

## Compressores Parafuso

### Introdução

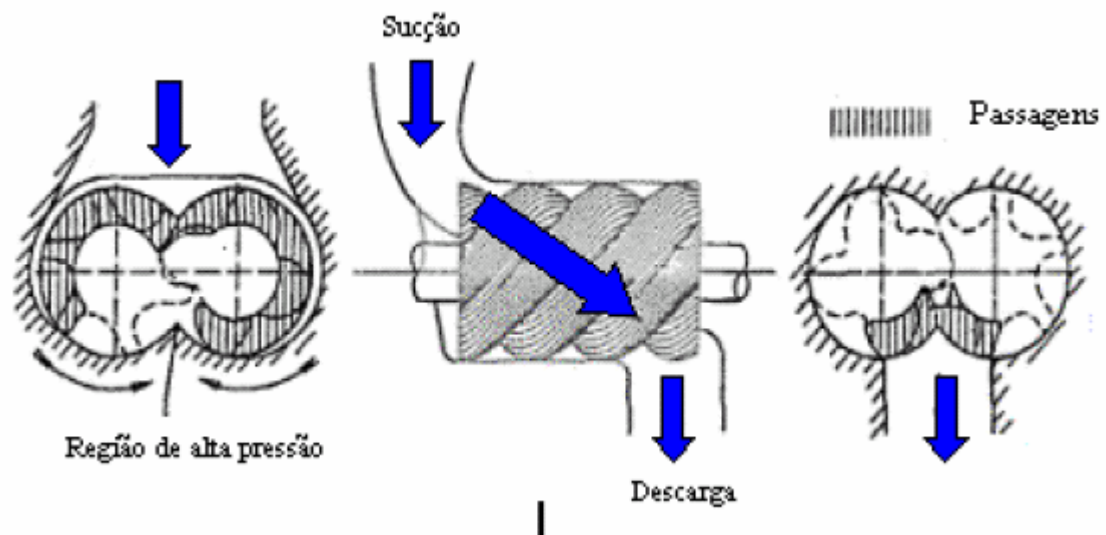
Os compressores parafuso são hoje largamente usados em refrigeração industrial para a compressão de amônia e outros gases. Conceitualmente simples, a geometria dessas máquinas é de difícil visualização, e muitas pessoas utilizam os compressores parafuso, tendo somente uma vaga idéia de como eles realmente operam. Uma compreensão dos princípios básicos de sua operação irá contribuir para a sua correta utilização, evitando problemas e alcançando um melhor desempenho global da instalação.

### Construção

Um compressor parafuso típico, selado com óleo, é uma máquina de deslocamento positivo que possui dois rotores acoplados, montados em mancais para fixar suas posições na câmara de trabalho numa tolerância estreita em relação à cavidade cilíndrica. O rotor macho tem um perfil convexo, ao contrário do rotor fêmea, que possui um perfil côncavo. A forma básica dos rotores é semelhante à uma rosca sem-fim, com diferentes números de lóbulos nos rotores macho e fêmea (Figura 18).

Freqüentemente, os rotores macho têm 4 e os fêmeas 6. Alguns compressores com tecnologia mais recente, possuem a configuração 5+7. Qualquer um dos dois rotores pode ser impulsionado pelo motor.

Quando o rotor fêmea é acoplado ao motor com uma relação entre os lóbulos de 4+6, a capacidade é 50 % maior que o acoplamento feito no rotor macho, sob as mesmas condições. O torque é transferido diretamente de rotor para rotor e o sentido da rotação é fixo. O dispositivo de acionamento é geralmente conectado ao rotor macho, e este aciona o rotor fêmea por meio de uma película de óleo.



*Figura 18. Geometria básica de um compressor parafuso.*

O ciclo de operação possui três fases distintas :

- sucção;
- compressão;
- descarga.

### **Vedação**

Todos os compressores parafuso utilizados em refrigeração utilizam injeção de óleo na câmara de compressão para lubrificação, vedação e resfriamento. A vedação entre os diferentes níveis de pressão compreende uma estreita faixa entre o engrenamento dos rotores e a periferia dos mesmos na câmara de compressão. O óleo é injetado diretamente na câmara de compressão em uma quantidade suficiente, de forma a minimizar o vazamento e resfriar o gás. Posteriormente, este óleo é separado do gás em um separador de óleo.

A utilização da quantidade adequada de óleo, permite que este absorva a maioria do calor proveniente da compressão, fazendo com que a temperatura de descarga seja baixa, mesmo quando a razão de compressão for alta. Por exemplo, operando numa razão de compressão 20:1 em simples estágio com amônia sem injeção de óleo, a temperatura de descarga pode chegar a 340°C. Com o resfriamento de óleo, esta mesma temperatura não excede 90°C. Entretanto, operando a 20:1 ou mesmo numa razão mais alta e em simples estágio, não há como superar a eficiência dos sistemas de duplo estágio, que não danificam o compressor. As instalações com sistema de duplo estágio são bastante comuns hoje em dia.

### **Princípios de Operação**

Um compressor parafuso pode ser descrito como uma máquina de deslocamento positivo com dispositivo de redução de volume. Esta ação é análoga à de um compressor alternativo.

É útil referir-se ao processo equivalente efetuado por um compressor alternativo, para se entender melhor como funciona a compressão em um compressor parafuso.

O gás é comprimido simplesmente pela rotação dos rotores acoplados. Este gás percorre o espaço entre os lóbulos enquanto é transferido axialmente da sucção para a descarga.

### **Sucção**

Quando os rotores giram, os espaços entre os lóbulos se abrem e aumentam de volume. O gás então é succionado através da entrada e preenche o espaço entre os lóbulos, como na Figura 19. Quando os espaços entre os lóbulos alcançam o volume máximo, a entrada é fechada.

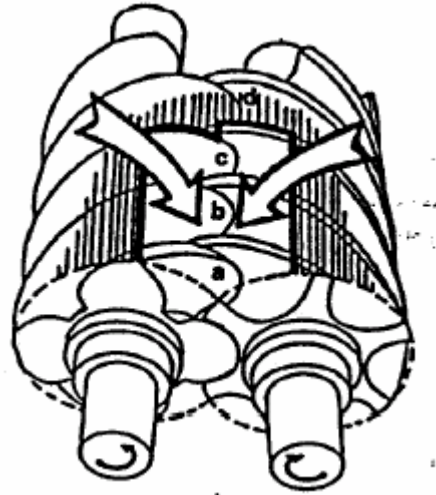


Figura 19. Princípio da sucção em um compressor parafuso.

Este processo é análogo à descida do pistão num compressor alternativo (Figura 20).

O refrigerante admitido na sucção fica armazenado em duas cavidades helicoidais formadas pelos lóbulos e a câmara onde os rotores giram. O volume armazenado em ambos os lados e ao longo de todo o comprimento dos rotores é definido como *volume de sucção* ( $V_s$ ). Na analogia com o compressor alternativo, o pistão alcança o fundo do cilindro e a válvula de sucção fecha, definindo o volume de sucção  $V_s$ . Isto pode ser visto na Figura 21.

