

Capítulo XIII

Motores de ignição espontânea

A importância dos motores de ignição espontânea deriva do fato que sua eficiência térmica é maior do que a de qualquer outra máquina térmica. Existem motores diesel com potências de 3 até 22.500 bhp, com diâmetros de pistões de desde 70 até 800 mm. A relação peso/potência varia entre 3 lb/bhp e 375 lb/bhp. Motores com cilindros de mais de 500 mm de diâmetro são, em geral, de dois tempos, predominando os de quatro tempos nos tamanhos menores.

As principais aplicações do motor diesel são: estações termo-elétricas até 10.000 KW; embarcações, onde o motor diesel é usado de preferência nas de tamanho pequeno e médio; transporte pesado como estradas de ferro, onibus e caminhões.

Na construção, os diversos tipos de motores diesel não diferem grandemente um do outro, a não ser no projeto da câmara de combustão e do equipamento de injeção. Por isso o estudo dos diferentes tipos de motores será desenvolvido considerando especialmente a câmara de combustão.

13.1 - Câmaras de combustão abertas

Quasi todos os motores diesel de grande tamanho .. (diâmetro dos cilindros acima de 200 mm) e muitos dos motores menores usam uma câmara de injeção direta ou câmara aberta. Nesses motores o combustível é injetado diretamente para a câmara de combustão, que é formada em parte pelo pistão. É, nesse caso, responsabilidade do sistema injetor a obtenção de uma mistura entre ar e combustível (a mistura é também favorecida pela turbulência). Usam-se, por isso, injetores com vários orifícios, que dirigem para o interior da câmara diversos jatos de combustível. Os injetores são localizados no centro da câmara de combustão e os jatos dispostos de maneira a não atingirem as paredes. Existem também motores com mais do que um injetor por cilindro, colocados diametralmente opostos ou tangencialmente, em relação à câmara de combustão.

A turbulência do ar não altera a direção dos jatos de combustível, porém arrasta consigo partículas do mesmo. O movimento do ar, em geral rotativo, é obtido por meio de uma disposição adequada das janelas ou válvulas de admissão. No caso de janelas, a orientação no plano horizontal forma um ângulo de 15° a 60° com a direção radial do cilindro; no plano vertical, os canais de admissão são orientados para cima, formando um ângulo de 45° a 60° com a horizontal, a fim de serem dirigidos para obter-se uma boa lavagem dos cilindros sem passagem direta para as válvulas (ou janelas) de escape. No caso de válvulas, obtém-se uma entrada tangencial do ar orientando-se o tubo de admissão convenientemente, ou então colocando uma "máscara" nas válvulas de admissão (fig. 13.1). Essa "máscara" consiste num pedaço de chapa soldado na parte superior da válvula de admissão que orienta o ar durante a entrada para a câmara. Essas válvulas necessitam de guias para impedir o movimento de rotação.

