

NÚBIA DOS SANTOS COIMBRA

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO DESEMPENHO UTILIZANDO
COMBUSTÍVEIS ADULTERADOS EM UM MOTOR ASTM CFR.**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello
Co-orientador: Prof. Darci Campani

Porto Alegre
2008



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO DESEMPENHO UTILIZANDO COMBUSTÍVEIS
ADULTERADOS EM UM MOTOR ASTM CFR

NÚBIA DOS SANTOS COIMBRA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Darci Savicki
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre
2008

dedico de modo especial à minha Mãe e meu Pai, que mesmo longe nos últimos anos, contribuíram para que este sonho se tornasse realidade.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais *Rui e Ivone*, que sempre estiveram do meu lado, me incentivando a não desistir jamais dos meus ideais,

à *Madre Paulina* por sempre iluminar o meu caminho, e me dar força pra continuar,

ao meu irmão *Renan*, e a meu namorado *Thiago*, por terem paciência e companheirismo nestes anos de luta,

à equipe do Museu do Motor da Escola de Engenharia da UFRGS, que me acolheu e me apoiou neste trabalho,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Pedro Mello* e meu co-orientador, *Prof. Darci Campani*, pelos conhecimentos e paciência na minha orientação,

aos colegas do Laboratório de Motores, *Eng. Fabiano Wildner* e *Eng. Serguei Nogueira*, pela ajuda fundamental na execução deste trabalho.

COIMBRA, N. S. **Análise da Variação do Desempenho Utilizando Combustíveis Adulterados em um Motor ASTM CFR**. 2008. 29f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

RESUMO

A adulteração de combustíveis tem sido um tema bastante recorrente, seja pela sonegação de impostos ou pela preocupação da influência destas adulterações no desempenho de motores automotivos e o impacto destas ao ambiente. O presente trabalho visa identificar a influência de combustíveis adulterados no desempenho de um motor de ciclo Otto, utilizando-se o motor padrão ASTM CFR (Cooperative Fuel Research), único motor certificado para análise de combustíveis utilizado na indústria Petroquímica. Todos os ensaios foram padronizados pela norma ASTM D357. As adulterações foram feitas com misturas de gasolina e aguarrás (solvente), com porcentagens de solvente iguais a 20%, 30%, 40% e 50% do total da mistura. Fez-se medidas da velocidade de queima do combustível, variação da pressão na câmara de combustão, posição da árvore de manivelas, ponto de ignição e emissão de gases da descarga. Para as condições testadas, a velocidade de combustão foi alterada significativamente somente pela amostra de gasolina com 50% de solvente, tendo uma redução média de 15% em relação à amostra de gasolina tipo C sem solvente. Verifica-se nas amostras com percentual superior a 30% de solvente a ocorrência de combustão anormal, evidenciada pelas variações da amplitude da pressão e posição do pico de pressão na câmara de combustão. Através da análise dos gases da descarga, verifica-se que com o aumento da porcentagem de solvente a mistura, torna-se menos eficiente a combustão, caracterizada pela maior emissão de HC e emissão de CO₂ inferior a 12%. Entretanto ocorre uma redução significativa na emissão de CO, o que seria ideal ao ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: Desempenho, Velocidade de Combustão, Pressão na Câmara, Combustíveis, Adulteração, ASTM CFR.

COIMBRA, N. S. **Análise da Variação do Desempenho Utilizando Combustíveis Adulterados em um Motor ASTM CFR**. 2008. 29f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

ABSTRACT

The adulteration of fuel has been quite a recurring theme, whether for tax evasion or the concern of the influence of adulteration in the performance of automotive engines and the impact of the environment. This paper aims to identify the influence of adulterated fuel in the performance of an Otto cycle engine, using the engine standard ASTM CFR (Cooperative Fuel Research), the only engine certified for analysis of fuels used in the petrochemical industry. All tests were standardized by ASTM D357. The adulteration were made with blends of gasoline and turpentine (solvent), with percentages of solvent equal to 20%, 30%, 40% and 50% of the total mixture. They did measures the speed of burning of fuel, change of pressure in the combustion chamber, position of the tree of cranks, point of ignition and emission of gases from the discharge. For the conditions tested, the burn rate was significantly altered only by the sample of gasoline with 50% solvent, and an average reduction of 15% compared to the sample of gasoline type C without solvent. There is percentage in the samples with more than 30% of solvent the occurrence of abnormal combustion, evidenced by changes of the magnitude of pressure and position of the peak pressure in the combustion chamber. Through analysis of the discharge of gases, it appears that with the increase in the percentage of the solvent mixture, it becomes less efficient combustion, with the highest emissions of HC and CO₂ emission below 12%. However there is a significant reduction in emissions of CO, which would be the ideal environment.

KEYWORDS: Performance, Speed Combustion, Pressure in the Cylinder, fuels, Adulteration, ASTM CFR.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	1
2.1 Motores de Combustão Interna – Ciclo Otto.....	1
2.1.1 Motores de Ciclo Quatro Tempos	2
2.1.2 Taxa de Compressão.....	3
2.1.3 Combustão na Condição Estequiométrica.....	4
2.1.4 Velocidade de Queima e Deflagração	4
2.1.5 Curva de Pressão e Ponto de Ignição	4
2.2 Combustão Anormal	5
2.2.1 Detonação	5
2.2.2 Pré-ignição.....	5
2.3 Resistência a Detonação de um Combustível	5
2.3.1 Número de Octanagem Motor (MON)	6
2.3.2 Número de Octanagem de Pesquisa (RON)	6
2.3.3 Índice Anti-Detonante (IAD)	6
2.4 Características do Combustível e Solvente Utilizado.....	6
2.4.1 Gasolina Tipo C.....	6
2.4.2 Aguarrás	6
2.5 Composição dos Gases de Descarga.....	6
3. ESTUDO EXPERIMENTAL	7
3.1 Materias e Métodos	7
3.1.1 Característica do Motor Padrão ASTM CFR	7
3.1.2 Sistema de Alimentação do Motor	8
3.1.3 Sensor de Pressão na Câmara de Combustão	8
3.1.4 Sistema de Injeção e Ignição	9
3.1.5 Relação Ar/Combustível	9
3.1.6 Posição Angular da Árvore de Manivelas	9
3.1.7 Sistema de Aquisição de Dados	9
3.1.8 Combustíveis Utilizados.....	10
3.2 Procedimento Experimental	11
4. RESULTADOS E ANÁLISES	12
4.1. Amostra 1 - Gasolina Tipo C	12
4.2. Amostra 2 - Gasolina com 20% de Aguarrás	12
4.3. Amostra 3 - Gasolina com 30% de Aguarrás	13

4.4. Amostra 4 - Gasolina com 40% de Aguarrás	14
4.5. Amostra 5 - Gasolina com 50% de Aguarrás	14
4.6. Comparação das Curvas de Pressão entre Combustíveis.....	15
4.7. Análise dos Gases da Descarga.....	16
5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	20
APÊNDICE	21

1. INTRODUÇÃO

No Brasil a adulteração de combustíveis tem sido tema de discussões e planejamento no sentido de fiscalizar e coibir a ocorrência deste tipo de ação ilícita. Um dos principais motivos desta prática de adulteração ter se tornado tão difundida e utilizada foi - conforme Takeshita [2006] - a abertura do mercado que após anos de monopólio passou a comprar combustíveis de qualquer distribuidora com o intuito de baixar os valores através da oferta e procura, dando início aos conhecidos postos “bandeira branca”. Outro agravante para a adulteração de combustíveis foi a redução aos subsídios ao álcool anidro e a liberação da importação de solventes, tornando o custo destes bem abaixo do valor da gasolina, esta que sofre uma alta taxa de impostos com os tributos de ICMS, CIDE, PIS e COFINS.

O uso de combustíveis adulterados além de lesar aos cofres públicos traz prejuízos principalmente aos consumidores e proprietários de veículos, pois a adulteração de combustíveis pode provocar a deterioração de dutos e mangueiras de borrachas, corrosão de peças metálicas e componentes, queima de bombas e eletroinjetores, além de alto nível de impurezas depositadas sobre as válvulas de admissão do motor.

Além de danos aos veículos, a utilização de combustíveis adulterados afeta ao ambiente, visto que a combustão ocorre de forma irregular, e as emissões de gases tóxicos provenientes destas queimas são ainda maiores. Publicamente, até o momento, o que se sabe, é que estas adulterações acarretariam principalmente em perda de potência e torque associada a um consumo excessivo de combustível.

Com base nestas informações, propõe-se neste trabalho realizar ensaios com motor de ciclo Otto, denominado CFR (Cooperative Fuel Research) utilizando-se de combustíveis adulterados, ou seja, fora da especificação da ANP para qualidade da gasolina, conforme ANP, PORTARIA Nº 309, de 27 de Dezembro de 2001, para a verificação e posterior comparação entre os combustíveis testados quanto à velocidade de combustão, pressão na câmara de combustão, ponto de ignição, posição da árvore de manivelas e emissão de gases da descarga, desenvolvendo-se o trabalho experimental no Laboratório de Motores da UFRGS.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA – CICLO OTTO

Motores de combustão interna, também chamados de motores endotérmicos, recebem este nome por realizarem trabalho queimando uma mistura de ar e vapor de combustível dentro de um cilindro. No momento da queima desta mistura ar/combustível são formados gases em altas temperaturas que provocam um aumento da pressão no interior da câmara, levando a um deslocamento do êmbolo e conseqüentemente o giro do eixo principal do motor. Nos motores endotérmicos, o trabalho obtido provém da transformação parcial da energia térmica fornecida pelo fluido em expansão em energia mecânica.

