

Capítulo VII

Influência das características dos motores sobre a detonação (knock)

7.1 - Generalidades

Já vimos no capítulo III que os fatores que controlam a autoignição são os seguintes:

- 1- Temperatura
- 2- Densidade
- 3- Tempo (retardamento da ignição)
- 4- Relação AC
- 5- Material suplementar (gases inertes, catalizadores, aditivos, etc.)
- 6- Turbulência (afetando a homogeneidade da mistura).

Vimos também que as batidas originadas pela detonação são devidas à autoignição, tanto nos motores de combustão por faísca como nos de combustão espontânea. A diferença fundamental é que naquele a autoignição ocorre no fim da combustão, enquanto que neste ela ocorre no início.

7.2.- Batidas no motor a explosão

Afim de evitar a autoignição nos motores de explosão, deve-se ter, na mistura que queima por último (mais afastada da vela), as seguintes propriedades:

- a- Uma temperatura baixa
- b- Uma densidade pequena
- c- Um retardamento de ignição grande
- d- Uma mistura afastada da estequiométrica.

Passemos a analisar cada um desses fatores, separadamente.

Temperatura. A temperatura pode ser aumentada por qualquer um dos seguintes fatores, com aumento da possibilidade de detonação:

- 1- aumento da compressão ou sobrealimentação
- 2- aumento da temperatura do ar admitido
- 3- aumento das temperaturas do refrigerante
- 4- aumento da temperatura das parcelas dos cilindros e da câmara de combustão
- 5- abrindo o acelerador
- 6- avançando a faísca.

Deve-se ter em mente que aumentar a abertura da boleta (aceleração) não influi sensivelmente na temperatura dos gases queimados (ver exercícios nrs. 3 e 4, cap. V). No entanto, a temperatura das paredes aumenta com a aceleração, pois na realidade as transformações não são adiabáticas e o calor perdido aumenta quanto maiores forem as energias em jogo.

Quando se adianta a ignição, os gases são comprimidos enquanto estão queimando, fazendo com que a temperatura e também a densidade da mistura aumentam radicalmente. Por isso a possibilidade de ocorrer detonação aumenta com o avanço da faísca e diminui com o retardamento da mesma.

No projeto de um motor devem-se considerar as circunstâncias que poderão provocar temperaturas elevadas e autoignição. Assim a válvula de escape, que está sujeita a altas temperaturas (cerca de 600°C) deve ser colocada de preferência próximo da vela ou, de qualquer maneira, longe da região onde se dá o fim da combustão. Pode-se esfriar a parte

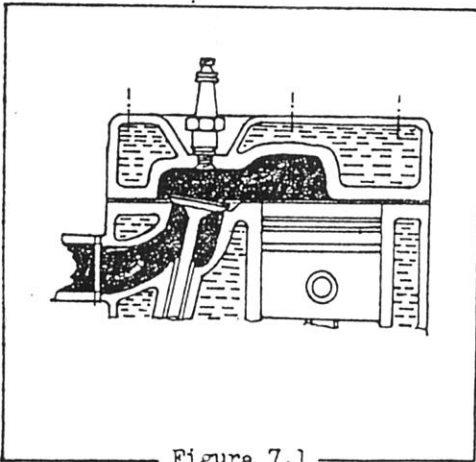


Figura 7.1

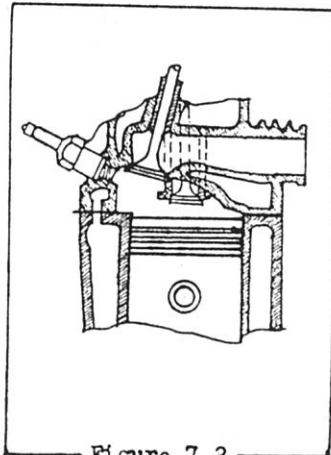


Figura 7.2

final da mistura, para evitar a autoignição, diminuindo-se a altura da câmara de combustão em sua região final, oferecendo assim maior superfície para resfriamento dos gases.

