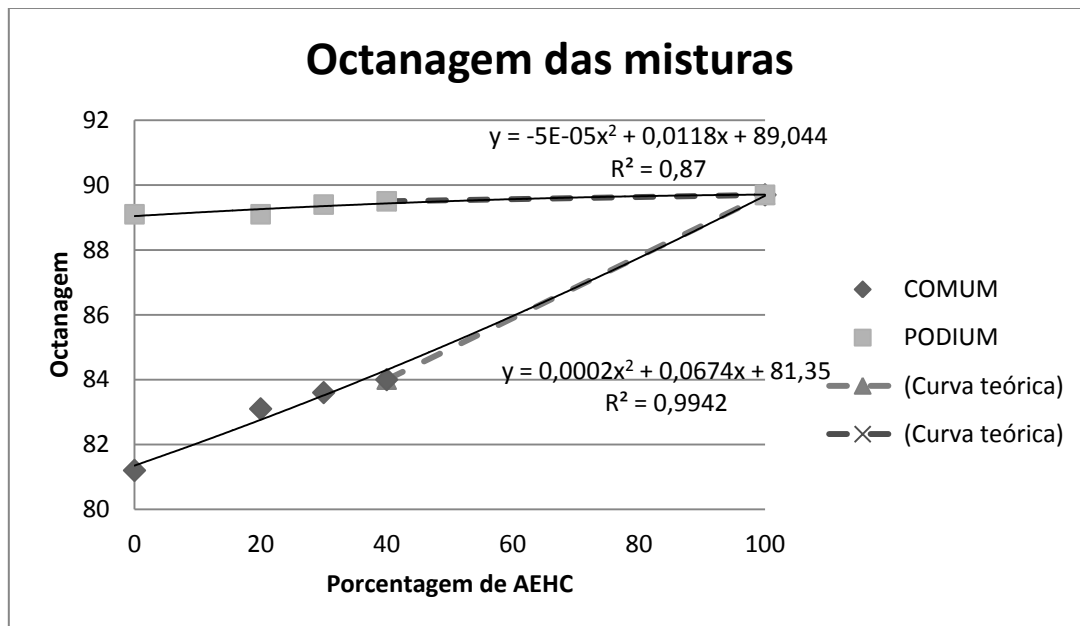


Figura 5.2 - Ajuste polinomial da octanagem das Misturas

Com o valor da octanagem do AEHC citado (89,7), é possível traçar as curvas que melhor representam os pontos de octanagem e percentual de AEHC na mistura. O melhor ajuste encontrado para ambas as curvas foi o polinomial, junto às equações representadas no gráfico. Através da figura 5.2 é possível verificar um crescimento suave da curva de octanagem da gasolina Premium enquanto a curva da gasolina Comum possui uma inclinação mais acentuada devido às maiores diferenças de octanagem entre a Comum e o AEHC utilizados. Observa-se a convergência de ambas as curvas para a octanagem do etanol de 89,7.

Na figura 5.3 observam-se os ajustes das curvas de octanagens dos combustíveis testados sem a convergência para o valor de 89,7. É possível verificar que com o ajuste encontrado, as curvas não se encontrarão no ponto de octanagem de 100% etanol. Com as equações de ajuste, os pontos de 100% etanol são representados pelas octanagens MON calculadas de 92,7 para o ajuste da Premium e de 80,88 para o ajuste da Comum. Esse comportamento ocorre, possivelmente, por não haver os valores das octanagens entre as misturas de 40% de etanol e gasolinas e 100% etanol, já que conforme a mistura aproxima-se do valor de 100% etanol, a octanagem deve se aproximar também para a do etanol.

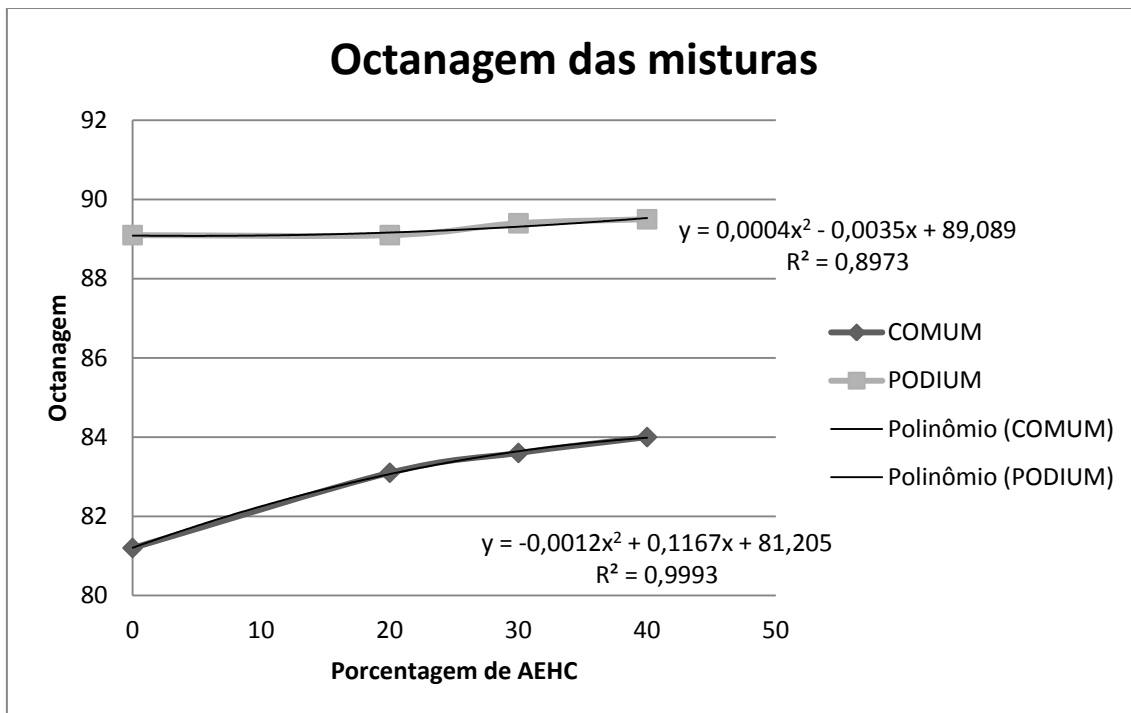


Figura 5.3 – Ajuste polinomial sem convergência para o valor de 89,7 do etanol

A tabela 5.3 apresenta os valores das octanagens MON calculadas com base na equação 5.1 abaixo.

$$MON = \sum_{i=1}^n x_{vi} ON_i \quad (5.1)$$

Onde  $x_{vi}$  representa a fração volumétrica do componente  $i$  e  $ON_i$  representa a octanagem do componente  $i$ . Com base nas octanagens MON de 81,2 para a Comum, 89,1 para a Premium e 89,7 para o etanol hidratado, calculou-se os dados da tabela para os percentuais de etanol e gasolinas. Essa tabela com os valores teóricos serve para efetuar comparações dos resultados com os valores obtidos no experimento e para avaliar valores intermediários não calculados no experimento.

