

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO EXPERIMENTAL DO PONTO DE IGNIÇÃO E DA VARIAÇÃO DE PRESSÃO  
PARA DIFERENTES COMBUSTÍVEIS

**Fabiano Disconzi Wildner**

Orientador: Prof. Pedro Barbosa Mello

Área de Concentração: Ciências Térmicas

RESUMO:

Este trabalho apresenta um estudo sobre os efeitos da variação do ponto de ignição sobre a curva de pressão dentro da câmara de combustão de um motor para testes de combustíveis padrão ASTM CFR (Cooperative Fuel Research) ciclo Otto para diversos combustíveis. Utilizou-se para padronização do ensaio as condições especificadas pela norma ASTM D357, com exceção do controle de umidade do ar e da temperatura da mistura ar/combustível, para determinação do número de octanas de combustíveis com valor igual ou inferior a 100 octanas pelo método *Motor*.

Obteve-se uma curva padrão, com base no índice de detonação estabelecido pela norma acima citada e três outras variando-se apenas o ponto de ignição para 10°, 20° e 30° antes do ponto morto superior. As curvas obtidas são confrontadas tanto com a curva padrão do próprio combustível quanto as dos demais com relação a eficiência mecânica.

ABSTRACT

Experimental research on ignition point and pressure changes to different kind of fuel. This paper is regarding the effects of the ignition point changes, concerning a pressure curve obtained inside a combustion chamber, on a standard fuel engine, ASTM CFR (Cooperative Fuel Research) Otto cycle, making use of ten different kind of fuel .Eight different kinds of fuel were tested, eight liquid with octane MON ranging from 77 to 100, and a gas with octane ROM of 113.

A standard curve could be get based on the detonation point settled by the norm, changing the ignition point to 10°, 20° and 30° before the dead upper point. The curves may be compared with the standard and one by one, reflecting the engine mechanical efficiency.

## PALAVRAS CHAVE:

Curva de pressão, ponto de ignição, detonação, CFR, taxa de compressão.

## SUMÁRIO:

1- INTRODUÇÃO.....	3
2- MOTORES CICLO OTTO QUATRO TEMPOS.....	3
2.1- TAXA DE COMPRESSÃO .....	3
2.2- COMBUSTÃO ESTEQUIOMÉTRICA .....	4
2.3- EFEITOS DA RAZÃO DE MISTURA AR/COMBUSTÍVEL .....	4
2.4- CURVA DE PRESSÃO, VELOCIDADE DE QUEIMA E PONTO DE IGNIÇÃO .....	7
3- COMBUSTÃO ANORMAL.....	8
3.1- DETONAÇÃO.....	8
3.2- PRÉ IGNIÇÃO:.....	8
4- DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A DETONAÇÃO DE UM COMBUSTÍVEL.....	9
4.1- OCTANAGEM E NÚMERO DE METANO DO GÁS NATURAL .....	10
5- CARACTERÍSTICAS DOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS.....	10
5.1- GÁS NATURAL VEICULAR – GNV E ISOCTANO .....	11
5.2- PENTENO E XILENO.....	12
5.3- ETANOL.....	12
5.4- GASOLINA.....	12
6- EXPERIMENTO E APARATO EXPERIMENTAL .....	12
6.1- ANÁLISE DE ERROS .....	15
6.2- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	15
7- RESULTADOS.....	17
7.1- PENTENO.....	17
7.2- GASOLINA .....	18
7.3- MTBE.....	18
7.4- XILENO.....	19
7.5- ETANOL.....	19
7.6- GASOLINA PODIUM .....	20
7.7- ISOCTANO.....	20
7.8- GÁS NATURAL VEICULAR .....	21
7.9- COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS PADRÃO .....	22
7.10- COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE PRESSÃO ENTRE COMBUSTÍVEIS .....	22
8- CONCLUSÕES.....	24
9- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25

## 1- INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo o estudo da variação da pressão dentro da câmara de combustão com a variação do ponto de ignição através de duas etapas distintas em métodos experimentais e técnicas numéricas.

Numa primeira etapa é feita a aquisição de dados de pressão, para um computador, de um motor CFR operando em ciclo Otto. Este motor tem características especiais que permitem variar a taxa de compressão. Tendo a combustão monitorada durante todo o processo, este procedimento é executado para diversos tipos de combustíveis.

A segunda etapa consiste no processamento numérico dos dados experimentais obtidos, onde são traçadas as curvas de interesse, com determinação de pontos de máximos e médias, para finalmente então compará-las com as curvas de pressão padrão obtidas com base na norma ASTM-D357, encontradas na literatura.

## 2- MOTORES CICLO OTTO QUATRO TEMPOS

O funcionamento de um motor de combustão de quatro tempos passa por quatro fases do fluido de trabalho. Na primeira, denominada como fase **1- aspiração ou admissão**, o êmbolo se desloca para baixo dentro do cilindro, com a válvula de admissão aberta e a válvula de escape fechada, aspirando a mistura ar/combustível. Essa mistura forma-se no interior do carburador e é aspirada devido ao vácuo que o êmbolo cria ao descer. Em seguida tem lugar a fase **2- compressão**, na qual o êmbolo se eleva enquanto as válvulas se mantêm fechadas aumentando a pressão interna da câmara. Esta fase é seguida pela fase **3- combustão e expansão**; quando estando a mistura em sua pressão e temperatura máximas, a vela faz saltar a centelha que provoca a ignição da mistura, estando as válvulas ainda fechadas. Por último, na fase **4- descarga**, mantêm-se fechadas as válvulas de admissão e abrem-se a válvula de descarga, a fim de permitir a eliminação dos resíduos da combustão.

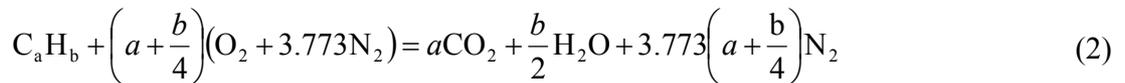
### 2.1- RELAÇÃO VOLUMÉTRICA DE COMPRESSÃO

Taxa de compressão: é o quociente existente entre os valores máximo e o mínimo do volume contido no cilindro, ou seja:

$$r_c = \frac{V_{cilindro} + V_{câmara}}{V_{câmara}} \quad (1)$$

## 2.2- COMBUSTÃO NA CONDIÇÃO ESTEQUIOMÉTRICA

As relações de combustão são chamadas, quando balanceadas quimicamente, de combustão estequiométrica e dependem da conservação de massa de cada elemento químico dos reagentes, da composição relativa do elemento combustível e da proporção necessária entre o combustível e o ar. Se o oxigênio disponível for suficiente, o combustível hidrocarboneto pode ser completamente oxidado. Neste caso, o carbono existente no combustível é convertido em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); e o hidrogênio em água (H<sub>2</sub>O). Em geral, a combustão em motores realiza-se a partir do ar atmosférico que apresenta, para cada mol de oxigênio, 3.773 mol de nitrogênio atmosférico. Dessa forma, o processo de combustão completo de um hidrocarboneto de composição molecular C<sub>a</sub>H<sub>b</sub> com o ar, é dado pela equação 2:



A equação citada em Heywood (1988) acima, define a proporção estequiométrica entre o ar e o combustível, ou seja, a quantidade suficiente de oxigênio para converter todo o combustível em produto completamente oxidado. Considerando os pesos moleculares do oxigênio, nitrogênio atmosférico, carbono atômico e hidrogênio como 31.998, 28.16, 12.011 e 1.008 respectivamente, pode-se reescrever a equação (2) para a obtenção da relação ar/combustível, equação (3), dependendo somente da composição do hidrocarboneto CH<sub>y</sub>, onde  $y=b/a$ .

$$\left(\frac{A}{C}\right)_s = \frac{\text{massa de ar}}{\text{massa de combustível}} = \frac{(1 + y/4) \times (32 + 3.773 \times 28.16)}{12.011 + 1.008y} = \frac{34.56(4 + y)}{12.011 + 1.008y} \quad (3)$$

onde  $A$  é a massa de ar,  $C$  é a massa de combustível,  $s$  representa a condição estequiométrica e  $y$  é a relação entre o número de carbono e hidrogênio do combustível ( $y=b/a$ ).

