

Através do processo de combustão, a energia contida no combustível é liberada e transformada em trabalho mecânico ou potência.

Para que a energia disponível não seja desperdiçada, o processo de combustão deve ocorrer de forma controlada. Ainda assim, por limitações impostas pelas leis da física, não resulta possível transformar toda a energia contida no combustível, em trabalho ou potência útil; sempre haverá certa porcentagem não aproveitada. Assim, o motor de combustão interna tem uma eficiência bem inferior a 100%; na prática verifica-se que o rendimento está entre 25% e 35%. Ou seja, entre 65% e 75% da energia disponível no combustível é desperdiçada na forma de calor, por fricção, através do líquido de arrefecimento e nos gases de escape. Estes últimos, além de energia não aproveitada, contêm agentes poluidores.

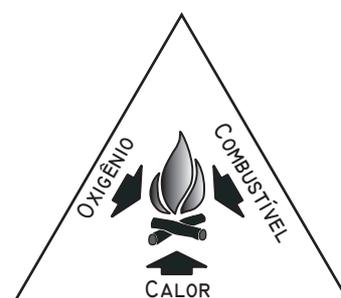
## PROCESSO DE COMBUSTÃO

A ocorrência da combustão só é possível na presença de três elementos:

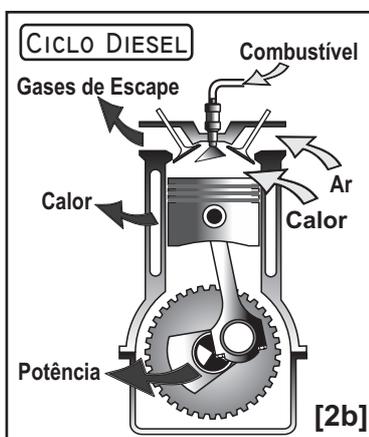
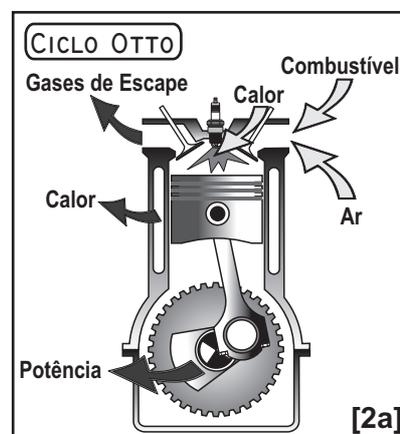
- ▶ **Combustível (HC):** Os combustíveis utilizados nos motores de combustão interna são hidrocarbonetos compostos de hidrogênio (H) e carbono (C).
- ▶ **Oxigênio ou comburente:** Os motores de combustão interna utilizam o oxigênio contido no ar.
- ▶ **Calor:** Nos motores de combustão interna o calor é gerado pela faísca (ciclo Otto) ou pela compressão do ar admitido (ciclo Diesel).

Nos motores de combustão interna, a combustão ou queima do combustível, acontece num recinto fechado denominado **câmara de combustão**.

Dentre eles, dois tipos são de interesse para a análise do processo de combustão:



**1. Motor Ciclo Otto - Ignição por Centelha.** Neles, na câmara de combustão é admitida uma mistura de ar (contendo o oxigênio) e combustível. Esta é comprimida pelo pistão, e no momento apropriado, próximo do fim do ciclo de compressão, é fornecido o calor necessário à combustão na forma de centelha nas velas. A potência desenvolvida pelo motor é controlada variando a abertura da válvula de aceleração (borboleta) ou a abertura das válvulas de admissão. A taxa de compressão pode variar entre 8:1 e 12:1. Utilizado, principalmente, em veículos de passeio e utilitários. Atualmente, a rotação máxima se encontra na faixa de 5.000 - 7.000 rpm.



**2. Motor Ciclo Diesel - Ignição por Compressão ou Ignição Espontânea.**

Na câmara de combustão é admitido somente ar, o qual é comprimido intensamente. Isto provoca o aumento da sua temperatura num nível tal que, quando o combustível é injetado, próximo do fim do ciclo de compressão, ocorre a combustão. O motor diesel foi patenteado em 1892 e apresentado oficialmente (por Rudolph Diesel) na exposição de Paris de 1898 utilizando como combustível óleo de amendoim. Por não possuir válvula de aceleração para o controle da carga admitida nos cilindros, a potência desenvolvida pelo motor é controlada variando a quantidade de combustível injetado. A taxa de compressão pode variar entre 14:1 e 24:1. Estes motores podem ser classificados em função da sua rotação.

- ▶ **Diesel lento.** Aplicado em embarcações e instalações estacionárias: 400 – 800 rpm.
- ▶ **Diesel normal.** Aplicado em veículos pesados: 800 – 2000 rpm.
- ▶ **Diesel rápido.** Aplicado em veículos de passeio, comerciais leves e utilitários: 2000 – 4000 rpm.



O motor de ciclo Diesel apresenta maior eficiência (ver capítulo 5) devido à maior taxa de compressão e menores perdas de bombeamento por não possuir borboleta de aceleração. Isto último, se comparado com um motor de ciclo Otto aspirado.

Nestes motores, a combustão da mistura se dá de forma bastante rápida o que provoca um aumento considerável da pressão e temperatura dentro do cilindro. Isto, por sua vez, gera a força que impulsiona o pistão no sentido de fazer girar o virabrequim, produzindo trabalho mecânico, ou seja, gerando potência. Como resultado da combustão, o motor libera:

- a) Trabalho mecânico ou potência, que movimenta o veículo
- b) Gases de escape
- c) Calor (energia não aproveitada) retirado pelo líquido arrefecedor
- d) Calor (energia não aproveitada) gerado pela fricção das peças mecânicas

Destes quatro itens, o único que realmente interessa é o primeiro, trabalho mecânico ou potência. Os outros três podem ser considerados energia desperdiçada ou não aproveitada.

Pior ainda, os gases de escape além transportarem calor (energia não aproveitada) são fonte de poluição, já que alguns dos seus componentes agredem intensamente o meio ambiente, sendo os mais relevantes: **CO** (monóxido de carbono), **HC** (combustível não queimado), **NOx** (óxidos de nitrogênio), **SO<sub>2</sub>** (dióxido de enxofre) e material particulado.

Em função de fatores que influenciam o processo de combustão, este pode resultar em:

- ▶ **Combustão completa** da mistura: Os gases de escape contêm **H<sub>2</sub>O** (água) e **CO<sub>2</sub>** (dióxido de carbono). Outros gases presentes no ar (nitrogênio, por exemplo) passam inalterados pelo processo de combustão. Esta definição é só teórica, já que na realidade verifica-se que, ainda no caso de combustão completa, o nitrogênio é oxidado, formando **NOx** (óxidos de nitrogênio); isto, devido às altas temperaturas presentes na câmara de combustão.
- ▶ **Combustão incompleta** da mistura: Os gases de escape contêm, além **H<sub>2</sub>O** e **CO<sub>2</sub>**, outros compostos poluentes como: **CO**, **HC**, **NOx**. Outros componentes do combustível (enxofre, por exemplo), por sua vez, darão origem a gases nocivos à saúde e ao meio ambiente. Além dos mencionados, o motor diesel emite **material particulado**.