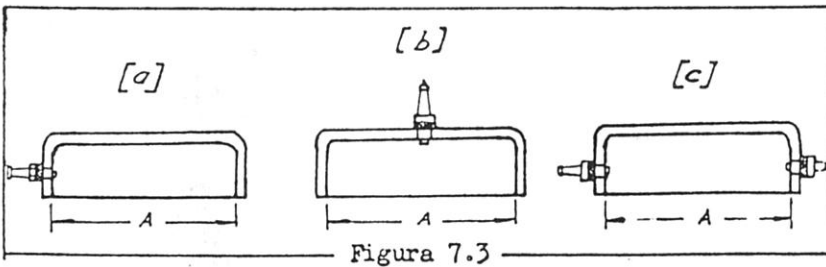
Densidade. A densidade aumenta ao:

- 1- abrir a borboleta
- 2- sobrealimentar o motor
- 3- aumentar a compressão
- 4- avançar a faísca.

Tempo. Aumentando-se o tempo em que a mistura está sujeita à autoignição, tem-se, por um dos fatores seguintes, maiores possibilidades de "batidas":

- 1- Aumentando a distância que a chama deve percorrer;
- 2- Diminuindo a turbulência e com isso a velocidade de propagação da chama;
- 3- Diminuindo a rotação do motor, o que faz diminuir a turbulência e aumentar o tempo de duração da combustão.

Pode-se influir na distância que a chama deve percorrer escolhendo-se lugares convenientes para a vela: uma vela colocada no centro da câmara reduz a distância a ser percorrida pela metade; uma vela em cada extremidade tem efeito semelhante (ver fig. 7.3).



Abaixando-se as alturas das câmaras das regiões finais, consegue-se também uma diminuição do percurso concentrando uma maior parte do volume da câmara sobre uma área menor (ver figs. 7.1 e 7.2).

Composição da mistura. Uma mistura estequiométrica tem:

- 1) pequeno retardamento
- 2) baixa temperatura de autoignição.

Para potências elevadas usam-se misturas ricas, a fim de conseguir:

- 1) o resfriamento da mistura pelo excesso de gasolina
- 2) a diminuição da afinidade química da mistura.

O resfriamento da mistura pode também ser conseguido usando excesso de ar, ou seja, misturas pobres; nesse caso a reação química é menos rápida pois houve um afastamento da mistura estequiométrica. O uso de misturas pobres somente é possível quando se pode obter um excesso de ar, o que não sucede nas potências elevadas ou máximas (justamente limitadas pela capacidade do motor de aspirar ar). Outro problema é conseguir uma combustão estável, devido a desuniformidade na distribuição da mistura pelos tubos de admissão (alguns cilindros recebem mistura mais rica, outros mais pobre). Essas razões fazem com que o uso de misturas pobres fique reservado a motores mais aperfeiçoados, como, por exemplo, motores de avião.

7.3 - "Batidas" no motor de ignição espontânea (motores Diesel)

Nesses motores a combustão é iniciada por autoignição. A batida decorre da queima repentina do combustível acumulado durante o retardamento. Esse retardamento depende de:

- a) densidade e temperatura do ar no cilindro
- b) maneira pela qual o combustível foi pulverizado pelo sistema de injeção
- c) propriedades do combustível, como volatilidade e viscosidade, que influem nas características da injeção
- d) turbulência do ar que provoca a mistura.

Além disso, a rapidez com que é injetado o combustível durante o retardamento químico e físico, vai influir na quantidade de combustível que poderá reagir explosivamente.

Para reduzir a possibilidade de detonação num motor Diesel, deve-se ter:

- A- uma temperatura elevada
- B- uma grande densidade
- C- um retardamento pequeno
- D- uma mistura próxima da estequiométrica.

A- Temperatura. Uma diminuição da temperatura, provocada por um dos seguintes fatores, aumenta as possibilidades de "batidas" no motor diesel:

- 1) diminuição da relação de compressão
- 2) diminuição da temperatura do ar admitido
- 3) diminuição da temperatura do agente de resfriamento
- 4) diminuição da temperatura das paredes
- 5) diminuição da carga
- 6) avanço ou retardamento do início da injeção, em relação da posição mais adequada.

O último fator, que corresponde ao ajuste da ignição no motor a explosão, é explicado a seguir:

- a) um avanço demasiado grande faz com que as temperaturas sejam baixas durante o retardamento, prolongando-o, acumulando-se assim mais combustível para detonar;
- b) um avanço muito pequeno faz com que a turbulência do ar seja menor (o pistão para, ao atingir o PMS), influenciando na mistura e com isso aumentando também o retardamento.

A posição mais adequada é da ordem de 10° antes do PMS, variando de um motor para outro. Uma injeção feita depois do PMS tende a reduzir, ao mesmo tempo, a detonação e a potência.