A mistura ar/combustível, quando está com excesso de combustível, é chamada de mistura rica e caracteriza-se por apresentar, além do CO<sub>2</sub> e do H<sub>2</sub>O, outros produtos, tais como CO e H<sub>2</sub>. Por outro lado, quando há excesso de ar é chamada de mistura pobre.

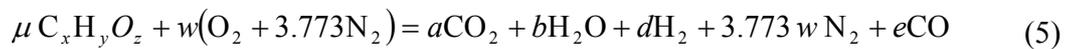
A variável  $\lambda$  representa a relação ar/combustível utilizada (instantânea) com a relação ar/combustível estequiométrica. Os valores de  $\lambda$  podem ser obtidos pela equação (4) e variam conforme descritos na tabela (1). Utiliza-se também o  $\phi$ , que representa o inverso de  $\lambda$ .

$$\lambda = \phi^{-1} = \frac{(A/C)_{real}}{(A/C)_s} \quad (4)$$

Tabela (1). Condições de  $\lambda$  e de  $\phi$  para mistura pobre, rica e estequiométrica.

Mistura	$\lambda$	$\phi$
rica	<1	>1
pobre	>1	<1
estequiométrica	=1	=1

Quando o combustível contém oxigênio, é necessário incluí-lo no balanço entre os reagentes e os produtos, resultando na equação (5):



onde  $\mu$  é o excesso de combustível em relação à quantidade necessária na combustão estequiométrica e  $w, a, b, c, d, e$  são os coeficientes para o balanço químico.

### 2.3- Efeitos da razão de mistura ar/combustível

Um motor ciclo Otto a gasolina pode operar em razões de mistura ar/combustível na faixa de 8:1 a 20:1, ou seja, em toda a faixa que varia entre uma mistura pobre à rica, passando pelo ponto estequiométrico. A relação existente entre a potência e o consumo específico de combustível pode ser medida variando as razões da mistura ar/combustível, com a borboleta totalmente aberta e a rotação constante. Os resultados podem ser apresentados na forma de *Curva de Hook* (fig. 1), que mostra a relação entre o consumo específico (*bsfc*) e a pressão média efetiva (*bmep*), (Plint & Martyr, 1997).

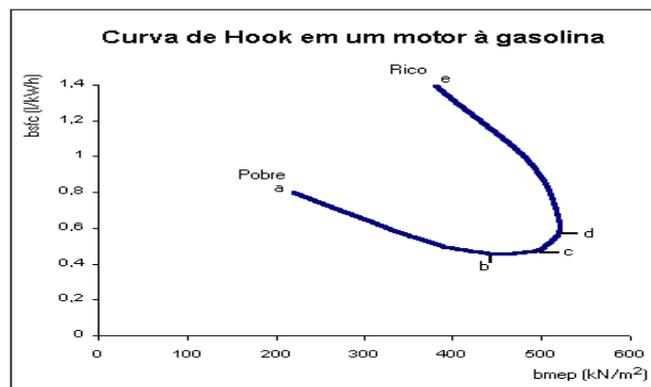


Figura (1). Curva de Hook, consumo em um motor ciclo Otto, conforme Plint & Martyr (1997)

Onde:

- O ponto *a* corresponde à mistura pobre, na qual o motor está operando. Nesse ponto, a potência é bastante reduzida, e o consumo específico pode chegar a duas vezes mais do que o consumo específico de melhor eficiência;
- O ponto *b* corresponde ao melhor desempenho do motor (maior eficiência térmica);
- O ponto *c* corresponde à razão estequiométrica da mistura;
- O ponto *d* corresponde à máxima potência, mas o consumo específico é cerca de 10% maior do que o consumo específico do ponto de máxima eficiência térmica (ponto *b*);
- O ponto *e* corresponde ao máximo valor de mistura rica em que o motor pode operar.

Cabe ainda ressaltar algumas características importantes relacionadas à razão ar/combustível, tais como:

- Para misturas ricas a partir da zona de máxima potência em direção à mistura estequiométrica, tem-se uma combustão rápida e de chama azul, que cessa rapidamente no ciclo de expansão.
- Tornando a mistura mais pobre ainda, esta se propagará durante o ciclo de expansão, ocasionando retorno de explosões no coletor de admissão; por outro lado, tornando a mistura mais rica que a de máxima potência, ocorrerá formação de chama amarela devido a partículas incandescentes de carbono que se propagam até a abertura da válvula de escape, podendo ocasionar explosões no sistema de exaustão.

A figura (2) mostra como o calor específico da mistura queimada à pressão constante ( $C_{p,b}$ ) varia em relação à composição da mistura não queimada ( $\phi$ ) para as temperaturas de 1750K, 2250K e 2750K a 30 atm. Verifica-se nesta figura que o máximo valor do calor específico à pressão constante ocorre próximo da região estequiométrica ( $\phi=1$ ), onde se tem a máxima energia térmica disponibilizada. Estas curvas foram calculadas a partir das funções polinomiais com seus respectivos coeficientes conforme descrito por Heywood (1988).

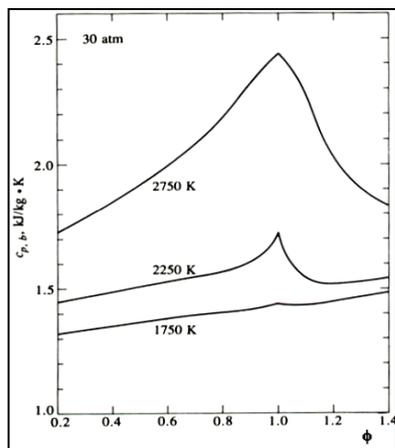


Figura (2). Calor específico à pressão constante de gases queimados em equilíbrio em função da composição da mistura combustível/ar ( $\phi$ ) para as temperaturas de 1750, 2250 e 2750 a 30 atm. Combustível isooctano, conforme (Heywood, 1988).

## 2.4- CURVA DE PRESSÃO, VELOCIDADE DE QUEIMA E PONTO DE IGNIÇÃO

Em um motor de ignição por centelha convencional, o combustível e o ar são misturados no sistema de admissão através da válvula de entrada do cilindro, onde é misturada com o gás residual e então comprimidas. Sob circunstâncias de operação normais, a combustão é iniciada durante o curso de compressão por uma descarga elétrica na vela. Depois da inflamação, torna-se uma chama turbulenta, propagando-se através da mistura ar/combustível, até que alcance as paredes da câmara de combustão, e então extinguindo-se.

Há um período durante a liberação da energia da chama que esta torna-se demasiadamente pequena para ser observada a ascensão da pressão devido à combustão. Enquanto a chama continua a crescer e propagar-se através da câmara de combustão, a pressão então eleva-se acima do valor que teria na ausência da combustão. A pressão alcança o seu valor máximo DPMS (Depois do Ponto Morto Superior) mas antes que a carga do cilindro esteja inteiramente queimada, e então diminui enquanto o volume do cilindro continua a aumentar durante o restante do curso da expansão.