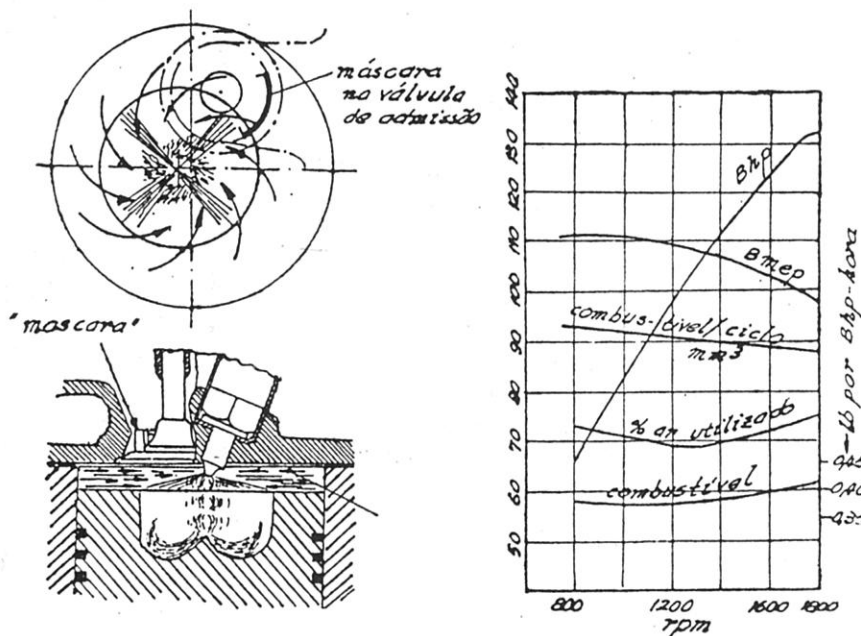


Figura 13.1

A turbulência do ar persiste durante o tempo de com

pressão e pode ser reforçada pela forma da câmara e do pistão. Na câmara mostrada na fig. 13.1, por exemplo, o ar é forçado radialmente para dentro à medida que o pistão se aproxima do PMS, aumentando-se assim a velocidade do ar (o aumento de velocidade é aproximadamente proporcional à razão entre os diâmetros do cilindro e da câmara de combustão.

A turbulência criada durante os tempos de admissão e compressão é chamada "turbulência primária". Uma vez iniciada a combustão, a turbulência pode ser aumentada pela mesma, o que se denomina de "turbulência secundária". Nos motores de câmara aberta o movimento de ar é principalmente devido à turbulência primária.

Nos motores a dois tempos procura-se obter uma corrente de lavagem numa única direção. Isso favorece a formação da turbulência bem como melhora a lavagem do cilindro. As soluções possíveis são janelas de admissão combinadas com válvulas de escape na cabeça (motor GM) ou então dois pistões de movimentos opostos no mesmo cilindro, sendo que um descobre as janelas de admissão e o outro as de escape. Essa solução permite que se fechem as janelas de escape antes das de admissão, o que se consegue mediante um defasamento da rotação de um girabrequim em relação ao outro. Nos motores em que tanto as janelas de admissão como as de escape são descobertas pelo mesmo pistão, a abertura antecipada das janelas de escape (necessária) implica em fechamento tardio das mesmas, prejudicando a eficiência volumétrica. Fechando-se as janelas de escape antes das de admissão, obtém-se pressão maior do que a ambiente por meio da bomba de lavagem, o que não seria possível se as janelas permanecerem abertas.

Todos os motores a dois tempos necessitam de bomba de lavagem. O tipo mais comum é o compressor "Roots" (fig. 13.2). Esses compressores mantêm uma pressão de 2,5 a 7 ... lb/sq.in no tubo de admissão, a plena velocidade.

Motores diesel de câmara aberta têm eficiências térmicas elevadas, pois a forma compacta da câmara de combustão reduz a perda de calor. Quando se trata de motores grandes e de baixa rotação, o combustível pode ser barato, pois há bastante tempo para permitir um retardamento relativamente grande, e as pressões não crescem muito rapidamente, pois a injeção pode ser lenta. Esses motores de grande tamanho em

geral operam em rotação constante, devido às grandes forças de inércia envolvidas.

Por outro lado, quando esses motores operam em velocidades médias ou altas, as pressões máximas atingidas na câmara podem ser elevadas, agindo diretamente nos pistões e mancais. As pressões de injeção precisam ser elevadas para que se possa obter uma boa atomização. O problema de injeção se complica quando se pretende operar em rotação variável. Os inje-

toretos, que necessitam de muitos orifícios, sendo cada um de tamanho reduzidíssimo, podem ser obstruídos por depósitos de carvão, prejudiciais a uma boa pulverização. Essas objeções não são válidas se o motor é operado por pessoal competente, que faz inspeções periódicas e manutenção preventiva. Isso faz o motor diesel de câmara aberta a máquina ideal para grandes produções de potência.