O abaixamento da carga nos motores Diesel é feito reduzindo-se o combustível, porém mantendo-se a mesma quantidade de ar. O maior excesso de ar faz que diminuam as temperaturas das paredes.

B- Densidade. As possibilidades de "batidas" aumentam com a diminuição da densidade. A diminuição da densidade ocorre se:

- 1) a pressão de admissão diminuir
- 2) a relação de compressão diminuir.

Assim, ao contrário do que ocorre num motor de explosão, um motor Diesel sobrealimentado tem menor tendência a detonar.

C- Tempo. Um aumento do tempo de retardamento implica em maiores acúmulos de combustível antes do início da combustão, favorecendo a detonação. Os seguintes fatores aumentam o tempo de retardamento:

- 1) diminuição da turbulência do ar comprimido
- 2) aumento da pressão de injeção
- 3) diminuição da pressão de injeção
- 4) aumento da vazão de combustível injetado na unidade de tempo.

A finalidade da turbulência é promover a mistura do ar com o combustível injetado. Este se apresenta na forma de um cone formado de gotículas. O ar turbulento arranca as gotículas do cone de injeção e forma misturas homogêneas. Pressões de injeção altas melhoram a pulverização do combustível. Tanto a turbulência como a pressão de injeção diminuem o retardamento físico, pois aceleram a transição de líquido para vapor.

Em geral o aumento da rotação aumenta a detonação. Como a bomba de injeção é acionada pelo próprio motor, um aumento de rotação implica em maiores descargas da bomba. Se o tempo de retardamento não diminuísse com a rotação, com as pressões maiores e com as temperaturas maiores, o acúmulo de combustível seria proporcional à rotação; esses fatores, porém, fazem diminuir o retardamento, embora em geral não o suficiente para impedir um aumento do acúmulo de combustível com a rotação. Ao atingir rotações da ordem de 3000 ou 4000 rpm, a turbulência não consegue mais reduzir o retardamento, enquanto que a vazão de combustível continua a crescer linearmente com a rotação. Essa é a razão que dificulta a construção de motores Diesel com rotações muito elevadas (em motores de explosão de automóveis de corrida, chega-se até ... 11.000 rpm).

D- Composição. Aumentam-se as possibilidades de detonação com os seguintes fatores:

- 1) retardamento grande

- 2) temperatura de autoignição elevada
- 3) volatilidade pequena (geralmente)
- 4) viscosidade alta.

Alta volatilidade e baixa viscosidade são, em geral, desejáveis pois permitem a formação rápida de uma mistura homogênea. Por outro lado um combustível volátil pode provocar detonações violentas devido a formação de maiores quantidades de misturas combustíveis durante o retardamento. Com essas contradições, é difícil prever o comportamento do combustível, que pode variar muito de um caso para outro.

7.4.- Índices para os combustíveis usados nos motores de explosão

Os índices são obtidos comparando-se os combustíveis com uma mistura combustível de referência. A mistura de referência é constituída de:

- 1- n-heptana, com "índice de octanas" = 0
- 2- 2,2,4-trimetil-pentana, ou iso-octana, com um índice de octanas = 100.

A porcentagem de iso-octana numa mistura dos dois combustíveis de referência é o índice de octanas. A escala estende-se acima de 100 adicionando-se chumbo-tetra-etila à iso-octana. Assim uma gasolina poderá ser equivalente, por exemplo, à iso-octana com 5 ml de chumbo-tetra-etila por galão. Usam-se também para estender a escala dos "índices de octanas", os "números de performance AN".

Esses números de performance têm a vantagem de compensar uma certa linearidade dos índices de octanas.

A relação entre uma escala e a outra é mostrada na fig. 7.4.

Como vimos nos capítulos anteriores, a detonação não depende somente dos combustíveis, mas tam-

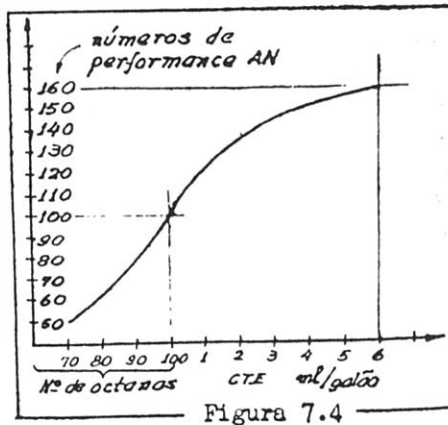


Figura 7.4

bém do motor em questão. Para comparar determinado combustível com os combustíveis de referência, é necessário especificar também o método usado.