O desenvolvimento da chama e a propagação variam de ciclo para ciclo, desde a forma da onda de pressão, a fração do volume queimado, e as frações mássicas queimadas para cada ciclo, diferem significativamente, porque o crescimento da chama depende do movimento e da composição locais da mistura. Estas quantidades variam em ciclos sucessivos em todo o cilindro e podem variar de cilindro para cilindro. São especialmente significativos o movimento e a composição da mistura na vizinhança da vela de ignição no momento da faísca, pois esta gera o desenvolvimento da chama. As variações de ciclo para ciclo e de cilindro para cilindro na combustão são importantes porque os ciclos extremos limitam o regime de operação do motor.

O processo de combustão pode ser dividido em quatro fases distintas: **1-** ignição da faísca; **2-** desenvolvimento da chama; **3-** propagação da chama; e **4-** término da chama. O evento da combustão deve ocorrer em um ponto que forneça a potência máxima ou o torque máximo. A duração combinada do processo de desenvolvimento e da propagação da chama é tipicamente entre os 30 e 90 graus do eixo de manivelas. A combustão começa 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 APMS (Antes do Ponto Morto Superior), a transferência do trabalho do curso da compressão, que é a do pistão aos gases do cilindro, aumenta. Se o fim do processo da combustão for atrasado, retardando-se progressivamente a faísca, 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 pistão. A faísca 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.

Descreve-se a combustão normal como aquela em que a frente de chama move-se através da câmara de combustão até que a mistura ar/combustível esteja consumida inteiramente. Entretanto diversos fatores como composição do combustível, projeto e parâmetros de operação do motor, e depósitos na câmara de combustão, impedem que o processo normal de combustão ocorra.

### **3- COMBUSTÃO ANORMAL**

Existem várias possibilidades de ocorrer uma combustão anormal em um motor de combustão interna, dentre as quais cabe destacar a detonação e a pré-ignição. Esses fenômenos, além de causarem vibrações e ruídos, podem diminuir substancialmente a vida útil de um motor. 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.

#### **3.1- DETONAÇÃO**

É o nome dado ao ruído que é transmitido através da estrutura do motor quando ocorre uma ignição espontânea de uma parte do gás-final, na extremidade oposta à frente de chama. Entende-se o gás-final como aquela parte da mistura que ainda não foi consumida pela reação normal da frente de chama. Quando ocorre uma combustão anormal deste tipo, há o fornecimento extremamente rápido de uma grande quantidade de energia química contida no gás-final, causando pressões locais muito elevadas e a propagação de ondas de pressão de amplitude substancial através da câmara de combustão (Maltz, 1995; Taylor, 1976).

#### **3.2- PRÉ IGNIÇÃO:**

É a ignição da mistura de ar-combustível por um ponto quente nas paredes da câmara de combustão como, por exemplo, uma vela de ignição superaquecida, por depósitos incandescentes dentro da câmara de combustão ou por qualquer outro meio que não seja a faísca normal da ignição (Maltz, 1995).

#### 4-.DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A DETONAÇÃO DE UM COMBUSTÍVEL.

Os combustíveis são misturas de um grande número de compostos de hidrocarbonetos, provenientes de todas as classes, e que geram diferentes índices de resistência anti-detonante para cada mistura de combustível. Esta propriedade é definida pelo número de octanas do combustível, e é determinante de quando irá ou não haver a detonação em determinado motor, sob determinadas condições. Quanto maior o número de octanas, maior a resistência à detonação.

A escala do número de octanas é baseada em dois hidrocarbonetos que definem as extremidades da escala. Por definição o normal heptano (n-  $C_7H_{16}$ ) tem o valor zero e o iso-octano ( $C_8H_{18}$  : 2,2,4 – trimetilpentano) tem um número de octanos de 100. Estes hidrocarbonetos foram escolhidos por causa de sua grande diferença na habilidade de resistir à detonação, O iso-octano tem a maior resistência à detonação de todos os combustíveis disponíveis na época em que foi feita a escala (Maltz,1995). Misturas destes dois hidrocarbonetos definem a resistência à detonação em números de octanas intermediários, onde o número de octanas será a proporção de mistura existente entre o iso-octano e o heptano. O número de octanas é proporcional à resistência anti-detonante do combustível.

Os principais métodos para medição de octanagem são: o método *motor* e o método *research*, ambos feitos em motores monocilíndricos standardizados e conhecidos como CFR (Cooperative Fuel Research). Nestes motores, a taxa de compressão é variável, permitindo ajustes para geração da detonação, esta sobre controle e monitoramento. Este motor queima a mistura sob análise e também misturas padrões conhecidas, compostas de uma mistura de n-heptano e iso-octano em níveis de detonação standardizados e monitorados por um sensor eletrodinâmico. Isto permite, por interpolação, calcular-se o número de octanas da amostra. O método *motor* é mais severo, conforme expresso na tabela de comparação dos métodos abaixo (Tabela 2).

Tabela 2- Condições de operação para os métodos *Research* e *Motor*

	RON ( <i>Research</i> )	MON ( <i>Motor</i> )
Temperatura do ar	52°C	149°C
Pressão do ar de admissão	Atmosférica	Atmosférica
Umidade		0,0036 – 0,0072 kg/kg de ar seco
Temperatura do líquido de arrefecimento		100°C

Rotação do motor	600 RPM	900 RPM
Avanço da faísca	13° APMS	19 – 26° APMS (varia em função da taxa de compressão)
Razão ar/combustível		Ajustada para a máxima detonação

O método *motor* é realizado em condições mais severas, pois com o aumento da temperatura aumentam-se as chances de detonação, fazendo com que o MON (Motor Octane Number) de um combustível seja geralmente menor que seu RON (Research Octane Number). A diferença entre estes dois é denominada de sensibilidade do combustível.

#### 4.1- OCTANAGEM E NÚMERO DE METANO DO GÁS NATURAL

A medição de octanagem do gás natural veicular (GNV) é complicada devido ao seu elevado valor, fazendo com que fosse desenvolvido um método de medição chamado de *Número de Metano* (NM).

Resume-se basicamente a encontrar em um motor padrão, uma composição de metano (atribuindo valor 100) e hidrogênio (atribuindo valor 0) que tenha comportamento similar a amostra. O percentual de metano da referência passa a ser o *Número de Metano*.

Existe uma correlação (6) desenvolvida entre MON e NM (Dalávia, 1999) onde:

$$\text{MON} = 0,679 \times \text{NM} + 72,32 \quad (6)$$

Ex: Para uma composição de GNV contendo 98% metano, substituindo na fórmula  
 $\text{MON} = 0,679 \times 98 + 72,32 = 139$  octanas

#### 5- CARACTERÍSTICAS DOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS

A principal matéria-prima para produção de combustíveis líquidos e gasosos é o petróleo, composto por diversos hidrocarbonetos. A proporção de matéria hidrocarbonada varia de 50% a 98%, embora isso não implique em uma mudança fundamental nas propriedades do petróleo cru. Quimicamente esses hidrocarbonetos estão presentes no petróleo em famílias de parafinas, naftenos e compostos aromáticos (cíclicos). A diferente proporção de cada um deles condiciona o refino, operação pela qual se extraem os combustíveis, sejam gasosos, como o propano e o butano; sólidos, como as parafinas; ou líquidos, como o querosene, as gasolinas automotivas, o óleo diesel e o óleo combustível.