Portanto, é possível enunciar de forma bastante ampla, as necessidades básicas impostas aos motores modernos:

*Obter a máxima potência com o menor consumo de combustível e menor nível de emissões de poluentes, compatíveis com tal potência. Em resumo: máxima eficiência com mínimo de emissões.*



Os motores de ciclo Otto e Diesel são de combustão interna **intermitente**, isto porque a combustão só acontece no fim do ciclo de compressão. Em contraposição, por exemplo, uma turbina de gás (propulsor de avião) é um motor de combustão interna **contínua**.

Para compensar a condição de combustão intermitente, os recursos básicos utilizados são:

- ▶ **Aumentar o rendimento térmico**: Para otimizar a transformação de energia química do combustível em energia que impulsiona os pistões.
- ▶ **Maximizar o rendimento volumétrico**: Para otimizar o enchimento dos cilindros.
- ▶ **Aproveitar o calor gerado durante a combustão**: Para recuperar parte da energia dos gases resultantes, através da turbo-alimentação.

Alguns dos recursos básicos para aumentar o rendimento termo-mecânico ou total, são:

- ▶ **Minimizar o atrito mecânico**: Pistões forjados com saias de grafite; comandos com balancins de ação por rolamento (roletados) e não por escorregamento.
- ▶ **Aumentar o rendimento volumétrico**: Indução forçada, coletores de plástico, mais lisos e com formas mais aerodinâmicas (caracol, toroidal).
- ▶ **Aumento da eficiência de combustão**: Mecanismo de "squizz", para comprimir o ar admitido e forçá-lo na direção da vela (Otto) ou aumentar o turbilhonamento ou redemoinho (Diesel).

**TIPOS DE MISTURAS**

Uma característica fundamental dos motores de ciclo Otto e Diesel, é que, para que aconteça a combustão, a mistura ar/combustível presente na câmara, deve possuir quantidades desses elementos, em proporções dentro de uma faixa definida. Ainda mais, para funcionar corretamente, o motor precisa receber a dosagem mais conveniente (de ar e combustível), para cada regime de operação. Só assim é possível obter o máximo de rendimento com o mínimo de emissões.

■ **RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL**

Este conceito encontra aplicação na análise dos métodos de controle do motor. A Relação Ar/Combustível representa a proporção das quantidades de ar e combustível que constituem a mistura. É uma relação de massas definida como:

$$[1] \text{ RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL} = \frac{\text{MASSA DE AR ADMITIDA}}{\text{MASSA DE COMBUSTÍVEL ADMITIDA}}$$

Em função destas quantidades de ar e combustível podem ser identificados 3 tipos de misturas: **ideal, pobre e rica**.

**Mistura Ideal ou Estequiométrica**

A mistura ideal ou **estequiométrica** é definida, teoricamente, como aquela que possui uma quantidade de ar (quantidade suficiente de oxigênio) capaz de queimar todo o combustível presente na mesma. Ou seja:



Reparar que depois da combustão completa (situação teórica) não resta nem O<sub>2</sub> nem HC. Ou seja, todas as moléculas de oxigênio contidas no ar da mistura foram completamente utilizadas para reagir com todas aquelas de combustível.

O valor da relação estequiométrica depende do tipo de combustível considerado. A tabela ao lado apresenta a relação ar/combustível estequiométrica para diversos combustíveis. Os valores são aproximados, Ou seja, no caso da gasolina, por exemplo, com uma composição de 86% de carbono e 14% de hidrogênio, são necessárias 14,7 partes (em peso) de ar para cada parte (em peso) de gasolina, para se obter uma mistura estequiométrica.

COMBUSTÍVEL	COMPOSIÇÃO	RELAÇÃO
Gasolina	86% C + 14% H	14.7:1
Etanol	52% C + 13% H + 35% O	8.5 a 9:1
Diesel	87% C + 13% H	14.5:1
Metano (GNV)	75% C + 25% H	17.2:1
Gasolina + Etanol	77.8% C + 13.8% H + 8.4% O	12.5 a 13:1

**Mistura Rica**

Quando a mistura admitida nos cilindros possui menos ar que o correspondente à mistura ideal (excesso de combustível), uma parte do combustível não é queimada, e a combustão torna-se incompleta. Como resultado, aumenta o nível de emissão de poluentes. Verifica-se, também, que se tal excesso de combustível ultrapassa certo patamar, a combustão não mais é possível, e o motor não funciona (motor ciclo Otto afogado). As misturas com excesso de combustível denominam-se misturas **ricas**.

**Mistura Pobre**

No caso oposto, ou seja, quando a mistura possui menos combustível que o correspondente à mistura ideal (excesso de ar), parte do oxigênio não é utilizado. As misturas com excesso de ar denominam-se misturas **pobres**.

■ **FATOR LAMBDA**

Para facilitar a análise do processo de combustão e a qualidade das emissões no escapamento, é definido um número denominado Fator Lambda através do qual é normalizada a relação ar/combustível para os diversos combustíveis. O fator Lambda auxilia no raciocínio, e é definido como uma relação de relações [3]:

$$[3] \text{ FATOR LAMBDA} = \frac{\text{RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL REAL}}{\text{RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL IDEAL}}$$

Sendo a **relação real**, aquela correspondente à mistura admitida nos cilindros e a **relação ideal**, a estequiométrica do combustível utilizado.

O fator Lambda mede o desvio da mistura realmente admitida nos cilindros, com relação à mistura ideal ou estequiométrica, e pode ser utilizado para caracterizar os diferentes tipos de misturas, independentemente do combustível utilizado. Assim:

- Lambda > 1 Identifica as misturas pobres (excesso de ar)
- Lambda < 1 Identifica as misturas ricas (excesso de combustível)
- Lambda = 1 Identifica a mistura estequiométrica ou ideal

O símbolo ">" significa "maior que"  
O símbolo "<" significa "menor que"

PROCESSO DE COMBUSTÃO - CICLO OTTO

No caso do motor de ciclo Otto convencional, as quantidades de ar e combustível mais adequadas para um bom funcionamento, são aquelas em torno da mistura ideal ou estequiométrica.

Ou seja, a condição de máximo rendimento, com o mínimo de consumo e de emissão de poluentes, acontece numa estreita faixa em torno de  $\lambda = 1$ .