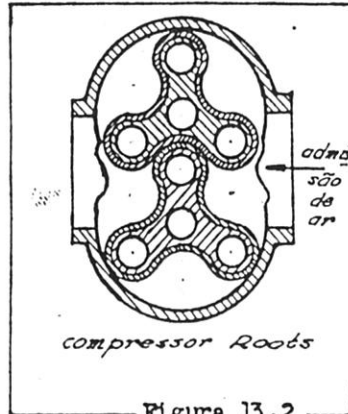


Figura 13.2

13.2 - Câmara de Pré-combustão

Nos motores diesel com câmara de pré-combustão o volume disponível é dividido entre duas câmaras que se comunicam através de uma passagem estreita. A pequena câmara chama-se câmara de Pré-combustão e usa de 25 a 40% do volume total; o restante incorpora a câmara principal.

O combustível é injetado na câmara de pré-combustão. O choque inicial devido à combustão é amortecido e usado para expelir a mistura parcialmente queimada da antecâmara, injetando-a com alta velocidade na câmara principal. A turbulência secundária permite ao combustível encontrar o ar e queimar.

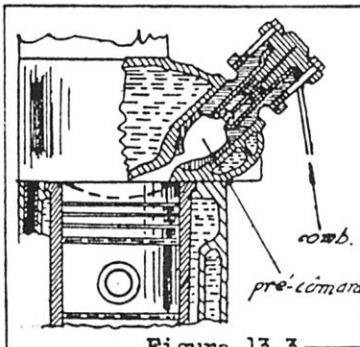


Figura 13.3

Uma das maiores vantagens dessa construção é a pequena exigência em relação ao sistema de injeção. Os bicos injetores podem ser menos precisos e as pressões de injeção inferiores em relação a aquelas dos motores de câmara aberta (motor de antecâmara: cerca de 50 atm de pressão de injeção; motor de câmara aberta: cerca de 150 atm).

Nas câmaras de pré-combustão existe geralmente turbulência intensa (primária) antes do início da injeção. Na ocasião da injeção, a combustão se inicia quando a ponta do jato atinge a região próxima ao bocal de saída da antecâmara. De lá a chama se propaga rapidamente em direção do injetor, causando uma elevação de pressão na antecâmara e conseqüente expulsão dos gases.

Os gases, constituídos principalmente de combustível não queimado, encontram o ar necessário à combustão na câmara principal, onde a turbulência secundária é elevada devido à grande velocidade de expulsão. A combustão continua na câmara principal, causando uma rápida elevação de pressão e fazendo por vezes voltar parte dos gases para a antecâmara. A combustão termina logo após o atingimento da pressão máxima, ficando porém em alguns motores uma chama residual até 40° ou 50° do girabrequim.

Estimativas e ensaios indicam que aproximadamente 80% da energia de combustão é liberada na câmara principal, ficando os 20% restantes para a antecâmara. É por isso que o sistema de injeção tem sua função praticamente substituída pela descarga proveniente da antecâmara. Constatou-se até que é preferível um bico injetor que não pulverize demasiadamente o combustível, sendo que alguns fabricantes modificaram seus motores nesse sentido. A explicação disto reside no fato que uma pulverização muito fina utiliza, para a combustão, todo o ar da antecâmara, elevando a temperatura e provocando a formação de carbono livre, aldeídos e outros produtos da combustão incompleta que, quando expelidos para a câmara principal, dificilmente queimam. Quando a pulverização é menos completa, a combustão se dá nas vizinhanças do bocal de saída da antecâmara somente, aumentando a pressão e expelindo produtos não queimados. Uma parte de ar e de combustível permanece até o fim da injeção, quando é finalmente entra em combustão, ajudando a expelir o restante dos gases.

O índice de cetanas do combustível usado não deve ser muito elevado, pois uma combustão muito suave (retardamento pequeno) pode fazer com que não haja suficiente elevação de pressão para promover a expulsão eficiente dos gases da antecâmara. O índice de cetanas mais adequado é determinado experimentalmente.