A maioria dos combustíveis hidrocarbonados, líquidos e gasosos, é uma mistura de diversos hidrocarbonetos. A gasolina, por exemplo, é constituída por cerca de 40 hidrocarbonetos principais com a presença de muitos outros em quantidades mínimas (Van Wylen e Sonntag, 1993).

A Tabela 3 nos mostra as principais características dos combustíveis utilizados para os ensaios deste trabalho.

Tabela 3- Características dos combustíveis utilizados

Combustível	Fórmula Reduzida	1.1 A/F	Pci [MJ/l <sub>comb</sub> ]	Pci [MJ/l <sub>ar</sub> ]	$\lambda_{má}$ x pot	$\Delta H_{vap}$ [kJ/kg]	RO N	1.2 MO N	CO <sub>2</sub> Máx
GNV	CH <sub>3,76</sub>	16,96	0.0341	0.00329	1	-	>100	>100	9,8%
2 GASOLÍ- PÓ- DIUM	CH <sub>1,86</sub>	14,56	31.71	0.00377	0.89	377	98	92	13,4%
Xileno	CH <sub>1,25</sub>	13,64	35.73	0.00382	-	423	103	93	15,2%
Tolueno	CH <sub>1,143</sub>	13,47	35.18	0.00390	0.88	416	103	93	15,5%
Gasool-22	CH <sub>2,05</sub> O <sub>0,07</sub>	13,42	29.41	0.00376	0.87	349	86	82	13,1%
MTBE	CH <sub>2,4</sub> O <sub>0,2</sub>	11,74	26.08	0.00383	0.86	338	113	93	12,7%
Etanol	CH <sub>3</sub> O <sub>0,5</sub>	8.99	21.28	0.00385	0.85	937	115	95	12,2%
1-Penteno	CH <sub>2</sub>	17,76					91	77	13,0%

### 5.1- GÁS NATURAL VEICULAR – GNV E ISOCTANO

O gás natural veicular é formado principalmente de compostos pertence a família das parafinas normais (metano CH<sub>4</sub>, etano C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, propano C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> e butano C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) onde os átomos de carbono estão interligados em seqüência, com átomos de hidrogênio preenchendo as ligações vazias, sendo a fórmula geral para esta cadeia expressa por C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>.

O isooctano pertence a família das isoparafinas, ou cadeias ramificadas. Nestes compostos, a cadeia de átomos de carbono é ramificada, sendo a fórmula geral para esta cadeia expressa por  $C_nH_{2n+2}$ .

A resistência a detonação dos combustíveis parafínicos aumenta com:

- Redução do tamanho da sua cadeia carbônica;
- Compactação dos átomos de carbono pela incorporação de cadeias laterais (diminuindo o comprimento da cadeia principal);
- Adição de grupos de metil ( $CH_3$ ) do lado da cadeia carbônica básica, no segundo carbono a partir das pontas ou numa posição central;

### 5.2- PENTENO E XILENO

Pertence à família das olefinas, que são compostos com um ou mais átomos de carbono duplamente unidos em uma cadeia direta. As fórmulas gerais são  $C_nH_{2n}$  para as monoolefinas (uma ligação dupla) e  $C_nH_{2n-2}$  para as diolefinas (duas ligações duplas).

A resistência a detonação dos combustíveis olefínicos aumenta com:

- A introdução de duas ou três ligações duplas, que geralmente resultam em uma tendência consideravelmente menor para detonação, enquanto que a introdução de uma única ligação dupla tem pouco efeito anti-detonante. Existem exceções a esta regra, como por exemplo o acetileno ( $C_2H_2$ ), etileno ( $C_2H_4$ ), e o propileno ( $C_3H_6$ ), que detonam muito mais facilmente que seus correspondentes saturados.

### 5.3- ETANOL

São compostos saturados com uma estrutura em cadeia em que um átomo de hidrogênio é substituído por uma hidroxila (OH). Podem ser obtidos da oxidação parcial do petróleo ou de vegetais ricos em carboidratos, que se constituem exclusivamente de carbono, hidrogênio e oxigênio.

### 5.4- GASOLINA

A gasolina é constituída por cerca de 40 hidrocarbonetos principais com a presença de muitos outros em quantidades mínimas (Van Wylen e Sonntag, 1993).

## 6- EXPERIMENTO E APARATO EXPERIMENTAL

Foi utilizado para o teste dos combustíveis um motor padrão monocilíndrico ASTM CFR com taxa de compressão variável de 4:1 até 16:1. Este motor foi escolhido por ser um motor padrão para testes de combustível e por permitir ajustes para gerar detonação sob níveis controlados e monitorados por instrumentação especificada adiante.

A intensidade da detonação é determinada usando-se um sistema de instrumentação com componentes normalizados pela ASTM, mostrados na figura 3, dos quais destacam-se o captador de detonação D-1, que é colocado no cilindro do motor CFR, um medidor de detonação modelo 501-A, e um medidor de detonação de display analógico com divisões de 0 a 100.

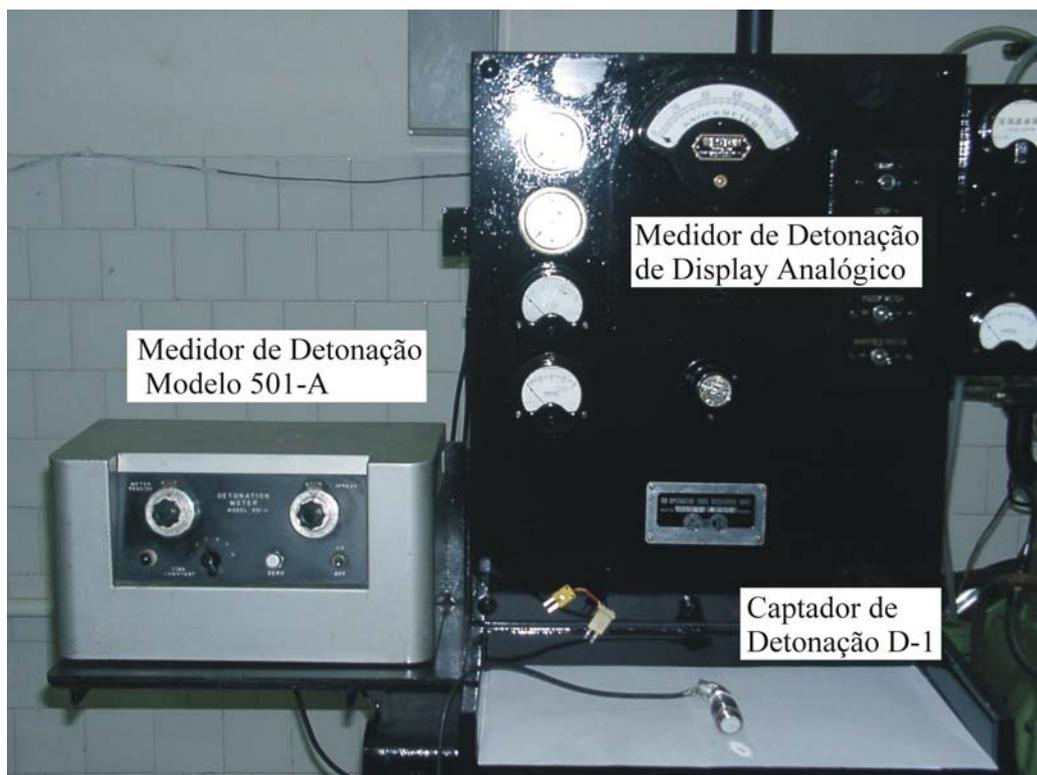


Figura 3- Sistema de Medição de Detonação

O captador de detonação do tipo D-1, mostrado na figura 4, 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 à velocidade de mudança da pressão da câmara de combustão.

