

Capítulo X

Injeção

O primeiro motor diesel utilizava carvão pulverizado como combustível. Era injetado na câmara de combustão por meio de um sopro de ar. O sistema recebeu por isso o nome de injeção de ar. Diesel pensou em injetar óleo diretamente na câmara de combustão mas finalmente optou pela injeção de ar, apesar de mais cara. Hoje em dia utiliza-se quase somente a injeção mecânica, salvo alguns casos especiais quando o combustível é muito sujo.

10.1 - Objetivos

Os requisitos que o dispositivo de injeção de um motor diesel deve preencher são os seguintes:

1. Injetar a quantidade de combustível exigida pela carga do motor e manter essa quantidade:
 - a - constante, de ciclo para ciclo
 - b - constante, de cilindro para cilindro.
2. Injetar o combustível no tempo exato a despeito da rotação do motor.
3. Injetar o combustível na quantidade necessária para controlar a pressão e o aumento de pressão.
4. Atomizar o combustível no grau desejado.
5. Distribuir o combustível na câmara de combustão.
6. Iniciar e terminar a injeção bruscamente.

Comparando um sistema de injeção com um de carburação, podemos dizer que a injeção apresenta sobre a carburação as seguintes vantagens:

1. Melhor rendimento volumétrico por causa
 - a. da menor perda de carga na tubulação de admissão
 - b. não precisar aquecer a mistura para vaporizar o combustível.
2. Maior aceleração porque o combustível sendo injetado per-

to do cilindro não cria filme sobre as paredes da tubulação de admissão, que é uma das causas do atraso da aceleração.

3. Eliminação do gelo na tubulação de admissão, o que é importante em motores de avião.
4. Temperatura de trabalho do motor menor, porque a vaporização do combustível se dá durante os cursos de admissão e compressão e não na tubulação de admissão (à qual se fornece calor para isso) como na carburação.
5. Partida fácil porque o combustível é totalmente atomizado (perto da entrada ou dentro do cilindro).
6. Menos detonação por ser a temperatura menor devido ao calor para vaporizar o combustível. Em consequência se pode utilizar um combustível com menor índice de octanas ou então maior relação de compressão.
7. Menor tendência a retorno de chama uma vez que não há combustível na tubulação de admissão.
8. Projeto mais compacto do motor porque o sistema de injeção não exige localização especial.
9. Possibilidade de se usar um combustível menos volátil.

Por outro lado o sistema de injeção apresenta as seguintes desvantagens quando comparado ao sistema de carburação:

1. De construção mais dispendiosa.
2. Maior complicação para ajustagem e manutenção.
3. Menor vida.
4. Pouco tempo para o combustível se misturar com o ar.

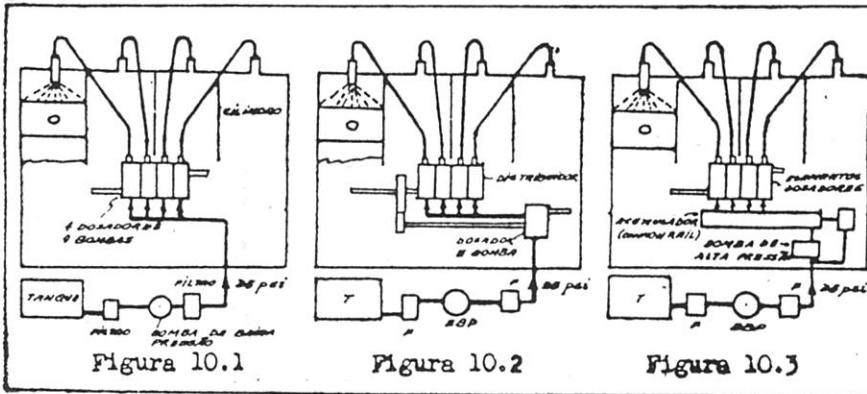
10.2 - O sistema de injeção nos motores diesel

O sistema de injeção introduzido por Diesel era baseado numa injeção de ar comprimido. O combustível era dosado e bombeado até o injetor, que também era ligado a uma fonte de ar comprimido. Quando se abria o injetor, o ar aspergia o combustível para dentro do motor atomizando-o apesar da viscosidade ser bastante alta.

Entretanto, em virtude do tamanho e da potência consumida (10% da do motor) pelo compressor de ar, o sistema de injeção de ar foi abandonado sendo utilizado apenas em casos excepcionais, como, por exemplo, quando se dispõe de óleo muito viscoso.

Os sistemas modernos de injeção usam injeção sólida ou mecânica (o ar é aspirado ou lançado dentro do cilindro por um compressor e o combustível é injetado e atomizado por meio do bico de um injetor), numa das três seguintes modalidades:

- 1- Bomba individual, constituído por uma bomba e um dosador para cada cilindro (fig. 10.1)
- 2- Distribuidor. Neste sistema existe apenas uma bomba para comprimir e dosar o combustível e mais um distribuidor para levar o combustível para cada cilindro (fig. 10.2)
- 3- Acumulador (common rail). O sistema tem uma única bomba para comprimir o combustível. Há um acumulador do fluido comprimido, na alta pressão e mais um elemento dosador para cada cilindro (fig. 10.3).



Em qualquer desses sistemas o combustível é transportado do tanque para a bomba injetora de alta pressão por meio de uma bomba de transferência de baixa pressão, existindo no caminho filtros para limpeza do óleo e assim diminuição dos desgastes.

A vantagem principal do primeiro sistema (de bomba individual) é a de ser compacto, porque todas as funções es-

tão combinadas numa bomba separada para cada cilindro. Entretanto seu custo é elevado pois tôdas as bombas devem apresentar as mesmas características de operação, independentemente da velocidade do motor e da sua carga. Isso exige tolerâncias de construção muito pequenas.

Para reduzir o custo de produção, foi desenvolvido o sistema com distribuidor. Uma bomba só comprime o combustível e este é dosado para cada cilindro por meio do dosador (um para cada cilindro). Entretanto a bomba deve executar n vezes mais rotações se o motor tiver n cilindros, o que é um inconveniente porque a pressão de injeção cresce com o quadrado da rotação podendo atingir valores elevados. Pressões assim altas exigem tolerâncias pequenas.

No sistema de acumulador a bomba comprime o combustível e o manda para um acumulador cuja pressão é matida constante por uma válvula. Este sistema não exige cuidados muito grandes para fabricação, comparado com os outros.

A descarga dos injetores é controlada pelo tamanho do orifício e pela perda de carga nas linhas. A igualdade dos orifícios e da perda de carga na tubulação deve porisso ser rigorosamente controlada para dosagem igual dos cilindros.

10.3 - Sistema de bomba individual

Bomba Bosch

O funcionamento e o sistema de dosagem da bomba .. Bosch são vistos na fig. 10.4.