O funcionamento da câmara de pré-combustão pode ser apreciado na fig. 13,4, onde se registraram os resultados de ensaios feitos num motor de 1 cilindro, com antecâmara, operada com ou sem restrição na saída para a câmara principal.

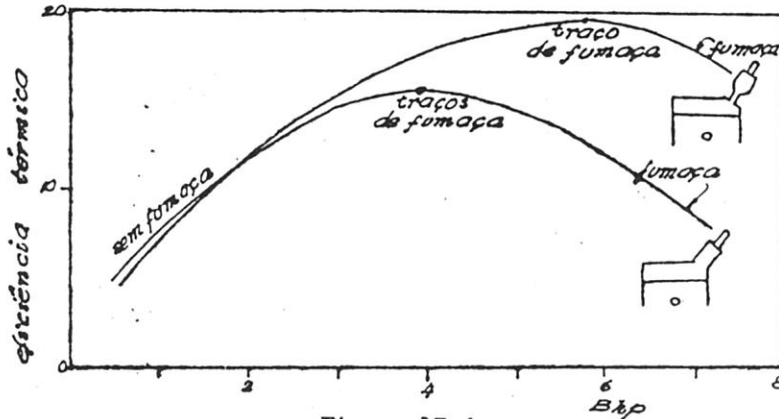


Figura 13.4

Verifica-se que em cargas baixas, a turbulência secundária é dispensável e a ausência de restrição faz aumentar o rendimento. Entretanto, em potências mais elevadas, a deficiência do sistema de injeção, que não foi projetado para funcionar com câmara aberta, fica evidente. A perda em potências baixas deriva da energia de combustão que foi transformada em turbulência, desnecessariamente.

A operação do motor é influenciada por:

- a- Volume da antecâmara
- b- O tamanho, formato e localização da comunicação entre a antecâmara e a câmara principal de combustão
- c- As características do sistema de injeção
- d- As características do combustível
- e- A rotação do motor
- f- A carga do motor.

Devido ao grande número de variáveis, fixam-se as proporções da antecâmara para uma operação boa na potência e rotação máximas. Essas proporções são determinadas experimentalmente.

Como a quantidade de ar contida na câmara de combustão é pequena, a energia libertada pela combustão na mesma tende a ser constante independente da carga, porém variável com a rotação. Por essa razão a temperatura da câmara é função unicamente da rotação. Um aumento de rotação aumenta a turbulência primária, e a pressão de injeção, e o retardamento da ignição tende por isso a ser constante, independente da rotação.

Procura-se dirigir o jato de gases que sai da antecâmara para o centro do pistão, a fim de obter expansões térmicas uniformes.

As vantagens do diesel de antecâmara são:

1. Uma grande seleção de combustíveis pode ser usada, sem afetar o desempenho de maneira crítica;
2. Pouca necessidade de manutenção e com isso um baixo custo de manutenção devido a:
 - a) pressão de injeção baixa,
 - b) injetores simples, de orifício único, que não precisam pulverizar o combustível de uma maneira apreciável,
 - c) pressões baixas na câmara principal, pois a elevação inicial intensa da pressão é absorvida na antecâmara. Isso diminui as pressões nos mancais.

As desvantagens são:

1. Perda de calor elevada devido a:
 - a) grande superfície das duas câmaras
 - b) grande velocidade da turbulência;
2. Perda de pressão devido ao estrangulamento da passagem entre as duas câmaras;
3. Partida difícil, pois a grande área das câmaras esfria os gases, o que é agravado pela grande velocidade do ar ao passar de uma câmara para outra;
4. A combustão tende a ser mais lenta, o que aumenta a perda devido ao afastamento da transformação a volume constante.

As vantagens do motor com antecâmara ficam prepon-

derantes especialmente quando ele deve operar sem manutenção preventiva.