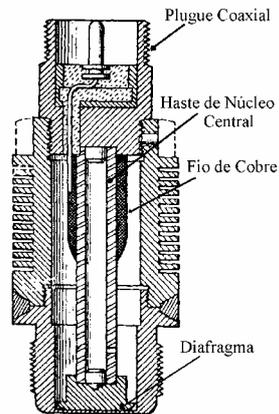


Figura 4- Captador de Detonação do Tipo D-1

O sistema de aquisição dos dados de pressão dentro da câmara de combustão, consiste em uma placa condicionadora de sinal CIO EXP GP, uma placa de aquisição de dados CIO DAS 08, e uma chave seletora, que ora enviava o sinal do captador de detonação para o medidor de detonação, enquanto eram feitos os ajustes do motor, e ora enviava o sinal do sensor de detonação para a placa condicionadora de sinais.

O monitoramento das temperaturas de mistura ar/combustível, óleo e líquido de arrefecimento foi feito com termopares tipo K.

O programa utilizado para a aquisição dos dados foi o SAD32, desenvolvido pelo LMM - Laboratório de Medições Mecânicas da UFRGS. Utilizou-se um computador 500 MHz, com placa de aquisição adquirindo a uma taxa de amostragem de 20 kHz. A figura 5 representa esquematicamente os principais instrumentos utilizados para execução do experimento.

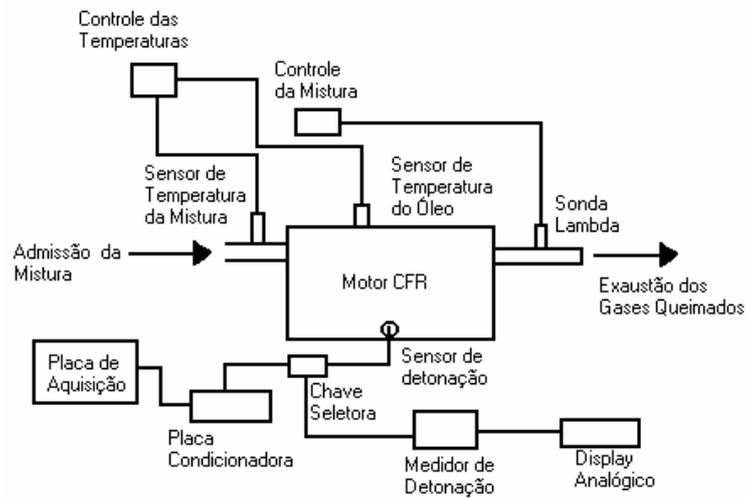


Figura 5- Representação esquemática do experimento

### 6.1- ANÁLISE DE ERROS

Para cada combustível realizou-se os testes durante intervalos pequenos de tempo para que não fosse necessário a correção da pressão em relação as condições atmosféricas. Cabe ressaltar também que a pressão foi medida em uma faixa comparativa, minimizando a incerteza da medição, conforme descrito por Santos (1995). Existem alguns fatores ambientais que influenciam a pressão dentro da câmara de combustão do motor, tais como: temperatura, pressão atmosférica, umidade. Esses fatores podem, contudo, ser considerados estáveis para intervalos pequenos de tempo.

A validação dos dados obtidos foi feita a partir do conhecimento do resultado fornecido pelo Laboratório de Motores da Petrobrás RS para o combustível iso-octano, utilizado como referência para calibração do sistema de aquisição de dados e enquadramento do motor conforme norma ASTM D 357.

Cada curva de pressão é determinada a partir da média aritmética dos picos de pressão existentes em cada um dos 5 arquivos, com aproximadamente 75 curvas adquiridas cada, gerando uma média final feita com aproximadamente 375 pontos, que é utilizada para localizar uma curva de pressão que possua um pico de pressão com o mesmo valor desta média.

## 6.2- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este se dividiu em 4 etapas:

- Obtenção da curva padrão de pressão dentro da câmara de combustão a partir das condições padronizadas pela norma;

- Obtenção da curva de pressão dentro da câmara de combustão com ponto de ignição em 10° Antes do Ponto Morto Superior (APMS);

- Obtenção da curva de pressão dentro da câmara de combustão com ponto de ignição em 20° APMS;

- Obtenção da curva de pressão dentro da câmara de combustão com ponto de ignição em 30° APMS;

Antes do início dos testes, o motor foi posto em funcionamento até atingir as condições especificadas pela norma ASTM D357, com exceção do controle de umidade do ar e da temperatura da mistura ar/combustível, para determinação do número de octanas de combustíveis com valor igual ou inferior a 100 octanas pelo método *Motor*.

Após o motor estar operando dentro dos padrões especificados pela norma, foi acertada a taxa de compressão para cada combustível, e o ponto de ignição, conforme a Tabela -4.

Tabela 4- Parâmetros para obtenção das curvas padrão

Combustível	Octanagem MON	Posição do Ca-beçote	Taxa de Compressão	Ponto de Ignição
1 - Penteno	77	0,651	5,73:1	31,2°
Gasolina Comum	82	0,591	6,05:1	29,8°
MTBE	93	0,446	7,03:1	27°
Xileno	93	0,446	7,03:1	27°
Etanol	95	0,424	7,22:1	26,7°
Gasolina Podium 96	96	0,414	7,30:1	26,3°
Iso-octano	100	0,382	7,60:1	25,2°
Gás Natural Veicular	113	0,245	9,26:1	18°

Para o início dos testes, aguardava-se cerca de 30 minutos para o aquecimento e estabilização das temperaturas do óleo lubrificante (57 °C), da água de arrefecimento (100°C) e temperatura da mistura (80°C). Depois de alcançadas as condições de trabalho o motor era colocado na condição de mistura ar/combustível estequiométrica, monitorada por um sistema eletrônico colocado no escape através de um sensor lambda.

Estando o motor nas condições ideais de ensaio para a geração da curva padrão, foram realizados 5 testes de 10 segundos de duração para cada condição analítica, cuja média foi estabelecida como padrão para os dados de pressão dentro da câmara de combustão. Estas curvas foram geradas aumentando-se o ponto de ignição até o indicador de detonação 501-A indicar a detonação estabelecida pela norma. As três etapas seguintes foram realizadas sob as mesmas condições de ensaio da primeira, variando-se apenas o ponto de ignição para 10°, 20° e 30° APMS.

Seguindo-se as mesmas condições de ensaios cada um dos nove diferentes tipos de combustível, foram geradas curvas de pressão média para cada tipo, em cada ponto de ignição, cujos resultados serão apresentados a seguir.