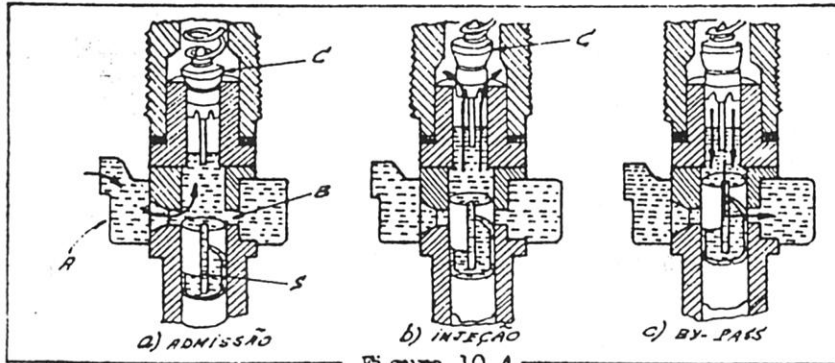


Figura 10.4

O bombeamento é feito por um pistão empurrado por um excêntrico. Quando o pistão se encontra na posição inferior, as aberturas A e B estão descobertas. A bomba de transferência empurra o combustível para a câmara de injeção. A bomba de transferência é necessária porque o pequeno curso do pistão (1/2") não é suficiente para transportar o combustível do tanque aos cilindros.

Ao subir, o pistão fecha as aberturas A e B e comprime o combustível que ficou na câmara. Abre-se a válvula de descarga e tem início o período de injeção.

O pistão continua a subir, injetando combustível até quando a ranhura em forma de hélice do pistão descobre a abertura B. Nesse instante o combustível, que está sob pressão na câmara de compressão, escoava através da abertura B de volta para o tanque, fechando-se a válvula de descarga.

A posição da ranhura em hélice, em relação à abertura B, é controlada por uma cremalheira R (fig. 10.5).

O controle da cremalheira R corresponde ao acelerador num motor a explosão. Variando a posição da cremalheira varia a quantidade de combustível injetado desde zero até o máximo.

Uma translação da cremalheira corresponde a uma rotação da camisa do pistão variando com isso o curso útil do pistão antes de se descobrir a abertura B. A partir daí o pistão continua seu curso, sem comprimir.

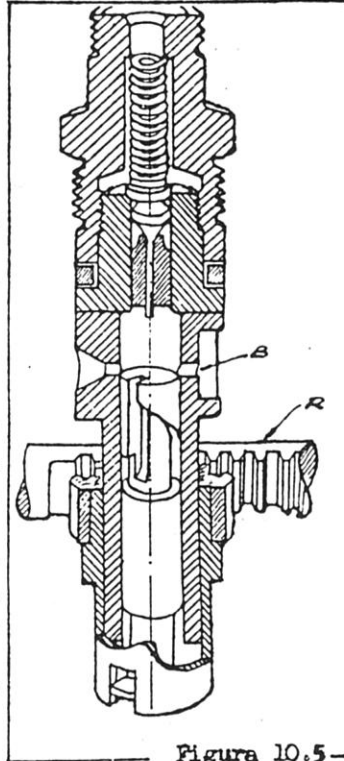


Figura 10.5

A ranhura em hélice pode variar. Pode-se pensar num pistão que avance a injeção à medida que se aumente a carga; pode-se pensar também num motor cujo fim e cujo início de injeção são variáveis.

A quantidade de combustível liberada por curso numa bomba Bosch cresce ao aumentar a rotação do motor por causa do efeito de estrangulamento das aberturas em alta rotação.

Em baixa rotação só há aumento de pressão dentro da câmara de compressão quando o pistão fechar totalmente a abertura A.

Em alta rotação, mesmo com a abertura A semicoberta, há um aumento de pressão porque durante o estrangulamento de A, a parte ainda não coberta não é capaz de dar vazão ao combustível que está sendo comprimido.

Fato análogo ocorre com a abertura B: em alta rotação mesmo com uma parte de B descoberta, o efeito do estrangulamento não deixa a pressão dentro da câmara cair tão depressa quanto se estivesse em baixa rotação.

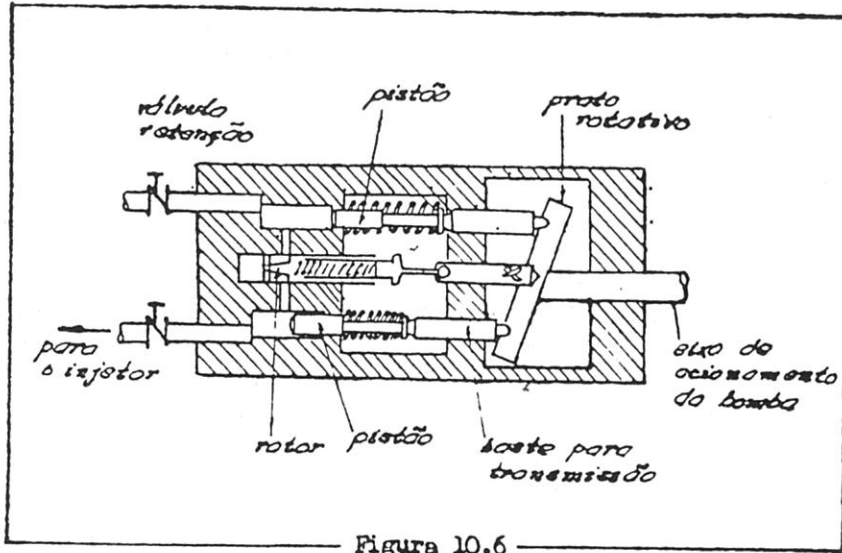
A válvula de descarga tem a finalidade de manter na linha, desde a bomba até o injetor, uma pressão elevada e de interromper a injeção bruscamente. Quando a pressão cai, a válvula desce para o seu assento evitando que a pressão diminua aquém de um certo valor. No curso seguinte a pressão subirá já a partir desse valor e aumentará até abrir o injetor. Por outro lado, o fato da pressão na linha se tornarem menor que a necessária para abrir o injetor, garante a não injeção de combustível quando não necessário, bem como evita a formação de gotículas no bico do injetor.