O ciclo foi imaginado pelo francês, Alphonse Beau de Rochas em 1862 e posto em execução pelo técnico alemão Nikolaus August Otto em 1872 recebendo seu nome Ciclo Otto [Andrade, 2003].

2.1.1 Motores de Ciclo Quatro Tempos

O ciclo de quatro tempos é composto de quatro vezes o percurso feito pelo êmbolo, entre o Ponto Morto Inferior (PMI) ao Ponto Morto Superior (PMS), figura 2.1, que necessita de duas rotações da árvore de manivelas.

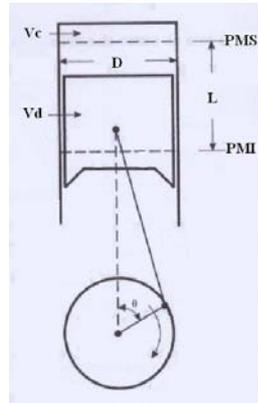


Figura 2.1- Geometria do cilindro.

As quatro fases que formam o ciclo completo de combustão podem ser visualizadas na figura 2.2:

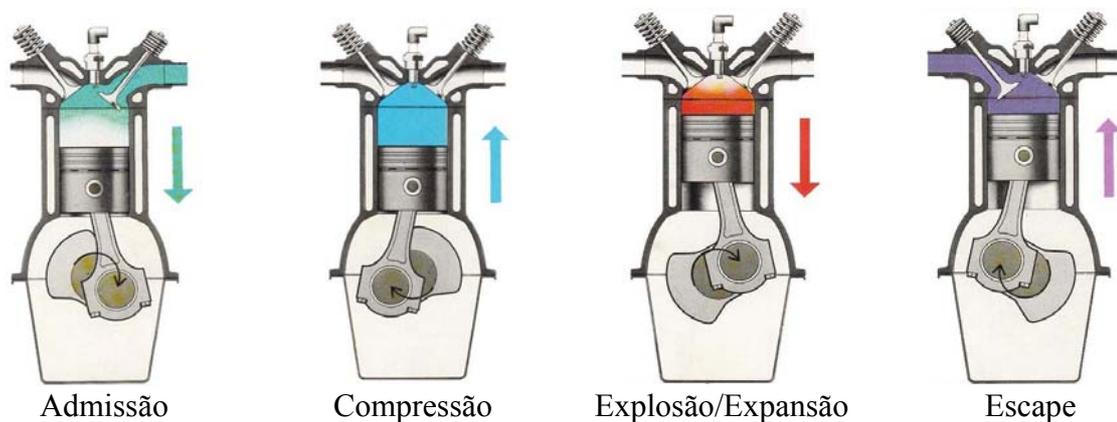


Figura 2.2 - Ciclos motor quatro tempos (Fonte: Oficina e Cia, 2002).

Admissão: Trata-se da primeira fase dos quatro tempos do ciclo de funcionamento de um motor. No momento em que a válvula de admissão se abre, o êmbolo desce em direção ao PMI criando uma depressão que succiona a mistura ar/combustível para o interior do cilindro. No instante em que o êmbolo atinge o PMI, a fase de admissão será concluída e a fase de compressão se inicia.

Compressão: Para que possa existir uma explosão capaz de gerar energia mecânica que empurre o êmbolo para baixo, a mistura ar/combustível deve ser comprimida na câmara de combustão antes que a queima se inicie. A fase de compressão inicia-se quando o êmbolo está no PMI prestes a subir em direção ao PMS com as válvulas devidamente fechadas. Depois que a mistura aspirada pelo cilindro for comprimida, receberá a descarga elétrica da vela que iniciará a combustão.

Explosão/Expansão: A explosão é desencadeada com a centelha produzida pela vela de ignição depois que a mistura ar/combustível é comprimida na câmara de combustão. Com a

explosão decorrente da queima, em virtude do calor desprendido na combustão, o volume da mistura ar/combustível tende a aumentar rapidamente seu volume, causando uma forte pressão interna. Como a parte superior do cilindro (cabeçote e válvulas) está hermeticamente fechada, esse aumento exagerado de pressão empurra violentamente o êmbolo para baixo, movimentando assim o motor. Caracterizando-se assim principalmente, por uma rápida e forte liberação de energia térmica oriunda da queima do combustível, que se transforma em energia mecânica. A explosão, juntamente com a expansão que a sucede, é a fase útil do ciclo de operação do motor, ou seja, aquela que gera o trabalho motor propriamente dito. No momento da explosão, visualizada em frações mínimas de segundos na figura 2.3, a temperatura instantânea da câmara oscila entre 2000 °C e 2500 °C e a pressão chega a 80 bar, valor suficiente para que o êmbolo seja vigorosamente empurrado para baixo. Segundo a Nova Enciclopédia do Automóvel [1998] a combustão se propaga no interior da câmara de combustão a uma velocidade média que varia de 20 m/s até 50 m/s, dependendo do número de rotações que o motor desenvolve exatamente no momento da explosão.

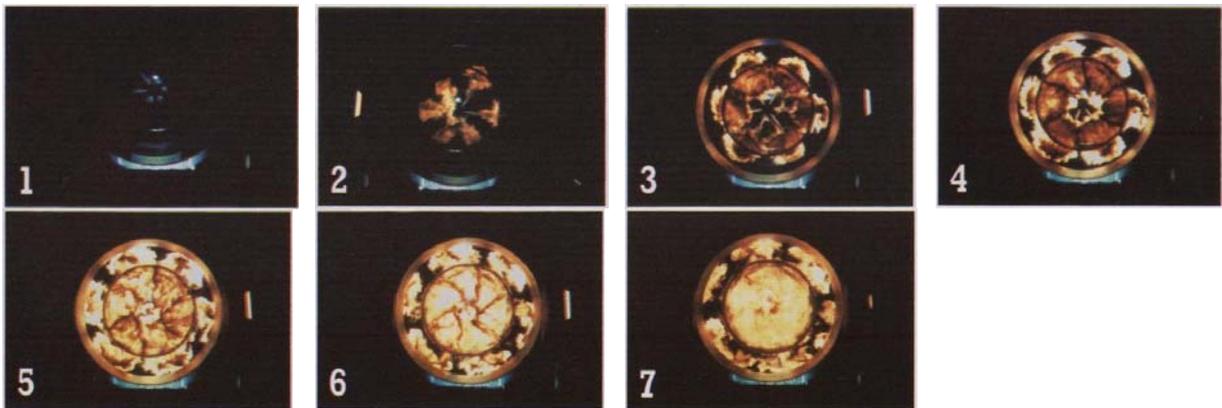


Figura 2.3 – Sequência da explosão ocorrida na cabeça do êmbolo (Fonte: Nova Enciclopédia do Automóvel, 1998).

Escape: É a última fase do ciclo de um motor de quatro tempos. Depois que a pressão criada na fase de expansão empurrou o êmbolo do seu PMS até o PMI, chega o momento de expulsar os gases queimados de dentro do cilindro. Assim, quando o êmbolo atinge o PMI, inicia-se a abertura da válvula de escapamento e a expulsão dos gases queimados. Graças a uma pressão residual remanescente da expansão no interior do cilindro, os gases queimados começam a sair em grande velocidade e sua expulsão fica completa quando o êmbolo inicia seu processo de subida até o PMS, empurrando o que ainda resta de gases queimados para fora através do orifício aberto pela válvula de escape.

2.1.2 Taxa de Compressão

É a relação volumétrica que indica quantas vezes a mistura ar/combustível aspirado para dentro dos cilindros pelo êmbolo é comprimido dentro da câmara de combustão antes que se inicie o processo de queima. Assim, um motor a gasolina que tenha especificada uma taxa de compressão de 10:1, por exemplo, indica que o volume aspirado para dentro do cilindro foi comprimido dez vezes até o êmbolo chegar ao PMS. Do ponto de vista termodinâmico, a taxa de compressão é diretamente responsável pelo rendimento térmico do motor. Em termos práticos, isso significa que o motor poderá gerar mais torque, e conseqüentemente mais potência, e consumir menos combustível quanto maior for à taxa de compressão sofrida pela mistura ar/combustível antes da explosão.

2.1.3 Combustão na Condição Estequiométrica

A combustão é uma reação química em que os elementos oxidantes constituintes do combustível reagem com oxigênio, sendo necessário que esta relação esteja balanceada quimicamente, para que a reação ocorra por completa. Esta relação de combustão estequiométrica depende da massa de cada elemento químico dos reagentes, da composição relativa do elemento combustível e da proporção necessária entre o combustível e o ar.