Nesta situação, a combustão da mistura "ideal" produz elevadas porcentagens de H<sub>2</sub>O (vapor de água) e CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono).

Quando na mistura admitida existe excesso de combustível, assim como quando existe excesso de ar, além de certo nível, a combustão não é possível.

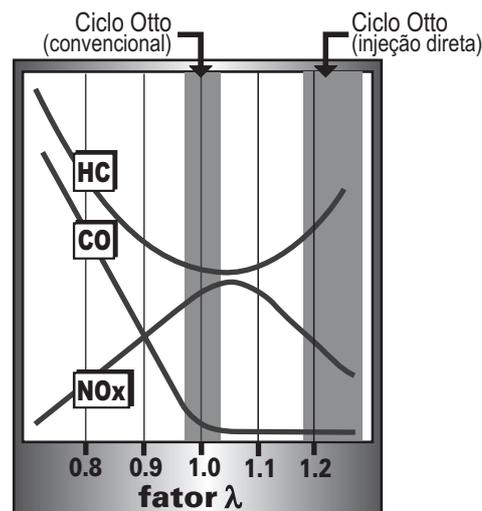


Os motores de ciclo Otto que funcionam sob o princípio de "combustão de mistura pobre", trabalham com misturas na faixa de  $\lambda$  1,2 a 1,7. Isto resulta numa economia de até 25% nas cargas parciais, redução na emissão de CO<sub>2</sub> e drástica diminuição nas emissões de CO e NO<sub>x</sub>.

A figura [3] mostra a variação de concentração dos gases em função do  $\lambda$ , salientando as faixas de funcionamento do motor ciclo Otto convencional e de combustão de mistura pobre. Estes últimos são de injeção direta de combustível (GDi).

Nos motores de ciclo Otto, a potência liberada é função da carga admitida de ar a qual depende da abertura da válvula de aceleração (borboleta). Esta nada mais é do que uma restrição variável com a qual se controla o rendimento volumétrico de 12% a 18% na marcha lenta, até 100% (em teoria) em plena carga. Isto, para motores aspirados. Os motores sobre-alimentados superam esta marca de 100%.

Desta forma, o teor da mistura é regulado de acordo com a massa de ar admitida e esta, por sua vez, depende da abertura da borboleta. Nos motores sem borboleta, a massa de ar admitida depende do curso ou levantamento (variável) das válvulas de admissão.

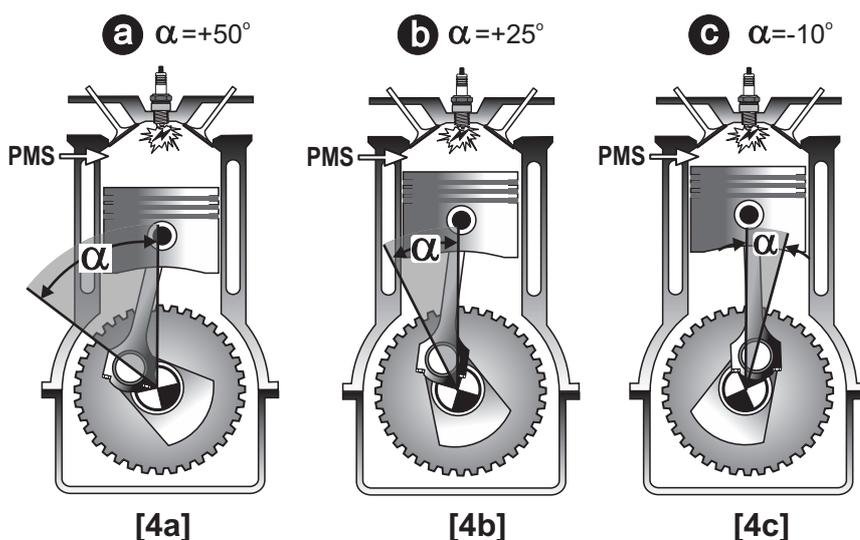


[3]

□ PONTO DE IGNIÇÃO

Nos motores de ciclo Otto, a combustão se inicia no instante em que aparece a centelha sendo a determinação deste evento, de fundamental importância para o correto funcionamento. No momento da ignição (início da combustão), na câmara de combustão formam-se duas regiões: Uma com a mistura já queimada e a outra com mistura ainda por queimar, separadas estas, pela **frente de chama** que corresponde à mistura em combustão. Entre a ignição da mistura e sua completa combustão transcorrem aproximadamente, 2 a 2,5 mS.

A centelha deve acontecer com certa antecipação com relação ao ponto morto superior (PMS), no ciclo de compressão. Este avanço do ponto de ignição deve ser tal, que a pressão gerada pela combustão seja máxima assim que o pistão supera o PMS. Nesta situação, a energia gerada pela combustão provoca o aumento de temperatura dos gases no volume mínimo da câmara o que resulta na geração de máxima pressão; conseqüentemente, a força que impulsiona o pistão é máxima. Esta condição é ilustrada pela figura [4b].



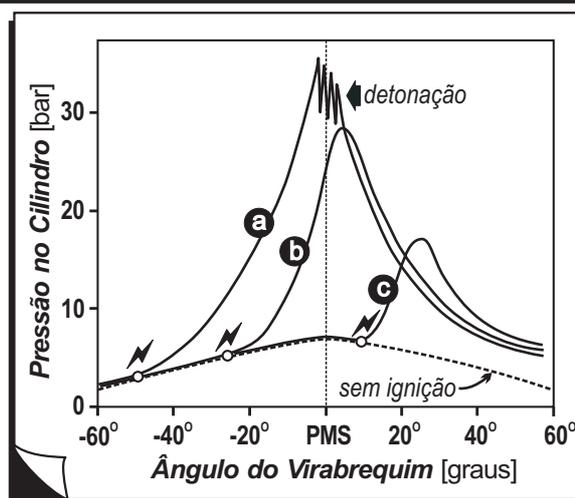
Por outro lado:

- ▶ Se a centelha acontece antes (fig.[4a]), a pressão também, será máxima antes do PMS e freará o movimento do pistão.
- ▶ Se a centelha acontece com retardo (fig.[4c]), o aumento de temperatura dos gases se dá num volume que não é o mínimo, com o pistão tendo se afastado do PMS; como resultado, a pressão assim como a força gerada, são menores. Verifica-se um desaproveitamento de energia.

A figura [4d] apresenta o gráfico com as curvas de pressão na câmara, correspondentes às 3 situações. O avanço do ponto de ignição é determinado basicamente, por:

- ▶ **Rotação do motor:** Quanto maior é a rotação, maior deve ser o avanço já que para um mesmo tempo de combustão o virabrequim percorre um ângulo maior.
- ▶ **Carga do motor:** Quanto menor a carga, maior deve ser o avanço em função de a combustão ser mais lenta.