Bomba Ex-Cell-O

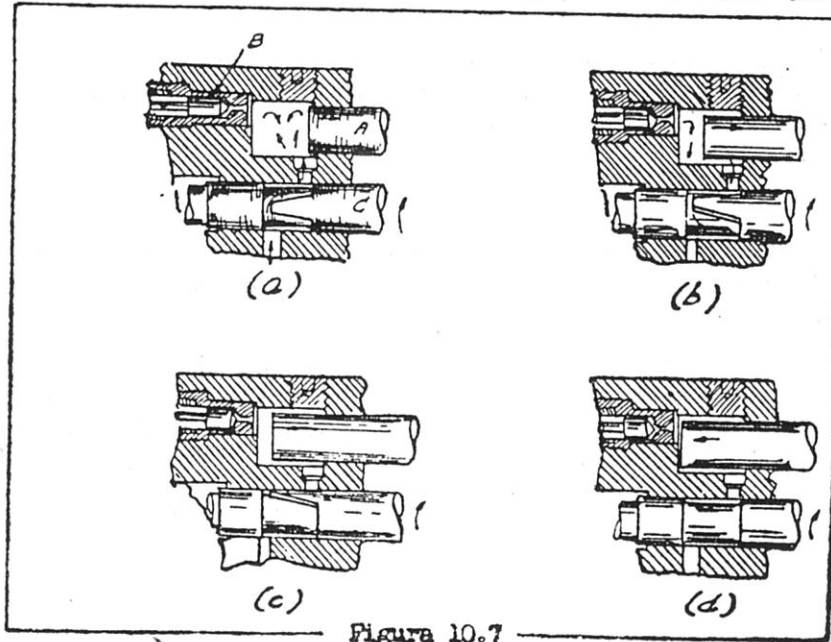
Neste tipo, as bombas são dispostas circularmente e são acionadas por um mesmo excêntrico (não exatamente excêntrico, mas um disco que gira debaixo das hastes das bombas) (fig. 10.6).

O funcionamento de cada elemento pode ser compreendido através da fig. 10.7, na qual A representa o pistão de uma das bombas, B a válvula de descarga e C o rotor acionado diretamente pelo motor.

Na figura a, a posição do rotor permite que o óleo proveniente do tanque, através do filtro, penetra na câmara de compressão.



Na figura b, começa a expulsão do óleo em excesso através da ranhura do rotor. Na figura c, o perfil do rotor já vedou completamente a passagem e tem início então a compressão. Abre-se a válvula de descarga e o óleo segue pela



tubulação de injeção até o injetor. Na figura d finalmente o perfil do rotor descobre a passagem e faz cair a pressão da câmara de compressão, cessando a injeção.

A quantidade de combustível injetado (que controla o funcionamento do motor) é regulada por um movimento axial do rotor, deslocando-se-o para a direita diminui a quantidade de injetada até um ponto em que não há injeção alguma.

Enquanto que na bomba Bosch o elemento de compressão era também o dosador (o que exige porisso maior cuidado no projeto, uma vez que é necessário dispendir energia relativamente grande para acioná-lo), na bomba Ex-Cell-O o elemento dosador, que é o rotor, é independente da bomba propriamente dita (exigindo porisso menor esforço para acionamento e menos cuidados no projeto).

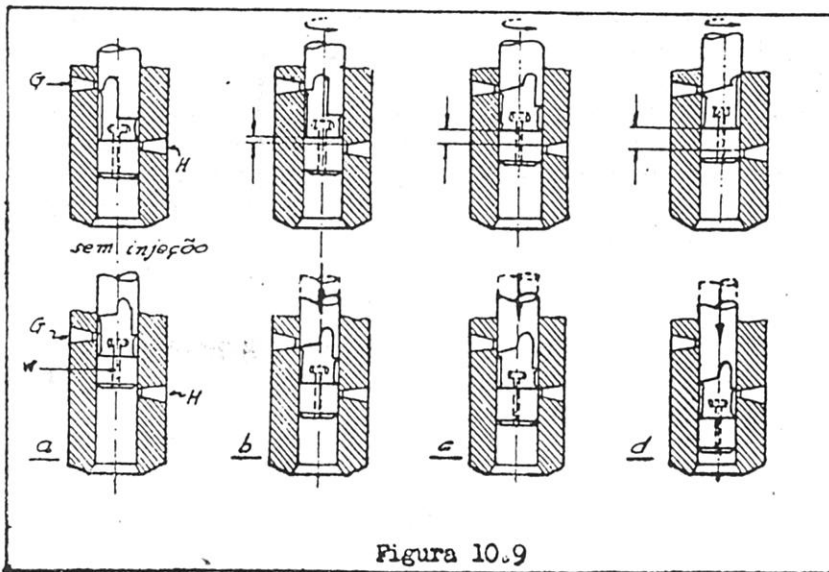
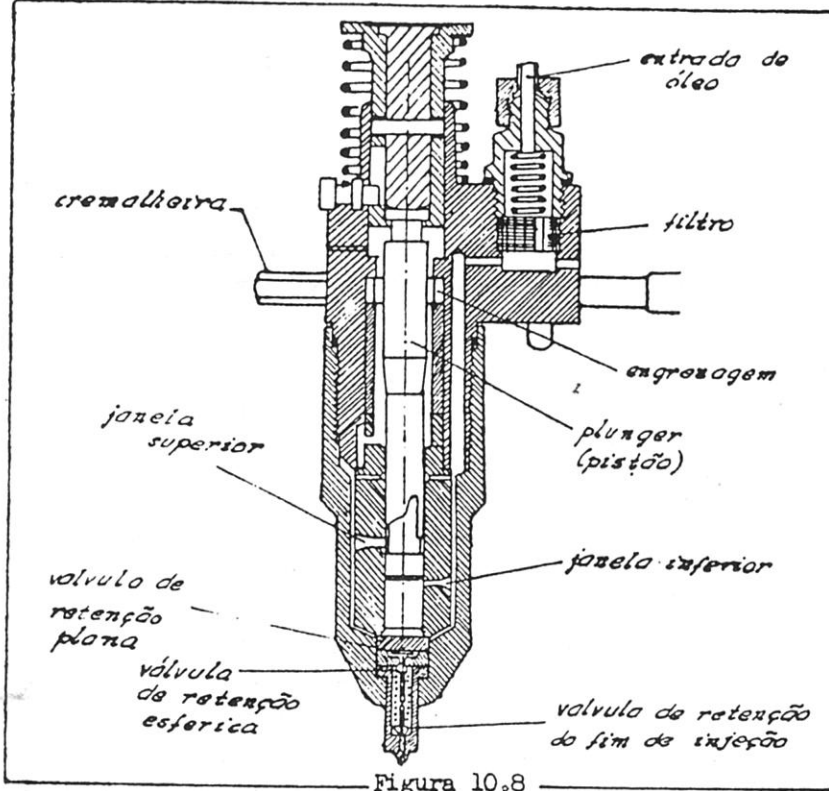
Sistema General Motors

A tubulação de alta pressão, que liga a bomba ao injetor, sempre introduz uma perda de carga que tem como consequência um atraso na injeção.

O sistema General Motors consiste em se fazer a bomba e o injetor numa única peça a que se denomina injetor unitário, o qual está representado na fig. 10.8.