A relação estequiométrica é o dado que define a relação ar/combustível utilizado no motor. Para medir o quanto uma mistura afasta-se da estequiométrica, foi criado o fator Lambda (λ). Este, de modo simplificado, representa o excesso ou falta de oxigênio na mistura. Se a mistura apresentar $\lambda=1$, diz-se estequiométrica; se $\lambda>1$, a mistura apresenta muito oxigênio, sendo chamada de mistura “Pobre”. Se $\lambda<1$, a mistura apresenta muito combustível em relação ao oxidante, sendo conhecida como mistura “rica” [Gaudioso, 2008].

2.1.4 Velocidade de Combustão e Deflagração

Velocidade de combustão, também chamada de taxa de propagação da chama ou velocidade de ignição, é a velocidade com que a frente de chama se desloca através da mistura ar/combustível, inflamando a mistura ainda não queimada.

Deflagração é a propagação da combustão que ocorre por transmissão de calor devido à condução, convecção e radiação da chama para a mistura ar/combustível vizinha, levando esta a atingir a temperatura de inflamação e iniciar a combustão [Andrade, 2007].

2.1.5 Curva de Pressão e Ponto de Ignição

A velocidade de aumento da pressão, denominado gradiente de pressão, durante o desenvolvimento da combustão exerce uma notável influência sobre a pressão máxima e sobre a forma com que é transmitida ao êmbolo a força gerada pelo fluido [Giacosa, 1967].

O gradiente de pressão é função da rapidez com que se desenvolve o processo de combustão, sendo este processo dividido em quatro fases distintas: 1- centelha de ignição; 2- desenvolvimento da chama; 3- propagação da chama; e 4- término da chama.

A combustão se inicia antes do fim da compressão, continua através do início da expansão, e acaba após o ponto no ciclo em que o pico de pressão dentro do cilindro ocorre. Se o início da combustão for avançado progressivamente para antes do PMS, a transferência do trabalho do curso da compressão, que é a do êmbolo aos gases do cilindro, aumenta. Se o fim do processo da combustão for atrasado, retardando-se progressivamente a centelha, o pico de pressão dentro do cilindro ocorre mais tarde no curso da expansão e este terá uma redução no seu valor. Estas mudanças reduzem a transferência do trabalho do curso da expansão dos gases do cilindro ao êmbolo. A centelha que melhor se ajusta depende da taxa de propagação e da propagação da chama, do comprimento da trajetória da chama através da câmara de combustão, e dos detalhes do processo de fim de chama, depois que esta alcança as paredes de cilindro. Estes dependem do projeto do motor, das condições de operação, e das propriedades da mistura ar/combustível queimada. O melhor sincronismo é o que gera máximo torque [Wildner, 2003].

A combustão é dita normal quando a propagação da frente de chama progride de forma crescente e constante até que se extingue nas paredes do cilindro. Entretanto, alguns fatores como composição do combustível, projeto e parâmetros de operação do motor, e depósitos na câmara de combustão podem impedir que ocorra uma combustão normal.

2.2 COMBUSTÃO ANORMAL

Em motores de combustão interna existem várias possibilidades de ocorrer uma combustão anormal, dentre as quais a detonação e a pré-ignição são as que mais se destacam. Esses fenômenos, além de causarem vibrações e ruídos, podem diminuir substancialmente a vida útil de um motor e seus componentes. Quando a detonação ou a pré-ignição ocorrem, há um grande fornecimento de energia química contida no gás final, causando pressões locais elevadas que se propagam por toda a câmara de combustão [Pasquotto, 2008].

2.2.1 Detonação

A detonação é um fenômeno que pode ocorrer dentro da câmara de combustão, conhecido popularmente por “batida de pino”, manifesta-se através de sons metálicos e agudos. A repetição constante desse feito pode ocasionar sérios prejuízos ao motor, danificando, inclusive, a cabeça do êmbolo pelas altas temperaturas que geram. A detonação é, na realidade, uma combustão anormal. O aparecimento desse efeito vem embasado nas oscilações de altas frequências da pressão no interior da câmara, provocadas primordialmente pela auto-ignição da mistura antes da chegada da frente de chama produzida pela centelha da vela, isto é, parte do volume admitido pelo cilindro se auto-inflama quando a pressão, temperatura ou ambos, é muito alta.

O excessivo adiantamento da ignição é um dos fatores que podem gerar a detonação. A frente de chama seria iniciada pela vela precocemente no interior da câmara e, por isso, já estaria em fase muito adiantada de queima quando o êmbolo atingisse o PMS. Em uma fase mais aguda de pressão, a mistura parcialmente queimada também já teria criado outra fonte de pressão, a expansão do gás queimado, detonando espontaneamente a mistura por queimar. Algumas condições, como aquelas encontradas em motores turboalimentados ou com alta taxa de compressão, o aquecimento excessivo da vela, o uso de combustíveis de baixa octanagem, a câmara repleta de depósitos carbônicos e resíduos de combustão ou ainda o arrefecimento deficiente do motor, criam um ambiente propício para que aconteça a detonação.

2.2.2 Pré-ignição

A pré-ignição é um fenômeno anômalo da combustão onde a mistura admitida incandesce-se precocemente através de pontos quentes que eventualmente existam no interior da câmara, na superfície interna das paredes do cilindro, antes mesmo da propagação da chama enviada pela vela. Uma cabeça de êmbolo que esteja em adiantado grau de carbonização, por exemplo, pode causar a pré-ignição pela criação de diversos pontos incandescentes que funcionam como se fossem verdadeiras velas.

2.3 RESISTÊNCIA A DETONAÇÃO DE UM COMBUSTÍVEL

São usados métodos experimentais para determinar a resistência à detonação de um combustível, essa propriedade recebe o nome de octanagem de um combustível e avalia a qualidade de um combustível quando submetido a diferentes condições de pressão e temperatura sem se auto-inflamar, causando a conhecida “batida de pino” ou detonação. Quanto maior o número de octanas, maior a resistência do combustível, permitindo o uso de taxas de compressão mais elevadas, aumentando assim a eficiência dos motores. Os principais métodos para medição de octanagem são: o método pesquisa (MON) e o método motor

(RON). Ambos são realizados em um motor monocilíndrico padrão, denominado CFR (Cooperative Fuel Research).

2.3.1 Número de Octanagem Motor (MON)

Determina a resistência do combustível à detonação quando o motor está em regime de plena carga, em altas rotações.

2.3.2 Número de Octanagem de Pesquisa (RON)

Determina a resistência do combustível à detonação quando o motor está em regime de plena carga, em baixas rotações.

2.3.3 Índice Anti-Detonante (IAD)

É a média entre os métodos MON e RON, conforme mostrado na equação 2.1:

$$IAD = \frac{MON + RON}{2} \quad (2.1)$$

2.4 CARACTERÍSTICAS DO COMBUSTÍVEL E SOLVENTE UTILIZADO

2.4.1 Gasolina Tipo C

É o combustível empregado na maioria dos motores de automóveis que seguem o ciclo Otto. A gasolina é uma mistura complexa de cerca de 40 hidrocarbonetos principais com a presença de muitos outros em quantidade mínimas. Estes hidrocarbonetos possuem de 4 a 12 átomos de carbono, possuindo também contaminantes naturais em baixas concentrações, formados por compostos contendo enxofre, oxigênio, metais e nitrogênio [Van Wylen e Sonntag, 1993].

Ao lado do diesel, ambos destilados do petróleo, a gasolina oferece as melhores condições que se conhece para ser utilizada em larga escala, sendo a gasolina tipo C, a mais difundida. A gasolina tipo C é constituída por gasolina pura, conhecida como gasolina tipo A, adicionada de álcool etílico anidro combustível (AEAC) em porcentagem de 25% em volume, conforme ANP, PORTARIA Nº 309, de 27 de Dezembro de 2001.

2.4.2 Aguarrás

Também chamado de essência da terebintina, o aguarrás é uma mistura de hidrocarbonetos alifáticos, com faixa de destilação compreendida entre 150°C e 240°C, classificado numa faixa intermediária de destilação entre a nafta pesada e o querosene. É um líquido incolor e possui odor similar ao querosene, insolúvel em água e solúvel em solventes orgânicos. É utilizado principalmente como solvente e também na formulação de tintas, diluentes para resinas e vernizes, e na fabricação de ceras e graxas.

2.5 COMPOSIÇÃO DOS GASES DE DESCARGA

Os resíduos do processo da combustão de um motor endotérmico, os gases de escape ou descarga, em teoria, deveriam ser totalmente inofensivos à natureza e ao ser humano se

houvesse uma queima perfeita do combustível na câmara de combustão, o que resultaria apenas em CO_2 (dióxido de carbono ou gás carbônico) e H_2O (água). Como estes gases decorrem de uma série de parâmetros, como qualidade do combustível, regulagem do motor, seja de injeção ou de ignição, combinados ao formato da câmara de combustão e a curva de avanço, é pouco provável que os gases de descarga sejam somente os desejados e citados acima.

Ao abrir a válvula de escape, os principais gases poluentes que restam da combustão são HC (hidrocarbonetos), CO (monóxido de carbono) e NO_x (óxidos de nitrogênio), formando uma mistura de gases resultante, que é expulsa pela pressão residual da combustão e pelo movimento ascendente do êmbolo em direção a seu PMS. Conduzido pelo coletor a um tubo de escapamento, estes gases, passam pelo catalisador, onde sofrem uma reação química, transformam-se em nitrogênio, gás carbônico e água, em seguida passam pelo silenciador até atingirem a atmosfera.

3. ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAS E MÉTODOS

3.1.1 Característica do Motor Padrão ASTM CFR

Os ensaios foram realizados em um motor monocilíndrico, denominado CFR (Cooperative Fuel Research), fabricado pela Waukesha, apresentado na figura 3.1, junto ao CFR é acoplado um motor elétrico através de polias e corria que tem a função de manter a rotação do CFR em 900 RPM. O CFR foi desenvolvido para suprir a necessidade das refinarias e construtores de motores, possibilitando a medida do número de octanas de combustíveis veiculares e de aviação segundo a Norma ASTM D357. Sendo este método de medida aceito no mundo todo como padrão na determinação do número de octanas MON e RON de um combustível. Na tabela 3.1 estão listadas as especificações técnicas do motor ASTM CFR [ASTM, 1964].



Figura 3.1 – Motor ASTM CFR.

Tabela 3.1 – Especificações Técnicas do Motor ASTM CFR

Cilindros	monocilíndrico
Diâmetro (D)	82,55 mm
Curso (L)	114,3 mm
Volume deslocado (Vd)	611,3 cm ³
Volume câmara de combustão (Vc)	Variável
Abertura da válvula de admissão	30° antes PMS
Fechamento da válvula de admissão	214° antes PMS
Abertura da válvula de escape	160° antes PMS
Fechamento da válvula de escape	355° antes PMS
Comprimento de abertura das válvulas	6,05 mm

3.1.2 Sistema de Alimentação do Motor

A alimentação do motor foi feita através do carburador com três cubas, figura 3.2, com regulagem de altura para ajuste da relação ar/combustível. A escolha da cuba a ser utilizada foi feita através de uma válvula seletora.



Figura 3.2 – Carburador do motor ASTM CFR.

3.1.3 Sensor de Pressão na Câmara de Combustão

A variação da depressão dentro da câmara de combustão foi medida através do sensor de captação de detonação tipo D-1, componente padrão do motor CFR, normalizado pela ASTM, figura 3.3. O sensor possui um fundo delgado de aço inox que serve como diafragma que se flexiona com a força exercida pelos impulsos de detonação; uma haste de núcleo central de liga magnetostrictiva, com uma bobina de fio de cobre criticamente enrolada em seu entorno, que quando solicitada pela ação do diafragma flexível induz uma tensão na bobina, unida no topo do sensor a um plugue coaxial. O sinal de saída de tensão resultante é proporcional a velocidade de mudança da pressão da câmara de combustão.

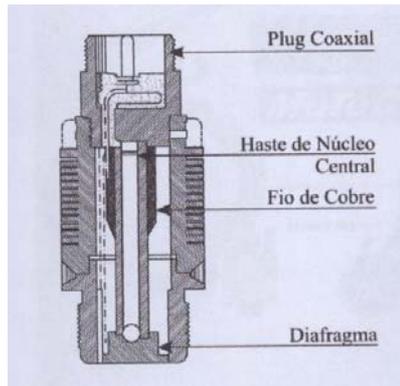


Figura 3.3 – Sensor de captação de detonação D-1. (Fonte: Wildner, 2006).

3.1.4 Sistema de Ignição

Nos ensaios foi utilizado o sistema de ignição eletrônica programável, Electromotive Tec-II, que permite a programação dos mapas de avanço de ignição com base nos dados de carga aplicada ao motor.

O registro do momento da ignição ocorre a partir do chaveamento do primário da bobina, realizado pelo sistema de controle de ignição eletrônica.

3.1.5 Relação Ar/Combustível

Foi utilizado um sensor de oxigênio de banda larga modelo LSU4, fabricação Bosch, com um display da FuelTech modelo WB-02 para medida da relação ar/combustível. Para aquisição dos dados utilizou-se uma saída analógica da sonda que permitia o registro do sinal pelo sistema, possibilitando o monitoramento do mesmo.

3.1.6 Posição Angular da Árvore de Manivelas

Para medida do PMS e a posição da árvore de manivelas, foi utilizado um sensor indutivo posicionado junto a uma roda dentada de aço, com 600 mm de diâmetro e 304 dentes, que está acoplada junto à tampa traseira da árvore de manivelas. O sensor detecta a falta de um dente retirado propositalmente, permitindo assim a identificação do PMS e conseqüentemente a posição da árvore de manivelas.

3.1.7 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema utilizado para registro dos sinais dos sensores de ignição, pressão na câmara de combustão e posição da árvore de manivelas, consistiu de uma placa condicionadora de sinal montada pelo LAMECC (Laboratório de Mecatrônica e Controles) e uma placa de aquisição de dados National Instruments (Conversor Analógico Digital A/D NI USB-6259), conectadas a um computador. O programa utilizado para a aquisição dos dados foi o LabVIEW 8.5, com uma taxa de amostragem utilizada de 100 kHz para registro dos dados.

O registro das emissões foi realizado através de um Analisador de Gases, fabricado pela Alfatest, com incerteza de medição de $\pm 5\%$, figura 3.4. Este possui displays digitais, que possibilitam a visualização dos valores referentes às emissões de cada gás analisado (CO, CO₂ e HC), sendo feita a aquisição destes dados manualmente. Não se pode analisar as emissões de NO_x, pois os níveis alcançados estavam acima da faixa de operação do analisador de gases, que registra valores até 2000 PPM.



Figura 3.4 – Analisador de gases da AlfaTest.

Um diagrama esquemático do sistema de instrumentação utilizado para realização dos ensaios é mostrado na figura 3.5.

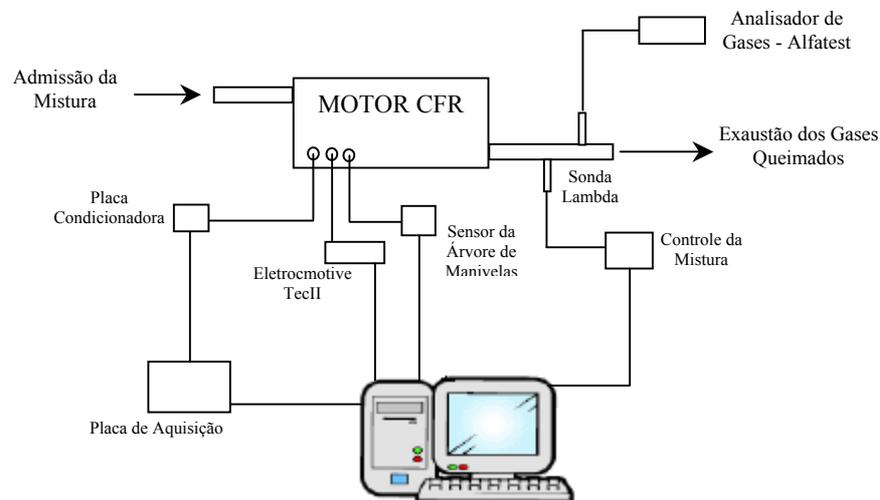


Figura 3.5 – Representação esquemática do experimento.

3.1.8 Combustíveis Utilizados

Para composição dos combustíveis foram adicionadas quantidades preestabelecidas de aguarrás em gasolina tipo C. Além da amostra de gasolina pura testada, foram criadas 4 amostras para ensaios com percentuais que variam de 20% até 50% de aguarrás, conforme a tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição das Amostras de Ensaios

Amostras:	Gasolina (%)	Aguarrás (%)
Amostra 1	100	0
Amostra 2	80	20
Amostra 3	70	30
Amostra 4	60	40
Amostra 5	50	50

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O tempo de queima na câmara de combustão é definido como o intervalo entre a ignição e o máximo da variação de pressão no interior da câmara de combustão. A velocidade de combustão é expressa como o inverso do tempo de queima do combustível, sendo este o parâmetro comparativo entre os diferentes combustíveis testados. Para cada amostra foram medidos os valores dos “tempos de queima”, através de 5 ensaios consecutivos, realizados após a completa estabilização das condições operacionais. Com a média dos tempos de queima das amostras foi possível comparar as mesmas quanto à velocidade de queima. É importante salientar, que este tempo não é o de queima total da carga no cilindro, pois na verdade o tempo de crescimento da pressão no cilindro é denominado de gradiente de pressão.

Na realização dos ensaios, utiliza-se como referência às condições especificadas pela norma ASTM D357. Para coleta dos dados, o motor foi aquecido até atingir a temperatura ideal de funcionamento, de aproximadamente 86°C para água de arrefecimento. A seguir, foram acertadas a taxa de compressão de 6,51:1 baseada na norma ASTM D357 para octanagem da gasolina tipo C que é de 87 octanas, sendo esta taxa fixa para todos os ensaios, e a condição de mistura ar/combustível estequiométrica ($\lambda=1$), sendo este parâmetro monitorado pelo sistema eletrônico colocado junto ao escape através de um sensor de oxigênio (lambda) de banda larga. Com todos os parâmetros estáveis, coletou-se os dados da variação de pressão dentro da câmara de combustão, posição da árvore de manivelas e o chaveamento do enrolamento primário da bobina de ignição (centelha), durante um intervalo de 5 segundos. Cada uma das 5 amostras foi testada por 5 vezes, gerando um total de 25 ensaios. Neste mesmo intervalo de tempo, eram coletados os dados manualmente das análises dos gases de descarga das amostras com relação à emissão de CO, CO₂ e HC.