## 7- RESULTADOS

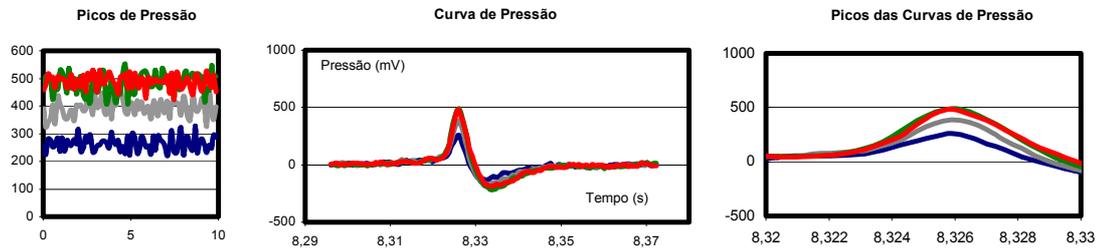
Abaixo serão descritos os resultados obtidos para os combustíveis analisados, acompanhados por suas respectivas curvas de pressão, onde a curva traçada em vermelho representa a curva padrão do combustível, a curva traçada em verde representa a pressão dentro da câmara de combustão quando utilizados 30° APMS, a curva traçada em cinza representa a pressão dentro da câmara de combustão quando utilizados 20° APMS e a curva traçada em azul representa a pressão dentro da câmara de combustão quando utilizados 10° APMS. O eixo das ordenadas representa o tempo, em segundos e o eixo das abscissas o valor da resposta do sensor tipo D-1 para a pressão dentro da câmara de combustão.

### 7.1- PENTENO

Para o ponto de ignição 10° APMS foi obtido uma redução na pressão dentro da câmara de combustão de 46%, para o ponto de ignição 20° APMS obtivemos uma redução de 20% e para o ponto de ignição 30° APMS obtivemos uma redução de 1%, em relação à curva padrão, obtida com o ponto de ignição em 31,2° APMS e taxa de compressão de 5,73:1. A tabela 5 e as curvas 6, 7 e 8 mostram os resultados obtidos

Tabela 5- resultados para o combustível penteno e Figuras 6, 7 e 8- curvas de pressão

	10°	20°	30°	Valor Padrão
Média	263,99	393,31	484,36	488,72
%	-46%	-20%	-1%	1,00

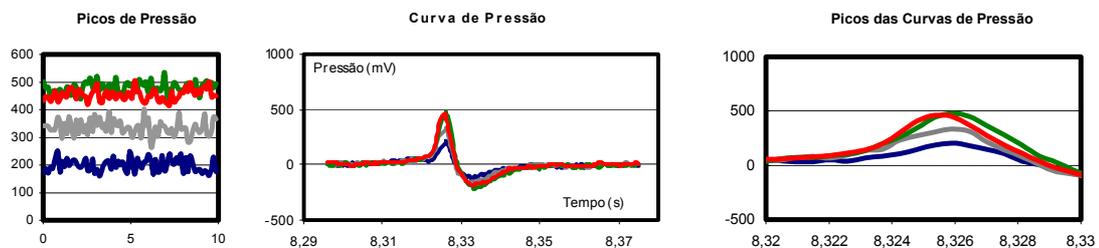


## 7.2- GASOLINA

Para o ponto de ignição  $10^\circ$  APMS foi obtido uma redução na pressão dentro da câmara de combustão de 46%, para o ponto de ignição  $20^\circ$  APMS obtivemos uma redução de 26% e para o ponto de ignição  $30^\circ$  APMS obtivemos um aumento de 6%, em relação à curva padrão, obtida com o ponto de ignição em  $29,8^\circ$  APMS taxa de compressão de 6,05:1. A tabela 6 e as curvas 9, 10 e 11 mostram os resultados obtidos.

Tabela 6- resultados para o combustível gasolina e Figuras 9, 10 e 11- curvas de pressão

	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	Valor Padrão
Média	199,59	335,69	480,81	453,76
%	-46%	-26%	6%	1,00

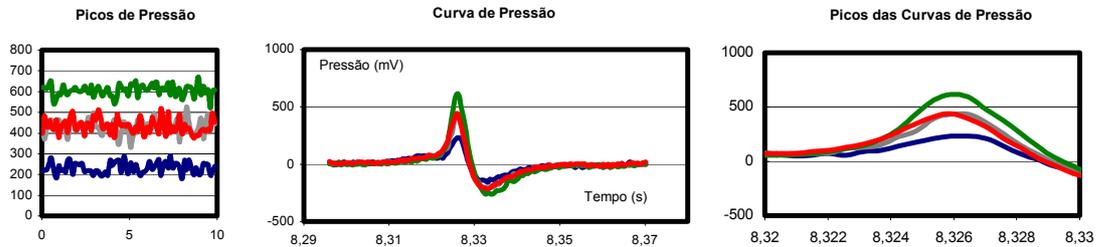


## 7.3- MTBE

Para o ponto de ignição  $10^\circ$  APMS foi obtido uma redução na pressão dentro da câmara de combustão de 47%, para o ponto de ignição  $20^\circ$  APMS obtivemos uma redução de 1% e para o ponto de ignição  $30^\circ$  APMS obtivemos um aumento de 40%, em relação à curva padrão, obtida com o ponto de ignição em  $27^\circ$  APMS e taxa de compressão de 7,03:1. A tabela 7 e as curvas 12, 13 e 14 mostram os resultados obtidos.

Tabela 7- resultados para o combustível MTBE e Figuras 12, 13 e 14- curvas de pressão

	10°	20°	30°	Valor Pa- drão
Média	231,92	429,52	605,81	433,62
%	-47%	-1%	40%	1,00

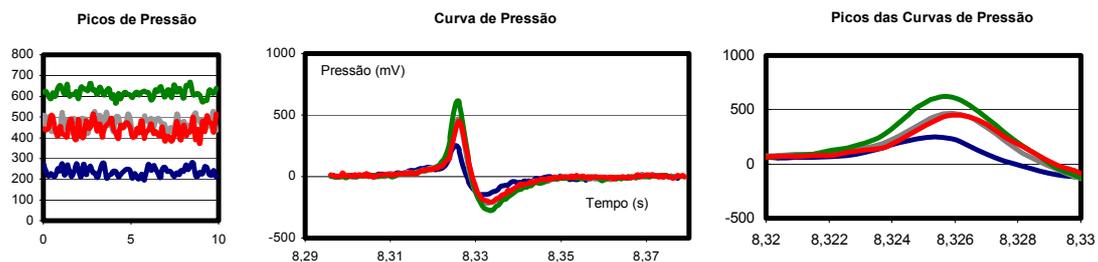


#### 7.4- XILENO

Para o ponto de ignição 10° APMS obteve-se uma redução na pressão dentro da câmara de combustão de 55%, para o ponto de ignição 20° APMS obtivemos uma redução de 16% e para o ponto de ignição 30° APMS obtivemos um aumento de 13%, em relação à curva padrão, obtida com o ponto de ignição em 27° APMS e taxa de compressão de 7,03:1. A tabela 8 e as curvas 15, 16 e 17 mostram os resultados obtidos.