O seu funcionamento se vê na fig. 10.9. Em a o pistão está no início do curso e o combustível entra pela janela H. Entretanto não há compressão porque uma das janelas se encontra aberta e o óleo escoá pela passagem W. Girando-se o pistão, o perfil em hélice neste, fará com que haja compressão, durante um certo intervalo de tempo, que corresponde a um curso útil do pistão. Girando-o mais ainda, aumentando-se-á o curso útil. O curso útil é portanto o curso percorrido pelo pistão enquanto as duas janelas estão fechadas contemporaneamente.

O bico do injetor é provido de 6 orifícios bastante pequenos, com 0,006 polegadas de diâmetro. A pressão de trabalho é bastante alta; a 2100 rpm, por exemplo, tem-se .. 2700 atmosferas. Por causa disso o injetor unitário deve ser construído com muito cuidado.



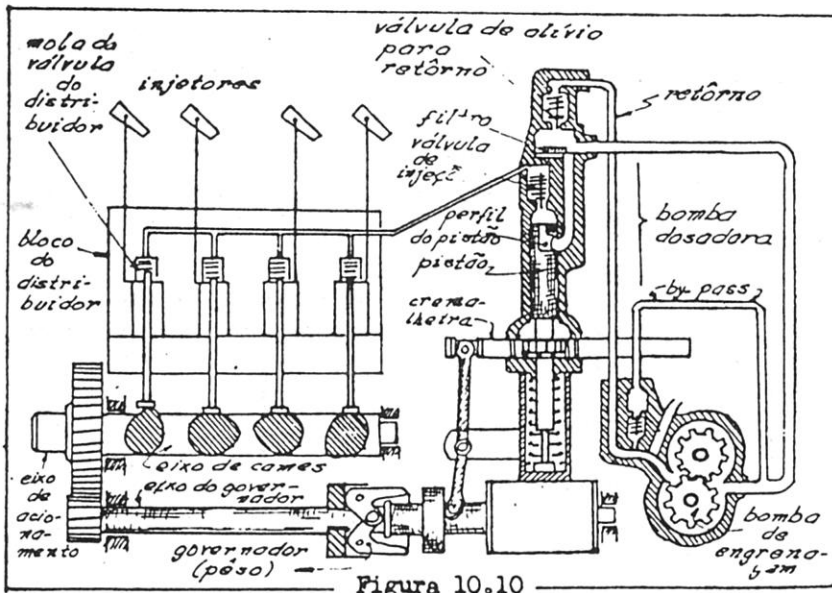
10.4 - O sistema de distribuidor

Neste sistema uma bomba comum faz a compressão e o óleo comprimido é enviado para um distribuidor.

No sistema para 4 cilindros da International Harvester, o pistão da bomba, que também é dosador, é acionado pelo mesmo eixo que o do distribuidor, porém o came da bomba tem 4 ressaltos de maneira que o pistão da bomba sobe e desce 4 vezes para cada rotação do eixo.

Da bomba o combustível é enviado para o elemento distribuidor, o qual é constituído de 4 válvulas, cada uma acionada por um excêntrico situado num eixo comum.

No motor de 6 cilindros, a International dispõe 2 conjuntos como o acima, um para cada 3 cilindros.



No sistema Cummins, a distribuição é feita em baixa pressão. Uma bomba de transferência fornece o óleo a uma pressão de cerca 120 psi para o elemento dosador, que envia a quantidade adequada e dosada para o distribuidor. O distribuidor é do tipo rotativo (ver fig. 10.11).

O injetor é combinado com a bomba de injeção, sen-

do o pistão do injetor comandado por um eixo comum a todos os cilindros.

O conjunto é sincronizado para que o combustível do sado entre na câmara através da válvula de retenção C, durante a subida do pistão da bomba.

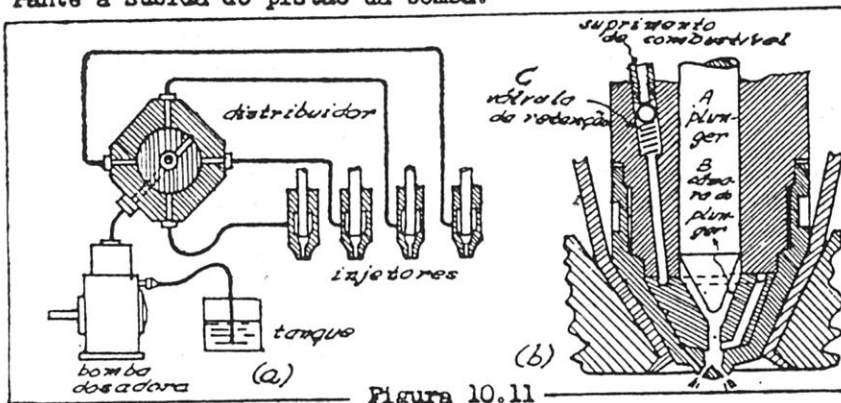


Figura 10.11

Enquanto isso o pistão do motor está comprimindo o ar dentro da câmara de combustão. O ar quente penetra na câmara do injetor aquecendo e vaporizando o combustível que aí se encontra.

Pouco antes do ponto morto superior do pistão do motor, o pistão da bomba desce e comprime o óleo combustível injetando-o no cilindro através de um bico com 6 orifícios.

10.5 - O sistema com acumulador

Os primeiros projetos do sistema com acumulador .. (common rail) usavam um processo no qual o acumulador era ligado diretamente ao bico injetor. No instante adequado os orifícios do injetor eram abertos por uma haste acionada por excêntrico, colocando em contato o coletor com o cilindro e injetando neste o óleo que se achava em alta pressão.

A quantidade de combustível era dosada pelo tempo que permaneciam abertos os orifícios (fig. 10.12)

O inconveniente deste sistema era que gotejava constantemente, provocando bastante fumaça no escapamento.

Há vários sistemas modernos que usam acumulador.

Atlas-Imperial, Cooper-Bessemer, National Superior, Winton. No sistema da Atlas-Imperial, a pressão do combustível é mantida constante. Já o Cooper-Bessemer possui uma válvula de alívio que dá para a atmosfera e que abre justamente no fim da injeção, fazendo cair a pressão para um valor bem baixo, ao mesmo tempo que uma haste fecha o orifício. Consegue-se assim evitar gotejamento e fuga de flúido motivados pela alta pressão.

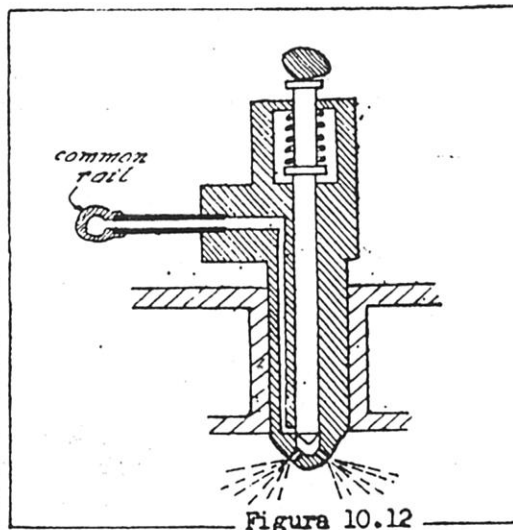


Figura 10.12

O sistema Cooper-Bessemer é constituído por um conjunto de controle de pressão A, bomba injetora B, acumulador C, elemento dosador D e injetor E.