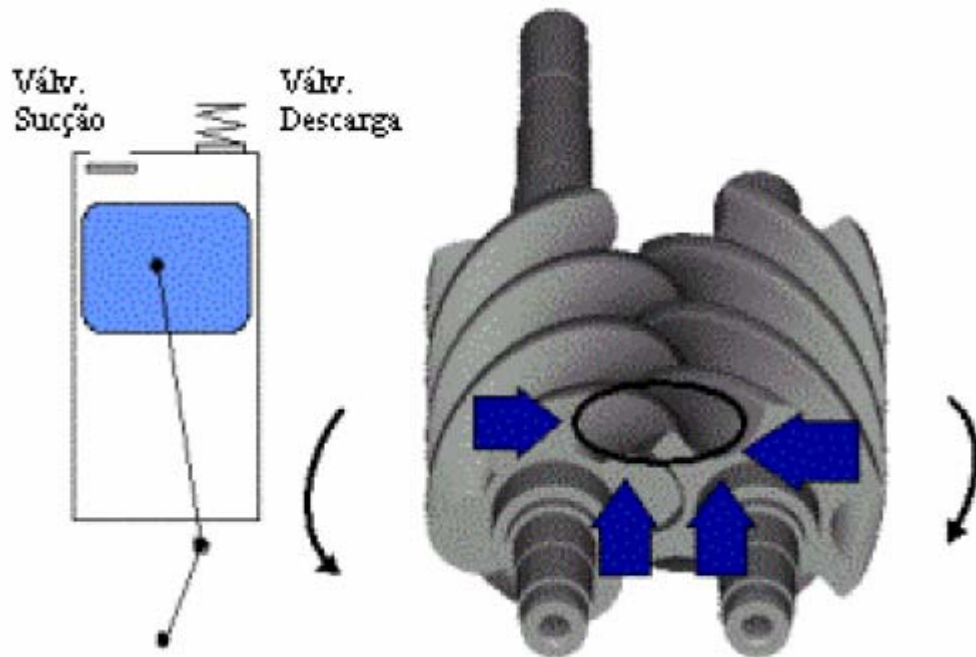


Figura 20. Comparação entre processos de sucção.

O deslocamento volumétrico do compressor alternativo é definido em termos do volume da sucção, pela multiplicação da área da cavidade pelo percurso do cilindro e pelo número deles. No caso do compressor parafuso, este deslocamento é dado pelo volume da sucção por fio, vezes o número de lóbulos do motor acionado.

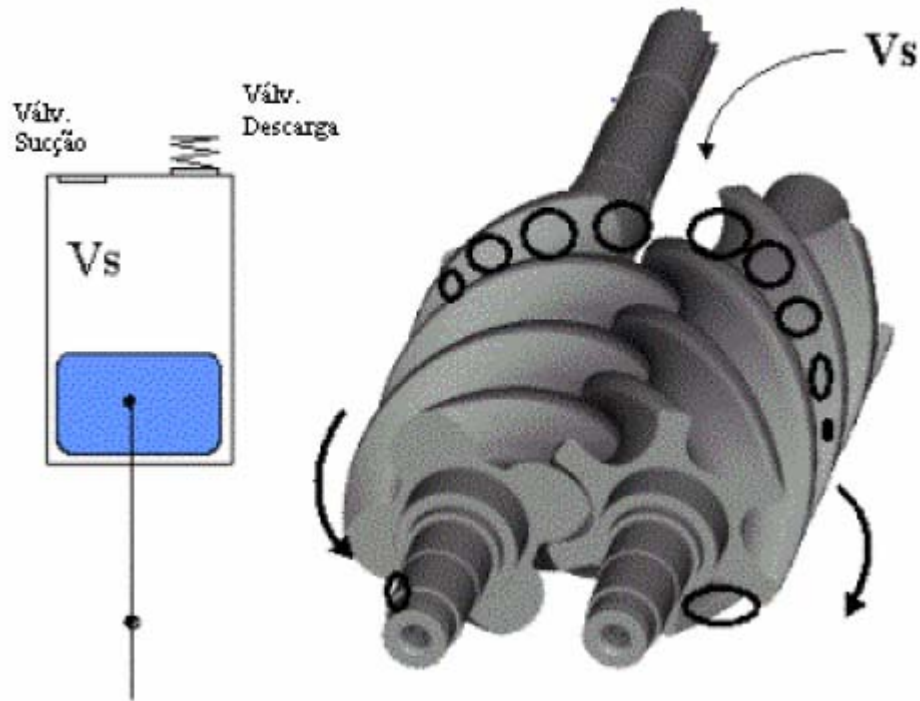


Figura 21. Volume máximo na sucção.

### Compressão

Os lóbulos do rotor macho começarão a encaixar-se nas ranhuras do rotor fêmea no fim da sucção, localizada na traseira do compressor. Os gases provenientes de cada rotor são unidos numa cunha em forma de “V”, com a ponta desse “V” situada na intersecção dos fios, no fim da sucção, como mostrado na Figura 21.

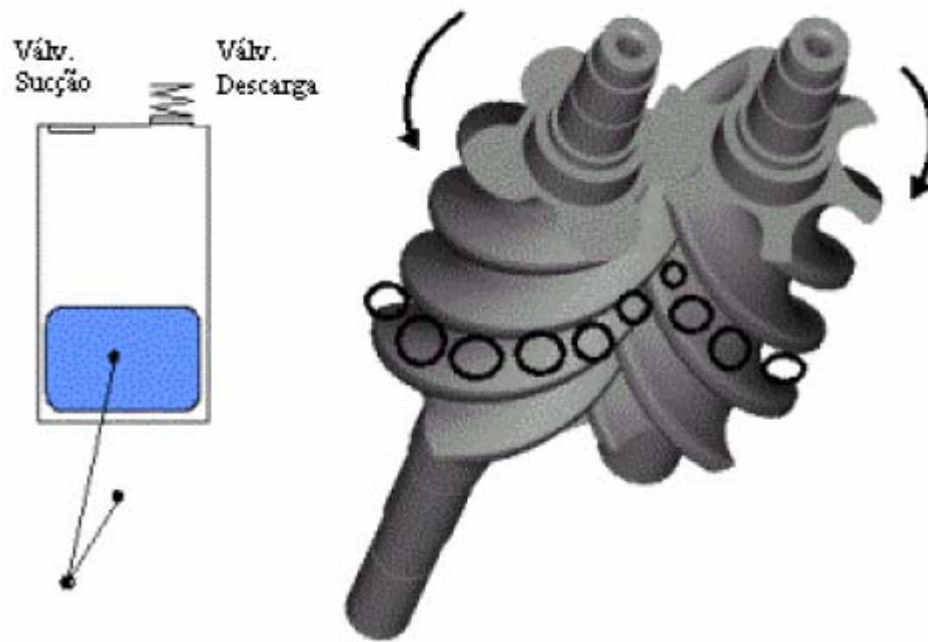


Figura 21. Início da compressão.

Posteriormente, em função da rotação do compressor, inicia-se a redução do volume no “V”, ocorrendo a compressão do gás. O ponto de intersecção do lóbulo do rotor macho e da ranhura do rotor fêmea é análogo à compressão do gás pelo pistão em um compressor alternativo (ver a Figura 22).

### Descarga

Em um compressor alternativo, este processo começa quando da abertura da primeira válvula de descarga. Como a pressão no cilindro excede a pressão acima da válvula, esta se abre, permitindo que o gás comprimido seja empurrado para a descarga. O compressor parafuso não possui válvulas para determinar quando a compressão termina: a localização da câmara de descarga é que determina quando isto acontece, como mostrado na Figura 23. O volume do gás nos espaços entre os lóbulos na porta de descarga é definido como *volume de descarga* ( $V_d$ ).