Para cada método existe um motor feito por um único fabricante, de acordo com especificações determinadas.

Os métodos usuais são:

Nome	Finalidade	Especificação ASTM	Designação CRC*
Research method	motores de automóveis	D-908-47T	F-1
Motor method	idem	D-357-47T	F-2
Aviation method	motores de avião com misturas pobres (regime de cruzeiro)	D-614-47T	F-3
Supercharge method	Motores de avião com misturas ricas (condições de potência)	D-909-47T	F-4

* Coordinating Research Council

7.5 - Sensibilidade dos combustíveis

Já vimos que o índice de octanas obtido por comparação de um combustível com uma mistura de referência pode variar de acordo com o motor usado no ensaio.

Há combustíveis mais sensíveis a essa variação, enquanto outros produzem, sempre, quasi os mesmos resultados. Um combustível mais sensível apresenta índice de octanas mais baixo quando as condições de operação se tornam mais severas. A medida da sensibilidade se faz pela diferença obtida entre dois ensaios, um feito segundo o método F_1 (Research) e o outro segundo o método F_2 (Motor).

$$\text{Sensibilidade} = \text{índice } F_2 - \text{índice } F_1$$

Esse método de avaliação não é preciso, mesmo porque a escala dos índices de octanas não é linear com a relação de compressão que se pode obter (vide figura 7.5).

Os hidrocarbonetos parafínicos são em geral os menos sensíveis, enquanto que as naftalenas e as olefinas são os mais sensíveis. Devido às diferentes sensibilidades dos combustíveis é necessário fazer muitos ensaios com combustíveis diferentes, quando se

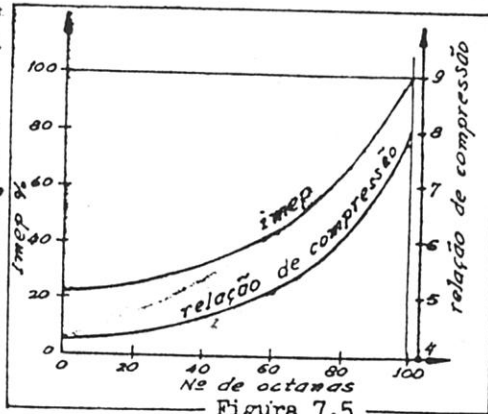


Figura 7.5

quer determinar qual o índice de octanas necessário ao combustível usado nesse motor. Esses ensaios se fazem no dinamômetro ou mesmo em condições de operação normal (teste de estrada).

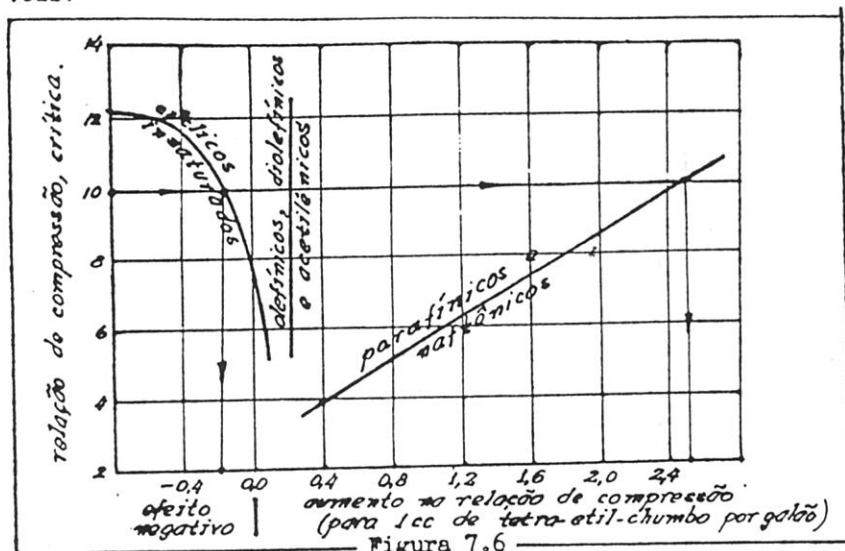
Atualmente, com métodos recentes consegue-se produzir gasolinas com índice de sensibilidade 14 (gasolina natural: índice sensibilidade = 0).