**Tabela 5.3 – Tabela de regra da mistura – Valores de octanagem MON calculadas**

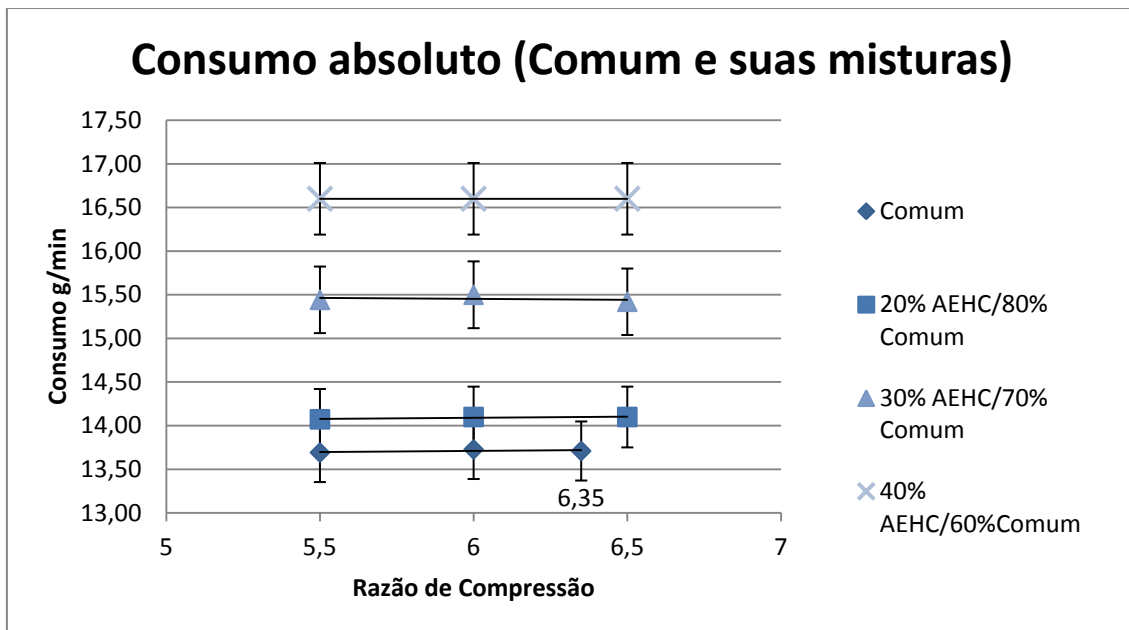
Percentual de Etanol nas gasolinas	Octanagens Calculadas	
	Misturas Comum	Misturas Premium
0,1	82,1	89,2
0,2	82,9	89,2
0,3	83,8	89,3
0,4	84,6	89,3
0,5	85,5	89,4
0,6	86,3	89,5
0,7	87,2	89,5
0,8	88,0	89,6
0,9	88,9	89,6
1	89,7	89,7

## **5.2. Consumo absoluto de combustível**

O consumo de combustível foi realizado variando-se a razão de compressão do motor para que os valores pudessem ser comparados. No entanto, é possível verificar que não houve variação expressiva, ou seja, para diferentes valores de razão de compressão o consumo manteve-se praticamente inalterado quando utilizado os mesmos combustíveis.

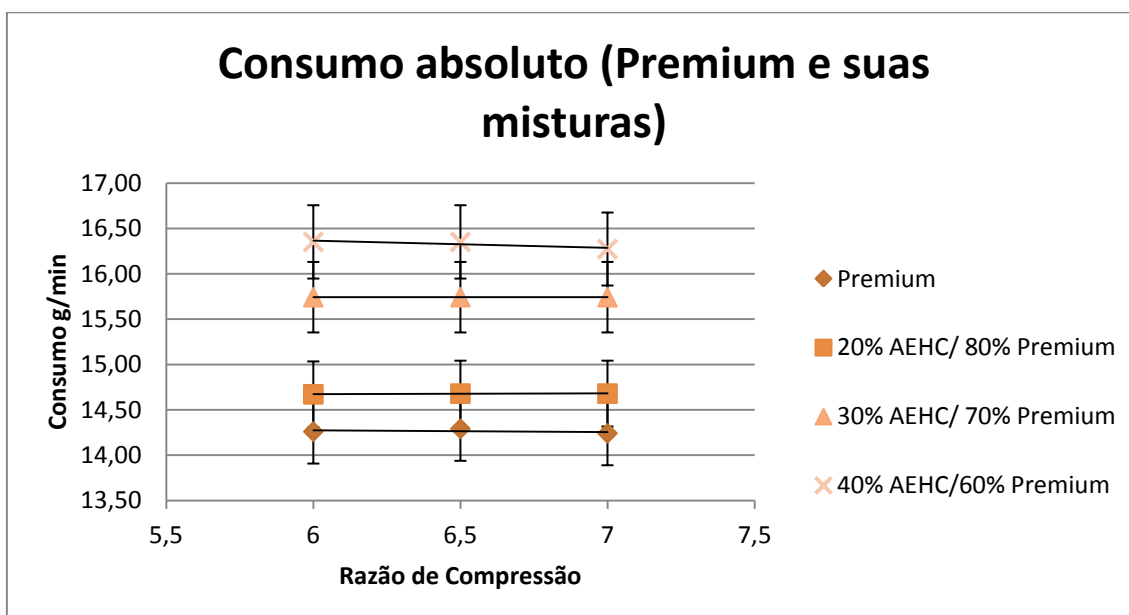
Também é possível observar o aumento do consumo absoluto com a adição do AEHC. Tanto na mistura com gasolina Comum quanto na Premium, o maior consumo foi o com a maior adição de etanol hidratado.

Com as razões de compressão utilizadas, foi possível verificar a presença de autoignição para todas as misturas utilizadas, embora em intensidades diferentes em função do percentual de etanol e da razão de compressão utilizada.



**Figura 5.4 - Consumo absoluto da gasolina Comum e suas misturas**

Para as misturas de gasolina Comum e AEHC as razões de compressão utilizadas foram de 5,5, 6,0 e 6,5:1 onde somente a gasolina Comum sem adição de etanol hidratado teve seu máximo de compressão limitado em 6,35:1 (micrômetro na posição 0,541 pol.) por ser o máximo limite de detonação deste combustível, nas condições operacionais especificadas, representado pelo limite 100 da escala do *knockmeter*. A figura 5.3 expressa o consumo absoluto da gasolina Comum e suas misturas variando a razão de compressão.



**Figura 5.5 - Consumo absoluto da gasolina Premium e suas misturas**

Para o teste de consumo na gasolina Premium e suas misturas, as razões de compressão utilizadas foram de 6,0, 6,5, e 7,0:1. O consumo pode ser observado na figura 5.4. Nesse caso foi possível utilizar a razão de 7,0:1 devido a maior octanagem da gasolina Premium. No gráfico abaixo é possível observar a influência da adição de AEHC no consumo absoluto de combustível. Observa-se que para a adição de 20% de AEHC a influência para a Premium e a Comum tiveram valores próximos. Quanto mais se adicionou etanol, mais a distância da influência aumenta para o consumo na Comum em relação a Premium.