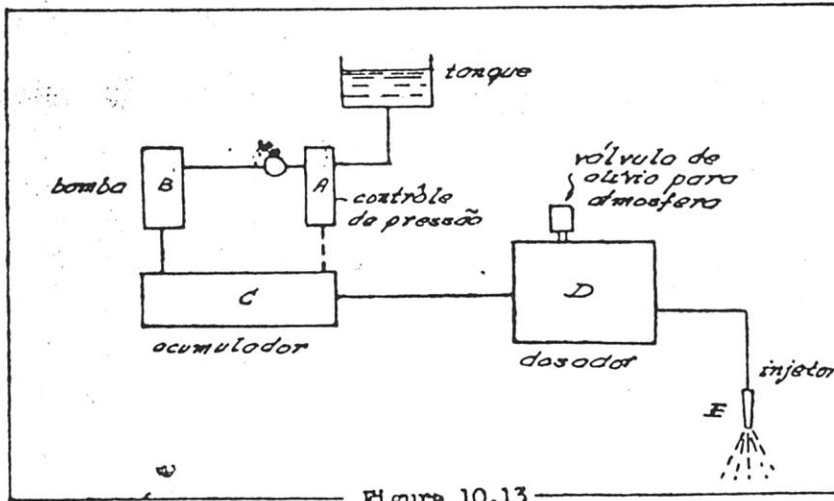


Figura 10.13

O óleo proveniente do tanque passa através do conjunto de pressão A e é comprimido na bomba B, sendo armazenado no acumulador C, elemento dosador D e injetor E. O óleo proveniente do tanque passa através do conjunto de pressão A e é comprimido na bomba B, sendo armazenado no acumulador C.

Do acumulador C é retirado uma comunicação que "informa" o conjunto A da pressão ali reinante. Se a carga crescer, cairá a pressão em C, o qual aumentará a passagem de óleo através de A, restaurando a pressão.

O combustível é dosado e vai ter ao injetor. No elemento dosador fica a válvula de alívio que dá para a atmosfera.

10.6 - O jato de combustível

A principal função do bico injetor é introduzir o combustível na câmara de combustão num jato finamente atomizado.

É difícil dizer qual a forma exata desse jato dentro da câmara de combustão porque aí o ar se encontra em alta turbulência e a combustão ocorre antes de terminar a injeção. Daí a razão de se efetuar esses estudos em condições atmosféricas sem turbulência. Modernamente o estudo pôde ser aperfeiçoado com o uso de câmaras fotográficas ultra-rápidas, fotografando a câmara de combustão.

O início da injeção é caracterizado pela formação de algumas gotículas, em virtude da baixa pressão reinante (fig. 10.14).

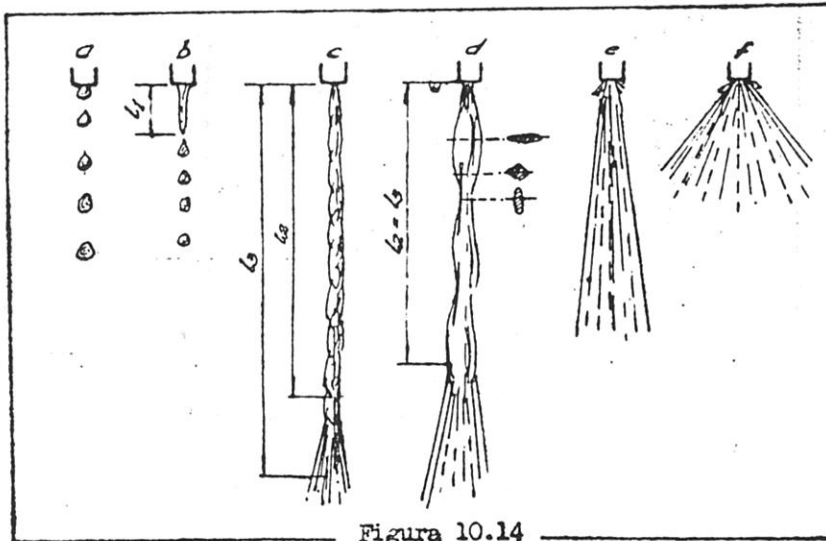


Figura 10.14

À medida que a pressão sobe tem início a formação de um filete de combustível, que depois se rompe formando algumas gotículas. Continuando a aumentar a pressão de injeção, o filete cresce e se abre num jato. O comprimento do filete (l_2) nesse instante é denominado distância de rompimento. A distância de rompimento diminui à medida que aumenta a pressão até que o vértice do cone do jato coincida com o orifício.

É claro que os combustíveis pesados exigem pressão mais elevada para a formação do jato.

No início e no final do processo, em virtude de ser pequena a pressão de injeção pode haver formação de gotas do combustível o que é inconveniente para a combustão uma vez que é difícil a sua vaporização.

Na saída do orifício o jato se encontra em alta velocidade, que é quasi igual ao valor dado pela equação hidráulica $v = \sqrt{2gH}$, sendo H a diferença de pressão da injeção para a da câmara de combustão.

Duas velocidades podem ser observadas no jato: a velocidade da extremidade do jato e a velocidade média das partículas.

Segundo experiência de Schweitzer para uma pressão de 280 atmosferas injetando em ar cuja densidade é 15 vezes maior que a atmosférica, a velocidade inicial das gotículas (quando abandonam o bico) é de 225 m/s, enquanto que a velocidade da ponta do jato é de 70 m/s.

É interessante observar que qualquer que seja a pressão de injeção, a profundidade de penetração do jato é mais ou menos a mesma, se bem que em pressões altas a penetração se faz em menos tempo e em maior quantidade.

Também a penetração média das partículas é praticamente a mesma. Isso se deve ao fato de que quanto maior a pressão, tanto mais pulverizado ficará o combustível e tanto maior será a resistência encontrada para penetração.

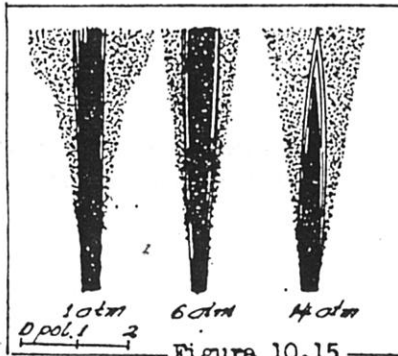
Pode-se controlar melhor a penetração média por meio da viscosidade.