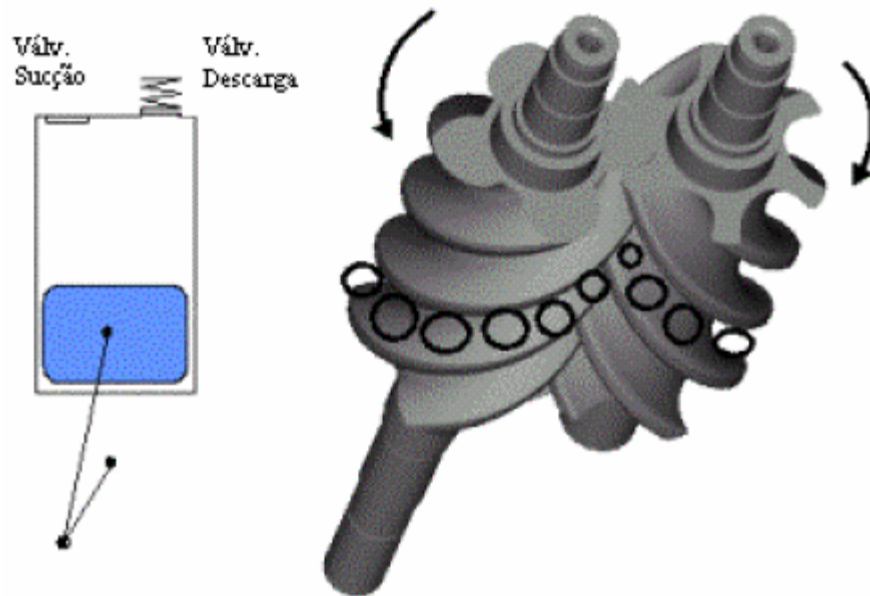


Figura 22. Continuação da Compressão.

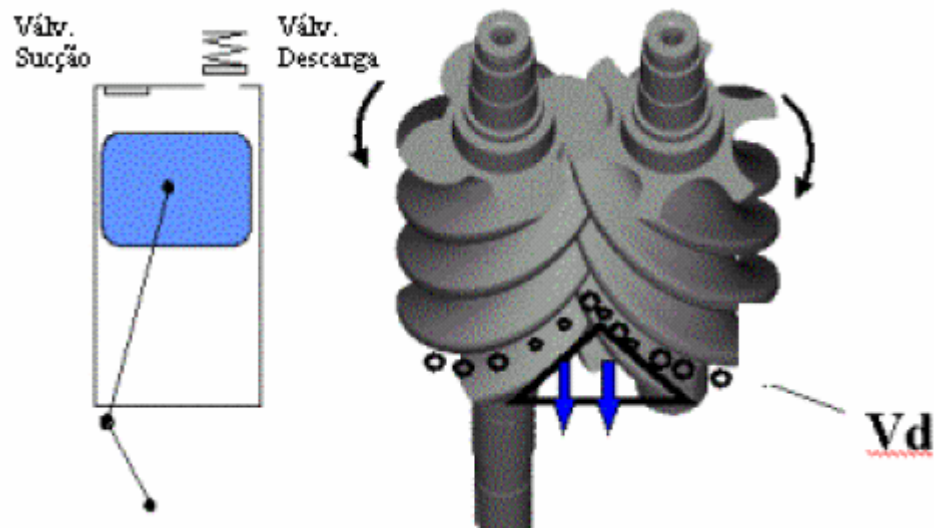


Figura 23. Início da descarga.

São utilizadas duas aberturas: uma para descarga radial na saída final da válvula de deslizamento e uma para descarga axial na parede de final da descarga. Estas duas acarretam uma liberação do gás comprimido internamente, permitindo que seja jogado na região de descarga do compressor. O posicionamento da descarga é muito importante pois controla a compressão, uma vez que determina a razão entre volumes internos ( $V_i$ ). Para se atingir a maior eficiência possível, a razão entre volumes deve possuir uma relação com a razão entre pressões.

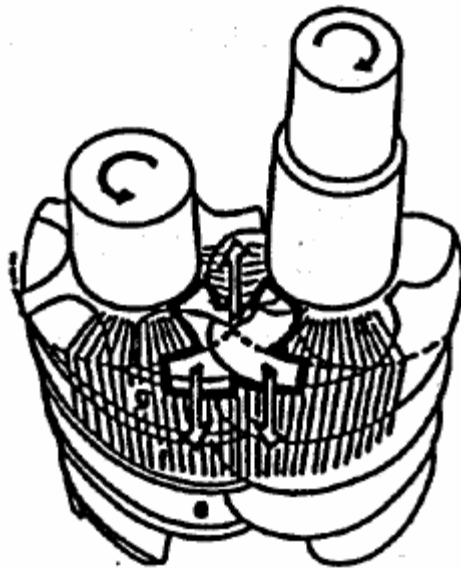


Figura 24. Descarga

Em um compressor alternativo, o processo de descarga é finalizado quando o pistão alcança o ponto superior da câmara de compressão e a válvula de descarga se fecha. No compressor parafuso, isto ocorre quando o espaço antes ocupado pelo gás é tomado pelo lóbulo do rotor macho (ver Figura 25).

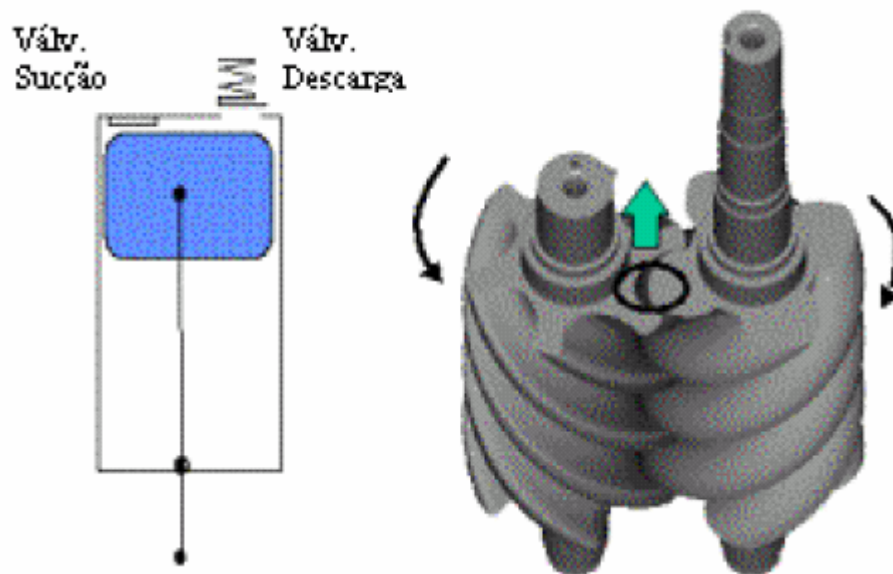


Figura 25. Fim da descarga.

Os compressores alternativos sempre têm uma pequena quantidade de gás (espaço morto) que é deixado no topo do cilindro de compressão e se expande no próximo ciclo, desta forma, ocupando um espaço que poderia ser utilizado para aumentar a massa de refrigerante succionado. No final da descarga de um compressor parafuso, nenhum volume “nocivo” permanece no interior da câmara de compressão, ou seja, todo o gás é jogado para fora. Esta é uma razão que faz com que os



compressores parafuso sejam capazes de operar com razões de compressão mais altas do que os compressores alternativos.

