

## CAPÍTULO 9 - MOTORES DIESEL

### COMBUSTÃO EM MOTORES DIESEL

Embora as reações químicas, durante a combustão, sejam indubitavelmente muito semelhantes nos motores de ignição por centelha e nos motores Diesel, os aspectos físicos dos dois processos de combustão são bastante diferentes.

No motor de ignição por centelha em operação normal, o combustível está substancialmente no estado gasoso e o combustível, o ar e os gases residuais estão uniformemente misturados, no instante da ignição. A ignição ocorre em um ou mais pontos fixos e a um ângulo de manivela sujeito a controle preciso. A ignição é seguida pelo espalhamento de uma frente de chama definida, através da mistura, com velocidades mensuráveis. Exceto em um ponto da ignição ou em uma zona de detonação, a combustão, em qualquer ponto dado da mistura, é iniciada por meio de transferência de energia, ou de partículas energizadas, de um elemento adjacente que já está queimando; o período de combustão depende da taxa de ocorrência dessa transferência.

No motor Diesel, o ar, diluído por uma pequena fração de gás residual, é comprimido até uma relação de volume de 12 a 20, e o combustível, líquido, é borrifado no cilindro próximo ao ponto morto superior do pistão.

Como a pressão e a temperatura dos gases contidos no cilindro são muito elevadas no instante de injeção, alguma reação química, sem dúvida, tem início logo que a primeira gota de combustível entre no cilindro. Entretanto essa reação química começa de forma tão lenta que as manifestações usuais de combustão, a saber, a aparição de uma chama visível ou de uma elevação de pressão mensurável, ocorrem apenas após um período apreciável, chamado de período de atraso. Assim, para os motores Diesel, é conveniente definir-se a ignição como o momento em que aparece uma chama observável, ou quando a pressão começa a se elevar apreciavelmente devido à combustão.

### DEFINIÇÕES

**Período de injeção.** Período que decorre do início da pulverização no cilindro e o final do escoamento do bocal.

**Ângulo de injeção.** Ângulo de manivela entre o início e o fim da injeção.

**Período de atraso.** Período entre o início da injeção e o surgimento da primeira chama ou da elevação de pressão.

**Ângulo de atraso.** Ângulo de manivela correspondente ao período de atraso.

### AS TRÊS FASES DA COMBUSTÃO

Imagina-se a combustão em motores Diesel como ocorrendo em três estágios (Ricardo - Combustion in Diesel Engines, 03/1930), sendo o primeiro o período de atraso. O atraso é sempre grande, tal que, ao ocorrer a ignição, existe apreciável quantidade de combustível evaporado e dividido, bem misturado com o ar. Uma vez inflamado, este combustível tende a queimar-se rapidamente, devido a multiplicidade de pontos de ignição e à alta temperatura já existente na câmara de combustão. Considera-se esse período de rápida combustão como a segunda fase do processo. Após o período de combustão rápida, o combustível que ainda não foi queimado, juntamente com qualquer combustível subsequente injetado, queima com determinada taxa, controlada principalmente por sua habilidade de encontrar o oxigênio necessário para a combustão. Esta é a terceira fase da combustão.

**Período de atraso.** O período de atraso nos motores Diesel, freqüentemente chamado de atraso da ignição, corresponde aparentemente ao período de reações preliminares que ocorrem antes da aparição da chama na auto-ignição das cargas pré-misturadas. É aceito que o período de atraso nos motores Diesel pode incluir um período de aquecimento das gotículas de combustível, antes da ocorrência de qualquer reação química. Na avaliação dessa teoria, entretanto, deve-se lembrar que cada gotícula é envolvida pelo vapor, imediatamente após sua entrada na câmara de combustão. Por essa razão, parece que as reações devem iniciar-se no vapor que envolve as superfícies da gota quase simultaneamente à entrada de cada gota no cilindro. Tal visão é suportada pelo fato de que grandes variações nesses fatores, que deveriam afetar o período de aquecimento, tais como mudanças na espessura do jato de pulverização ou na volatilidade do combustível, tem pequeno efeito sobre o atraso.

Estudos sobre a combustão das gotículas de combustível no ar indicam que a ignição tem início na camada de vapor que envolve a gotícula, e que a taxa de combustão das mesmas é limitada por sua taxa de evaporação. A taxa de queima decresce com o decréscimo da fração de oxigênio no ar envolvente. Estas observações ajudam a explicar a ocorrência da combustão Diesel antes da evaporação completa das gotas.

**Atraso da ignição nos motores.** Através de experiências pode-se deduzir que, com dado combustível, o principal fator que influencia o atraso é a temperatura média dos conteúdos do cilindro durante o período de atraso. Nos motores, entretanto, existe outra influência forte sobre o atraso, a saber, o choque do jato de pulverização sobre as superfícies quentes. Se essas superfícies estão suficientemente quentes, pode-se obter reduções significativas no atraso.