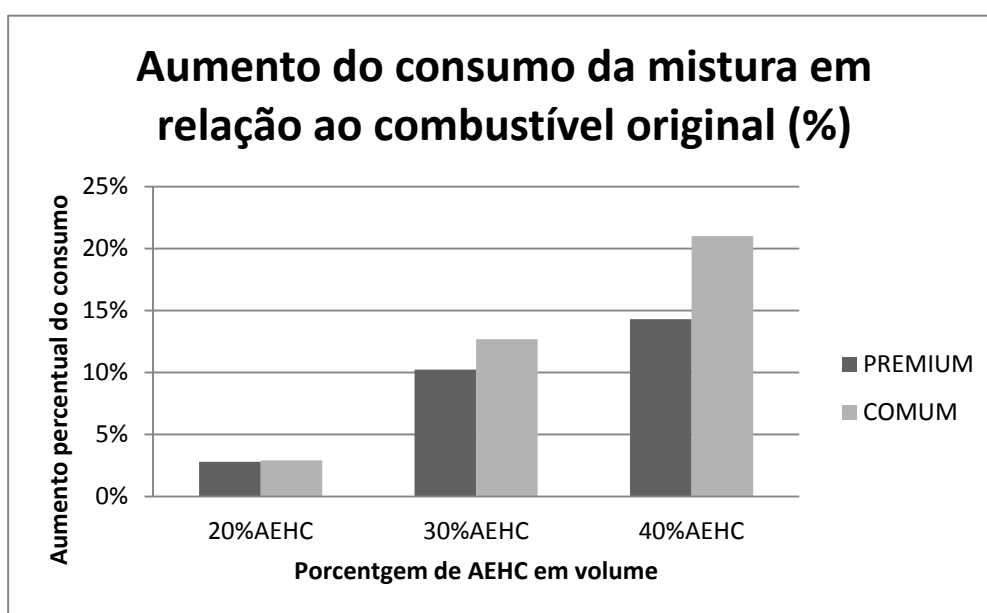


Figura 5.6 - Influência do AEHC no aumento do consumo de combustível

### 5.3. Emissão de poluentes

Os resultados obtidos através do teste de emissões de poluentes foram inconclusivos devido à complexidade das curvas de emissões obtidas e, portanto, não serão apresentados nessa seção. No entanto, os gráficos dos resultados encontram-se no Apêndice A para efeito de análises em trabalhos futuros.

## 6. Tratamento de Dados

Este capítulo trata da análise das incertezas associadas aos valores obtidos nos testes. Toda medida possui uma incerteza, seja ela devido ao próprio processo de medição e o uso de instrumentos ou na propagação das incertezas, quando no cálculo de uma grandeza  $f$  que é função de outras grandezas ( $x, y, \dots$ ) que possuem também suas incertezas ( $\sigma_x, \sigma_y, \dots$ ). O cálculo da propagação de incertezas para variáveis independentes é

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \dots} \quad (6.1)$$

### 6.1. Incertezas da massa específica

Para o cálculo das incertezas das massas específicas, primeiramente obteve-se as incertezas referentes aos instrumentos utilizados. A balança possui uma incerteza de 0,1g e a proveta calibrada possui incerteza de valor arredondado de 0,3ml. Com isso, através da equação de propagação de incertezas, é possível calculá-las para todos os combustíveis utilizados, onde os valores são mostrados nas tabelas abaixo.

$$\rho(m, V) = \frac{m}{V} \quad (6.2)$$

$$\sigma_{\rho(m,v)} = \sqrt{\left(\frac{1}{V}\right)^2 (\Delta m)^2 + \left(-\frac{m}{V^2}\right)^2 (\Delta V)^2} \quad (6.3)$$

Para os cálculos iniciais das massas específicas do AEHC, da gasolina Comum e da gasolina Premium, utilizou-se uma proveta de 500 ml, onde cada combustível com esse volume teve sua massa verificada na balança calibrada. Através do cálculo da incerteza propagada, o valor das massas específicas e suas incertezas são encontradas na tabela a seguir

**Tabela 6.1 - Massas específicas dos combustíveis**

<b>Combustível</b>	<b>Massa específica encontrada (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Gasolina Comum	743,0 ± 4,5
Gasolina Premium	743,2 ± 4,5
AEHC	806,6 ± 4,8

Para a formação das misturas, o volume total utilizado foi de 4000 ml e a partir da tabela apresentada a seguir, é possível observar as novas incertezas calculadas, demonstrando que ao utilizar um maior volume há a diminuição da incerteza total. Também foi possível calcular as incertezas das misturas de combustíveis.

**Tabela 6.2 - Propriedades da gasolina comum e suas misturas com incertezas**

	<b>Gasolina Comum</b>	<b>20% AEHC / 80% Comum</b>	<b>30% AEHC / 70% Comum</b>	<b>40% AEHC / 60% Comum</b>
<b>Massa (g)</b>	2972,0 ± 0,1	3022,9 ± 0,1	3048,3 ± 0,1	3073,8 ± 0,1
<b>Volume (ml)</b>	4000,0 ± 0,3	4000,0 ± 0,3	4000,0 ± 0,3	4000,0 ± 0,3
<b>Massa específica g/ml</b>	0,743	0,75572	0,76208	0,76844
<b>Incerteza Massa específica</b>	0,000557811	0,000567341	0,000572106	0,000576872
<b>Incerteza %</b>	0,075	0,075	0,075	0,075
<b>Massa específica kg/m<sup>3</sup></b>	743,0 ± 0,6	755,7 ± 0,6	762,1 ± 0,6	768,4 ± 0,6

**Tabela 6.3 - Propriedades da gasolina Premium e suas misturas com incertezas**

	<b>Gasolina Premium</b>	<b>20% AEHC / 80% Premium</b>	<b>30% AEHC / 70% Premium</b>	<b>40% AEHC / 60% Premium</b>
<b>Massa (g)</b>	2972,0 ± 0,1	3023,5 ± 0,1	3048,9 ± 0,1	3074,2 ± 0,1
<b>Volume (ml)</b>	4000,0 ± 0,3	4000,0 ± 0,3	4000,0 ± 0,3	4000,0 ± 0,3
<b>Massa específica g/ml</b>	0,7432	0,75588	0,76221	0,76856
<b>Incerteza Massa específica</b>	0,000557811	0,000567341	0,000572106	0,000576872
<b>Incerteza %</b>	0,075	0,075	0,075	0,075
<b>Massa específica kg/m<sup>3</sup></b>	743,2 ± 0,6	755,9 ± 0,6	762,2 ± 0,6	768,6 ± 0,6



## 6.2. Incertezas no consumo de combustível

Esse capítulo trata do estudo dos erros e incertezas relacionados ao consumo, e será dividido em três etapas. Cada consumo foi medido duas vezes e o resultado adotado foi a média entre os valores. Quando os dois valores possuíam grande diferença entre eles, uma terceira medição era feita eliminando-se o valor mais discrepante e fazendo-se uma nova média. O fato de não se utilizar maiores repetições decorre do grande tempo utilizado para cada procedimento, onde maiores repetições inviabilizariam a conclusão dos testes em um dia, adicionando-se fatores externos aos resultados como variações de temperatura e pressão.

O método da propagação de incerteza foi utilizado para que todos os valores fossem calculados de forma correta e para que a avaliação dos resultados pudesse ser elaborada de forma mais segura.

### 6.2.1. Etapa 1: Incerteza da medição do consumo

A primeira etapa consiste na análise dos erros para a análise do consumo que foi medida através do visor milimetrado do nível de combustível e do tempo marcado no cronômetro. A incerteza associada ao visor milimetrado é de 0,5 mm e incerteza adotada para o cronômetro é de 1,0 segundo ou 0,01667 minuto.

$$\text{Consumo}(x, t) = \frac{x \text{ [mm]}}{t \text{ [s]}} \quad (6.4)$$

$$\sigma_{\text{Consumo}(x,t)} = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{t}\right)^2 \Delta x^2\right] + \left[\left(-\frac{x}{t^2}\right)^2 \Delta t^2\right]} \quad (6.5)$$

### 6.2.2. Etapa 2: Conversão para ml/min e propagação da incerteza

Os cálculos para a conversão de mm/min para ml/min foram demonstrados no capítulo 4.3 e resultam na multiplicação da constante 3,53 tanto para o valor quanto para a incerteza.