### **Razão entre Volumes**

Em um compressor alternativo, as válvulas de descarga abrem quando a pressão no cilindro excede a pressão na descarga. Pelo fato do compressor parafuso não possuir válvulas, a localização da câmara de descarga determina a máxima pressão que será conseguida nos lóbulos, antes do gás ser empurrado para fora.

A razão entre volumes é uma característica de projeto fundamental em todos os compressores parafuso. O próprio compressor é um dispositivo de redução de volume. A comparação entre o volume de gás na sucção ( $V_s$ ) e o volume de gás na câmara de compressão quando a descarga se abre define a razão de redução de volumes do compressor ( $V_i$ ), que determina a razão de pressão do compressor através das relações abaixo :

$$V_i = V_s/V_d$$

onde :  $V_i$  = razão entre volumes

$V_s$  = volume na sucção

$V_d$  = volume na descarga

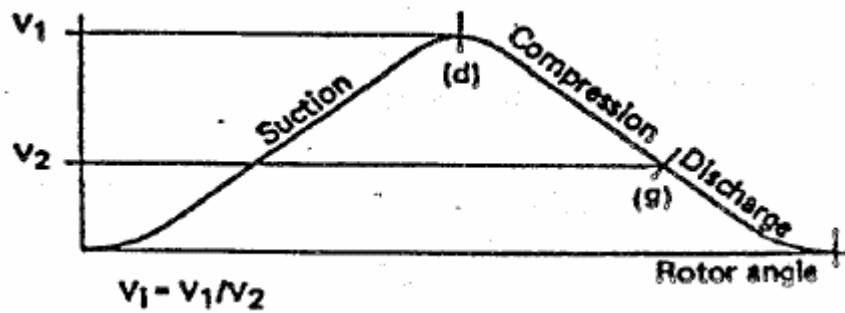
$$P_i = V_i \cdot c_p$$

onde :  $P_i$  = razão entre pressões

$c_p$  = calor específico do gás

Somente a pressão de sucção e a razão entre volumes definem o nível de pressão do gás antes da abertura da câmara de descarga. Entretanto, em todos os sistemas de refrigeração, a pressão de descarga do sistema é determinada pela temperatura de condensação, e a temperatura de evaporação determina a pressão de sucção.





Figuran26. Volume dos espaços entre lóbulos.

Se a razão entre volumes do compressor for muito alta para uma dada condição de operação, a descarga do gás tornar-se-á muito longa e a pressão ficará acima da pressão de descarga.

Este fenômeno é denominado *sobre-compressão* e é representado por um diagrama pressão-volume, conforme apresentado na Figura 26. Neste caso, o gás é comprimido acima da pressão de descarga e quando ocorre a abertura da descarga, a alta pressão do gás faz com que ocorra a expansão do refrigerante para a tubulação de descarga, fora do compressor. Isto acarreta um trabalho maior do que se a compressão tivesse sido interrompida quando a pressão interna fosse igual a pressão na câmara de descarga.



Figura 26. Sobre-compressão - Diagrama P x V.

Quando a razão entre volumes é muito baixa para as condições de operação do sistema, isto é chamado *sub-compressão* e está representada na Figura 27. Neste caso a abertura da porta de descarga acontece antes que a pressão do gás alcance a pressão de descarga. Isto faz com que o gás que estava do lado de fora do compressor invada a câmara de compressão, elevando a pressão imediatamente para o nível de pressão da descarga. O compressor tem que trabalhar com um nível de pressão mais alto, no lugar de trabalhar com uma gradual elevação do nível de pressão.

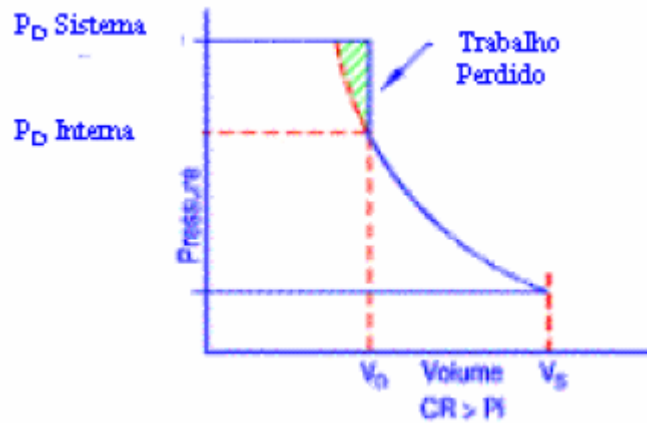


Figura 27. Sub-compressão - Diagrama  $P \times V$ .

Nos dois casos, o compressor ainda funcionará, e o mesmo volume de gás será deslocado, porém com uma potência requerida maior do que aquela que seria utilizada se as aberturas de descarga estivessem localizadas corretamente, de modo a equiparar a razão entre volumes com a necessidade do sistema. Isto gera um custo de energia maior. Projetos de razão entre volumes variável são usados para otimizar a localização da câmara de descarga e minimizar a potência requerida.

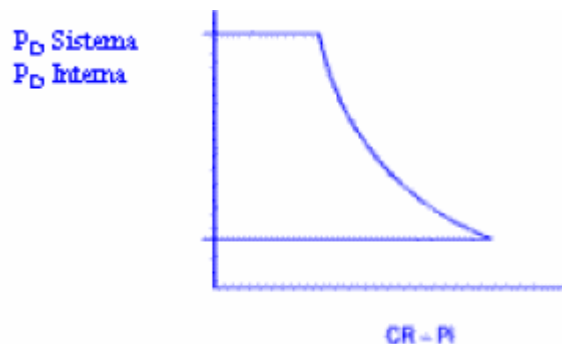


Figura 28. Compressão ideal – Diagrama  $P \times V$ .

### Controle de capacidade

O controle de capacidade em um compressor parafuso é utilizado para variar a quantidade de gás que entra na câmara. Isto é necessário para providenciar um controle preciso da temperatura de sucção, quando a carga térmica variar. Alguns métodos comuns de controle de capacidade são :

- Válvula de deslizamento controlando a câmara de descarga;
- Válvula de deslizamento controlando a câmara de descarga e a razão entre volumes;
- Válvula de deslizamento não controlando a câmara de descarga;

- Velocidade variável – Compressor Rotatune Válvulas de deslizamento controlando a câmara de descarga são muito comuns porque podem fornecer uma ampla faixa de controle de capacidade, freqüentemente entre 10 e 100%.

Este tipo de válvula opera através da abertura de uma passagem de recirculação, na região de alta pressão, o que permite que uma porção do gás localizado entre os lóbulos seja direcionada novamente para a cavidade da sucção antes de iniciar-se a compressão (ver Figura 28).