A figura 3.6 apresenta os perfis característicos dos sinais relativos aos sensores de posição da árvore de manivelas, da variação de pressão e de ignição (centelha). Observa-se a interferência devido ao chaveamento da bobina que dá início a centelha na câmara de combustão, fato que não afeta a análise dos dados, e se repete por todas as amostras.

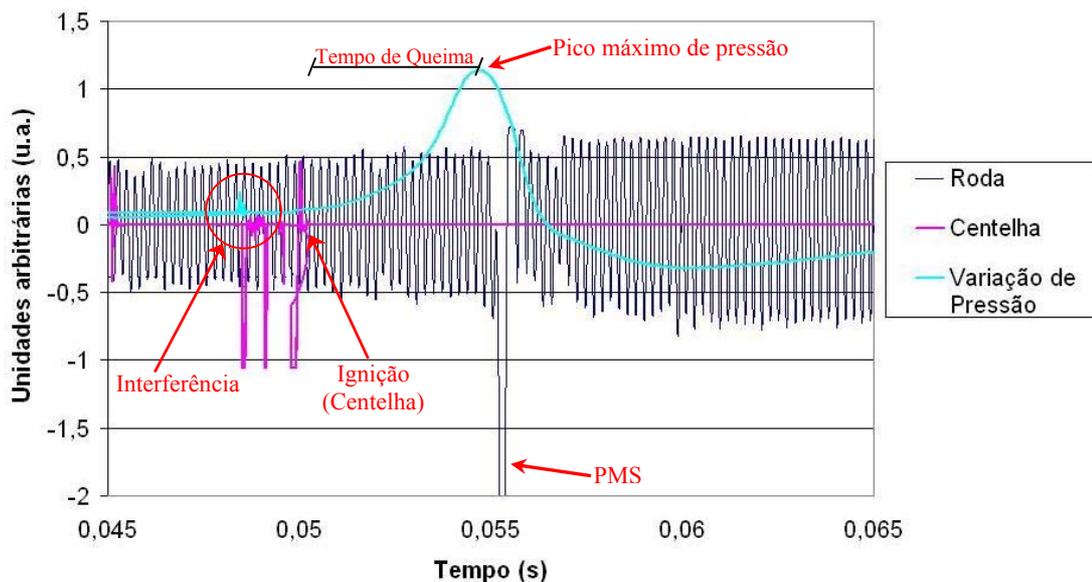


Figura 3.6 – Perfis característicos das curvas de variação de pressão, posição da árvore de manivelas e ignição (centelha).

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para cada uma das amostras analisadas, acompanhadas por suas respectivas curvas de pressão, ponto de ignição, posição da árvore de manivelas e emissões dos gases de descarga. Primeiramente foram analisados, para cada uma das amostras os parâmetros isoladamente, em seguida foram feitas comparações entre as amostras, através da curva média de cada amostra.

4.1. AMOSTRA 1 - GASOLINA TIPO C

Foram executados 5 ensaios com gasolina tipo C, as curvas de variação de pressão na câmara de combustão, o sinal da centelha e o sinal do sensor de posição da árvore de manivelas são apresentados na figura 4.1, onde se pode observar a sobreposição das curvas de pressão para os 5 ensaios realizados para amostra 1.

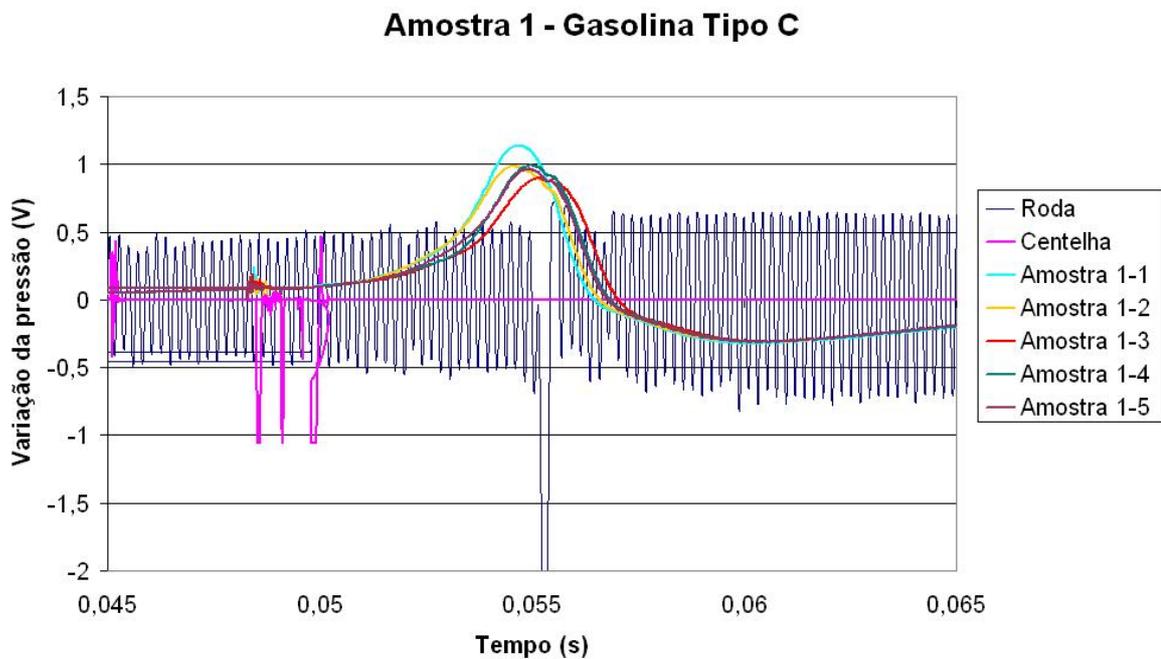


Figura 4.1 – Curvas de variação de pressão na câmara de combustão para Amostra 1.

Verifica-se que não há alteração significativa entre as curvas, o que representa uma combustão normal da amostra.

4.2. AMOSTRA 2 - GASOLINA COM 20% DE AGUARRÁS

Para adição de 20% de aguarrás a gasolina foram feitos 5 ensaios, a sobreposição das curvas de variação de pressão na câmara de combustão, o sinal da centelha e o sinal do sensor de posição da árvore de manivelas são apresentados na figura 4.2. Observa-se a presença de uma pequena variação com relação à posição do pico máximo de pressão na câmara de combustão e uma redução na amplitude das curvas, identificando uma queima da mistura não eficiente.

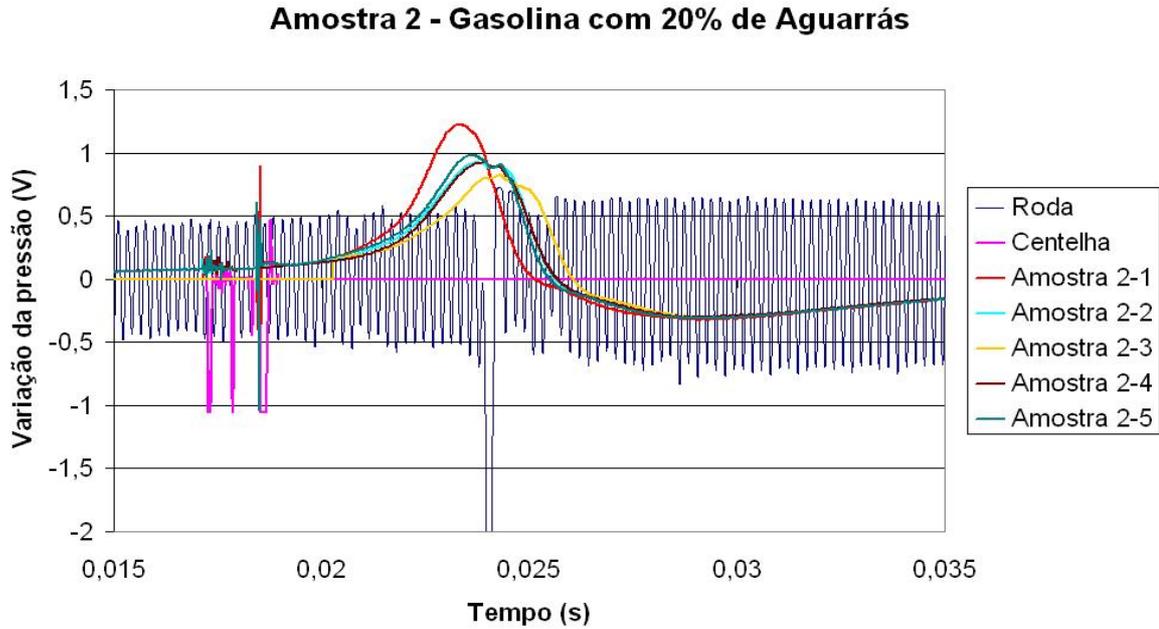


Figura 4.2 – Curvas de variação de pressão na câmara de combustão para Amostra 2.