Quando o jato entra na câmara encontra ar em turbi

lhão e se rompe em gotículas aumentando ainda mais a turbulência.

A dispersão das partículas de óleo cresce à medida que:

- 1- se afastam do bico do injetor
- 2- aumenta a pressão de compressão do ar na câmara
- 3- decresce a viscosidade do óleo
- 4- cresce a pressão de injeção (fig. 10.15).



Observações do jato mostraram os seguintes fatos dignos de nota:

- 1- Existem gotículas de diversos tamanhos. A maior parte tem diâmetro igual a 5 microns (a frequência dos outros diâmetros se distribui segundo uma curva de Gauss).
- 2- Aumentando a pressão de injeção diminui o tamanho das gotículas.
- 3- Aumentando a viscosidade do óleo cresce o tamanho das gotículas.
- 4- Aumentando o orifício do bico injetor cresce o tamanho das gotículas.

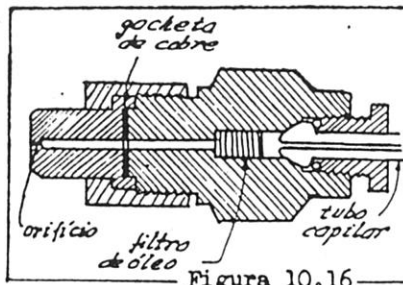
O conjunto de elementos: pressão de injeção, diâmetro do orifício, viscosidade do óleo, câmara de combustão, etc. deve ser estudado experimentalmente para a obtenção de resultados satisfatórios.

10.7 - Bicos de injetores abertos

O bico de injetor mais simples é o aberto (fig. 10.16). Um dos problemas principais destes bicos é o gotejamento de combustível quando a pressão é baixa. O problema pode ser resolvido em parte usando um tubo bastante fino para passagem do óleo, de maneira a introduzir uma tensão superficial que cause aderência do combustível ao tubo.

Outro problema é a alta pressão exigida quando o

motor se encontra em alta rotação. Suponhamos inicialmente que o combustível seja incompressível. Em rotação baixa o óleo sairá com uma certa velocidade. Se a rotação aumentar, a velocidade de saída do combustível aumentará proporcionalmente uma vez que a bomba está comprimindo mais depressa também. Porém a velocidade cresce com a raiz quadrada da diferença de pressão conforme já vimos ($w = \sqrt{2 g H}$). Daí a necessidade de que a diferença de pressão cresça com o quadrado da velocidade e portanto com o quadrado da rotação.



Na realidade não cresce exatamente nessa razão, pois o óleo é compressível, porém o aumento é substancial.

As razões de os bicos de orifícios abertos serem pouco utilizados são pois duas: gotejamento e grandes pressões de injeção em rotações elevadas.

10.8 - Bicos injetores fechados

Os bicos injetores fechados são providos de um pistão com um perfil especial. Envolvendo a extremidade inferior do pistão existe uma câmara onde vai ter o óleo sob pressão. Quando a pressão do óleo atuando sobre a superfície inclinada do pistão é suficiente para vencer a mola, o pistão ou agulha se abre e tem início a injeção, já então numa pressão elevada. O pistão pode abrir passagem para um ou vários orifícios.

Quando a pressão cair abaixo de um certo valor, a força da mola fecha o pistão dando fim à injeção.

O formato do pistão é tal que a pressão necessária para abri-lo é menor que a necessária para mante-lo aberto.

De fato, note pela fig. 10.17 que antes de abrir o pistão, a pressão do óleo se exerce sobre uma área menor do que depois de aberto. Normalmente a relação entre a pressão para manter aberto o pistão e a pressão para abri-lo é de .. 0,6 a 0,9.

A vantagem de um bico fechado sobre um aberto reside na pequena perda de carga e no melhor controle de pressão. Pode-se evitar que a pressão seja elevada usando um orifício grande. Por outro lado, a mola e o perfil do pistão podem determinar a pressão mínima de abertura. Quando a pressão atingir um certo valor, abre-se o pistão e o óleo é injetado. Pode acontecer então que a quantidade de óleo injetado na câmara é maior que a que a bomba injetora comprime, durante o intervalo de tempo

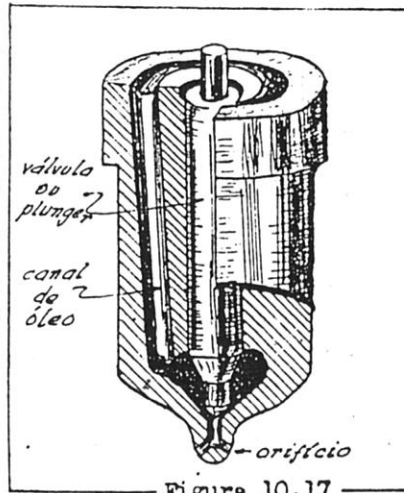
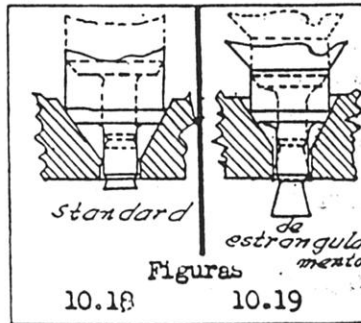


Figura 10.17

em que ocorreu a injeção. A pressão cai e o pistão fecha novamente o bico. A pressão sobe novamente e repete-se o processo injetando combustível. Assim o que se tem realmente é uma injeção intermitente. Portanto o bico fechado pode controlar a pressão: a baixa pelo pistão e a alta pelo diâmetro do orifício.

Entretanto a injeção intermitente não é conveniente porque há possibilidade de gotejamento. Por isso há um limite para o tamanho do orifício, o que torna inevitável pressões de injeção elevadas.

A extremidade do pistão pode ter perfis especiais que impeçam o gotejamento. Esses perfis abrem inicialmente apenas uma área anular para permitir a injeção. Aumentando o curso, podem abrir a área toda.



Figuras

10.18

10.19

O perfil da fig. 10.18 é denominado "standard" e o da figura 10.19 de estrangulamento. Neste tipo o pistão nunca abre completamente o orifício e na verdade diminui a área de injeção quanto mais sobe.

Se esse tipo de injetor for servir um motor com vá

rios cilindros, então precisa ter um acabamento muito cuidadoso para ser igual em todos. Análogamente, as moças dos pistões também precisam ser construídas com muito cuidado, visando a igualdade entre elas.

10.9 - Ondas de pressão na tubulação de combustível

Se o combustível fosse incompressível e a tubulação não dilatasse, em qualquer instante e em qualquer ponto da linha, a velocidade e a pressão do fluido seriam as mesmas. Qualquer variação de pressão numa extremidade da linha seria transmitida instantaneamente à outra extremidade.