Há outros fatores que contribuem na determinação do avanço e que foram incorporados nos sistemas eletrônicos, como temperatura do ar admitido, teor da mistura, condição de detonação.



[4d]

### ■ COMBUSTÃO ANORMAL - DETONAÇÃO - IGNIÇÃO SUPERFICIAL

Os dois processos mais significativos de combustão anormal em motores de ciclo Otto, são:

- ▶ **Detonação**
- ▶ **Ignição superficial**

#### □ DETONAÇÃO

A teoria sobre o processo de detonação diz que o fenômeno está relacionado com a combustão muito rápida da mistura que se encontra além da frente de chama e que ainda não entrou em combustão.

Manifesta-se quando a faísca provoca a ignição da mistura antes do pistão atingir o PMS (ponto morto superior), no fim do ciclo de compressão.

Quando esta mistura entra em combustão de forma abrupta, a elevação da pressão desequilibrada provoca a ressonância da câmara de combustão e a sua estrutura vibra.

Durante a detonação verificam-se pulsos de pressão de até 150 bar e frequências vibratórias de 6 a 12 kHz (kilohertz ou kilociclos/segundo), o que pode ser causa de falha nas juntas, erosão do pistão (furo na cabeça), quebra de anéis, etc.

Basicamente, é o resultado de altas taxas de compressão ou avanços do ponto de ignição além do limite e acontece, geralmente, com altas pressões absolutas de coletor de admissão (motor sob carga).

Pode-se dizer, portanto, que a detonação, também conhecida como “batida de pino”, é o resultado da “explosão” da mistura, em contraposição à queima gradual, necessária ao correto funcionamento.

Em resumo, é uma forma de combustão descontrolada que provoca perda de eficiência, além do aumento das emissões, e pode resultar na destruição de elementos mecânicos; sobretudo, se for de longa duração nas altas velocidades.



*Não confundir detonação com “auto-ignição” ou “efeito diesel” dos motores carburados, situação esta em que o motor continua a funcionar ainda depois de a ignição ter sido desligada.*

*A auto-ignição é o resultado da presença de pontos quentes na câmara de combustão e não pode ser controlada modificando o avanço. As causas, geralmente, residem no acúmulo de carvão na câmara de combustão (ponto quentes) ou velas inapropriadas (velas quentes).*

Nos motores equipados com sensor de detonação (KS) o fenômeno é controlado, pela UC, modificando (atrasando) o ponto de ignição.

Nos casos em que o motor não possui sensor KS, o fenômeno da detonação merece um cuidado especial já que, como mencionado, se persistir por um período prolongado, pode provocar sérios danos ao motor.



*Nos modernos motores com sistema de ignição do tipo CSI (“Compression Sense Ignition”, do inglês, Ignição com Sensoriamento de Compressão) ou ICS (“Ion Current Sensing”, do inglês, Sensoriamento da Corrente de Ionização) a detecção da detonação é feita por métodos que dispensam o uso do sensor KS. No entanto, devido a sua aplicação restrita, estes sistemas serão tratados em futura publicação.*

#### ● Limite de Detonação

O motor ciclo Otto apresenta, em função de condições de projeto e do combustível utilizado, um limite máximo de avanço (denominado **Limite de Detonação Inferior** ou **LDi**) que pode ser aplicado. Avanços superiores a este limite provocam o aparecimento do fenômeno de detonação.

A figura [5a] apresenta as curvas de **Potência x Avanço** (ciclo Otto) para duas taxas de compressão. Reparar no ganho de potência máxima (**Gp**) que a maior taxa de compressão oferece.

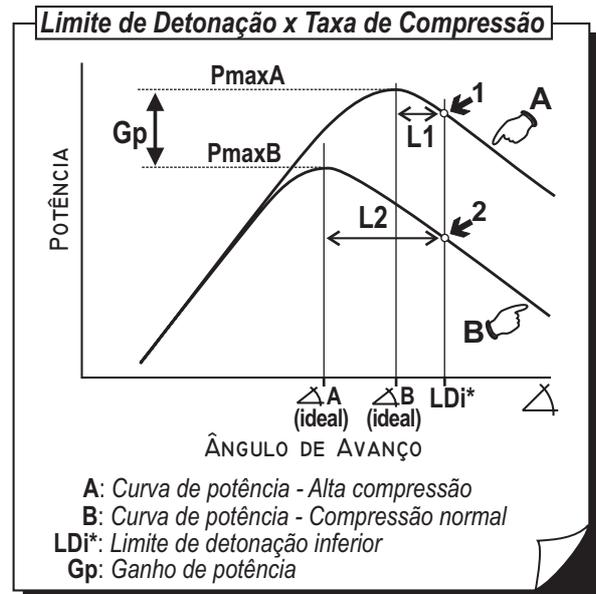
Na figura estão salientados os pontos do **Limite de Detonação Inferior** para ambas as curvas (1 e 2).

Como pode ser observado, quanto maior a taxa de compressão, mais próximo fica o avanço do **limite inferior de detonação**, do avanço correspondente à **máxima potência**.

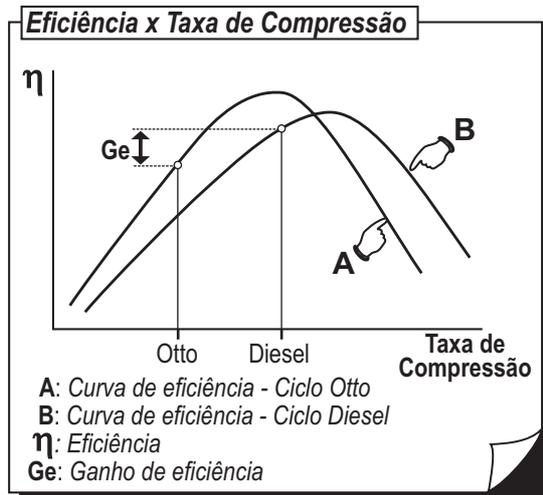
Este fato é salientado pelas distâncias **L1** e **L2**. Com isto, diminui a margem de proteção contra o aparecimento do fenômeno de detonação.

Dessa forma, as variações de tal limite, em função das condições mecânicas e de funcionamento, assim como da qualidade do combustível utilizado, podem interferir no desempenho e integridade do motor.

Nos sistemas com controle mecânico do avanço e em aqueles sistemas mapeados que não dispõem de detecção da detonação, a solução encontrada é diminuir o avanço aplicado nas condições de carga e rotação para as quais poderia aparecer o fenômeno; ou seja, a curva de avanço é corrigida no sentido de adotar uma margem de segurança para os avanços acima de um determinado valor.