4.3. AMOSTRA 3 - GASOLINA COM 30% DE AGUARRÁS

As curvas de variação de pressão na câmara de combustão, o sinal da centelha e o sinal do sensor de posição da árvore de manivelas são apresentados na figura 4.3, para adição de 30% de aguarrás em gasolina.

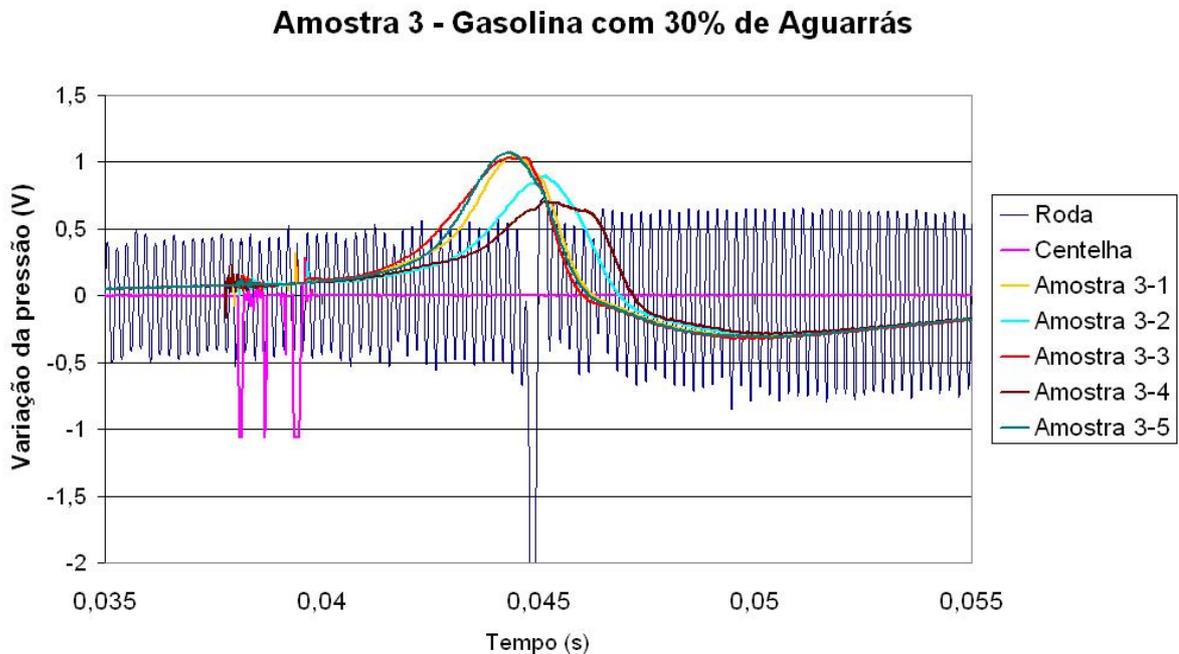


Figura 4.3 – Curvas de variação de pressão na câmara de combustão para Amostra 3.

Verifica-se a presença de possível combustão anormal, devido à variação nas amplitudes das curvas de pressão e a variação da posição dos picos de pressão, ocorrendo alguns picos de pressão após o PMS.

4.4. AMOSTRA 4 - GASOLINA COM 40% DE AGUARRÁS

Com adição de 40% de aguarrás a gasolina, observa-se através das curvas de variação de pressão na câmara de combustão, do sinal da centelha e do sinal do sensor de posição da árvore de manivelas para os 5 ensaios (figura 4.4), a presença de combustão anormal, devido à maior variação nas amplitudes das curvas de pressão e a variação da posição dos picos de pressão, ocorrendo alguns picos de pressão após o PMS.

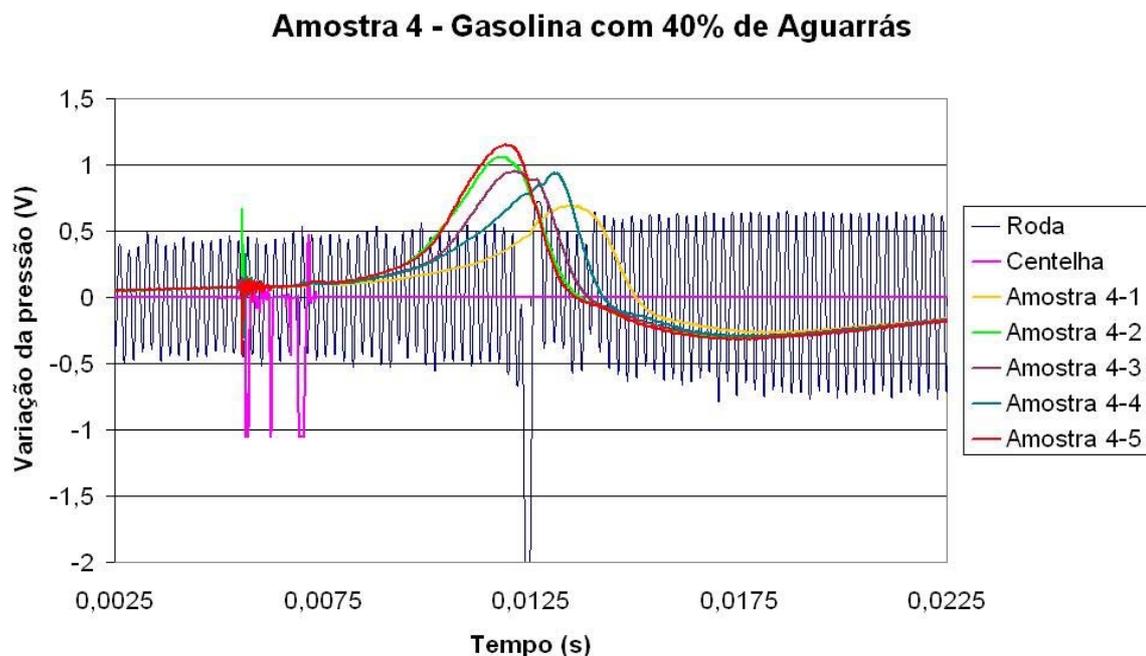


Figura 4.4 – Curvas de variação de pressão na câmara de combustão para Amostra 4.

4.5. AMOSTRA 5 - GASOLINA COM 50% DE AGUARRÁS

Executaram-se 5 ensaios com gasolina com adição de 50% de aguarrás, na figura 4.5 são apresentadas as curvas de variação de pressão na câmara de combustão, o sinal da centelha e o sinal do sensor de posição da árvore de manivelas. Após análise das curvas verifica-se uma maior evidência da presença de combustão anormal, devido à variação nas amplitudes das curvas de pressão e a variação da posição dos picos de pressão, ocorrendo todos os picos de pressão após do PMS, não sendo assim aproveitada toda a energia transferida pela queima do combustível, pois o êmbolo já se encontra em movimento de descida, não sofrendo total influência da variação de pressão na câmara de combustão.

Amostra 5 - Gasolina com 50% de Aguarrás

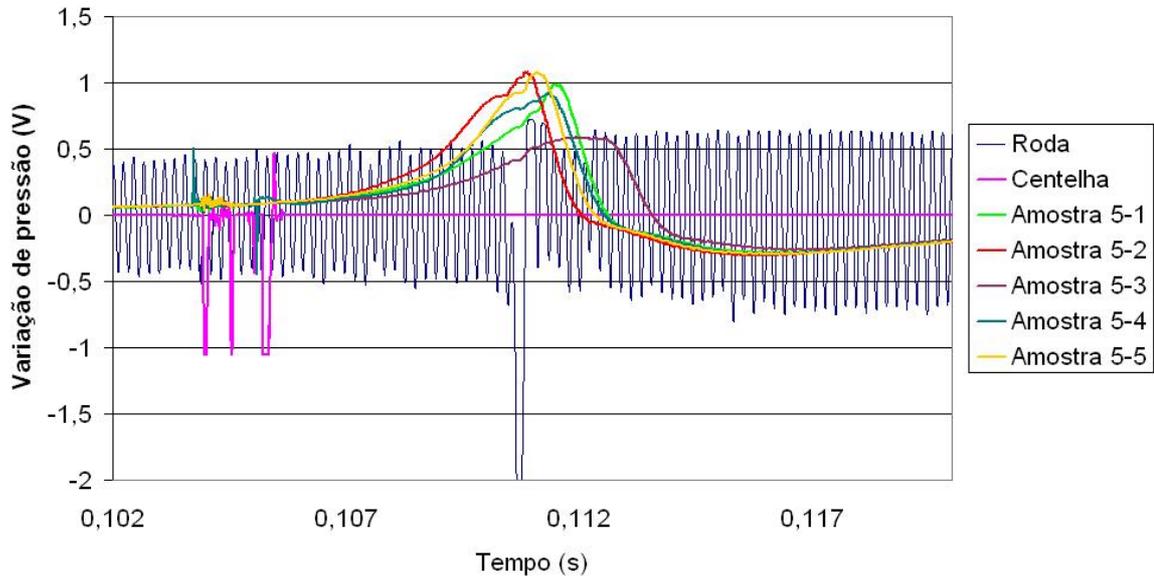


Figura 4.5 – Curvas de variação de pressão na câmara de combustão para Amostra 5.