Na verdade tal não acontece e como o líquido é compressível, qualquer aumento da pressão, criado pelo pistão da bomba injetora, se transmite com a velocidade do som para aquele combustível, nas condições em que se encontra.

Não consideraremos, porém, as variações da tubulação por serem muito pequenas e só levaremos em conta as do combustível.

Analisemos, então, uma perturbação que foi criada na bomba injetora por uma variação brusca de velocidade c no pistão.

Chamando de:

- Δc - a variação de velocidade do fluido na linha
- C_1 - a velocidade de propagação do som para as condições em que se encontra o fluido
- Δt - o intervalo de tempo decorrido entre duas posições do pistão da bomba
- ρ - o peso específico do fluido
- ρ - a densidade do fluido
- $\Delta \rho$ - a variação do peso específico provocada pela propagação do fenômeno
- $\Delta \rho$ - idem, da densidade.

A quantidade de massa introduzida a mais na linha

vale:

$$\Delta m = \Delta c \cdot \Delta t \cdot S \cdot \rho$$

Por outro lado, a massa de fluido comprimida a mais em virtude da propagação do fenômeno é

$$\Delta m = c_s \cdot \Delta t \cdot S \cdot \Delta \rho$$

Como as duas quantidades são iguais, tem-se que:

$$\Delta c \cdot \Delta t \cdot S \cdot \rho = c_s \cdot \Delta t \cdot S \cdot \Delta \rho$$

ou

$$c_s = \rho \frac{\Delta c}{\Delta \rho} \quad \text{ou} \quad c_s = \gamma \frac{\Delta c}{\Delta \gamma} \quad (10.1)$$

Por outro lado: $F = m a$ ou

$$\Delta p \cdot S = m \frac{\Delta c}{\Delta t} \quad (10.2)$$

porém a massa de fluido acelerada durante o tempo Δt é

$$m = c_s \cdot \Delta t \cdot S \cdot \rho$$

conforme já vimos. Substituindo em (10.2), temos:

$$\Delta p \cdot S = c_s \cdot \Delta t \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

ou

$$\Delta p = \frac{c_s \cdot \rho \cdot \Delta c}{g} \quad (10.3)$$

ou ainda

$$c_s = \frac{g \cdot \Delta p}{\rho \cdot \Delta c} \quad (10.4)$$

Multiplicando (10.4) por (10.1), obtemos:

$$c_s^2 = \frac{g \cdot \Delta p}{\Delta \gamma} \quad (10.5)$$

Introduziremos agora o chamado "módulo de volume" que vem a ser a pressão exigida para exercer uma certa tensão volumétrica, entendendo-se por tensão volumétrica a relação entre a variação de volume Δv e o volume v original.

$$K = \text{módulo de volume} = \frac{\Delta p}{\Delta v/v} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

O módulo é função da pressão e da temperatura, mas será suposto constante; portanto

$$K = \frac{\Delta p}{\Delta v/v} = \frac{\Delta p}{\Delta \gamma/\gamma} \quad (10.6)$$

Substituindo (10.6) em (10.5)

$$c_s^2 = \frac{K K}{\gamma} \quad \text{ou} \quad c_s = \sqrt{\frac{K K}{\gamma}} \quad (10.7)$$

Igualando (10.7) a (10.4), vem

$$\frac{K \cdot \Delta p}{\gamma \cdot \Delta c} = \sqrt{\frac{K K}{\gamma}} \quad (10.8)$$

Resolvendo (10.8) em relação a γ/g e substituindo em (10.7), tem-se

$$\frac{\Delta p}{\Delta c} = \frac{K}{c_s} \quad (10.9)$$

Nos líquidos não se atingem velocidades supersônicas porque o coeficiente de volume é praticamente constante, principalmente em altas pressões como ocorre na injeção.

A equação (10.9) mostra que uma variação na velocidade do pistão acarreta uma variação proporcional na pressão do combustível e que o aumento de velocidade se propagará com a velocidade acústica do meio.

Para o estudo de propagação das perturbações é conveniente supor que elas se façam bruscamente, como fizemos ao supor uma variação repentina da velocidade; na verdade, a variação é gradual e função do perfil do came do eixo da bomba injetora.

10.10 - Cálculo de uma linha

Consideremos um caso particular no qual:

- 1- o atrito do óleo contra as paredes da linha é desprezível
- 2- as variações de velocidade são instantâneas
- 3- a velocidade do pistão é constante
- 4- as deformações da linha são desprezíveis.

A fig. 10.20 representa esquematicamente a propaga

ção dos distúrbios criados.

p_0 e c_0 são os valores iniciais da pressão e velocidade. Ao deslocar-se, o pistão introduz uma perturbação no meio, que se propagará com a velocidade do som, naquele meio.

As figuras c e d representam a propagação da nova velocidade c_1 e nova pressão p_1 ao longo da linha.

A variação desses fenômenos foi admitida instantânea; como já dito, a frente de onda não é vertical e sim função da maneira como va-

ria a velocidade do pistão, ou seja, do came da bomba.

A velocidade com que se propaga o fenômeno é calculada por

$$c_B = \sqrt{\frac{K E}{\gamma}}$$

Conhecendo-se o comprimento da linha é fácil calcular o tempo Δt necessário para a propagação ir da bomba até o bico injetor.

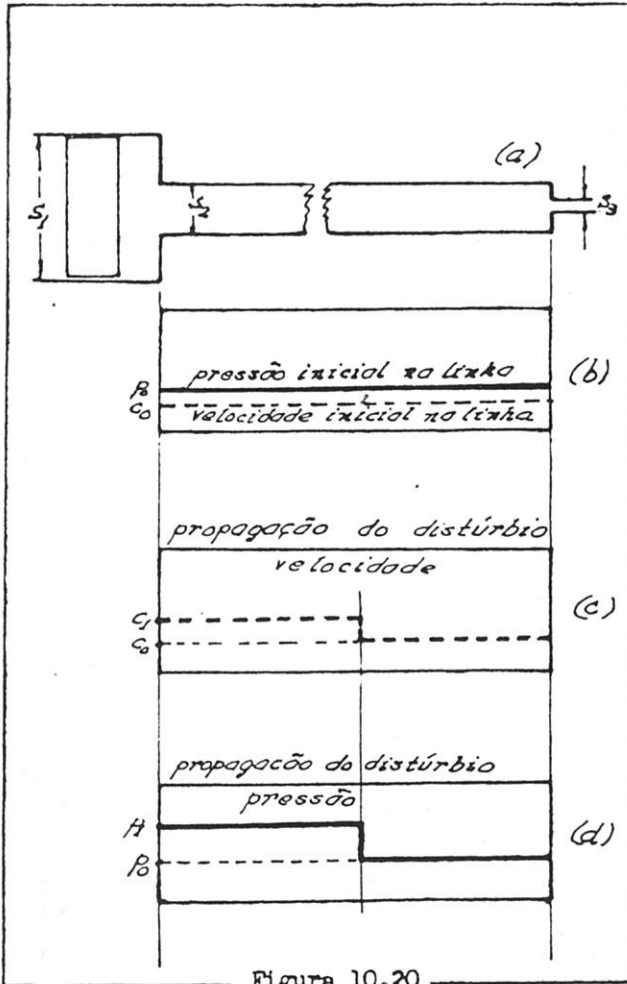


Figura 10.20

Por outro lado, a velocidade com que o óleo se desloca na linha é calculada pela relação (S_1/S_2) sendo S_1 a área da secção do pistão da bomba e S_2 a da secção da linha. Conhecendo-se a velocidade do pistão tem-se a do fluido no cilindro da bomba e na linha. Determina-se assim a variação c de velocidade que o fluido sofre antes e depois do pistão ter-se deslocado. Ao mesmo tempo a pressão na linha sobe e a variação é dada por