### 6.2.3. Etapa 3: Conversão para g/min e propagação da incerteza

A conversão do valor em ml/min para g/min é dada pela multiplicação da massa específica para cada combustível em questão, seguida da equação da propagação de erro.

$$\text{Consumo}(\rho, V) = \rho V \quad (6.6)$$

$$\sigma_{\text{Consumo}(\rho, V)} = \sqrt{(V^2 \Delta \rho^2) + (\rho^2 \Delta V^2)} \quad (6.7)$$

## 7. Conclusão

O Experimento envolvendo misturas de gasolina Comum e Premium com etanol hidratado no motor ASTM CFR-F2 foi realizado para análise do consumo, octanagem e emissão de poluentes. Os parâmetros de ajuste do motor foram selecionados com referência à norma ASTM D2700 utilizada para a medição da octanagem de combustíveis. Esse procedimento foi adotado para utilizar padrões de funcionamento evitando alterações nos resultados.

A octanagem da gasolina comum sofreu grande influência da adição de etanol hidratado. A gasolina Premium sofreu pouca influência do AEHC devido ao valor de sua octanagem ser próximo ao valor da octanagem do etanol.

O consumo absoluto de combustível foi conduzido para as misturas de combustíveis e as gasolinas sem adição de AEHC, variando a razão de compressão. A análise demonstrou não haver variação significativa no consumo dos combustíveis para as diferentes razões de compressão utilizadas. Porém o consumo absoluto aumentou conforme se adicionou etanol nas gasolinas. Comparando o consumo da gasolina Premium e da Comum, foi possível observar um maior consumo absoluto para a Premium e suas misturas.

É possível concluir que a adição de etanol favorece o aumento da octanagem da gasolina comum apesar do consumo aumentar devido à utilização de uma mistura ar-combustível mais rica pela utilização do AEHC. A adição de etanol na gasolina Premium não representou aumento significativo da octanagem e o consumo absoluto também sofreu aumento com a elevação da concentração de etanol.

Mesmo a gasolina Premium utilizando razão ar-combustível igual a da gasolina Comum, o fato do consumo absoluto da Premium ter sido maior não permite concluir que seu uso seja desvantajoso, pois o estudo foi feito em base no consumo absoluto. Caso a potência do motor fosse disponibilizada, através de um dinamômetro para cada ponto ensaiado, seria possível determinar os consumos específicos (em função da potência gerada) e então verificar a diferença de eficiência entre as gasolinas Comum e Premium.

## Referências bibliográficas

ABRAHAM *et al*, 2010. The Evolution of Flex-Fuel Technology in Brazil: The Bosch Case.

ANFAVEA, 2012. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores no Brasil. Disponível em: < <http://www.anfavea.com.br>> acessado em 25 nov. 2012.

ANP, Agência Nacional de Petróleo, Gás e Combustíveis Renováveis. Brasil, Resolução ANP N° 7, de 9.2.2011 - DOU 10.2.2011 – Retificada DOU 14.4.2011. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>> acessado em: 25 nov. 2012.

ANP, Agência Nacional de Petróleo, Gás e Combustíveis Renováveis. Brasil, PORTARIA MAPA N° 678, DE 31.8.2011 - DOU 1.9.2011.

Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>> acessado em: 01 fev. 2013.

ASTM D2699, 2004a. Standard Test Method for Research Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel. ASTM - International

ASTM D2700, 2004. Standard Test Method for Motor Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel. ASTM - International

AVL, 2005, Blending of Ethanol in Gasoline for Spark Ignition Engines – Problem Inventory and Evaporative Measurements - Stockholm University.

CARVALHO, J. A., LACAVA, P.T., 2003, Emissões em Processos de Combustão, Editora Unesp.

ÇENGEL, Y.A., BOYLES, M.A., 2006, Thermodynamics An Engineering Approach, 5th ed. McGraw-Hill.

HEYWOOD, 1988 J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, Estados Unidos da América.

MELO, T., MACHADO, G., COLAÇO, M., et al., 2011, “Hydrous ethanol-gasoline blends – Combustion and emission investigations on a Flex-Fuel engine”.

Brasil, 21 de dezembro de 2011.

MUHARREM *et al*, 2010, Impact of alcohol–gasoline fuel blends on the performance and combustion characteristics of an SI engine - Department of Automotive Engineering Technology, Kocaeli University.

PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A, 2012, disponível em: <[http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/automotivos/gasolina/!ut/p/c4/04\\_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hLf0N\\_P293QwP3YE9nAyNTD5egIEcnQ4MgQ\\_2CbEdFAGTIInk!/?PC\\_7\\_9O1ONKG10GSIC025HDRRAB10F4000000\\_WCM\\_CONTEXT=/wps/wcm/connect/portal+de+conteudo/produtos/automotivos/gasolina/duvidas+frequentes+gasolinas+petrobras](http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/produtos/automotivos/gasolina/!ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hLf0N_P293QwP3YE9nAyNTD5egIEcnQ4MgQ_2CbEdFAGTIInk!/?PC_7_9O1ONKG10GSIC025HDRRAB10F4000000_WCM_CONTEXT=/wps/wcm/connect/portal+de+conteudo/produtos/automotivos/gasolina/duvidas+frequentes+gasolinas+petrobras)>, acessado em: 25 de nov. de 2012.

PROCONVE/PROMOT, 2012, Programas de Controle de Emissões Veiculares disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/areas-tematicas-qa/programa-proconve>>, acessado em: 23 de Nov. de 2012.

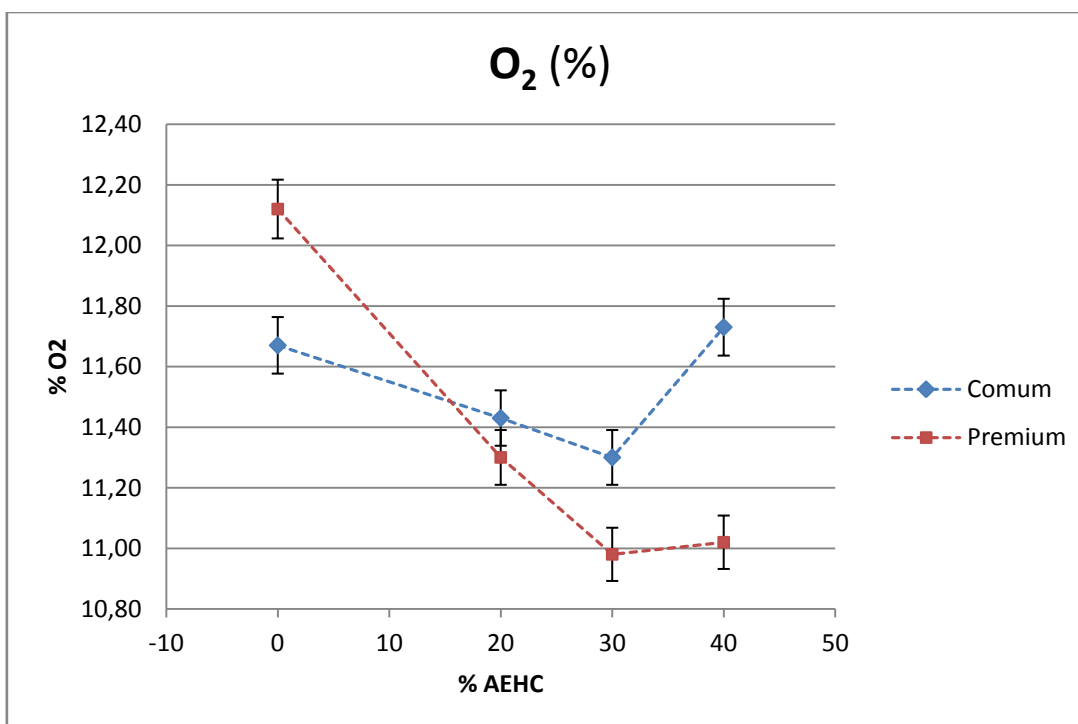
TESTO INC., 2003, Testo 350 XL/M Short Operation Instruction Manual, REV.11/03, disponível em: <<http://www.testo350.com> > acessado em: 25 nov. 2012