Tabela 8- resultados para o combustível xileno e Figuras 15, 16 e 17- curvas de pressão

	10°	20°	30°	Valor Pa- drão
Média	225,42	424,74	570,45	506,52
%	-55%	-16%	13%	1,00



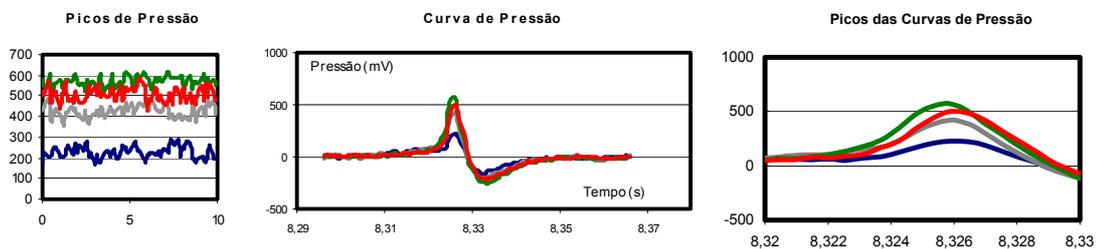
#### 7.5- ETANOL

Para o ponto de ignição 10° APMS obteve-se uma redução na pressão dentro da câmara de combustão de 46%, para o ponto de ignição 20° APMS obtivemos um aumento de 7% e para o ponto de ignição 30° APMS obtivemos um aumento de 40%, em relação à curva padrão, obtida com o pon-

to de ignição em  $26,7^\circ$  APMS e taxa de compressão de 7,22:1. A tabela 9 e as curvas 18, 19 e 20 mostram os resultados obtidos

Tabela 9- resultados para o combustível etanol e Figuras 18, 19 e 20- curvas de pressão

	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	Valor Pa- drão
Média	236,29	470,73	617,90	440,61
%	-46%	7%	40%	1,00

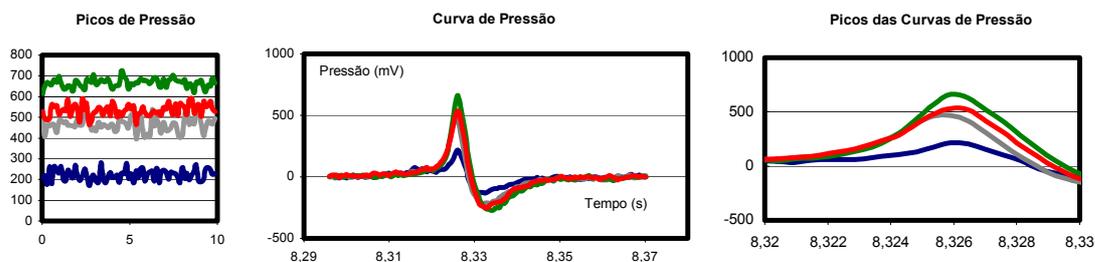


## 7.6- GASOLINA PODIUM

Para o ponto de ignição  $10^\circ$  APMS obteve-se uma redução na pressão dentro da câmara de combustão de 58%, para o ponto de ignição  $20^\circ$  APMS obtivemos uma redução de 13% e para o ponto de ignição  $30^\circ$  APMS obtivemos um aumento de 24%, em relação à curva padrão, obtida com o ponto de ignição em  $26,3^\circ$  APMS e taxa de compressão de 7,3:1. A tabela 10 e as curvas 21, 22 e 23 mostram os resultados obtidos.

Tabela 10- resultados para o combustível podium e Figuras 21, 22 e 23- curvas de pressão

	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	Valor Pa- drão
Média	222,28	463,15	665,22	534,80
%	-58%	-13%	24%	1,00

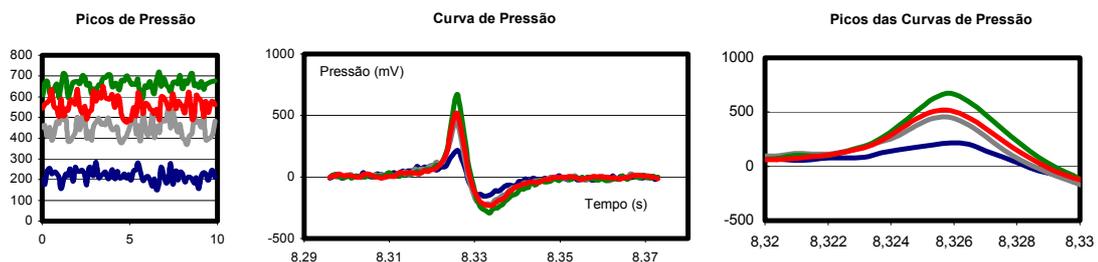


### 7.7- ISOOCTANO

Para o ponto de ignição 10° APMS obteve-se uma redução na pressão dentro da câmara de combustão de 61%, para o ponto de ignição 20°APMS obtivemos uma redução de 19% e para o ponto de ignição 30°APMS obtivemos um aumento de 18%, em relação à curva padrão, obtida com o ponto de ignição em 25,2° APMS e taxa de compressão de 7,60:1. A tabela 12 e as curvas 27, 28 e 29 mostram os resultados obtidos.

Tabela 12- resultados para o combustível isoootano e Figuras 27, 28 e 29- curvas de pressão

	10°	20°	30°	Valor Pa- drão
Média	218,75	450,67	660,44	558,78
%	-61%	-19%	18%	1,00

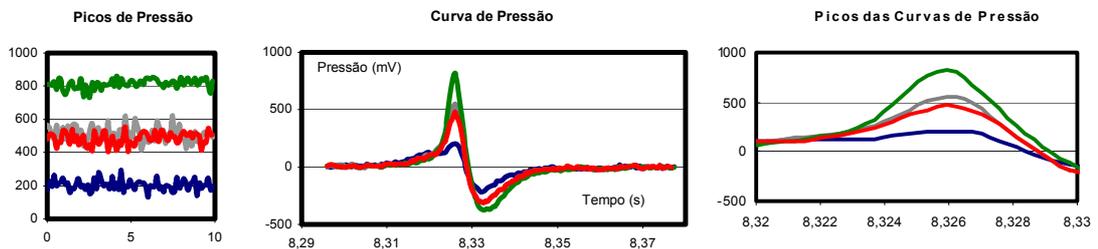


### 7.8- GÁS NATURAL VEICULAR

Para o ponto de ignição 10° APMS obteve-se uma redução na pressão dentro da câmara de combustão de 58%, para o ponto de ignição 20°APMS obtivemos um aumento de 6% e para o ponto de ignição 30°APMS obtivemos um aumento de 68%, em relação à curva padrão, obtida com o ponto de ignição em 18° APMS e taxa de compressão de 9,26:1. A tabela 13 e as curvas 30, 31 e 32 mostram os resultados obtidos.

Tabela 13- resultados para o combustível GNV e Figuras 30, 31 e 32- curvas de pressão

	10°	20°	30°	Valor Pa- drão
Média	203,55	512,13	814,61	484,36
%	-58%	6%	68%	1,00



### 7.9- COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS PADRÃO

A tabela 14 mostra os valores da variação de pressão dentro da câmara de combustão em relação a variação do ponto de ignição, para os combustíveis ensaiados, em relação a sua curva de pressão padrão. Observa-se que para os pontos de ignição 10°, 20° e 30° APMS os combustíveis com maior perda de pressão são respectivamente a Gasolina Podium 98, Gasolina Podium 96 e o GNV, e os combustíveis com menores perdas para 10° APMS são Penteno e GNV, com maiores ganhos para a condição de 20° APMS são o Penteno e o Etanol e para a condição de 30° APMS é o Etanol.