13.3 - Câmara turbulenta

Na câmara de combustão turbulenta usa-se principalmente a turbulência primária para formar uma mistura homogênea do ar com o combustível. Na fig. 13.5 pode-se observar um exemplo dessas câmaras que ocupam 50 a 90% do volume total das câmaras. A abertura para o pistão e o cilindro é relativamente grande. O ar na câmara tem um movimento circular, o que facilita a mistura com o combustível. Como a câmara é pequena não há necessidade de grande penetração do jato de combustível, embora seja desejável uma boa pulverização. Um bico injetor fechado é o mais indicado para esse caso.

Os motores que usam esse tipo de câmara têm propriedades intermediárias entre o motor de câmara aberta e o de antecâmara. São adequados para operação em rotação variável pois a turbulência primária varia bastante com a velocidade.

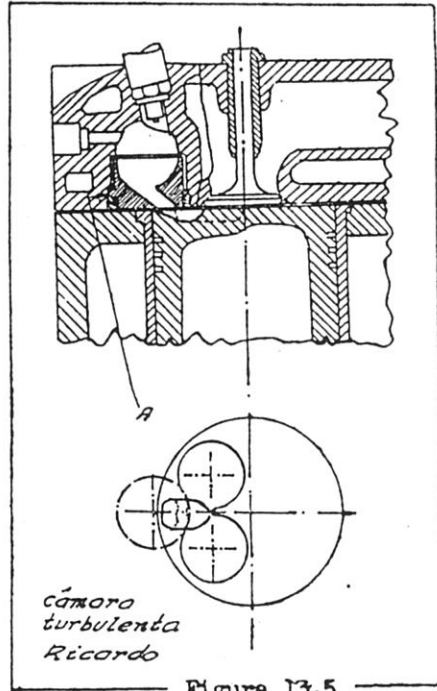


Figura 13.5

13.4 - Célula de ar

Um diesel com célula de ar é essencialmente um diesel de câmara aberta ao qual foi acrescentado uma célula pequena (cerca de 5% do volume da câmara).

Nessa célula acumula-se ar comprimido durante o tempo de compressão, aumentando sua pressão durante o início da combustão. Quando a pressão no cilindro cai, a pressão mais alta da célula dirige um jato de ar para o bico injetor a fim

de completar a combustão final do combustível.

Nesses motores usam-se relações de compressões elevadas. O comportamento do motor e suas vantagens e desvantagens são similares aos motores de câmara aberta.

13.5 - Célula de energia

É uma combinação da antecâmara de pré-combustão com a célula de ar (fig. 13.6), também chamada câmara de Lanova.

O funcionamento da câmara depende da passagem do jato do bico injetor para dentro da célula de energia, que possui cerca de 10% do volume total da câmara. A combustão inicia-se na câmara principal, estendendo-se em seguida para a célula de energia, onde a alta pressão inicial é armazenada. Quando a pressão no cilindro diminui, a pressão maior da célula de energia dirige um jato para o bico injetor a fim de completar a combustão. Pode-se comparar a célula de energia com uma antecâmara de pré-combustão, pois, em ambas, a combustão dá-se nas proximidades da passagem entre as câmaras. A parte maior da célula de energia serve para acumular pressão proveniente da parte menor.

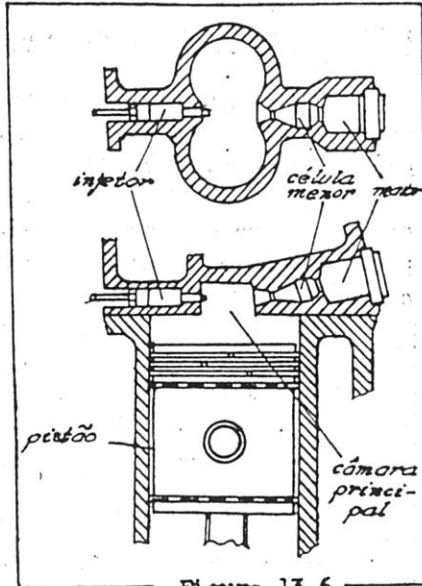


Figura 13.6

A célula de energia descarrega para uma câmara principal em forma de "8", ou então circular com entrada tangencial. A descarga provoca uma turbulência secundária circular na câmara principal.