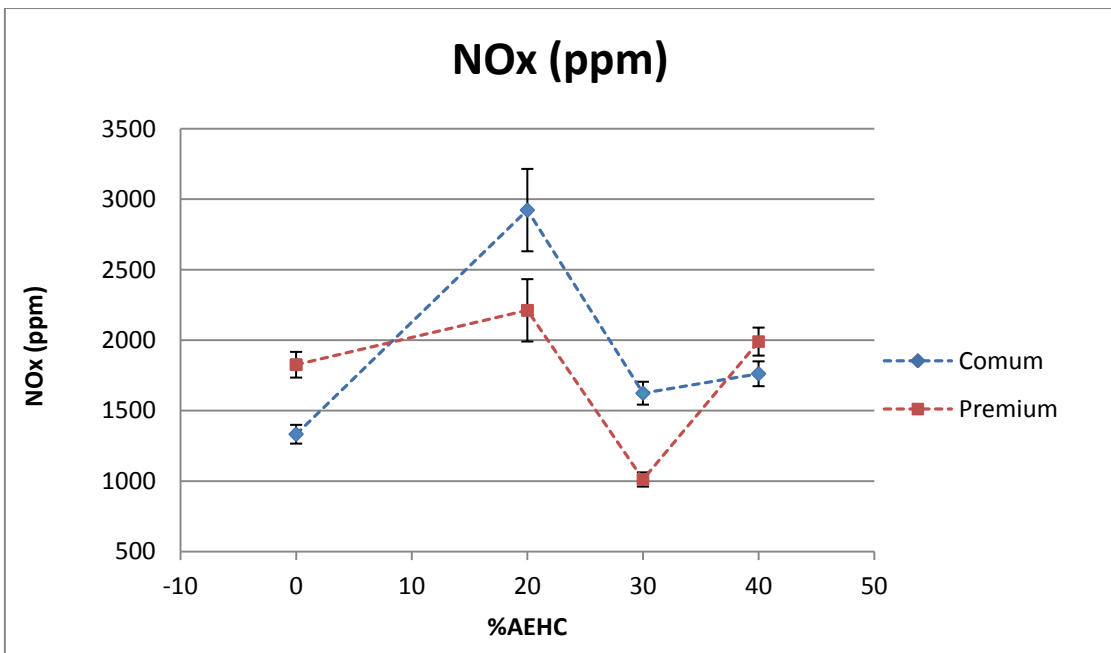
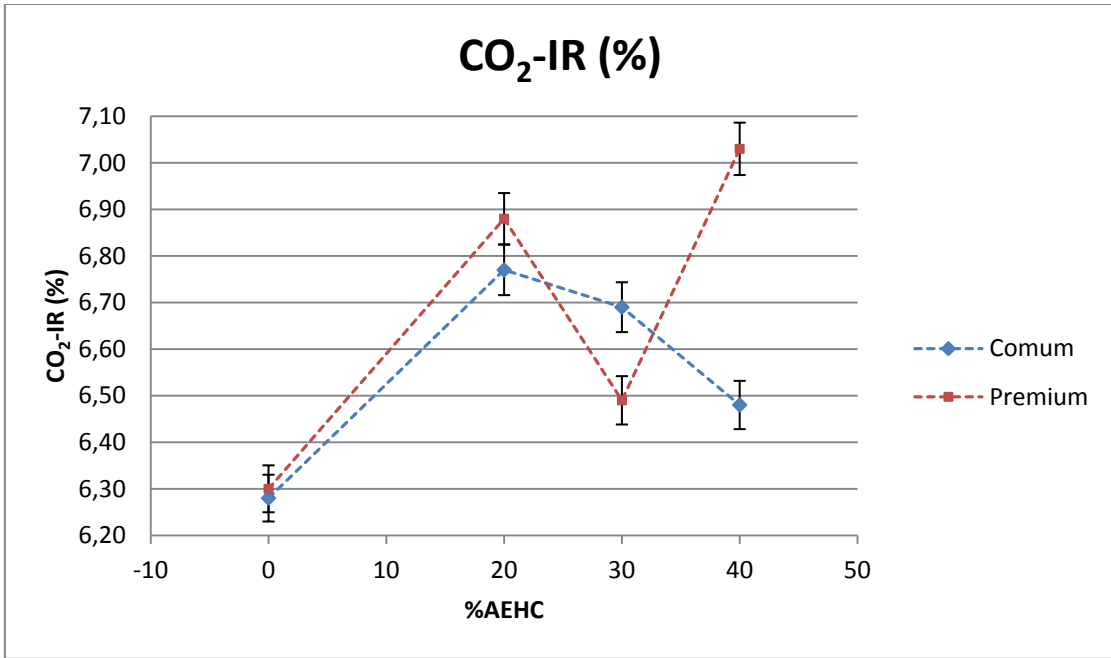
VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG. R. E.; BORGNAKKE, C. Fundamentos da Termodinâmica Clássica, Edgard Blücher, 4ª edição, São Paulo, 1995.

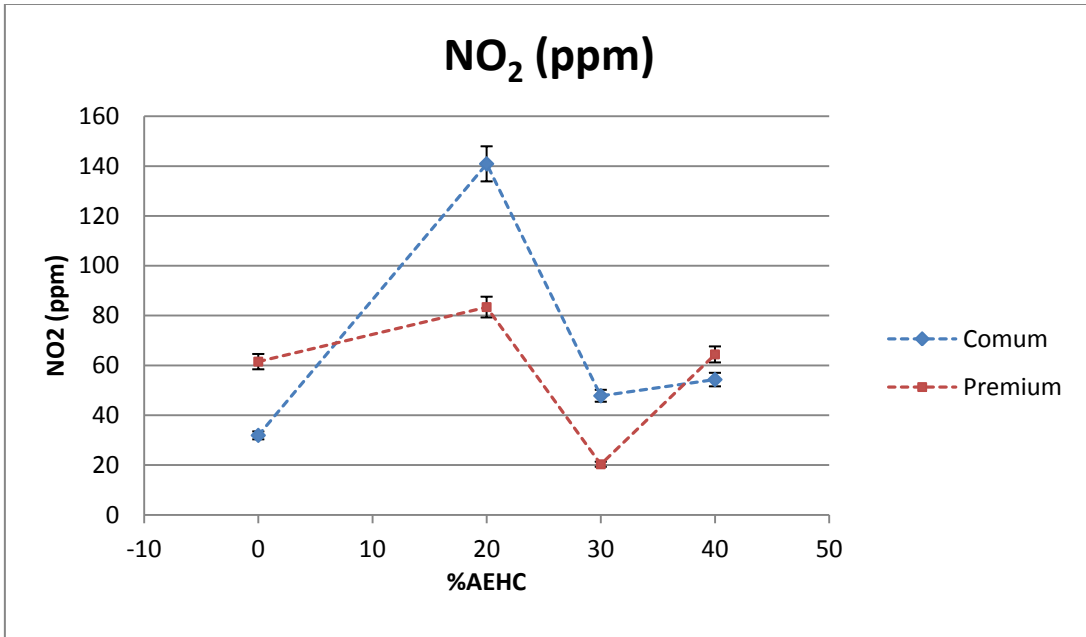
WILLARD W. PULKRABEK, 1997. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. First Edition.