7.6.- Aditivos usados nos combustíveis para motores a explosão

Aproximadamente 85% da gasolina hoje produzida tem seu índice de sensibilidade aumentado pela adição de chumbo-tetra-etila $Pb(C_2H_5)_4$ (aproximadamente 1,5 ml por galão americano). Esse aditivo nem sempre aumenta o índice de octanas.

A fig. 7.6 mostra que adicionando-se 1 ml a um combustível cíclico não saturado, a relação de compressão crítica diminui de 10 para 9,8, enquanto para um combustível parafínico o índice aumenta de 10 para 12,5. Essa qualidade de responder aos aditivos chama-se suscetibilidade. Combustíveis sensíveis são em geral pouco suscetíveis. A medida que se acrescenta chumbo-tetra-etila, a suscetibilidade diminui. A presença de enxofre é outro fator que diminui a suscetibi-

lidade, além de abaixar o índice de octanas. Por mais essa razão especifica-se baixo teor de enxofre para os combustíveis.



Os produtos de combustão do chumbo-tetra-etila não são voláteis e consistem de óxidos de chumbo. Esse óxido pode depositar-se nas velas fechando os eletrodos, bem como nas superfícies das câmaras de combustão formando pontos incandescentes e pré-ignição. Para impedir esses inconvenientes, usam-se aditivos que devem reagir com o óxido de chumbo para formar produtos voláteis. Em geral são compostos de cloro ou de bromo.

Um problema que surge com o uso de aditivos é a distribuição não uniforme dos mesmos para os diversos cilindros.

Outros aditivos que podem ser usados para aumentar o índice de octanas são a anilina ($C_6H_5NH_2$) e o $Fe(CO)_5$.

O chumbo-tetra-etila é porém o mais econômico. Todos os três aditivos citados são altamente venenosos.

7.7- Influência da detonação sobre o desempenho dos motores a explosão

A influência da detonação sobre o funcionamento dos motores a explosão é bem ilustrada pela figura 7.7.

Verifica-se que para relações de compressão baixas ... (3,7:1), a potência é praticamente a mesma para combustíveis com índices de 65 a 80 octanas (curvas D e E). Aumentando a relação de compressão para .. 6,4:1 (curvas A e B), o combustível de índice baixo detona antes, perdendo mais calor para a água.

A temperatura de escape nesse caso é menor, pois a energia total e a potência desenvolvida são aproximadamente

constantes. O avanço de ignição para potência máxima é diferente para os dois combustíveis, porque no caso A (índice 65) uma parte relativamente grande queima por auto-ignição, acelerando a combustão. Uma autoignição fraca favorece a potência, aproximando a combustão a de volume constante. Nessas condições as perdas de energia devidas às oscilações dos gases são menores do que o ganho de potência devido a combustão mais rápida. A potência máxima para ambos combustíveis obtém-se, por isso, quando há detonação incipiente.

Quando se ajusta a faísca para a máxima potência, a perda de energia devido a detonação do combustível de 65 em relação ao de 80 é de apenas 2% aproximadamente. Não se corrigindo a faísca, a perda é muito maior, devendo-se adiantar a faísca para combustíveis de índice elevado, e retardá-la

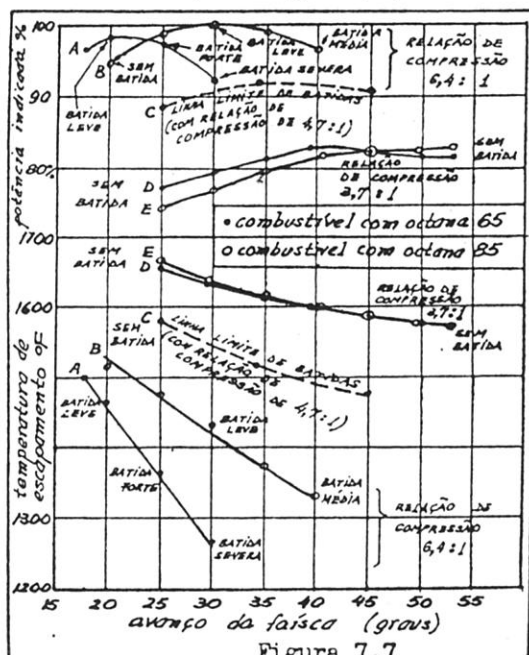


Figura 7.7

pelos de índice baixo. Essas conclusões, válidas para um de terminado motor, podem ser diferentes para motores de cons— trução diversa. No caso de mais de um cilindro, a distribui ção não uniforme dos aditivos e da mistura complica bastante o fenômeno.