[5a]

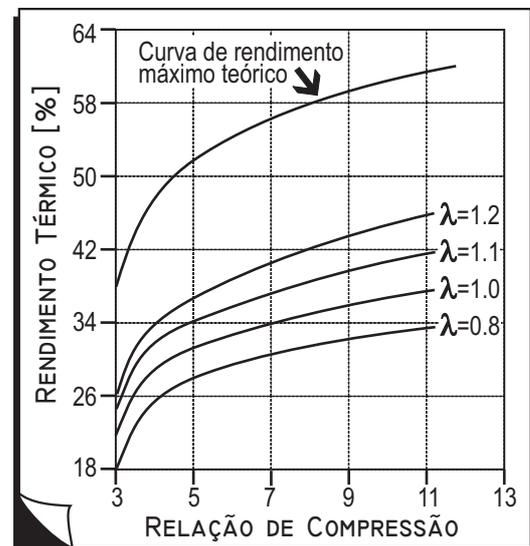


[5b]

A figura [5b] apresenta um comparativo de eficiência em função da taxa de compressão. Reparar que o ciclo Otto pode atingir níveis de eficiência superiores àqueles correspondentes ao ciclo Diesel.

No entanto, por não ter o fator limitante da detonação, o diesel consegue trabalhar com taxas de compressão maiores de onde resulta o ganho de eficiência **Ge**.

A figura [6] mostra o caso específico ao motor ciclo Otto. Apresenta as curvas de rendimento térmico em função da taxa de compressão para diversos valores de Lambda. Da análise da figura surge que uma elevada relação de compressão permite obter aumento do rendimento. Como resultado, aumenta também, a potência desenvolvida e diminui o consumo específico de combustível. No entanto, a temperatura na câmara também aumenta rapidamente da mesma forma que as emissões de NOx.



[6]

Por outro lado, a taxa está limitada pela octanagem do combustível utilizado já que se ultrapassado o limite máximo permitido, aparecerá o fenômeno de detonação.

Como será analisado em capítulo posterior, os motores de ciclo Otto de "combustão de mistura pobre" conseguem funcionar com Lambda superior a 1,4 e altas taxas de compressão.

## CAPÍTULO 3 - Combustão e Emissões

### □ IGNIÇÃO SUPERFICIAL

Este processo de combustão anormal está relacionado com o início da combustão provocado por algum ponto quente na superfície da câmara. Esses pontos quentes podem ter origem em:

- ▶ Vela superaquecida
- ▶ Fragmento de carvão incandescente

Quando acontece após o centelhamento é denominado de **pós-ignição** e pode passar despercebido.

Quando acontece antes, é denominado de **pré-ignição**. Neste caso, o fenômeno se apresenta de forma similar a um avanço exagerado e pode resultar em detonação.

O importante a salientar é que o fenômeno de ignição superficial está fora do controle do sistema eletrônico de gerenciamento do motor.

### ■ COMBUSTÃO DE BAIXA TEMPERATURA OU IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO DE CARGA HOMOGÊNEA

A "**combustão de baixa temperatura**", identificada com a sigla **LTC** ou "**ignição por compressão de carga homogênea**", identificada com a sigla **HCCI**, é um processo de combustão (em motor de ciclo Otto) que não utiliza centelha para a ignição da mistura.

A mistura homogênea presente no cilindro é comprimida, acumulando o calor necessário à ignição e combustão a baixa temperatura. Isto, se comparada com a temperatura resultante da combustão de uma mistura não homogênea. A combustão espontânea, por compressão, pode ser de 2 tipos:

1. **Convencional ou combustão por difusão.** É utilizada no motor de ciclo Diesel. O combustível é injetado ainda, durante o processo de combustão, com a chama presente, entre  $-10^{\circ}$  APMS e  $0^{\circ}$ . Isto resulta no aumento abrupto da temperatura que atinge níveis que propiciam a formação de NOx e contribuem no processo de *pirólise* através do qual é gerado material particulado (carvão).
2. **Combustão pré-misturada (HCCI).** O combustível é injetado entre  $-50^{\circ}$  e  $-20^{\circ}$  APMS, quando ainda, não se iniciou a combustão (não há chama). Assim, ao iniciar-se a combustão, a mistura já se encontra suficientemente homogeneizada pelo que a temperatura não aumenta tão abruptamente. Como resultado disto se verifica:
  - ▶ Diminuição das emissões de NOx e de material particulado decorrente da combustão de mistura homogênea (como no motor de ciclo Otto).
  - ▶ Aumento da eficiência em função da alta taxa de compressão (como no motor de ciclo Diesel).



*Pirólise é uma reação de decomposição de uma substância pela ação do calor. Durante o processo e em função da alta temperatura, ocorre a ruptura da estrutura molecular do composto num ambiente com pouco ou nenhum oxigênio.*

## PROCESSO DE COMBUSTÃO - CICLO DIESEL

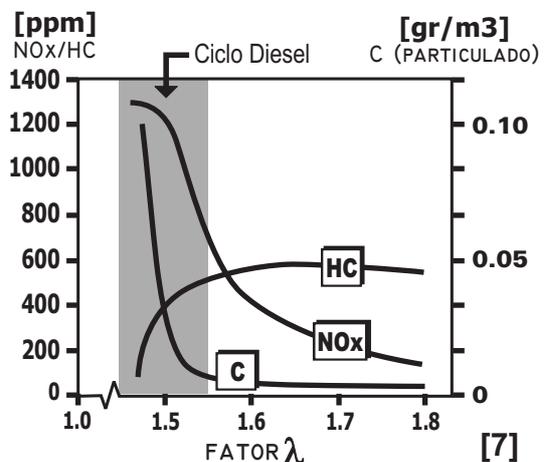
Os motores de ciclo Otto (ignição por centelha) usam combustíveis mais voláteis que os utilizados pelos motores de ciclo Diesel (ignição por compressão). Além disso, dispõem de tempos maiores para a formação da mistura, se comparados com o tempo disponível nestes últimos. Em consequência desses fatores, a mistura resulta mais homogênea nos de ciclo Otto.

Esta é uma das razões dos motores Diesel trabalharem com misturas pobres (16,5:1 a 22:1/24:1). Neles o tempo para a formação da mistura é menor, pelo que, para assegurar uma combustão completa, deve existir excesso de ar. A falta deste excesso provoca a emissão de fuligem, monóxido de carbono (CO), e hidrocarbonetos (HC), devido à combustão incompleta.

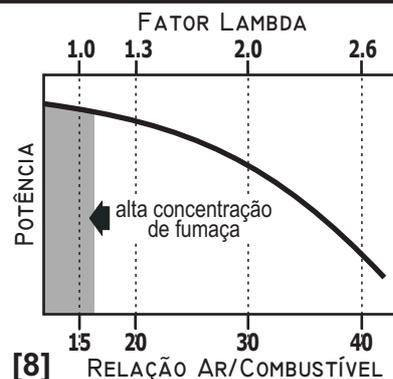
Por outro lado, não existindo a válvula de aceleração (borboleta), a cada ciclo de admissão o motor admite a carga total de ar que a sua capacidade volumétrica (cilindrada) permite. Assim, não havendo a restrição imposta pela borboleta, o controle da potência desenvolvida se consegue variando a quantidade de combustível injetado. O motor diesel não trabalha numa relação ar/combustível (Lambda) específica como é o caso do motor de ciclo Otto. A relação depende da potência solicitada. Varia entre muito pobre, para baixa carga, e a estequiométrica, ou próximo dela, para plena potência.