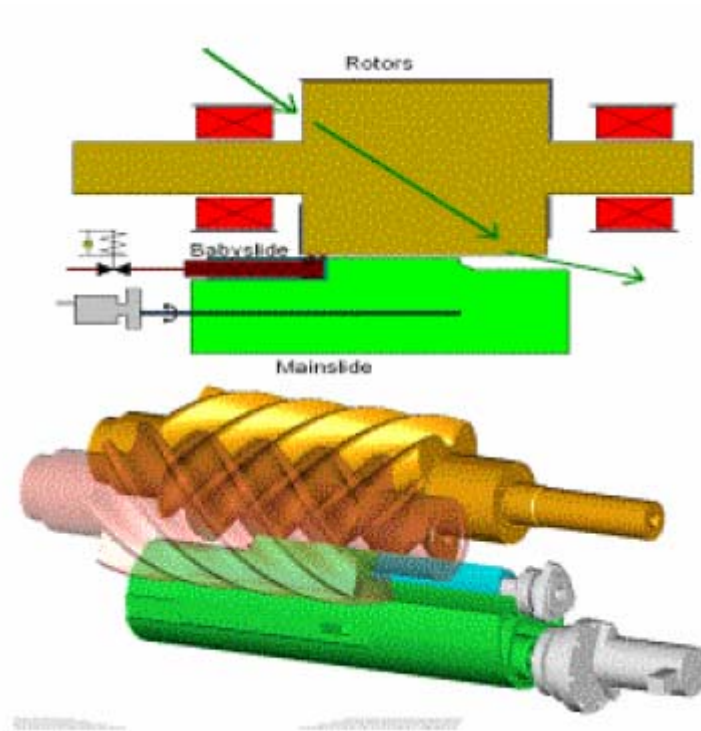
Este método oferece boa eficiência a cargas parciais por duas razões. Primeiro, o gás recirculado precisa somente superar uma ligeira queda de pressão antes de passar novamente à sucção desde que a cavidade de recirculação abra antes da compressão ter iniciado, evitando uma perda de trabalho na pré-compressão.

Segundo, como a válvula de deslizamento é móvel, a descarga radial é também móvel. Como o volume da sucção é diminuído, a abertura da câmara de descarga é também atrasada, mantendo assim aproximadamente a mesma razão entre volumes à carga parcial como à carga total para ótima eficiência à carga parcial.

Um compressor projetado para controle de capacidade e variação da razão entre volumes é mostrado na Figura 28. Neste projeto um deslizamento móvel é ajustado do mesmo modo que uma válvula de deslizamento. A posição da câmara de descarga e da cavidade de recirculação podem ser ambas ajustadas. Isto permite um grande número de posições para ambas as válvulas, as quais permitem ajuste da capacidade e da razão entre volumes desde a carga máxima até aproximadamente 40% da mesma, abaixo da qual continua o controle de capacidade até 10% da carga máxima. Este arranjo melhora a eficiência à carga total e parcial.

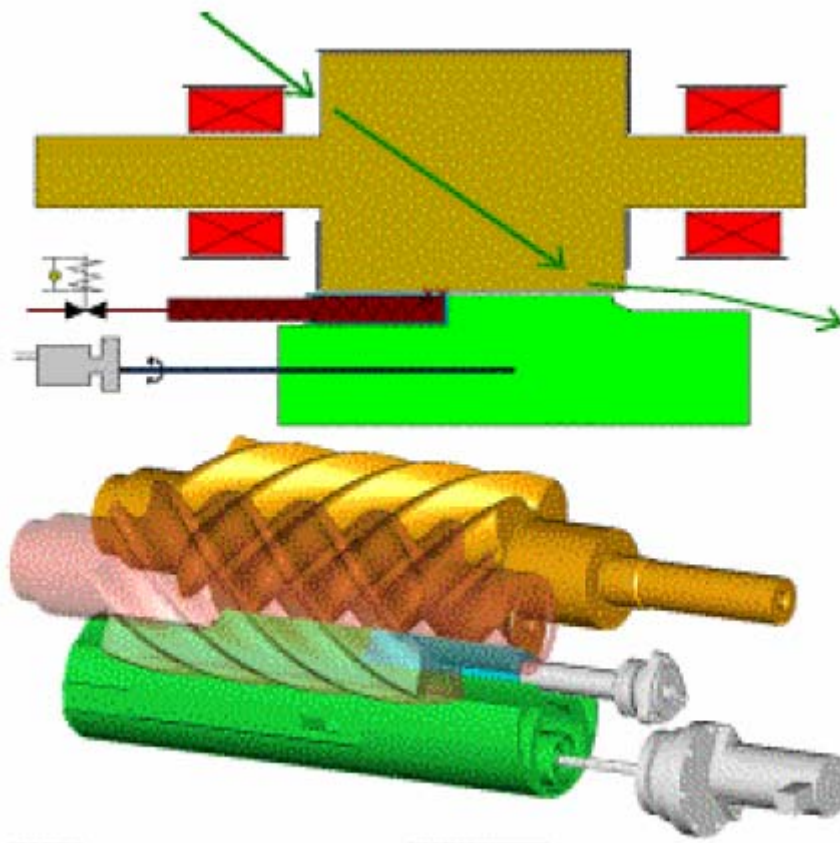
Há muitas variedades de válvulas de deslizamento que não controlam a descarga, sendo a mais comum aquela que é ligada à cavidade do rotor por meio de ranhuras. Este tipo de descarga fornece uma boa redução de capacidade mas não a cargas parciais, pelo fato da razão entre volumes não permanecer constante durante a descarga.

Pode haver também algum vazamento através das cavidades no rotor, o que pode prejudicar a eficiência em qualquer faixa de operação. Estes dispositivos têm um custo mais baixo que as válvulas de deslizamento convencionais e são utilizados em pequenos compressores.

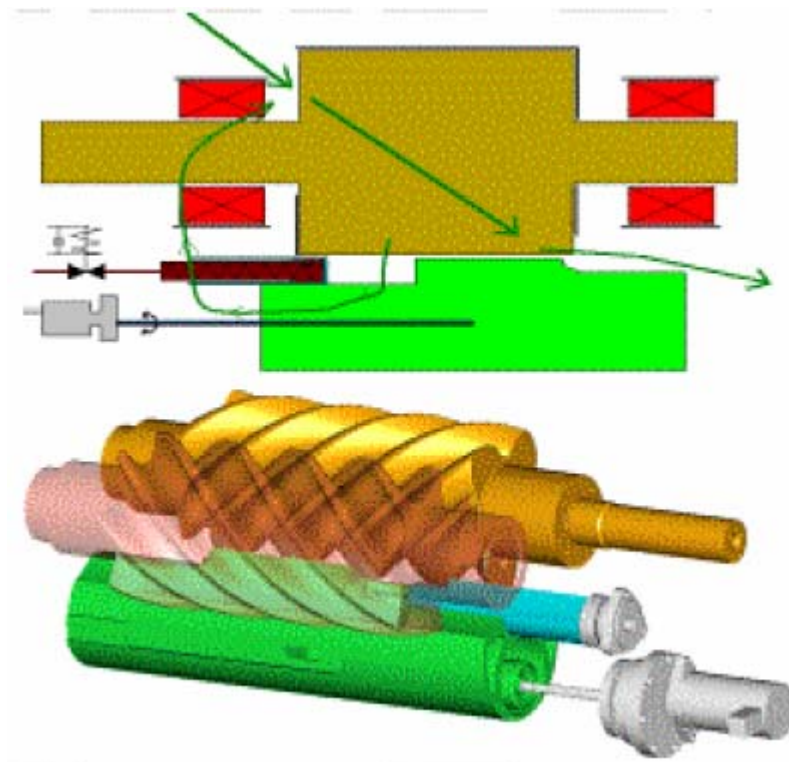


*Figura 28. Válvula de deslizamento controlando a capacidade e a localização da câmara de descarga. Carga total com  $V_i$  mínimo.*