Tudo o que foi dito, se aplica a operações a plena carga; na maior parte do tempo porém, os motores trabalham com potência reduzida. A va— riação de índice de octanas ne necessária com a potência pode ser observada na fig. 7.8.

Para potências redu— zidas, o índice de octanas po— de ser bem menor do que o de plena carga. Têm sido propos— tos carburadores especiais pa— ra utilizar dois combustíveis, reservando o de índice elevado para as potências elevadas.

Uma outra maneira de satisfazer as exigências do mo— tor em potências elevadas é a injeção de água ou mistu— ras de álcoolis com água (água— metanol ou água—metanol—etanol). Faz-se a substituição de certa quantidade de gasolina pela mis— tura anti-detonante (ADI) e ob— têm-se um ganho de potência pe

la maior aproximação da mistura estequiométrica. (a mistura , que era muito rica, tornou-se menos rica). Além disso, é pos— sível ganhar mais potência sobrealimentando o motor mais do que na potência sem injeção de água, pois o calor latente de vaporização da mistura ADI é maior do que o da gasolina, que foi substituída; há assim um efeito refrigerante melhor.

O ganho de potência obtido dessa maneira é da or— dem de 15%. Esse processo é usado especialmente em alguns motores de avião.

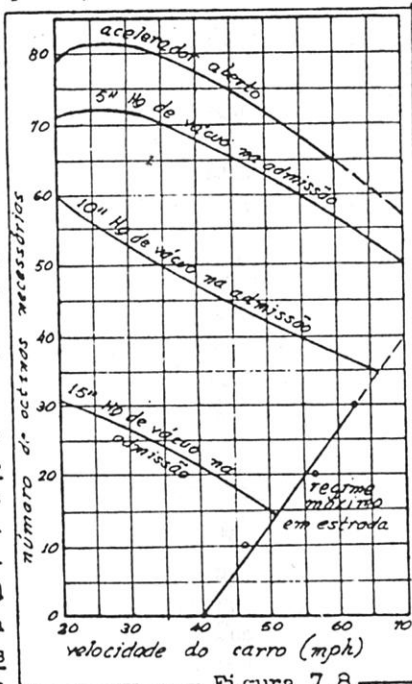


Figura 7.8

7.8 - Índices para combustíveis usados nos motores Diesel

O índice para combustíveis Diesel é obtido também por comparação com combustíveis de referência. Esses são a n-cetana, à qual é atribuído um "índice de cetanas" 100, e o alfa-metil-naftaleno, ao qual se atribui o índice 0.

A comparação dos combustíveis é feita num motor especial segundo um método único. Como o processo de combustão nos motores Diesel é mais complicado do que nos a explosão, essa simplificação de testes decorre antes da falta de maiores conhecimentos do que da completa satisfação com o método presente; o que se mede durante a comparação é o retardamento da combustão.

A bomba injetora é calada num avanço de 13° em relação ao PMS; ajusta-se a compressão até que a combustão se inicie no PMS, ou seja, até que o retardamento seja de 13°. Quando o combustível ensaiado e o de referência necessitarem da mesma relação de compressão para que haja retardamento de 13°, eles são equivalentes quanto ao índice de cetanas.

7.9 - Número de cetanas e o funcionamento do motor Diesel

Pode parecer, à primeira vista, que um combustível é tanto melhor para um motor Diesel, quanto mais elevado seu índice de cetanas; no entanto, se um motor operar satisfatoriamente com um índice de, digamos, 50, o funcionamento pode ser pior se for usado um combustível com índice 75. Acontece que o combustível de índice baixo, tendo um retardamento maior, fará com que se forme um acúmulo grande de combustível que queimará praticamente a volume constante. Com o combustível de índice maior, não haverá grande acúmulo de combustível e a combustão se dará menos violentamente com tendência a pressão constante. Onde obtêm-se potências menores e consumos maiores.

O índice de cetanas influe também na turbulência da mistura. Assim um motor projetado para combustíveis de baixo índice poderá ter turbulências insuficientes devido à relativa calma com que se dará a combustão, quando se empregarem combustíveis de índice de cetanas elevado.

7.10 - Aditivos usados para aumentar o índice de cetanas

Usam-se, modernamente, aditivos para aumentar o índice de cetanas de combustíveis usados em motores Diesel de alta rotação. Esses aditivos são, em geral, explosivos fracos, que funcionam como pontos de início de combustão quando explodem a temperaturas relativamente baixas.