A figura 7 mostra a variação na concentração dos gases em função do Lambda da mistura, salientando a faixa de funcionamento normal. No entanto, sob solicitação de torque, o motor funciona com mistura próxima da estequiométrica.

A adequação à rotação e carga é realizada controlando a quantidade de combustível injetada e não, ajustando o Lambda da mistura.



A figura 8 mostra a curva de potência típica em função da relação ar/combustível, a velocidade constante. Reparar que o desejável seria o funcionamento com baixas relações ar/combustível, onde a potência é máxima, mas, isso acarretaria a emissão de particulado em excesso.



Por não possuir borboleta de aceleração, o rendimento volumétrico (no motor diesel aspirado) em teoria, independe do regime de rotação e carga ao qual está submetido. A admissão de ar só é restrita pelo atrito com as válvulas, paredes do coletor e pelo filtro de ar.

Assim, um motor diesel aspirado, funcionando a 2000 rpm, admite praticamente, a mesma quantidade de ar independentemente do regime de carga. O que varia é a quantidade injetada de combustível. A relação ar/combustível da mistura não está dentro de uma faixa específica e é totalmente dependente da potência requerida.



**A sonda Lambda ou o sensor de O<sub>2</sub> de banda larga encontrado na maioria dos modernos sistemas de pós-tratamento para diesel, são utilizados para monitorar a composição dos gases de escape e não, para controlar a mistura.**

Já, no caso de um motor diesel turbo, sendo que a pressão de sobre-alimentação é resultado do processo de combustão, para uma mesma rotação, essa pressão e conseqüentemente, o enchimento dos cilindros, dependerá do estado de carga. Assim, com carga alta, a pressão de sobre-alimentação é maior o que resulta no aumento do rendimento volumétrico já que o ar admitido resulta mais denso e são eliminadas todas as perdas por fricção nas paredes do coletor e a restrição imposta pelo filtro de ar.



**O sensor MAP encontrado na maioria dos motores diesel com indução forçada é utilizado para evitar a injeção de combustível em quantidade maior que a necessária, no regime de carga baixa quando a pressão de sobre-alimentação é também, baixa.**

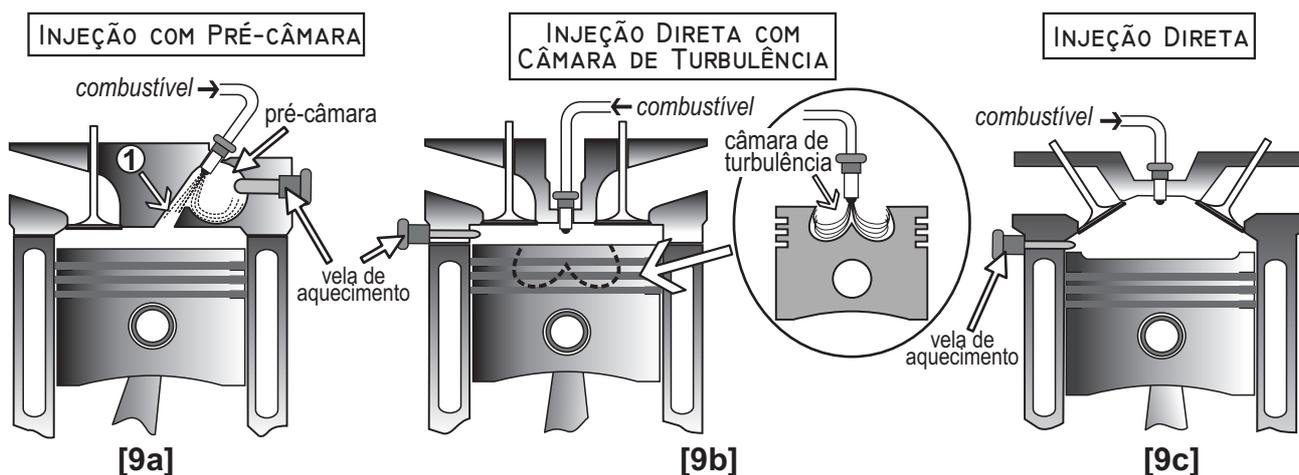
### ■ TORQUE EM MOTORES DIESEL

Tradicionalmente, os propulsores de veículos pesados são motores diesel. A razão reside no fato que estes desenvolvem um torque maior que similares de ciclo Otto. Nestes últimos, a combustão finaliza aproximadamente, 25° após o PMS. No caso de motores diesel, a combustão é mais demorada pelo que continua gerando pressão por um ângulo de giro maior do ciclo de expansão.

Um outro fator que contribui é que nos motores diesel, geralmente, o maior curso do pistão com relação ao diâmetro do cilindro, gera uma alavanca maior sobre o virabrequim.

### ■ TIPOS DE INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEL - CICLO DIESEL

Ainda existindo variações, os seguintes são os 3 tipos básicos de câmara de combustão:



▶ **Injeção com pré-câmara** (fig.[9a]): Emite menos NO<sub>x</sub> que no caso da configuração de injeção direta. O combustível é injetado na pré-câmara onde o alto turbilhonamento (agitação) produz uma queima que projeta um jato dentro da câmara principal o que favorece a combustão da mistura. A vela de aquecimento é utilizada para facilitar a partida.

▶ **Injeção direta com câmara de turbulência profunda** (fig.[9b]): Configuração principalmente utilizada em motores que trabalhavam com pressão de injeção moderada.

## CAPÍTULO 3 - Combustão e Emissões

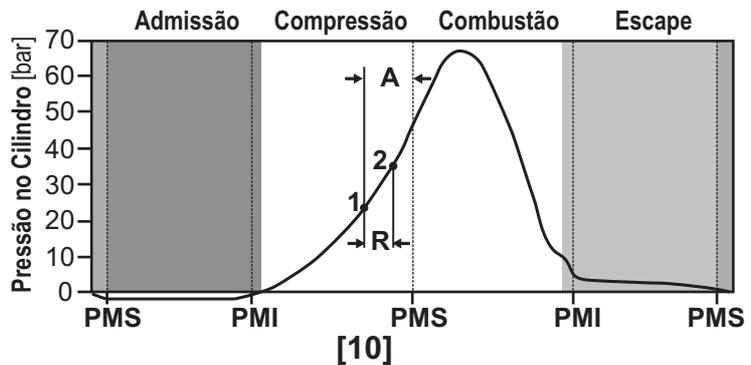
- ▶ **Injeção direta com câmara rasa** (fig.[9c]): Esta configuração é mais eficiente termicamente. Requer altas pressões de injeção. A injeção com alta pressão produz a diminuição do tamanho das partículas do combustível atomizado o que promove uma melhor mistura com o ar. Como resultado aumenta a eficiência térmica e diminui a emissão de particulado. Por outro lado, como será analisado em capítulo posterior, a injeção múltipla e as altas pressões permitem ter um funcionamento menos ruidoso.