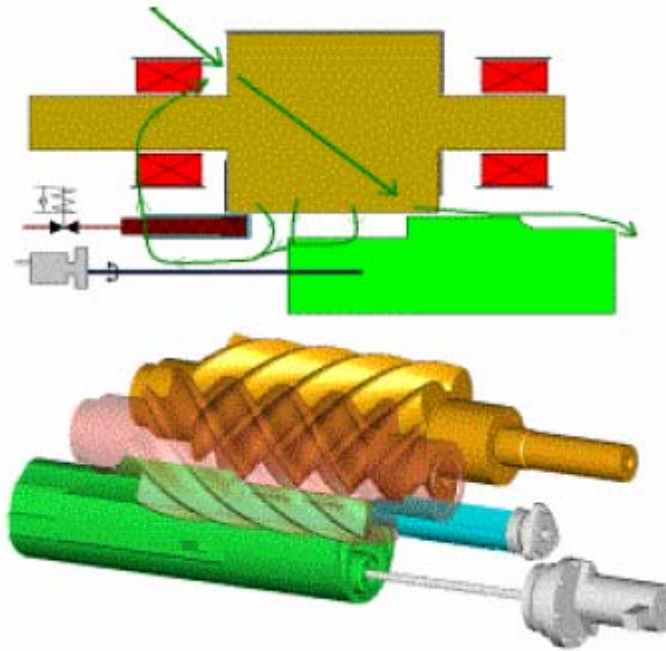
Válvulas de encaixe são dispositivos que podem ser tanto axiais como radiais e que levantam para abrir uma passagem de recirculação dos espaços entre os lóbulos de volta para a sucção. Geralmente operam em faixas definidas de 75, 50 e 25 % da carga máxima para cada abertura do encaixe. Estes dispositivos não fornecem correção da razão entre volumes a cargas parciais como as primeiras válvulas de deslizamento; assim, a eficiência quando não se opera a carga máxima é comparável às válvulas de deslizamento que não regulam a localização da descarga. Também possuem um baixo custo e um controle simples.



*Figura 29. Válvula de deslizamento controlando a localização da descarga e a razão entre volumes.  
Carga total com  $V_i$  máximo*



*Figura 30. Válvula de deslizamento controlando a localização da descarga e a razão entre volumes.  
Carga 60 % com  $V_i$  máximo*



*Figura 31. Válvula de deslizamento controlando a localização da descarga e a razão entre volumes.  
Carga mínima com  $V_i$  máximo*

### **Velocidade variável**

A variação de velocidade é ocasionalmente utilizada como método de controle de capacidade nos compressores parafuso e pode ser efetuada com motores com rotação controlada, turbinas a vapor, ou acionamentos com frequência elétrica variável. A potência do compressor não decresce linearmente com a redução de velocidade mas cai bastante com a rotação dos rotores e com a razão de compressão. Em geral, a eficiência do compressor a cargas parciais será ligeiramente melhor a baixas razões de compressão e significativamente melhor a altas razões de compressão à velocidade reduzida, quando comparada ao controle feito pela válvula de deslizamento, mas isto não leva em conta as perdas no acionamento da redução de velocidade.

Uma típica variação da frequência causará uma perda em torno de 3% quando operando à carga total, além de uma perda adicional de 2,5% na eficiência do motor. Isto dá uma perda de aproximadamente 5,5% à carga total. Com alguns acionamentos, esta perda pode igualar-se àquela relativa à redução de velocidade, tornando-se uma perda significativa a baixas velocidades. Se um compressor for operar à carga parcial a uma alta razão de compressão durante muitas horas por ano, o custo do acionamento pode ser justificado.

Caso opere próximo da carga total por longos períodos, ou opere fundamentalmente a baixas razões de compressão, é improvável que haja qualquer ganho com acionamento de velocidade variável, ou que o custo seja justificado em comparação com a válvula de deslizamento.

O perfil de carga e as condições de operação esperados numa aplicação devem ser considerados para se determinar a utilização ou não do controle de velocidade para cargas parciais.

O controle de velocidade variável com compressores parafuso não deve ser implementado sem antes consultar o fabricante do compressor. Há limites de velocidade abaixo dos quais pode haver falhas de lubrificação nos mancais. Grandes compressores terão menor velocidade mínima em comparação com os pequenos compressores. Muitos dos pequenos podem ser capazes de acoplarem um acionamento de velocidades acima da frequência padrão, mas os limites do separador, o tamanho do resfriador de óleo e outras limitações da unidade devem ser investigadas. É possível também encher um compressor com óleo e ele falhar se a velocidade é reduzida abaixo de um limite aceitável com o compressor sem carga.

Muitas destas limitações ainda não foram estudadas mas deverão ser analisadas num futuro próximo.

### **Sistemas de óleo: separação e resfriamento**

Como dito anteriormente, a injeção de óleo cumpre muitas funções úteis no compressor parafuso. Entretanto, se este óleo não for desejável em outras partes do sistema de refrigeração, será preciso a utilização de um separador de óleo. A mistura do gás de descarga e óleo que deixa o compressor é dirigida ao separador de óleo onde há uma mudança de direção e uma grande redução na velocidade. As partículas de óleo maiores são encaminhadas para o reservatório por gravidade, enquanto que as partículas menores e a fumaça são carregados para os filtros de coalescência (aderência), onde se chocam com as fibras do filtro e coalescem (aderem) com as gotículas maiores, as quais são recolhidas no reservatório e retornam para a região de baixa pressão do compressor. Além de remover o óleo da linha de gás, o separador também permite que qualquer gotícula de refrigerante presente no tanque principal absorva calor e vaporize, ou borbulhe na superfície do óleo, fornecendo ao óleo a pureza necessária para a reinjeção no compressor.

Já que a maioria do calor da compressão é transferido para o óleo durante a compressão, esta energia deve ser removida por um sistema de refrigeração do óleo. Os três sistemas mais comuns são resfriamento à água, por termosifão e injeção de líquido. Mesmo que o resfriamento a ar seja possível, este não é tão utilizado como os três sistemas acima que serão descritos a seguir.

### **Resfriamento a água**

Referindo-se a Figura 32, o óleo quente deixa o separador passando através de um filtro na bomba de óleo. Este óleo é bombeado através de um trocador de calor tipo casco e tubo ou tipo placa, onde o calor é rejeitado numa corrente de água ou glicol.

O óleo resfriado é então filtrado e retorna ao compressor para a injeção. A primeira desvantagem deste sistema envolve o custo inicial para a manutenção do sistema de água ou glicol, e o risco da



ruptura dos tubos ou encaixe se as condições da água não forem apropriadas. É preferível deixar o fluxo de água numa razão constante, e utilizar uma válvula de mistura reguladora de temperatura no lado que contém o óleo para misturar óleo quente e frio para se obter a temperatura desejada de injeção. Isto minimizará a formação de incrustações nos tubos, mantendo a velocidade da água num valor mínimo aceitável. O uso de glicol elimina o risco de incrustações.