## APÊNDICE A. Gráficos de Emissões de Gases do Escapamento

	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> -IR (%)	NO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)
<b>Gasolina Comum</b>	11,67	6,28	1302	31,9	1333
<b>80% Comum 20% AEHC</b>	11,43	6,77	2782	140,9	2923
<b>70% Comum 30% AEHC</b>	11,30	6,69	1577	47,8	1624
<b>60% Comum 40% AEHC</b>	11,73	6,48	1708	54,3	1762
<b>Gasolina Premium</b>	12,12	6,30	1764	61,5	1826
<b>80% Premium 20% AEHC</b>	11,30	6,88	2128	83,4	2212
<b>70% Premium 30% AEHC</b>	10,98	6,49	992	20,3	1012
<b>60% Premium 40% AEHC</b>	11,02	7,03	1926	64,4	1990









**APÊNDICE B. Tabela de incertezas do consumo: mm/min e mm/s**

	<b>x (mm)</b>	<b>Δx (mm)</b>	<b>t (min)</b>	<b>Δt (min)</b>	<b>Consumo (mm/min)</b>	<b>Incerteza (mm/min)</b>	<b>Consumo (mm/s)</b>	<b>Incerteza (mm/s)</b>
<b>Comum 5,5:1</b>	20	0,5	3,83	0,01667	5,22	0,13	0,087032202	0,002151484
<b>Comum 6:1</b>	20	0,5	3,82	0,01667	5,24	0,13	0,087260035	0,002157116
<b>Comum 6,35:1</b>	20	0,5	3,825	0,01667	5,23	0,13	0,087145969	0,002154296
<b>C20 5,5:1</b>	20	0,5	3,79	0,01667	5,28	0,13	0,087950748	0,002174191
<b>C20 6,0:1</b>	20	0,5	3,783	0,01667	5,29	0,13	0,08811349	0,002178214
<b>C20 6,5:1</b>	20	0,5	3,783	0,01667	5,29	0,13	0,08811349	0,002178214
<b>C30 5,5:1</b>	20	0,5	3,483	0,01667	5,74	0,14	0,095702938	0,002365829
<b>C30 6,0:1</b>	20	0,5	3,47	0,01667	5,76	0,14	0,096061479	0,002374693
<b>C30 6,5:1</b>	20	0,5	3,488	0,01667	5,73	0,14	0,095565749	0,002362438
<b>C40 5,5:1</b>	20	0,5	3,267	0,01667	6,12	0,15	0,102030405	0,002522248
<b>C40 6,0:1</b>	20	0,5	3,267	0,01667	6,12	0,15	0,102030405	0,002522248
<b>C40 6,5:1</b>	20	0,5	3,267	0,01667	6,12	0,15	0,102030405	0,002522248
<b>Premium 6:1</b>	20	0,5	3,678	0,01667	5,44	0,13	0,090628965	0,002240398
<b>Premium 6,5:1</b>	20	0,5	3,67	0,01667	5,45	0,13	0,090826521	0,002245281
<b>Premium 7:1</b>	20	0,5	3,683	0,01667	5,43	0,13	0,090505928	0,002237356
<b>P20 6,0:1</b>	20	0,5	3,636	0,01667	5,50	0,14	0,091675834	0,002266277
<b>P20 6,5:1</b>	20	0,5	3,634	0,01667	5,50	0,14	0,091726289	0,002267524
<b>P20 7,0:1</b>	20	0,5	3,634	0,01667	5,50	0,14	0,091726289	0,002267524
<b>P30 6,0:1</b>	20	0,5	3,417	0,01667	5,85	0,14	0,097551458	0,002411526
<b>P30 6,5:1</b>	20	0,5	3,417	0,01667	5,85	0,14	0,097551458	0,002411526
<b>P30 7,0:1</b>	20	0,5	3,417	0,01667	5,85	0,14	0,097551458	0,002411526
<b>P40 6,0:1</b>	20	0,5	3,317	0,01667	6,03	0,15	0,100492413	0,002484228
<b>P40 6,5:1</b>	20	0,5	3,317	0,01667	6,03	0,15	0,100492413	0,002484228
<b>P40 7,0:1</b>	20	0,5	3,333	0,01667	6,00	0,15	0,100010001	0,002472302

## APÊNDICE C. Tabela de incertezas do consumo: ml/min e ml/s

	Consumo (ml/min)	Incerteza (ml/min)	Consumo (ml/s)	Incerteza (ml/s)
<b>Comum 5,5:1</b>	18,43	0,46	0,307110531	0,007591941
<b>Comum 6:1</b>	18,47	0,46	0,307914485	0,007611815
<b>Comum 6,35:1</b>	18,45	0,46	0,307511983	0,007601865
<b>C20 5,5:1</b>	18,62	0,46	0,310351803	0,007672067
<b>C20 6,0:1</b>	18,66	0,46	0,310926073	0,007686263
<b>C20 6,5:1</b>	18,66	0,46	0,310926073	0,007686263
<b>C30 5,5:1</b>	20,26	0,50	0,337706958	0,008348301
<b>C30 6,0:1</b>	20,34	0,50	0,338972142	0,008379578
<b>C30 6,5:1</b>	20,23	0,50	0,337222859	0,008336334
<b>C40 5,5:1</b>	21,60	0,53	0,36003469	0,008900255
<b>C40 6,0:1</b>	21,60	0,53	0,36003469	0,008900255
<b>C40 6,5:1</b>	21,60	0,53	0,36003469	0,008900255
<b>Premium 6:1</b>	19,19	0,47	0,319802429	0,007905692
<b>Premium 6,5:1</b>	19,23	0,48	0,320499546	0,007922925
<b>Premium 7:1</b>	19,16	0,47	0,319368269	0,007894959
<b>P20 6,0:1</b>	19,41	0,48	0,323496516	0,007997012
<b>P20 6,5:1</b>	19,42	0,48	0,323674555	0,008001413
<b>P20 7,0:1</b>	19,42	0,48	0,323674555	0,008001413
<b>P30 6,0:1</b>	20,65	0,51	0,344229831	0,00850955
<b>P30 6,5:1</b>	20,65	0,51	0,344229831	0,00850955
<b>P30 7,0:1</b>	20,65	0,51	0,344229831	0,00850955
<b>P40 6,0:1</b>	21,28	0,53	0,354607577	0,008766094
<b>P40 6,5:1</b>	21,28	0,53	0,354607577	0,008766094
<b>P40 7,0:1</b>	21,17	0,52	0,352905291	0,008724013