$$\Delta p = \frac{K}{c_B} \cdot \Delta c$$

A pressão do fluido que, no começo do ciclo, valia P_0 , passa para um valor $P_0 + \Delta p$, quando o pistão da bomba começar a se deslocar. Essa nova pressão vai se propagar com a velocidade c_B até o fim da linha.

Se o fenómeno encontrar o orifício do injetor fechado, haverá uma reflexão; a velocidade cairá para zero, porque a reflexão se dá em sentido contrário e em mesmo valor. Porém a pressão aumentará, pelo reflexo, para

$$P_0 + \Delta p + \Delta p.$$

Se o orifício estiver aberto, a onda refletida terá menor amplitude. A velocidade do fluido em S_2 será então dada pela

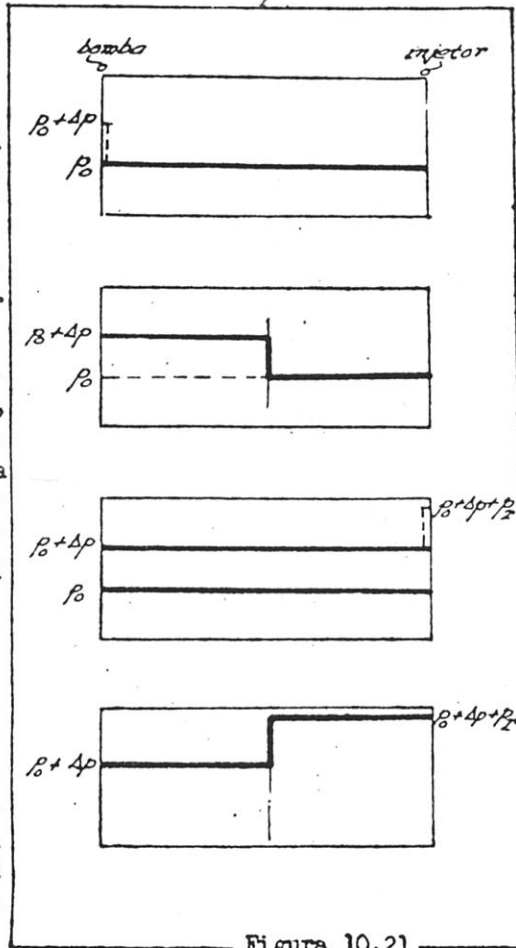


Figura 10.21

equação do escoamento:

$$c_3 = \sqrt{\frac{2g(p_2 - p_3)}{\gamma}}$$

e portanto a velocidade na linha antes do orifício será

$$c_2 = \frac{S_3}{S_2} c_3 = \frac{S_3}{S_2} \sqrt{\frac{2g(p_2 - p_3)}{\gamma}}$$

e como inicialmente $p_2 = p_0$

$$c_2 = \frac{S_3}{S_2} \sqrt{\frac{2g(p_0 - p_3)}{\gamma}}$$

Assim sendo, a variação de velocidade quando o orifício está aberto será $\Delta c' = \Delta c - c_2$, sendo Δc a variação se o orifício estivesse fechado.

Essa onda vai se refletir. Para o cálculo da amplitude da reflexão sabe-se que

$$p'_0 = p_0(\text{inicial}) + \Delta p(\text{distúrbio}) + p_r(\text{distúrbio refletido})$$

$$p_3 = p_0(\text{compressão do motor})$$

donde

$$\Delta c' = \Delta c - \frac{S_3}{S_2} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_0 + \Delta p + p_r - p_0)}$$

Por outro lado a amplitude da pressão refletida vale:

$$\Delta p = p_r = \frac{K}{c_B} \Delta c'$$

e portanto

$$p_r = \frac{K}{c_B} \left[\Delta c - \frac{S_3}{S_2} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (\Delta p + p_r)} \right]$$

Repetindo-se o processo acima para cada uma das reflexões, teremos a composição geral, que se acha representada na fig. 10.22. A parte superior da mesma mostra as varia

ções de pressão e velocidade que se sucedem na extremidade da linha que dá para o injetor e a parte inferior, as variações que se sucedem na extremidade oposta.

O eixo das abcissas foi dividido em múltiplos de Δt , que vem a ser o tempo que uma perturbação leva para percorrer a linha.

Supuzemos, neste gráfico, que no 12º intervalo de tempo igual a Δt tivesse fim a injeção, ou seja, o pistão da bomba chegasse ao fim do curso e iniciasse o retorno.

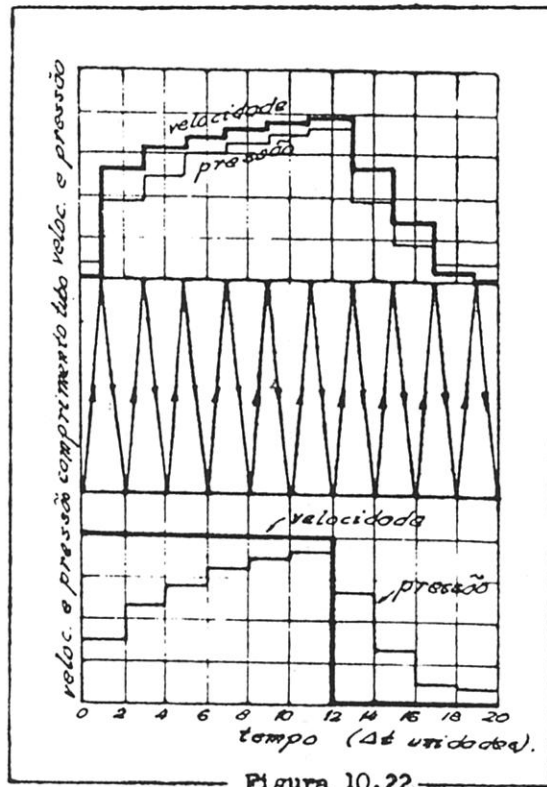


Figura 10.22