Tabela 14- Comparação entre os combustíveis

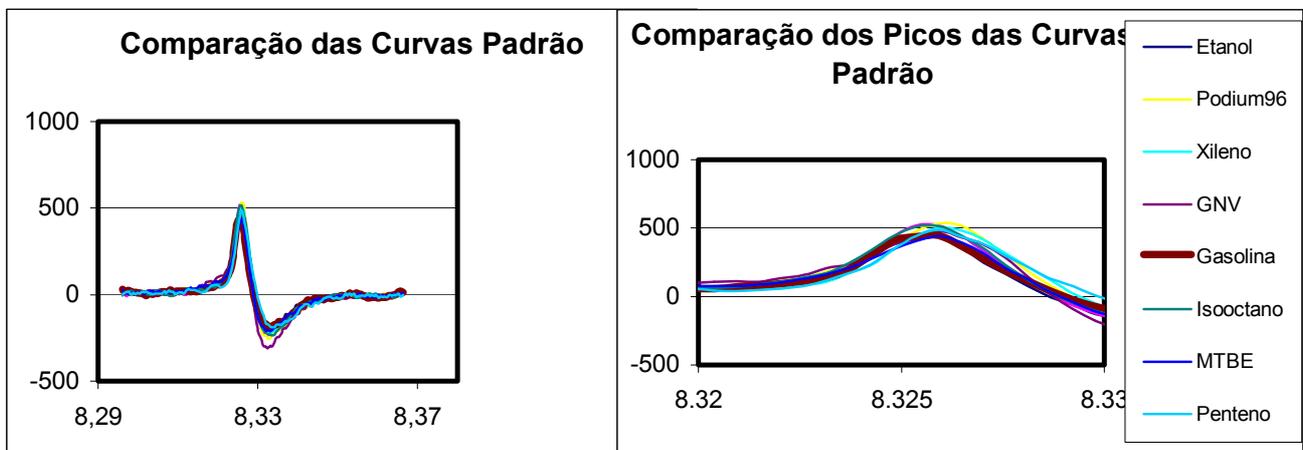
Base padrão	Valores Médios dos Picos de Pressão				Variação Percentual			
	10° APMS	20° APMS	30° APMS	Padrão	10° APMS	20° APMS	30° APMS	Padrão
Penteno	236,29	470,73	617,90	440,61	-46%	7%	40%	0,00%
Gasolina	270,85	437,02	624,19	558,46	-52%	-22%	12%	0,00%
MTBE	222,28	463,15	665,22	534,80	-58%	-13%	24%	0,00%
Xileno	225,42	424,74	570,45	506,52	-55%	-16%	13%	0,00%
Etanol	203,55	512,13	814,61	479,13	-58%	7%	70%	0,00%
Pod96	199,59	335,69	480,81	453,76	-56%	-26%	6%	0,00%
Isooctano	231,92	429,52	605,81	433,62	-47%	-1%	40%	0,00%
GNV	263,99	393,31	484,36	488,72	-46%	-20%	-1%	0,00%

### 7.10- COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE PRESSÃO ENTRE COMBUSTÍVEIS

A tabela 15 e as figuras 33 e 34 abaixo mostra a variação de pressão dentro da câmara de combustão em relação a variação do ponto de ignição, para os combustíveis ensaiados, em relação a curva de pressão padrão do combustível Gasolina. Observa-se que, que todos os combustíveis analisados teriam melhores rendimento que a Gasolina, quando comparadas suas curvas padrão com a com exceção do Etanol e do MTBE.

Tabela 15- Comparação entre os combustíveis

Base Pa- drão Gasolina	10° APMS	20° APMS	30° APMS	Padrão	Variação Percentual			
					10° APMS	20° APMS	30° APMS	Padrão
Penteno	263,99	393,31	484,36	488,72	32%	17%	1%	8%
Gasolina	199,59	335,69	480,81	453,76	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
MTBE	231,92	429,52	605,81	433,62	16%	28%	26%	-4%
Xileno	225,42	424,74	570,45	506,52	13%	27%	19%	12%
Etanol	236,29	470,73	617,90	440,61	18%	40%	29%	-3%
Pod96	222,28	463,15	665,22	534,80	11%	38%	38%	18%
Isooctano	218,75	450,67	660,44	558,78	10%	34%	37%	23%
GNV	203,55	512,13	814,61	479,13	2%	53%	69%	6%



Figuras 33 e 34- comparação entre as curvas padrão de pressão

A tabela 16 mostra a variação de pressão dentro da câmara de combustão em relação a variação do ponto de ignição, para os combustíveis ensaiados, em relação a curva de pressão padrão do combustível Etanol. Observa-se que combustíveis com menor octanagem que o Etanol tendem a reduzir a pressão dentro da câmara de combustão (se fossem utilizados em um motor projetado para funcionar com Etanol) e combustíveis com maior octanagem tendem a aumentar a pressão dentro da câmara de combustão, aumentando assim o rendimento térmico do motor, sem comprometer a vida útil do mesmo.

Tabela 16- Comparação entre os combustíveis

Base Pa- drão Etanol	10° APMS	20° APMS	30° APMS	Padrão	Variação Percentual			
					10° APMS	20° APMS	30° APMS	Padrão
Penteno	263,99	393,31	484,36	488,72	12%	-16%	-22%	11%
Gasolina	199,59	335,69	480,81	453,76	-16%	-29%	-22%	3%
MTBE	231,92	429,52	605,81	433,62	-2%	-9%	-2%	-2%
Xileno	225,42	424,74	570,45	506,52	-5%	-10%	-8%	15%
Etanol	236,29	470,73	617,90	440,61	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Podium	222,28	463,15	665,22	534,80	-6%	-2%	8%	21%
Isooctano	218,75	450,67	660,44	558,78	-7%	-4%	7%	27%
GNV	203,55	512,13	814,61	479,13	-14%	9%	32%	9%

## 8- CONCLUSÕES

Verificou-se, pela obtenção da curva padrão, que a pressão dentro da câmara de combustão para atingir-se o valor de detonação padrão, é de aproximadamente 500mV. Valores acima destes, são considerados prejudiciais ao funcionamento do motor, pois superam os índices permitidos, por norma, para detonação em motores de combustão interna. Por outro lado, valores abaixo deste resultam em um menor rendimento térmico e, conseqüentemente, desperdício de combustível.

A variação do ponto de ignição tem influência significativa na pressão desenvolvida dentro da câmara de combustão. A medida em que o ponto de ignição é adiantado há um acréscimo significativo na pressão, porém este valor é limitado pelo poder anti detonante característico de cada combustível.

Os valores de pico de pressão variam com a taxa de compressão. É necessário portanto projetar um tipo de motor para cada combustível para obter-se o melhor rendimento térmico. O uso do GNV no ciclo Otto é mais eficiente quando utilizado em motores a álcool, pois este apresenta, em geral taxa de compressão de 12:1 enquanto que nos motores à gasolina mais modernos, a taxa de compressão está em torno de 10:1. Contudo o GNV pode ser usado com taxa de 16:1, aumentando assim a eficiência térmica do motor (Dalávia, 1999).

Os dois parâmetros principais que influenciaram nos picos de pressão dentro da câmara de combustão são a taxa de compressão e o ponto de ignição, sendo que o segundo deve ser ajustado para que o pico de pressão coincida com a melhor condição de aproveitamento do mecanismo biela-manivela. Cabe então utilizar os combustíveis de maneira a aproveitar toda energia por ele disponibilizada, a partir da taxa de compressão.

## 9- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Heywood, J. B., 1988, “**Internal Combustion Engine Fundamentals**”, McGraw-Hill, Book Company.

Plint, M, A & Martyr, A., 1997, “**Engine Testing Theory and Practice**”, Butterworth-Heinemann.

Giacosa, D.,2000, “**Motori Endotermici**”, Ed. Ulrico Hoepli – 15 ed. Milano.

Maltz, N., 1995, “**Sistema Ótico de Monitoração de Combustão em Motores Ciclo Otto**”, Editora da UFRGS

Santos, M. J.& Irigoyen, E. R. C., 1995, “**Metrologia Dimensional: Teoria e Prática**”, Porto Alegre: ed. Universidade/UFRGS.

Taylor, C. F. and Taylor, E. S., 1962, “**The Internal-Combustion Engine**”, Second Edition.

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