### ■ RETARDO OU ATRASO DE IGNIÇÃO

Denominado também, **Retardo de Combustão**. A figura 10 mostra uma curva típica de como evolui a pressão dentro da câmara de combustão, durante as 4 fases de um ciclo diesel.

Dela surgem os seguintes fatores que caracterizam o processo de combustão nestes motores:

- ▶ Instante de começo da injeção do combustível (ponto 1) o qual é medido em graus de giro do virabrequim com relação ao PMS. É denominado “**avanço da injeção**” (A).
- ▶ Começo da combustão ou auto-ignição (ponto 2).
- ▶ Intervalo R (entre 1 e 2) denominado “**retardo de ignição**” ou “**retardo de combustão ou de inflamação**”. Constitui fator principal na diminuição do ruído característico do motor diesel e contribui decisivamente na estabilidade do processo de combustão.



Outro fator importante é a temperatura da câmara, necessária à auto-ignição, a qual deve superar os 600°C ou 700°C, no fim do ciclo de compressão. Isto, como resultado da compressão do ar admitido, que eleva a pressão na câmara, para a faixa de 30 a 40 bar.

### ■ CICLO DE COMBUSTÃO

A figura [11a] apresenta curva do ciclo de combustão com a evolução da pressão dentro do cilindro.

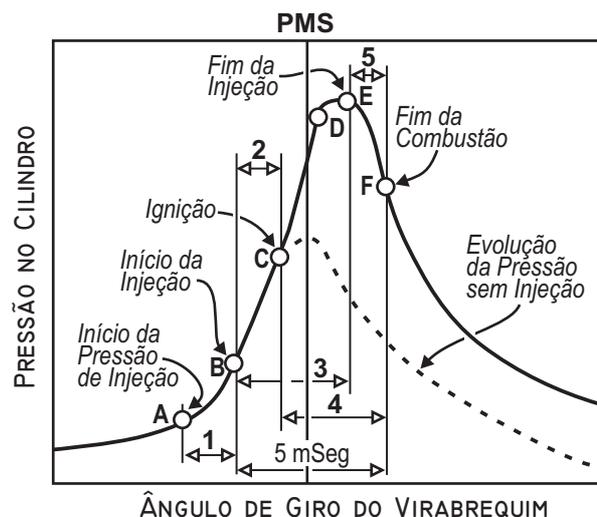
**Período A-B: Atraso de injeção.** A injeção do combustível não começa logo que a UC ativa o pulso de comando do injetor. Verifica-se uma demora devido a que o aumento de pressão na saída do injetor não é instantâneo. Ou seja, existe um tempo para a formação da pressão necessária no bico do injetor. Este atraso é mais evidente nos sistemas mecânicos e eletromecânicos com unidade injetora tipo UPS, por exemplo, onde o bico está separado da bomba. (ver Capítulo 9 “Tecnologias Avançadas – Ciclo Diesel”)

**Período B-C: Retardo de ignição.** Fase de combustão (oxidação) sem chama. A combustão não começa assim que o combustível é injetado. Durante este período, o combustível absorve calor se misturando com o ar em movimento turbulento até atingir a temperatura de ignição.

Nesta fase, as primeiras partículas de combustível se aquecem e oxidam com limitada produção de calor enquanto continua a acumulação combustível injetado, mas, sem queimar. Assim, o aumento de pressão nesta fase é devido unicamente, ao trabalho de compressão do pistão. Este atraso depende de fatores tais como:

- ▶ Tipo de injetor
- ▶ Pressão e temperatura na câmara no fim do ciclo de compressão
- ▶ Tipo de combustível
- ▶ Tipo de câmara de combustão

É desejável que o atraso seja o menor possível, mas, há fatores que limitam este tempo. O principal é o *índice cetano* do combustível (ver Capítulo 4, “Combustíveis”). Um *índice cetano* de 40 é considerado o mínimo sendo que índices maiores produzirão atrasos menores.



- [1]: Atraso de injeção
- [2]: Atraso de ignição
- [3]: Período de injeção
- [4]: Período de combustão
- [5]: Período de pós-combustão

[11a]

Atrasos longos implicam na posterior combustão abrupta o que leva ao aumento exagerado da pressão e conseqüentemente, da temperatura na câmara. Com isto verifica-se a tendência à detonação e aumento das emissões de NOx.

**Período C-D: Combustão rápida.** A massa de combustível acumulado entra em combustão de forma abrupta, o que provoca um rápido aumento da pressão. O combustível vaporizado tem partículas de diferentes tamanhos. Primeiramente, as menores entram em combustão gerando o calor necessário para a queima das maiores, resultando no rápido aumento da pressão. Esta fase é influenciada pelo atraso de ignição. Atrasos menores propiciam um aumento mais suave da pressão o que minimiza as emissões e o ruído gerado. A combustão nesta fase, depende de parâmetros tais como:

- ▶ Índice de cetano do combustível
- ▶ Temperatura de auto-ignição do combustível
- ▶ Avanço da injeção
- ▶ Pressão de injeção
- ▶ Tipo de câmara de combustão
- ▶ Tipo de injetor
- ▶ Taxa de injeção do combustível. Velocidade com que o combustível entra no cilindro

**Período D-E: Combustão controlada.** O combustível queima gradualmente, na medida em que continua a ser injetado. Neste período, a temperatura na câmara atingiu um nível tal que o combustível entra em combustão assim que é injetado. Durante esta fase, a pressão na câmara permanece quase constante devido a que o pistão desce e o volume da mesma aumenta equilibrando assim, a expansão dos gases resultantes da combustão que continua até o instante F, logo após o fim da injeção (E). Reparar que o máximo de pressão acontece depois do PMS, quando o pistão já começou a descer.