**Período de combustão rápida.** A combustão, no período de combustão rápida, decorre principalmente da queima do combustível que teve tempo de se evaporar e se misturar com o ar durante o período de atraso. A taxa e extensão da queima durante este período são proximamente associados com a extensão do período de atraso e sua relação com o processo de injeção.

**Terceira fase da combustão.** É o período que vai da máxima pressão até o ponto em que a combustão é mensuravelmente completa.

Quando o ângulo de atraso é maior que o ângulo de injeção, o terceiro período de combustão envolverá apenas o combustível que não encontrou o oxigênio necessário durante o período de rápida combustão. Nesse caso, a taxa de combustão é limitada apenas pelo processo de mistura. Isso, por sua vez, é controlado pela relação entre o oxigênio e o combustível não-queimado e pela maneira como ambos são distribuídos e misturados no final do segundo período. Ainda que todo o combustível seja injetado bem antes do final do período de atraso, as características de injeção pobre podem estender o terceiro período razoavelmente no curso de expansão, provocando baixa potência e eficiência pobre.

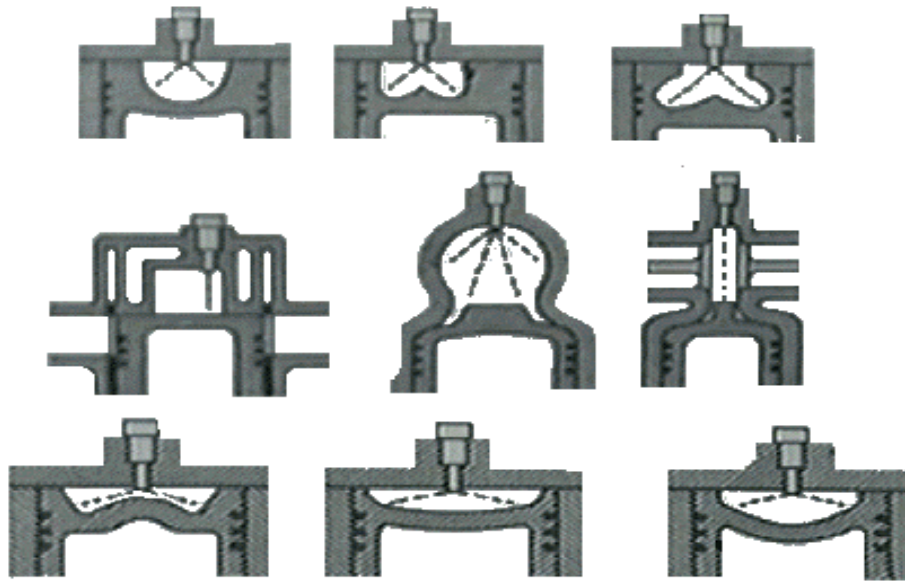
**Turbulência.** A resposta à velocidade do motor no segundo e terceiro estágios da combustão está provavelmente associada à turbulência da carga, como no caso da propagação da chama na ignição por centelha. Entretanto, no caso dos motores Diesel o efeito da turbulência deve estar mais associado ao processo de mistura do que à propagação da reação química. Nos caso em que a combustão tem início cedo, no processo de injeção, no uso de um forte turbilhamento, para provocar alta velocidade do ar, através da pulverização, provou ser bastante efetivo em assegurar certos estágios de combustão - segundo e terceiro.

## **PROJETO DA CÂMARA DE COMBUSTÃO NOS MOTORES DIESEL**

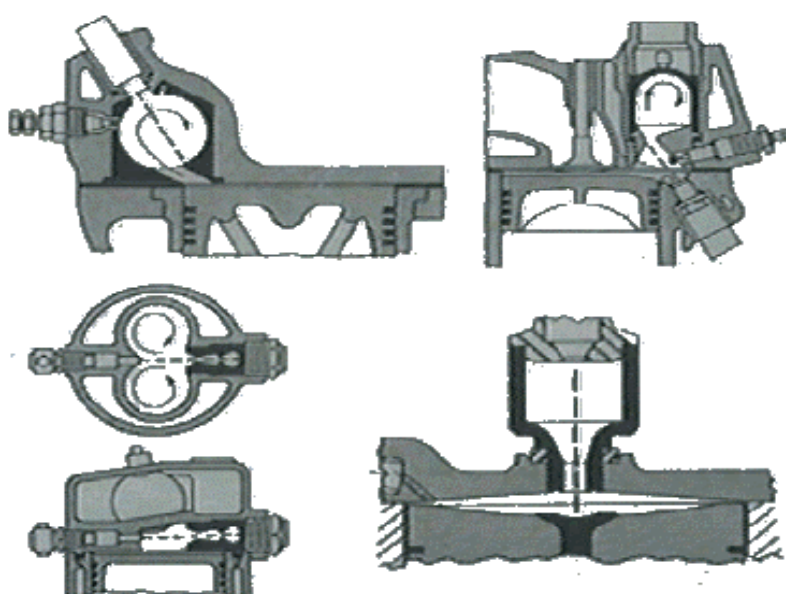
O processo de combustão no motor Diesel deveria ser controlado para evitar excessiva pressão máxima no cilindro e excessiva taxa de elevação de pressão, em termos de ângulo de manivela. Ao mesmo tempo, o processo deve ser tão rápido que, substancialmente, todo o combustível é queimado cedo no curso de expansão.