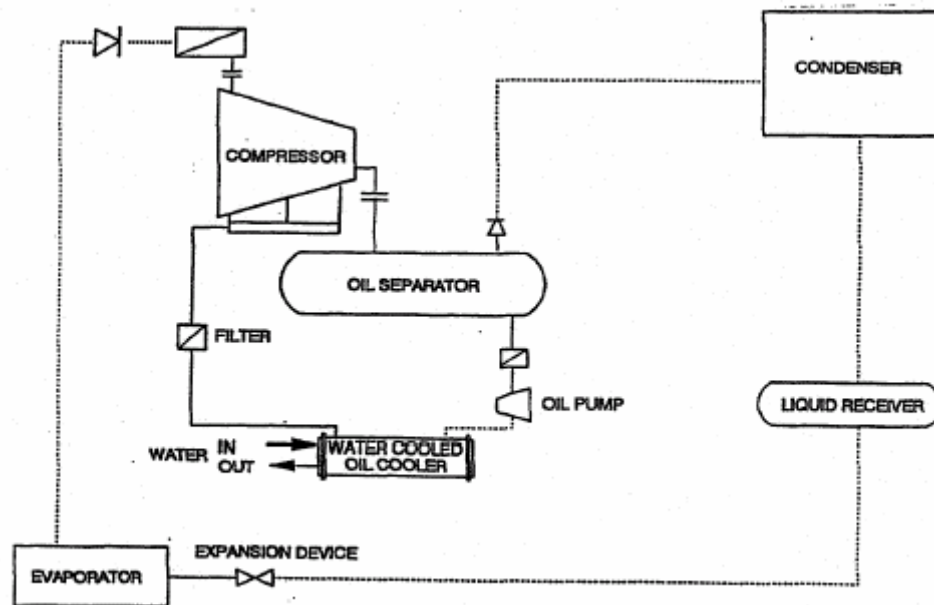


Figura 32. Compressor parafuso com resfriamento do óleo à água.

### Resfriamento por termosifão

Atualmente, o termosifão é um tipo comum de resfriamento de óleo em instalações industriais. Um exemplo é mostrado na Figura 33. O sistema termosifão é semelhante ao sistema à água. A diferença é que a água é substituída por refrigerante em ebulição no tubo de óleo no trocador de calor. O sistema termosifão é basicamente um evaporador inundado, alimentado por gravidade a partir de um tanque de refrigerante líquido num receptor termosifão, colocado acima do nível do trocador de calor. Como o óleo quente entra no lado do casco do trocador, o refrigerante evapora no tubo, com as bolhas elevando-se numa linha de retorno de volta ao termosifão. O vapor gerado neste processo é direcionado para o condensador onde libera calor e retorna para o tanque de líquido.

Assim, o resfriamento por termosifão é um evaporador inundado por gravidade, com a temperatura de evaporação controlada pela pressão do condensador.

Este sistema é muito utilizado porque praticamente não requer manutenção e não afeta a performance do compressor. A instalação possui um baixo custo, e a tubulação pode ser ocasionalmente modificada, particularmente em salas com dimensões reduzidas (teto baixo), ou casa de máquinas antiga onde a tubulação precisa ser modificada.

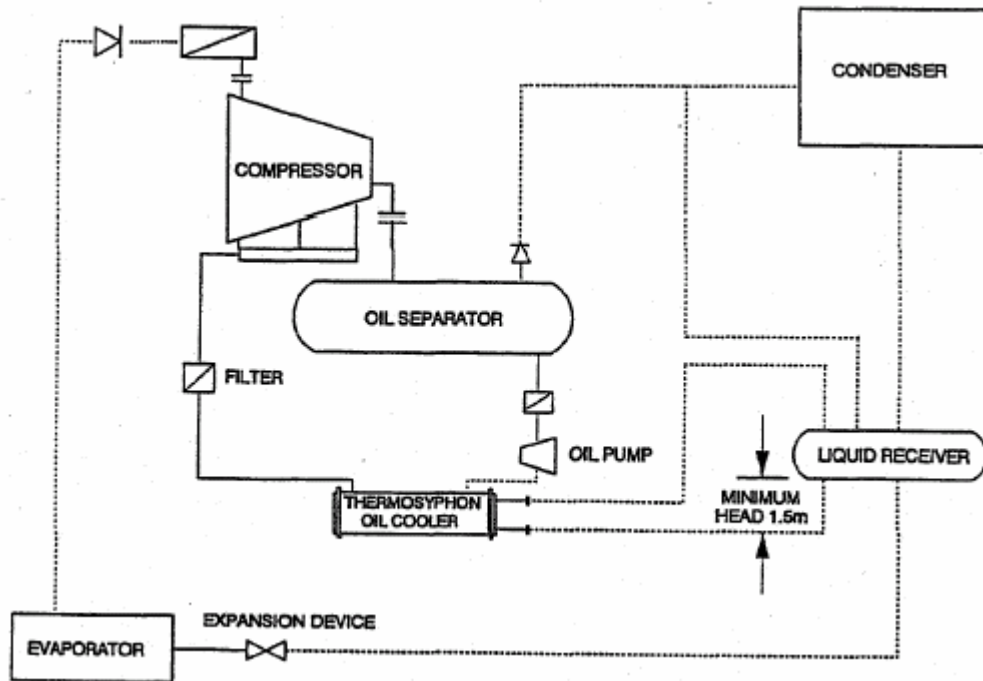


Figura 33. Resfriamento por termosifão.

### Resfriamento por injeção de líquido

A injeção de líquido resfria o óleo pela injeção direta de refrigerante na região de baixa pressão na câmara de compressão, interrompendo a compressão, como visto na Figura 34. O óleo e a descarga de gás são controlados pela temperatura mantida por uma válvula de expansão termostática. Esta válvula controla o fluxo de injeção de líquido para manter a temperatura de um termômetro de bulbo instalado na linha de descarga do compressor.

Parte do líquido injetado expande através da válvula nos espaços entre os lóbulos dos rotores, solicitando uma potência adicional para compressão. Todo líquido remanescente mistura-se com o óleo e é transportado para a linha de descarga junto com o gás. O líquido injetado permanece no compressor durante aproximadamente 0,01 s. Como a transferência de calor precisa de tempo, a maioria do resfriamento acontece na linha de descarga e no separador de óleo, onde o líquido tem tempo de absorver calor e evaporar.

Pode haver vazamento da mistura óleo-líquido na sucção. O vazamento de óleo tem pouco efeito, porém o líquido irá expandir na sucção como vapor, com um grande acréscimo no volume específico, reduzindo a quantidade de gás que pode ser succionado. Isto causa uma redução na capacidade com injeção de líquido, com influência em altas razões de compressão.

Baixo custo inicial e pouca manutenção fazem da injeção de líquido muito utilizada há vários anos. Entretanto, as perdas de potência e capacidade fazem-na pouco atrativa para a maioria das aplicações com alto calor de compressão. Não é recomendada para sistemas com condições mesmo temporárias

de alta sucção e baixa pressão, onde diferenças inadequadas através da válvula de expansão causam alimentação incerta de líquido.

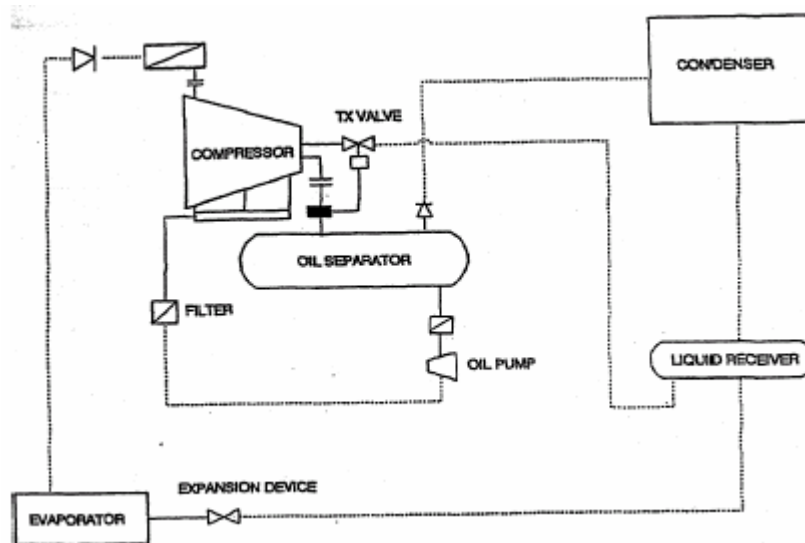


Figura 34. Resfriamento de óleo por injeção de líquido.