## APÊNDICE D. Tabela de incertezas do consumo: g/min e g/s

	Consumo (g/min)	Incerteza (g/min)	Consumo (g/s)	Incerteza (g/s)	Incerteza (%)
<b>Comum 5,5:1</b>	13,69	0,34	0,228	0,006	2,47
<b>Comum 6:1</b>	13,73	0,34	0,229	0,006	2,47
<b>Comum 6,35:1</b>	13,71	0,34	0,228	0,006	2,47
<b>C20 5,5:1</b>	14,07	0,35	0,235	0,006	2,47
<b>C20 6,0:1</b>	14,10	0,35	0,235	0,006	2,47
<b>C20 6,5:1</b>	14,10	0,35	0,235	0,006	2,47
<b>C30 5,5:1</b>	15,44	0,38	0,257	0,006	2,47
<b>C30 6,0:1</b>	15,50	0,38	0,258	0,006	2,47
<b>C30 6,5:1</b>	15,42	0,38	0,257	0,006	2,47
<b>C40 5,5:1</b>	16,60	0,41	0,277	0,007	2,47
<b>C40 6,0:1</b>	16,60	0,41	0,277	0,007	2,47
<b>C40 6,5:1</b>	16,60	0,41	0,277	0,007	2,47
<b>Premium 6:1</b>	14,26	0,35	0,238	0,006	2,47
<b>Premium 6,5:1</b>	14,29	0,35	0,238	0,006	2,47
<b>Premium 7:1</b>	14,24	0,35	0,237	0,006	2,47
<b>P20 6,0:1</b>	14,67	0,36	0,245	0,006	2,47
<b>P20 6,5:1</b>	14,68	0,36	0,245	0,006	2,47
<b>P20 7,0:1</b>	14,68	0,36	0,245	0,006	2,47
<b>P30 6,0:1</b>	15,74	0,39	0,262	0,006	2,47
<b>P30 6,5:1</b>	15,74	0,39	0,262	0,006	2,47
<b>P30 7,0:1</b>	15,74	0,39	0,262	0,006	2,47
<b>P40 6,0:1</b>	16,35	0,40	0,273	0,007	2,47
<b>P40 6,5:1</b>	16,35	0,40	0,273	0,007	2,47
<b>P40 7,0:1</b>	16,27	0,40	0,271	0,007	2,47

# APÊNDICE E. Escala do Micrômetro para indicação da Razão de Compressão

(Retirada do livro Annual Book of ASTM Standards 2003: Test Methods for Rating Motor, Diesel and Aviation Fuels)

TABLE 36 Conversion of Micrometer Reading to Compression Ratio for Research, Motor, and Motor (LP) Engines<sup>a</sup>

Micrometer Reading, in.	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	Micrometer Reading, in.
	Compression Ratio										
0.000	16.00	15.95	15.90	15.85	15.80	15.75	15.71	15.66	15.61	15.56	0.000
0.010	15.52	15.47	15.42	15.38	15.33	15.29	15.24	15.20	15.15	15.11	0.010
0.020	15.06	15.02	14.98	14.93	14.89	14.85	14.80	14.76	14.72	14.68	0.020
0.030	14.64	14.60	14.55	14.51	14.47	14.43	14.39	14.35	14.31	14.27	0.030
0.040	14.24	14.20	14.16	14.12	14.08	14.04	14.01	13.97	13.93	13.89	0.040
0.050	13.86	13.82	13.78	13.75	13.71	13.68	13.64	13.61	13.57	13.53	0.050
0.060	13.50	13.47	13.43	13.40	13.36	13.33	13.30	13.26	13.23	13.20	0.060
0.070	13.16	13.13	13.10	13.06	13.03	13.00	12.97	12.94	12.90	12.87	0.070
0.080	12.84	12.81	12.78	12.75	12.72	12.69	12.66	12.63	12.60	12.57	0.080
0.090	12.54	12.51	12.48	12.45	12.42	12.39	12.36	12.34	12.31	12.28	0.090
0.100	12.25	12.22	12.19	12.17	12.14	12.11	12.08	12.06	12.03	12.00	0.100
0.110	11.98	11.95	11.92	11.90	11.87	11.84	11.82	11.79	11.77	11.74	0.110
0.120	11.71	11.69	11.66	11.64	11.61	11.59	11.56	11.54	11.51	11.49	0.120
0.130	11.47	11.44	11.42	11.40	11.37	11.34	11.32	11.30	11.27	11.25	0.130
0.140	11.23	11.20	11.18	11.16	11.14	11.11	11.09	11.07	11.04	11.02	0.140
0.150	11.00	10.98	10.96	10.93	10.91	10.89	10.87	10.85	10.83	10.80	0.150
0.160	10.78	10.76	10.74	10.72	10.70	10.68	10.66	10.64	10.62	10.59	0.160
0.170	10.57	10.55	10.53	10.51	10.40	10.47	10.45	10.43	10.41	10.39	0.170
0.180	10.38	10.36	10.34	10.32	10.30	10.28	10.26	10.24	10.22	10.20	0.180
0.190	10.18	10.16	10.15	10.13	10.11	10.09	10.07	10.05	10.04	10.02	0.190
0.200	10.00	9.98	9.96	9.95	9.93	9.91	9.89	9.88	9.86	9.84	0.200
0.210	9.82	9.81	9.79	9.77	9.75	9.74	9.72	9.70	9.69	9.67	0.210
0.220	9.65	9.64	9.62	9.60	9.59	9.57	9.56	9.54	9.52	9.51	0.220
0.230	9.49	9.47	9.46	9.44	9.43	9.41	9.40	9.38	9.36	9.35	0.230
0.240	9.33	9.32	9.30	9.29	9.27	9.26	9.24	9.23	9.21	9.20	0.240
0.250	9.18	9.17	9.15	9.14	9.12	9.11	9.09	9.08	9.06	9.05	0.250
0.260	9.04	9.02	9.01	8.99	8.98	8.96	8.95	8.94	8.92	8.91	0.260
0.270	8.89	8.88	8.87	8.85	8.84	8.83	8.81	8.80	8.79	8.77	0.270
0.280	8.76	8.75	8.73	8.72	8.71	8.69	8.68	8.67	8.65	8.64	0.280
0.290	8.63	8.61	8.60	8.59	8.58	8.56	8.55	8.54	8.53	8.51	0.290
0.300	8.50	8.49	8.48	8.46	8.45	8.44	8.43	8.41	8.40	8.39	0.300
0.310	8.38	8.36	8.35	8.34	8.33	8.32	8.31	8.29	8.28	8.27	0.310
0.320	8.26	8.25	8.23	8.22	8.21	8.20	8.19	8.18	8.17	8.15	0.320
0.330	8.14	8.13	8.12	8.11	8.10	8.09	8.08	8.06	8.05	8.04	0.330
0.340	8.03	8.02	8.01	8.00	7.99	7.98	7.97	7.96	7.94	7.93	0.340
0.350	7.92	7.91	7.90	7.89	7.88	7.87	7.86	7.85	7.84	7.83	0.350
0.360	7.82	7.81	7.80	7.79	7.78	7.77	7.76	7.75	7.74	7.73	0.360
0.370	7.72	7.71	7.70	7.69	7.68	7.67	7.66	7.65	7.64	7.63	0.370
0.380	7.62	7.61	7.60	7.59	7.58	7.57	7.56	7.55	7.54	7.53	0.380
0.390	7.52	7.51	7.50	7.49	7.48	7.47	7.47	7.46	7.45	7.44	0.390
0.400	7.43	7.42	7.41	7.40	7.39	7.38	7.37	7.36	7.36	7.35	0.400
0.410	7.34	7.33	7.32	7.31	7.30	7.29	7.28	7.28	7.27	7.26	0.410
0.420	7.25	7.24	7.23	7.22	7.22	7.21	7.20	7.19	7.18	7.17	0.420
0.430	7.16	7.16	7.15	7.14	7.13	7.12	7.11	7.11	7.10	7.09	0.430
0.440	7.08	7.07	7.06	7.06	7.05	7.04	7.03	7.02	7.02	7.01	0.440
0.450	7.00	6.99	6.98	6.98	6.97	6.96	6.95	6.94	6.94	6.93	0.450
0.460	6.92	6.91	6.91	6.90	6.89	6.88	6.87	6.87	6.86	6.85	0.460
0.470	6.84	6.84	6.83	6.82	6.81	6.81	6.80	6.79	6.78	6.78	0.470
0.480	6.77	6.76	6.75	6.75	6.74	6.73	6.73	6.72	6.71	6.70	0.480
0.490	6.70	6.69	6.68	6.67	6.67	6.66	6.65	6.65	6.64	6.63	0.490