Para se chegar a estes objetivos, é conveniente dividir os motores Diesel em dois tipos:

**Motores de câmara aberta.** É aquele em que o espaço de combustão não incorpora restrições suficientemente pequenas para provocar grandes diferenças de pressão entre as diferentes partes da câmara durante o processo de combustão. Neste tipo, a mistura de combustível e ar depende inteiramente das características de pulverização e do movimento do ar, e não é vitalmente afetada pelo processo de combustão em si.



**Câmaras de combustão divididas.** É aquela em que o espaço de combustão é dividido em dois ou mais compartimentos distintos, entre os quais existem restrições, ou gargantas, pequenas o suficiente para que ocorram diferenças de pressão consideráveis entre eles durante o processo de combustão. Quando a queima do combustível inicia em uma câmara separada do pistão por meio de uma garganta, os motores de câmara dividida são freqüentemente chamados de motores de pré-câmara.



São características importantes dos motores com pré-câmara como as a seguir enumeradas:

- . Velocidade do ar extremamente alta através da garganta durante o curso de compressão, com turbulência intensa resultante e, também, na maioria dos casos, redemoinho na antecâmara;
- . O primeiro e o segundo estágios da combustão podem ser forçados a ocorrer em um espaço cuja estrutura é tão forte que pressões bem maiores e taxas de elevação de pressão mais altas podem ser toleradas nesse espaço, em comparação às permissíveis no espaço sobre o pistão;
- . O processo de mistura pode ser bastante acelerado pelos primeiros estágios do processo de combustão em si. Com elevadas pressões de A/C, a combustão é incompleta na antecâmara, devido ao ar insuficiente, e a alta pressão desenvolvida na primeira parte da combustão projeta o combustível não queimado, juntamente com os primeiros produtos da combustão, à outra parte da câmara com velocidades muito altas, provocando assim a rápida mistura com o ar no espaço sobre o pistão;
- . É usualmente possível permitir a toda a (ou parte da) da antecâmara operar a temperaturas muito elevadas, tendendo a reduzir o atraso, comparadas com as dos motores de câmara aberta que usam o mesmo combustível.

**Comparação das câmaras de combustão.** As principais vantagens atribuídas às câmaras divididas em comparação às abertas, são as seguintes:

- . uso de combustíveis de qualidades de ignição piores;
- . uso de injetores de furo simples, pressões de injeção moderadas e tolerância maior a incrustações no injetor;
- . emprego de razões A/C mais altas sem apresentar fumaça;

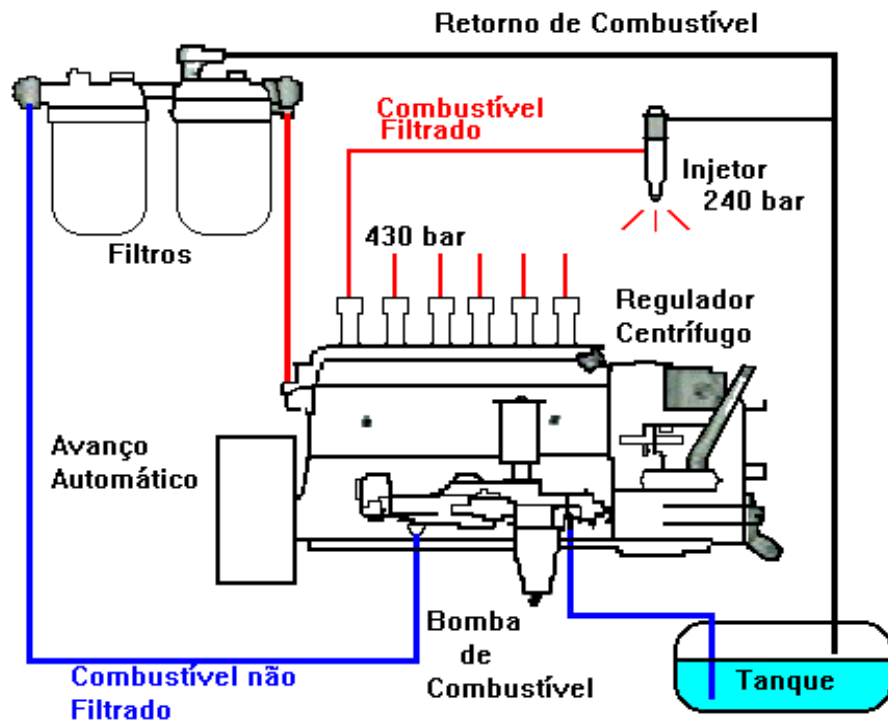
Contra estas vantagens, verificam-se as seguintes desvantagens:

- . construção dispendiosa do cilindro e/ou cabeçote;
- . partida a frio mais difícil, devido à maior perda de calor através da garganta;
- . pior economia de combustível devido às maiores perdas de calor e perdas de pressão através da garganta, que resultam em eficiência térmica mais baixa e maiores perdas de bombeamento.

## **SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO POR INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEL**

O motor de ciclo Diesel difere do motor de ciclo Otto basicamente em dois pontos: local de formação da mistura, feita no interior do cilindro, e o princípio de ignição, que é obtida por auto-ignição. Isso ocorre quando o combustível é injetado na câmara de combustão e encontra o ar aquecido.

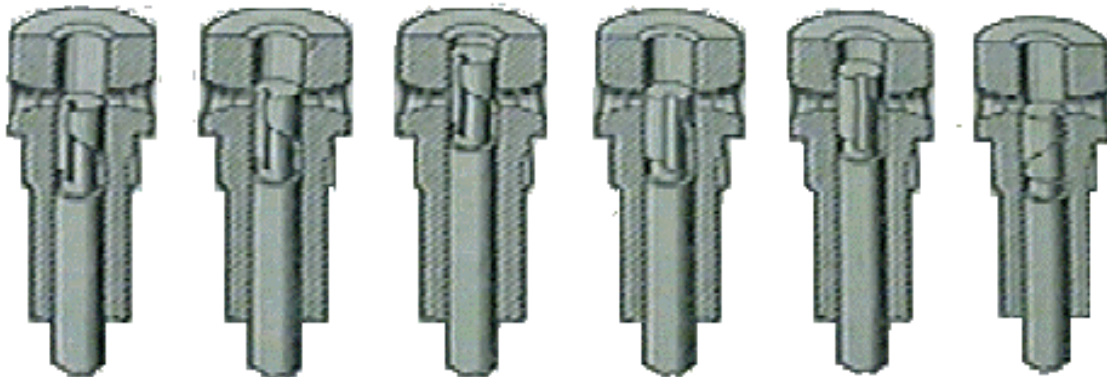
**Sistema de injeção.** Tem a função de fornecer a quantidade máxima de combustível necessária ao máximo rendimento do motor a cada instante.



**Bomba de injeção.** Mede exatamente a quantidade de diesel necessário para se obter o rendimento máximo em cada instante e envia esse combustível para os injetores a uma pressão determinada.

A bomba de alimentação envia o combustível à câmara de aspiração. Cada cilindro da bomba está em comunicação com a câmara de aspiração que fornece o combustível através de orifícios. O impulsor é acionado pelo excêntrico, obrigando o êmbolo a elevar-se. Ao subir, o êmbolo fecha o orifício de entrada de combustível. Neste instante começa a injeção de óleo através da válvula de descarga para o tubo que conduz ao injetor. Esta válvula está calibrada para abrir-se no momento que há pressão suficiente afim de que o combustível seja injetado no cilindro.

A quantidade de combustível que a bomba fornece ao motor é controlada fazendo rodar ligeiramente o êmbolo dentro do cilindro. Isto é possível, graças a um pinhão ligado a uma cremalheira, que por sua vez está ligado ao acelerador e ao regulador automático de velocidades.



O regulador automático de velocidades permite que a bomba envie para os injetores a quantidade de combustível requerida pela carga do motor a cada instante, para que o rendimento seja máximo, mas ao mesmo tempo impede que seja ultrapassada a velocidade de rotação determinada pelo projeto do motor. O regulador automático atua com o acelerador, mas sem interferir com ele.

São três os tipos principais de reguladores: os centrífugos ou mecânicos, os pneumáticos ou de vácuo e os hidráulicos.

**Injetores.** Tem a função de pulverizar o combustível e distribuí-lo na câmara de combustão. Podem ser de orifício único ou de multi-orifícios. A utilização de um tipo ou outro depende basicamente do desenho da câmara de combustão.