Os motores que usam esse tipo de câmara conseguem uma combustão muito completa, o que evidencia o pequeno excesso de ar a plena carga. A partida é fácil, pois a combustão inicia-se na câmara principal onde os gases são mais quentes; isso permite o uso de relações de compressão menores - 1.15 a 1.13 compatíveis com partidas elétricas. Por outro la

do, paga-se um preço pelas vantagens, pois o ajuste do bico injetor deve ser preciso a fim de introduzir combustível pelo bocal da célula de energia; a duração da combustão é maior do que num diesel de câmara aberta e a turbulência é alta, o que causa um consumo específico ligeiramente maior. O motor é adequado para altas rotações.

13.6 - Comparação dos diversos tipos de câmaras

Existem poucos dados precisos sobre ensaio de motores e aqueles publicados pelos fabricantes foram obtidos, em geral, com condições diferentes (correção da umidade, pressão ambiente, potência dos acessórios, etc.). Na tabela que segue pode-se observar a atual frequência de uso de cada tipo de câmara e os tamanhos e características dos motores em que são usados.

Elemento de comparação	Câmara de Pré comb.	Câmara Aberta	Câmara Turbulenta	Célula de Ar	Célula de Energia
Limite de velocidade rpm	2000	1200 1800*	2600	1800	3000
Limites de cilindra- da por cilindro	37-283	169-71*	46,5	31-127	26-282
Bmp obtido (psi)	60-79	70-85	80-110	80-86	80-105
Relação de compres.	14-17	13-17	15-16	15-16	13-16
Nº de furos no inj.	1	5-7	1	1	1
Nº de fabricantes	4	5	4	2	7
Nº de motores anali- sados	11	5	10	3	11

* Para motores 2T

13.7 - Motores diesel para uso com óleo diesel e gás simultaneamente

Em muitas localidades, o gás natural é o combustível de preço mais baixo, e quasi sempre o preço por caloria

do gás é menor do que o preço por caloria de óleo diesel. Por essa razão um motor que consome gás ao invés de óleo tem uma vantagem econômica sobre os outros.

Entretanto os motores a gás funcionam geralmente como motores a explosão, com relações de compressão, e portanto rendimentos menores do que os motores diesel. Procurou-se, por isso, construir motores a gás que funcionassem com relações de compressão maiores. Uma das possíveis soluções é o motor de carga estratificada; outra, um motor que funcione com mistura extremamente pobre, tão afastada da estequiométrica que se possam usar altas relações de compressão sem que ocorra detonação. O maior problema num motor desse tipo é a ignição, pois não basta uma vela para iniciar a combustão numa mistura muito pobre. A propagação da chama também se torna muito lenta.

No motor a gás, a mistura pobre de gás é comprimida a uma pressão alta e a combustão é iniciada pela injeção de pequena quantidade de óleo diesel. A mistura na vizinhança das gotas de óleo torna-se mais rica e a combustão se inicia suave e rapidamente. Uma quantidade de frentes de chama, que se propagam individualmente, é estabelecida; consegue-se assim combustão satisfatória até uma relação ar/gás em peso de 40 para 1.

É interessante notar que a combustão, nesses motores, inicia-se como no diesel e propaga-se como no motor a explosão.

A fig. 13.7 mostra dois tipos de motores da Cooper-Bessemer Corporation. No primeiro, de dois tempos, tanto o gás quanto o óleo são injetados diretamente para dentro da câmara de combustão. A injeção do gás começa logo que se fecha a janela de escapamento, à pressão baixa (25 a 50 psi), enquanto que a descarga de óleo é feita no instante adequado para o início da combustão. No motor de quatro tempos, o gás é descarregado continuamente para o tubo de admissão, sendo admitido somente quando a válvula se abre. A potência do motor é regulada pela variação de pressão do gás.