Equivalent digital counter reading = (1.012 - micrometer reading) 1410

<sup>a</sup> This table is based on the equation: Compression ratio = 4.50 + 0.30 + micrometer reading/0.30 ± micrometer reading.

TABLE 36 *Continued*

Micrometer Reading, in.	0.000	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	Micrometer Reading, in.
	Compression Ratio										
0.500	6.62	6.62	6.61	6.60	6.60	6.59	6.58	6.58	6.57	6.56	0.500
0.510	6.56	6.55	6.54	6.54	6.53	6.52	6.51	6.51	6.50	6.49	0.510
0.520	6.49	6.48	6.47	6.47	6.46	6.45	6.45	6.44	6.43	6.43	0.520
0.530	6.42	6.42	6.41	6.40	6.40	6.39	6.38	6.38	6.37	6.36	0.530
0.540	6.36	6.35	6.34	6.34	6.33	6.33	6.32	6.31	6.31	6.30	0.540
0.550	6.29	6.29	6.28	6.28	6.27	6.26	6.26	6.25	6.24	6.24	0.550
0.560	6.23	6.23	6.22	6.21	6.21	6.20	6.20	6.19	6.18	6.18	0.560
0.570	6.17	6.17	6.16	6.15	6.15	6.14	6.14	6.13	6.13	6.12	0.570
0.580	6.11	6.11	6.10	6.10	6.09	6.08	6.08	6.07	6.07	6.06	0.580
0.590	6.06	6.05	6.04	6.04	6.03	6.03	6.02	6.02	6.01	6.01	0.590
0.600	6.00	5.99	5.99	5.98	5.98	5.97	5.97	5.96	5.96	5.95	0.600
0.610	5.95	5.94	5.93	5.93	5.92	5.92	5.91	5.91	5.90	5.90	0.610
0.620	5.89	5.89	5.88	5.88	5.87	5.86	5.86	5.85	5.85	5.84	0.620
0.630	5.84	5.83	5.83	5.82	5.82	5.81	5.81	5.80	5.80	5.79	0.630
0.640	5.79	5.78	5.78	5.77	5.77	5.76	5.76	5.75	5.75	5.74	0.640
0.650	5.74	5.73	5.73	5.72	5.72	5.71	5.71	5.70	5.70	5.69	0.650
0.660	5.69	5.68	5.68	5.67	5.67	5.66	5.66	5.65	5.65	5.64	0.660
0.670	5.64	5.63	5.63	5.62	5.62	5.61	5.61	5.60	5.60	5.60	0.670
0.680	5.59	5.59	5.58	5.58	5.57	5.57	5.56	5.56	5.55	5.55	0.680
0.690	5.55	5.54	5.54	5.53	5.53	5.52	5.52	5.51	5.51	5.50	0.690
0.700	5.50	5.50	5.49	5.49	5.48	5.48	5.47	5.47	5.46	5.46	0.700
0.710	5.46	5.45	5.45	5.44	5.44	5.43	5.43	5.42	5.42	5.42	0.710
0.720	5.41	5.41	5.40	5.40	5.39	5.39	5.39	5.38	5.38	5.37	0.720
0.730	5.37	5.36	5.36	5.36	5.35	5.35	5.34	5.34	5.34	5.33	0.730
0.740	5.33	5.32	5.32	5.31	5.31	5.31	5.30	5.30	5.29	5.29	0.740
0.750	5.29	5.28	5.28	5.27	5.27	5.27	5.26	5.26	5.25	5.25	0.750
0.760	5.25	5.24	5.24	5.23	5.23	5.23	5.22	5.22	5.21	5.21	0.760
0.770	5.21	5.20	5.20	5.19	5.19	5.19	5.18	5.18	5.17	5.17	0.770
0.780	5.17	5.16	5.16	5.16	5.15	5.15	5.14	5.14	5.14	5.13	0.780
0.790	5.13	5.12	5.12	5.12	5.11	5.11	5.11	5.10	5.10	5.09	0.790
0.800	5.09	5.09	5.08	5.08	5.08	5.07	5.07	5.07	5.06	5.06	0.800
0.810	5.05	5.05	5.05	5.04	5.04	5.04	5.03	5.03	5.03	5.02	0.810
0.820	5.02	5.01	5.01	5.01	5.00	5.00	5.00	4.99	4.99	4.99	0.820
0.830	4.98	4.98	4.98	4.97	4.97	4.96	4.96	4.96	4.95	4.95	0.830
0.840	4.95	4.94	4.94	4.94	4.93	4.93	4.93	4.92	4.92	4.92	0.840
0.850	4.91	4.91	4.91	4.90	4.90	4.90	4.89	4.89	4.89	4.88	0.850
0.860	4.88	4.88	4.87	4.87	4.87	4.86	4.86	4.86	4.85	4.85	0.860
0.870	4.85	4.84	4.84	4.84	4.83	4.83	4.83	4.82	4.82	4.82	0.870
0.880	4.81	4.81	4.81	4.80	4.80	4.80	4.79	4.79	4.79	4.78	0.880
0.890	4.78	4.78	4.78	4.77	4.77	4.77	4.76	4.76	4.76	4.75	0.890
0.900	4.75	4.75	4.74	4.74	4.74	4.73	4.73	4.73	4.73	4.72	0.900
0.910	4.72	4.72	4.71	4.71	4.71	4.70	4.70	4.70	4.69	4.69	0.910
0.920	4.69	4.69	4.68	4.68	4.68	4.67	4.67	4.67	4.66	4.66	0.920
0.930	4.66	4.66	4.65	4.65	4.65	4.64	4.64	4.64	4.63	4.63	0.930
0.940	4.63	4.63	4.62	4.62	4.62	4.61	4.61	4.61	4.61	4.60	0.940
0.950	4.60	4.60	4.59	4.59	4.59	4.59	4.58	4.58	4.58	4.57	0.950
0.960	4.57	4.57	4.57	4.56	4.56	4.56	4.55	4.55	4.55	4.55	0.960
0.970	4.54	4.54	4.54	4.53	4.53	4.53	4.53	4.52	4.52	4.52	0.970
0.980	4.52	4.51	4.51	4.51	4.50	4.50	4.50	4.50	4.49	4.49	0.980
0.990	4.49	4.49	4.48	4.48	4.48	4.47	4.47	4.47	4.47	4.46	0.990
1.000	4.46	...	...	...	...	...	...	...	...	...	1.000