4.6. COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE PRESSÃO ENTRE COMBUSTÍVEIS

Com a sobreposição das curvas de pressão dos ensaios realizados para cada uma das amostras, foi possível calcular a média e desenvolver uma curva de variação de pressão na câmara que representasse cada amostra, passando-se a seguir a análise comparativa das curvas de variação de pressão na câmara, mostrada na figura 4.6.

Com o uso destes dados, foi feita uma análise do tempo entre o fim da centelha e a máxima variação de pressão na câmara de combustão. Estes resultados são mostrados na Tabela 4.1.

Curvas de Variação de Pressão Média

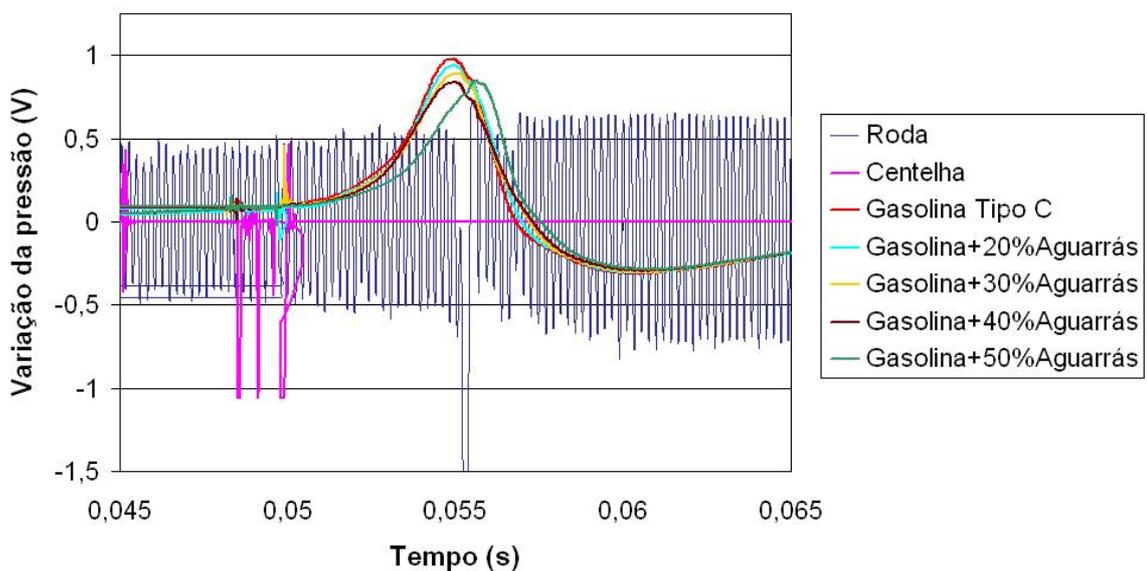


Figura 4.6 – Comparação das curvas de variação de pressão entre combustíveis.

Tabela 4.1 – Tempo de Queima e Velocidade de Combustão.

Amostras	Centelha (s)	Pico de Pressão (s)	Tempo de Queima (s)	Velocidade de Combustão (s ⁻¹)
Amostra 1	0,05004	0,05479	0,00475	210,53
Amostra 2	0,05004	0,05495	0,00491	203,67
Amostra 3	0,05004	0,05499	0,00495	202,02
Amostra 4	0,05004	0,05496	0,00492	203,25
Amostra 5	0,05004	0,05559	0,00555	180,18

Após a análise da velocidade de combustão, adquirida a partir do tempo de queima do combustível, pode-se verificar que com a adição de solvente à gasolina, se reduz a velocidade de combustão da mistura. Para porcentagens entre 20%, 30% e 40% de solvente, quando comparadas entre si, não apresentam variação significativa com relação à velocidade de combustão. A maior variação na velocidade é encontrada comparando-se as amostras 1 e 5, onde a velocidade de combustão chega a ser 15% menor.

4.7. ANÁLISE DOS GASES DA DESCARGA

Os resultados registrados dos gases da descarga estão apresentados na tabela 4.2. Fez-se curvas de emissões com as médias aritméticas das 3 medidas registradas para cada amostra, possibilitando assim a comparação entre as mesmas.

Tabela 4.2 – Análise dos Gases da Descarga.

Amostras / Gases	CO (%Vol.)			CO ₂ (%Vol.)			HC (PPM Vol.)		
Amostra 1	0,54	0,54	0,08	11,80	11,50	0,61	496	482,67	17,39
	0,62			11,90			489		
	0,47			10,80			463		
Amostra 2	0,43	0,44	0,10	10,20	10,10	0,10	369	371,33	2,08
	0,35			10,00			373		
	0,54			10,10			372		
Amostra 3	0,40	0,37	0,04	9,90	10,10	0,20	385	387,00	1,73
	0,33			10,10			388		
	0,38			10,30			388		
Amostra 4	0,30	0,31	0,05	10,10	10,10	0,00	525	494,67	28,29
	0,27			10,10			490		
	0,36			10,10			469		
Amostra 5	0,26	0,24	0,02	9,60	9,53	0,06	543	511,67	28,02
	0,23			9,50			503		
	0,22			9,50			489		
		Média	Desvio		Média	Desvio		Média	Desvio

MONÓXIDO DE CARBONO:

Na análise da emissão de monóxido de carbono com a variação da porcentagem de aguarrás (solvente) adicionado à gasolina, verifica-se uma redução do valor emitido à medida que se aumenta a porcentagem de solvente (figura 4.7), isto ocorre devido ao monóxido de carbono ser resultado direto do excesso de combustível na reação. A adição de solvente empobrece a mistura, comprovando-se assim a redução da emissão de monóxido de carbono.

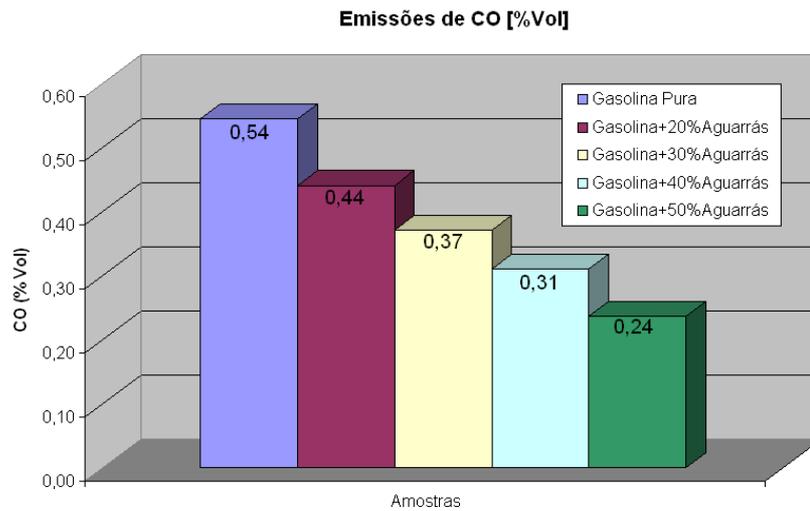


Figura 4.7 – Variação da emissão de monóxido de carbono em função do aumento de solvente a mistura.

DIÓXIDO DE CARBONO:

Com a variação da porcentagem de aguarrás (solvente) adicionado à gasolina, verifica-se uma redução do valor emitido de dióxido de carbono à medida que se aumenta a porcentagem de solvente (figura 4.8), porem não ocorre a variação da emissão, quando comparadas entre si, as amostras com 20%, 30% e 40% de solvente.

Um motor em condições normais de utilização comprova sua eficiência emitindo aproximadamente 12% CO₂ ou mais, logo se verifica que a eficiência de combustão das amostras diminui com a adição de solvente à mistura.

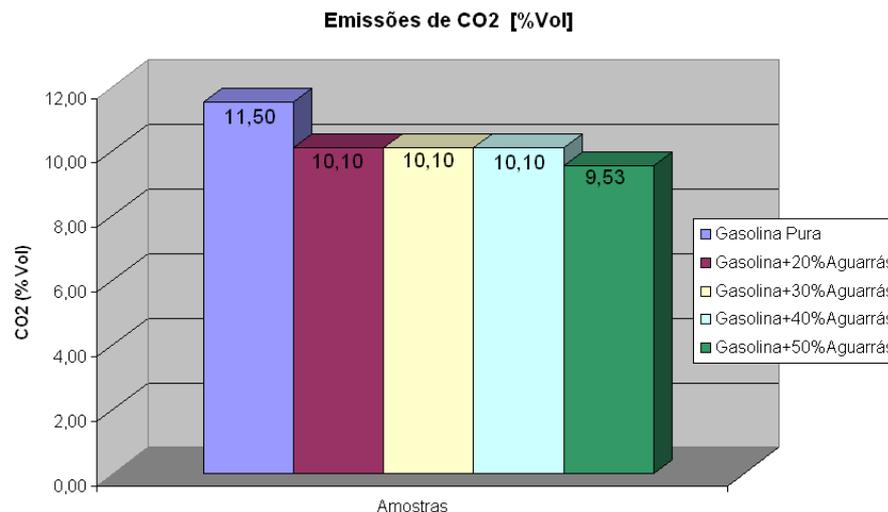


Figura 4.8 – Variação da emissão de dióxido de carbono em função do aumento de solvente a mistura.