A evolução dum motor de combustível duplo fabricado pela Fairbanks, Mor. é ilustrada na fig. 13.8. Os primeiros motores tinham um consumo específico elevado em potên

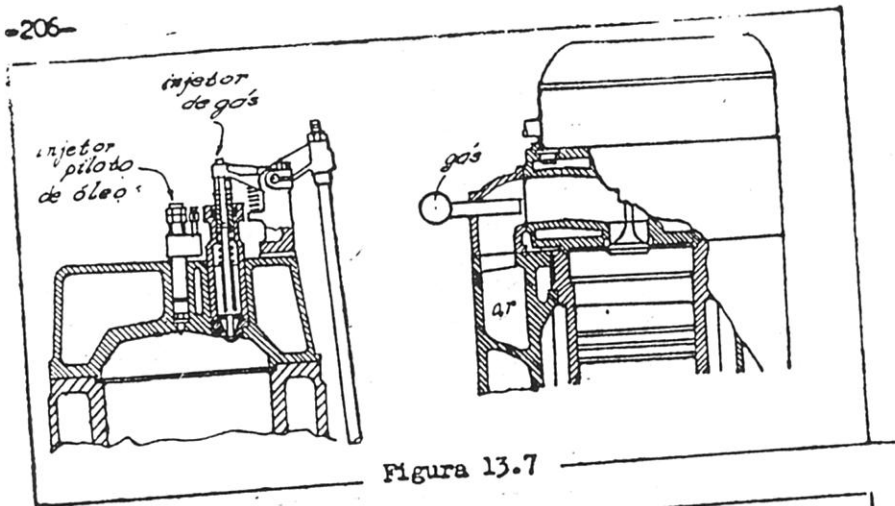


Figura 13.7

cias baixas, pois a mistura tornava-se excessivamente pobre; as chamas chegavam a extinguir-se durante a propagação, perdendo-se assim gases não queimados, pelo escapamento (curva AB). Num tipo posterior foi colocada uma borboleta para reduzir a quantidade de ar em potências baixas, o que resultou na curva CB. Posteriormente aperfeiçoamentos da câmara de combustão permitiram obter a curva EG, que quasi se confunde com a curva FG, correspondente ao mesmo motor operando como diesel convencional.

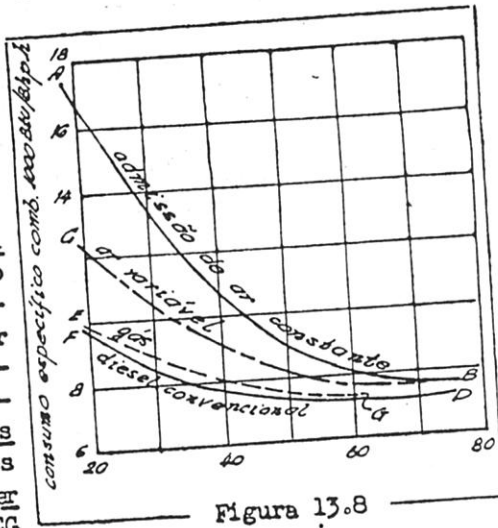


Figura 13.8

Alguns motores para combustível duplo permitem passar de um combustível para o outro enquanto estão em operação. Assim passam de diesel convencional para um motor a gás que usa óleo diesel somente como chama piloto. Em cargas reduzidas um aumento da quantidade de óleo injetada melhora o consumo específico. Há até dispositivos que permitem a passagem de gás para óleo diesel automaticamente, quando faltar gás. São necessários também dispositivos que parem o motor

quando não houver pressão de óleo combustível, pois a falta deste pode provocar explosões, no escapamento, provocadas pelo gás que não se queimou por falta de ignição. Motores que operam com dois combustíveis usam, em geral, duas bombas: uma grande para injetar óleo diesel para operação com óleo somente, e outra pequena para injetar óleo para a chama-piloto, quando se usa gás. A bomba grande em geral não se presta para as quantidades pequenas usadas na chama-piloto. Há construções especiais de bombas duplas.