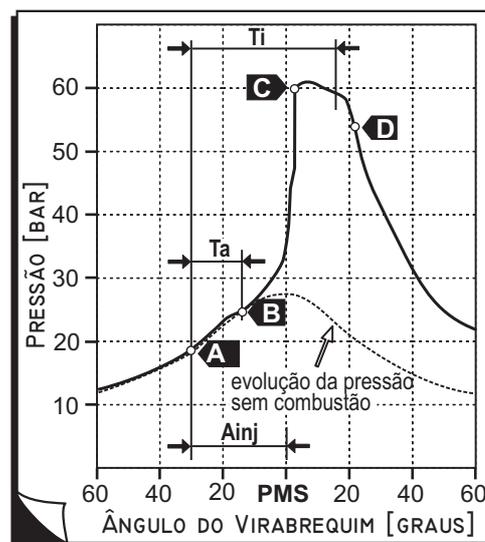
**Período E-F: Pós-combustão.** Nesta fase é queimado o combustível remanescente. O tempo entre o início da injeção (B) e o fim da combustão (F) é de aproximadamente, 5 mseg.

Complementando o explicado acima, a figura [11b] salienta especificamente, os parâmetros relevantes à combustão, na curva que relaciona (com valores típicos) a pressão na câmara com o ângulo do virabrequim.

1. **Atraso da ignição (Ta).** Fase de combustão (oxidação) sem chama (A-B). É da ordem de 15° a 20°. O ponto A indica o início da injeção de combustível e o ponto B, o instante da auto-ignição (início da combustão com chama). O intervalo **Ainj** é o **avanço da injeção**, ou seja, identifica o instante do início da injeção, em graus de giro do virabrequim antes do PMS. Geralmente, é da ordem de 20° a 30°. O intervalo **Ti** identifica a duração da injeção de combustível. É da ordem de 30° a 50°.

Verifica-se que quanto maior é o **atraso de ignição Ta**, mais abrupto é o aumento da pressão no intervalo B-C. Isto, devido à maior quantidade de combustível acumulado sem queimar durante a fase de atraso da ignição A-B. O resultado é o aumento do ruído produzido pelo motor.

2. **Combustão rápida (B-C).** A massa de combustível acumulado entra em combustão de forma abrupta, o que provoca um rápido aumento da pressão que, no ponto B é de aproximadamente, 25 bar.
3. **Combustão controlada (C-D).** O combustível, que continua a ser injetado, queima gradualmente.



[11b]

### ■ DETONAÇÃO

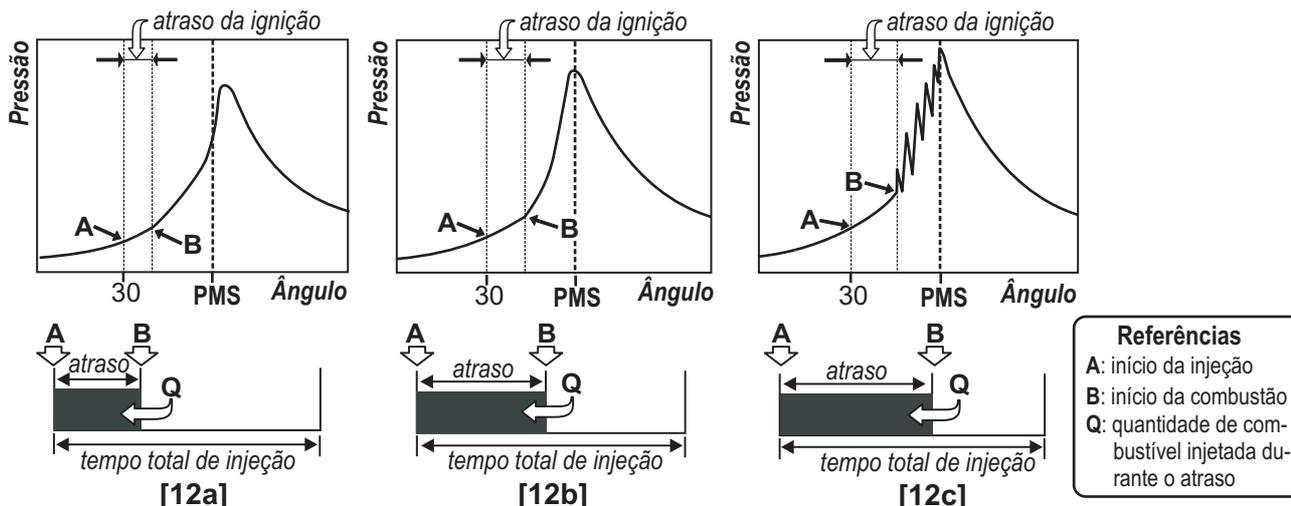
A quantidade de combustível que se acumula durante a fase de **retardo da ignição**, quando excessiva, dá origem a uma explosão violenta no início da combustão provocando o fenômeno de detonação. O que se deseja é a rápida auto-ignição do combustível inicialmente injetado na câmara, para que o injetado posteriormente não se acumule e queime bruscamente.

Quanto maior é o **atraso de ignição** (maior a quantidade acumulada) maior será a potência da explosão e conseqüentemente, mais significativa a detonação.

A detonação, tanto no motor ciclo Otto como no ciclo Diesel, ocorre pelo aumento excessivamente brusco da pressão. Assim como no motor ciclo Otto, a condição de detonação é particularmente perigosa também, no motor diesel.

## CAPÍTULO 3 - Combustão e Emissões

A figura [12] ilustra o apresentado acima.



- ▶ Figura [12a]: Atraso mínimo o que resulta numa quantidade acumulada de combustível que promove um aumento aceitável da pressão na segunda fase. Reparar que a pressão máxima acontece logo após o PMS favorecendo a ação da força exercida sobre o pistão.
- ▶ Figura [12b]: O aumento do atraso provoca um aumento acentuado da pressão na fase de combustão rápida. Neste caso, o máximo da pressão, coincidindo com o PMS, é indicação de que o pistão encontrou uma força oposta significativa já no fim do ciclo de compressão, o que poderá resultar em perda de desempenho e aumento do ruído produzido pelo motor.
- ▶ Figura [12c]: Devido ao atraso maior, a quantidade de combustível acumulada, quando em combustão, provoca aumento exagerado da pressão na câmara, com aparecimento do fenômeno de detonação.

O procedimento utilizado no motor diesel para evitar a detonação, consiste na diminuição do **atraso de ignição** através de providências tais como:

- ▶ Utilização de combustível com elevado índice de cetano o que resulta na ignição facilitada. Isto promove a diminuição da duração da fase de **atraso de ignição** e como conseqüência, um aumento menos acentuado da pressão na segunda fase.
- ▶ Pulverização conveniente do combustível injetado (injetores operando corretamente). Quanto melhor a pulverização tanto mais fácil resulta o processo de oxidação (reação do combustível com o oxigênio).
- ▶ Redução do **avanço de injeção  $A_{inj}$**  (fig.[11]). Com isto, o combustível só é injetado quando a compressão e temperatura na câmara são elevadas resultando no início mais rápido da combustão.
- ▶ Correta vedação da câmara. Isto, em função de que toda redução na compressão provoca um menor aquecimento do ar e conseqüentemente, falha de combustão ou combustão deficiente.