HIDROCARBONETOS:

Analisando a emissão de hidrocarbonetos com a variação da porcentagem de aguarrás (solvente) adicionada à gasolina (figura 4.9), tem-se uma redução do valor emitido quando se

adiciona 20% de solvente, porém verifica-se o aumento no valor das emissões à medida que se adiciona porcentagem maior de solvente a mistura.

Os hidrocarbonetos são resultados de uma combustão incompleta, a porcentagem destes nos gases de descarga pode também estimar a eficiência da combustão, logo quanto menores os valores de HC, mais completa é a combustão, na análise das amostras verifica-se que com porcentagens de 20% e 30% de solvente tem-se uma combustão mais completa que nas outras amostras, incluindo a gasolina tipo C, para uma identificação do motivo desta melhora, seria necessária uma análise química da mistura para identificar o porquê da diminuição de emissões de Hidrocarbonetos.

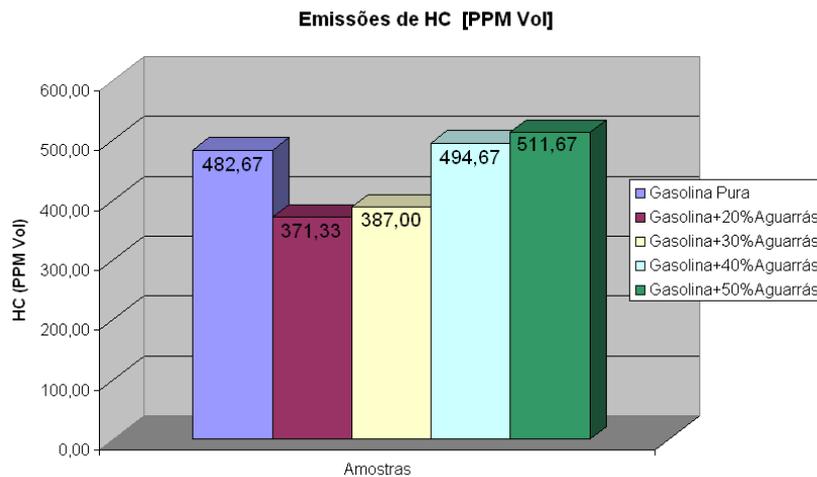


Figura 4.9 – Variação da emissão de hidrocarbonetos em função do aumento de solvente a mistura.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

A propagação da chama na câmara de combustão é dependente principalmente da pressão, temperatura e mistura de combustíveis utilizados. Com a adição de solvente à mistura a ser queimada na câmara, verifica-se a ocorrência de combustão anormal, nas amostras com percentual superior a 30% de solvente, evidenciada pelas variações da amplitude da pressão e posição do pico de pressão na câmara de combustão. Para as condições testadas, a velocidade de combustão foi alterada significativamente somente pela amostra de gasolina com 50% de solvente, tendo uma redução média de 15% em relação à amostra de gasolina tipo C sem solvente.

Com os resultados obtidos através da análise dos gases da descarga, conclui-se que com o aumento da porcentagem de solvente a gasolina, torna-se menos eficiente a combustão, caracterizada pela maior emissão de HC e emissão de CO₂ inferior a 12%. Entretanto ocorre uma redução significativa na emissão de CO, o que seria ideal ao ambiente.

Com isso, pode-se afirmar que quando se utiliza combustíveis adulterados com baixa porcentagem de solvente, tem-se pouca variação nos parâmetros da combustão e conseqüentemente poucos danos momentâneos, como por exemplo, perda de potência, maior emissão de gases poluentes entre outros fatores. No entanto, porcentagens acima de 30% de solvente, poderiam acarretar problemas relacionados à perfeita combustão da mistura na câmara. Mas os maiores danos, na utilização de combustíveis adulterados, conforme literaturas consultadas, viriam a longo prazo com a deterioração de dutos e mangueiras de borrachas, corrosão de peças metálicas e componentes, queima de bombas e eletroinjetores, além de alto nível de impurezas depositadas sobre as válvulas de admissão do motor.

Uma sugestão para trabalhos futuros seria testar as mesmas amostras em motor convencional automotivo, buscando uma análise da variação da potência, torque e rotações associadas ao consumo de combustível. Pode-se também alterar a taxa de compressão e o avanço de ignição, buscando uma maior eficiência na utilização da mistura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. “**Portaria N° 309 - Estabelece as especificações para a comercialização de gasolinas automotivas em todo o território nacional e define obrigações dos agentes econômicos sobre o controle de qualidade do produto**”. Diário Oficial da União, Brasília, 28/12/2001.

ASTM, “**ASTM Manual for Rating Motor Fuels by Motor and Research Methods American Society for Testing and Materials**”. Standard test Method, 5º edição, 1964.

ANDRADE, G. S. “**Avaliação Experimental da Duração de Combustão para Diferentes Combustíveis, em um Motor Padrão Ciclo Otto ASTM-CFR**”. Dissertação de mestrado, PROMEC / UFRGS, Porto Alegre, 2007.

EDITORA TRÊS. “**Nova Enciclopédia do Automóvel**”. São Paulo, 1998.

GAUDIOSO, J. C. S. “**Estudo do Comportamento de um Motor Endotérmico Usando Álcool, Gasolina e Gás Natural Veicular**”. UFRGS, Porto Alegre, 2008.

GIACOSA, D. “**Motores Endotérmicos**”. Editorial Científico-Médica, 3º edição, Barcelona, 1967.

OFICINA E CIA. **Ciclos Motor Quatro Tempos**. Disponível em: <<http://www.oficinaecia.com.br/bibliadocarro>> Acesso em 15 de Outubro de 2008.

PASQUOTTO, L. G. “**Estudo do comportamento de um motor endotérmico de ciclo Otto utilizando Álcool Hidratado, Gasolina Comum e Gasolina de Alta Octanagem**”. UFRGS, Porto Alegre, 2008.

TAKESHITA, E. V. “**Adulteração de Gasolina por Adição de Solventes: Análise dos Parâmetros Físico-Químicos**” Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis, 2006.

VAN WYLEN, G. J. e SONNTAG, R. E. “**Fundamentos da Termodinâmica Clássica**”, 3º edição – Editora Edgard Blücher – São Paulo, 1993.

WILDNER, F. D. “**Estudo Experimental do Ponto de Ignição e da Variação de Pressão para Diferentes Combustíveis**”. UFRGS, Porto Alegre, 2003.

WILDNER, F. D. “**Estudo Experimental da Variação de Velocidade de Combustão para Diferentes Combustíveis, Relações de Mistura e Relações de Compressão em um Motor ASTM-CFR**”. Dissertação de mestrado, PROMEC / UFRGS, Porto Alegre, 2006.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

HEYWOOD, J. B. “**Internal Combustion Engine Fundamentals**”. McGraw-Hill, USA, 1988.

SANTOS, M. J. & IRIGOYEN, E. R. C. “**Metrologia Dimensional: Teoria e Prática**”. Ed. Universidade / UFRGS, Porto Alegre, 1995.

TAYLOR, C. F. AND TAYLOR, E. S. “**The Internal-Combustion Engine**”, Second Edition, Editora Edgard Blucher Ltda, 1962.

VILANOVA, L. C. “**Efeitos da adição do etanol hidratado no combustível e do sistema de formação da mistura no desempenho e nas emissões de um motor bicombustível brasileiro**”. Tese de doutorado, PROMEC / UFRGS, Porto Alegre, 2007.

APÊNDICE

ANÁLISE DE ERROS

O erro de medição é o efeito composto de todas as fontes de erro. Podem ser erros sistemáticos ou aleatórios. Os erros sistemáticos são aqueles que podem ser identificados e conseqüentemente eliminados, podendo ser erros de instrumentação, paralaxe, efeitos do ambiente, etc. Os erros aleatórios ou residuais são conseqüências das flutuações de um determinado valor em relação à média, não podendo ser identificado, nem eliminado.

Para cada combustível foram realizados ensaios durante intervalos pequenos de tempo para que não fosse necessária a correção da pressão em relação às condições atmosféricas. Cabe ressaltar também que a pressão foi medida em uma faixa comparativa, minimizando a incerteza da medição, conforme descrito por Santos (1995). Alguns fatores ambientais, tais como: temperatura, pressão atmosférica, umidade que influenciam a pressão dentro da câmara de combustão do motor podem, contudo, ser considerados estáveis para intervalos pequenos de tempo.

Na prática o que se faz é determinar o erro aparente, ou seja, a diferença entre o valor objetivo na medida e o valor mais provável da grandeza física considerada, pois uma grandeza física experimental deve ser determinada a partir da medição, e o resultado é sempre uma aproximação para o valor verdadeiro da grandeza. Na tentativa de reduzir os erros aleatórios associados às medidas realizadas utiliza-se:

$$\text{a) Média aritmética: } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

$$\text{b) Variância experimental: } S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}$$

$$\text{c) Desvio padrão experimental: } S = \sqrt{S^2}$$

$$\text{d) Incerteza da medição (Distribuição de Student): } IM = t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}}$$