A deficiência dos motores de combustível duplo em cargas reduzidas fez uma fábrica de motores projetar um Diesel no qual tanto o óleo como o gás são injetados simultaneamente um pouco antes do PMS. O sistema é semelhante aos antigos motores de injeção por ar comprimido, só que o ar foi substituído por gás comprimido a 1.100 lb/sqin.

Uma curva que compara os diversos motores a gás e os diesels convencionais pode ser vista na fig. 13.9. Em plena carga o motor de combustível duplo supera o diesel (combustão de todo o ar),

mas em cargas menores as curvas se cruzam. Pode-se observar a grande vantagem que se obtém sobre os motores a gás de explosão.

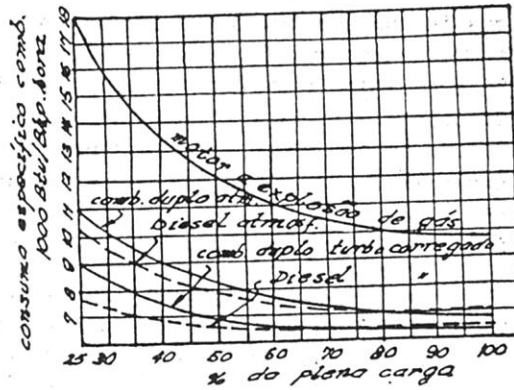


Figura 13.9

13.8 - Dispositivos de partida

Os dispositivos de partida mais comumente usados em motores grandes funcionam a ar comprimido. Para isso armazena-se uma grande quantidade de ar comprimido num tanque. Um pequeno compressor reabastece o tanque, quando o motor está em funcionamento. O ar entra nos cilindros através de válvulas especiais, comandadas pneumáticamente para abrirem no PMS do tempo de compressão. Em geral todos os cilindros

têm válvulas para que sempre haja uma válvula aberta. Motores de 2 ou 3 cilindros podem necessitar que se vire o eixo de manivelas para uma posição adequada antes de dar-se a partida no motor. A pressão usada varia entre 100 e 600 psi. A capacidade de ar armazenada deve permitir virar o motor um grande número de vezes.

Motores com célula de ar têm, às vezes, válvulas que permitem fechar a célula a fim de aumentar a compressão; obtém-se assim maiores temperaturas e partida mais fácil.

Outros dispositivos auxiliares de partida são bicos incandescentes ou resistências elétricas. Os bicos incandescentes são às vezes acesos por fósforos e posteriormente rosqueados para dentro da câmara de combustão. As resistências elétricas são mais práticas, porém sua duração é limitada quando sujeitas continuamente ao calor da câmara de combustão; podem ser colocadas no tubo de admissão para aquecer o ar que entra. Quando usadas na câmara de combustão, funcionam como pontos quentes para início da combustão.

Motores pequenos usam partida elétrica. Às vezes um dispositivo comprime a válvula de admissão a fim de diminuir o conjugado necessário, permitindo fazer uso da inércia do volante. Assim também se dá a partida com a manivela.

Alguns motores fazem uso de um pequeno motor a gasolina, que por sua vez é acionado por uma corda. O acoplamento entre o diesel e o motor a gasolina é feito por intermédio de um redutor e uma embreagem.

Um motor singularmente interessante é fabricado pela International Harvester. Um sistema constituído de válvulas e alavancas aumenta a câmara de combustão, diminuindo a relação de compressão para 5:1; ao mesmo tempo fecha a entrada normal do ar, abre a passagem para um carburador e engata o acionamento de um magneto. O motor parte assim como motor a gasolina e depois de cerca de 700 rotações completadas, passa automaticamente para operação diesel.