### Economizadores e carga intermediária

Como a pressão num compressor parafuso é gradualmente aumentada ao longo do comprimento do rotor, é possível introduzir aberturas na cavidade do rotor a qualquer pressão entre a sucção e a descarga. Um *economizador* é uma abertura localizada numa razão de volume fixa em relação à sucção e é utilizada como uma porta de sucção secundária. Uma quantidade adicional de gás pode ser dirigida para o espaço entre os lóbulos enquanto esta entrada está aberta, aumentando a pressão entre os lóbulos, com o fluxo combinado de gás sendo comprimido.

No caso de carga intermediária, o gás adicional geralmente vem de um segundo evaporador. A pressão do refrigerante no evaporador deve ser mais alta que no economizador para forçar o gás para dentro do compressor.

Um economizador é um caso especial de carga intermediária, onde a porção de líquido vinda do condensador é evaporada, com o gás de *flash* indo para o economizador de tal forma a subresfriar o líquido remanescente no condensador.

Isto permite um aumento na capacidade porque o líquido que vai para o evaporador principal é mais frio, e também um aumento na eficiência global, em virtude das vantagens termodinâmicas do subresfriamento e do fato da compressão do vapor no economizador ser geralmente muito eficiente.

Quando o compressor está girando, há certas fontes de ineficiência que devem ser sempre superadas : atrito nos mancais e nas paredes, rompimento do filme de óleo, vazamento de uma certa quantidade de óleo nos lóbulos, e atrito na vedação do eixo. A adição do economizador não aumenta nenhuma dessas perdas, e assim a compressão é quase ideal.

## Requisitos para instalação

A seguir, algumas diretrizes que poderão amenizar problemas na operação do compressor. Porém, é sempre importante seguir as recomendações do fabricante, mas as seguintes são freqüentes em instalações típicas :

- Instale o compressor numa fundação apropriada. Nivele a unidade para eliminar fadiga e transporte junto ao chão para assegurar pleno contato com o mesmo. Devem ser utilizados fixadores de boa qualidade para anexar a unidade na fundação.
- Use ganchos na linha de sucção com 0,6 m de elevação para evitar adicionar tubos na casa de máquinas. A linha de descarga também deve ser apoiada no caso de tubulações longas.
- Durante a instalação, mantenha a sujeira fora do sistema tanto quanto possível. Uma instalação suja causa problemas com válvulas de encaixe, e potencialmente danifica o compressor. Os compressores parafuso são muito resistentes, mas a inclusão de sujeira afetará a performance e a longevidade.
- Utilize somente a amônia como refrigerante. Use a assistência técnica apropriada para evitar a contaminação do sistema com água. Um sistema corretamente utilizado não deve possuir mais que 80 ppm de água. Bons sistemas têm 25-35 ppm.
- Utilize o óleo correto para a aplicação. Nem todos os óleos são equivalentes. Muitas instalações com temperaturas de sucção baixas ( $< -45^{\circ}\text{C}$ ) devem utilizar um óleo específico. Não misture diferentes óleos no mesmo compressor, e esteja seguro de armazenar óleos de máquina e hidráulicos longe do compressor parafuso. Aditivos utilizados em lubrificantes comuns não são compatíveis com
- aqueles utilizados em sistemas de refrigeração.
- Um modelo apropriado de acumuladores na sucção é vital para livrar de problemas a instalação do compressor. Enquanto compressores parafuso podem aceitar somente alguma quantidade de líquido sem danificar o sistema hidráulico, é possível causar falhas freqüentes em sistemas com amônia operando a baixas temperaturas com contínuo retorno de amônia líquida. Acumuladores apropriados que evitam sobrecarga de líquido podem eliminar problemas.

## Manutenção

As recomendações do fabricante quanto à manutenção variam de produto para produto. Entretanto, alguns comentários gerais podem ser feitos para agrupar mais aplicações.

A análise do óleo é importante para qualquer programa de manutenção em compressores. É muito importante analisar a quantidade de água; além disso, a viscosidade muda com o tempo, o que

indicaria diluição do óleo. Água em excesso podem afetar seriamente o compressor se permitido um retorno da mesma no sistema. A análise do metal pode detectar alguns problemas, mas usualmente os indica mais tarde, no que se refere a falhas mecânicas.

A análise de vibrações é o melhor método de monitorar a condição dos mancais. É muito útil com mancais de deslizamento, fornecendo uma indicação da deterioração do mancal quando ela se inicia. Um bom programa de análise de vibrações, planejamento de inspeções periódicas com o qual se traça um perfil de desempenho da máquina, ou uma monitoração direta elaborada no projeto pode eliminar a necessidade de desmontagens de rotina e pode minimizar de maneira eficiente o risco de uma falha irreversível no compressor.

### **Correção de problemas**

Apesar dos esforços contínuos, os compressores muitas vezes têm problemas. É o propósito de uma boa lista de problemas definir a causa dos mesmos sem precisar da substituição de componentes caros ou errados.

Uma das mais úteis lista de problemas é uma cuidadosa análise da temperatura de descarga. Se for muito alta ou muito baixa, as condições de operação devem ser investigadas, pois podem indicar uma grande distorção. Um processo lógico de correção deve ser seguido para determinar porque a temperatura de descarga está fora dos limites.

### **Baixa temperatura de descarga**

- A temperatura de descarga pode estar muito baixa porque o refrigerante líquido está sendo carregado para a linha de sucção ou economizador. A formação excessiva de espuma no separador ou o aparecimento de gelo na sucção também pode ser uma causa deste problema.
- Pode indicar a condensação de refrigerante na linha de descarga durante períodos em que o compressor estiver desligado, indo de volta para o separador de óleo e alimentando o compressor com excesso de líquido até a instalação entrar em regime permanente.
- Também pode indicar fluxo de óleo acima do valor de projeto. A injeção de óleo está ajustada apropriadamente, ou poder-se-ia regular o pistão aumentando o fluxo de óleo.

### **Alta temperatura de descarga**

- Alta temperatura de descarga pode ser causada pelo superaquecimento acima do valor de projeto na sucção ou economizador.
- Fluxo de óleo restrito no compressor provocará altas temperaturas de descarga. Verifique a válvula de injeção principal, orifícios de óleo ou o bloqueio do filtro.

- A razão entre volumes e a válvula de deslizamento estão calibradas para operarem corretamente? Se o compressor estiver operando numa incorreta razão entre volumes, uma potência excessiva será consumida na compressão, o que sempre acarreta um aumento na temperatura de descarga.
- O compressor está nos primeiros estágios de falha ou perdendo a posição axial devido a golpes do mancal? Qualquer condição que cause uma mudança na posição do rotor provocará um vazamento de lóbulo a lóbulo e altas temperaturas de descarga. Se isto for suspeito, a análise de vibrações é a melhor maneira de avaliar a condição do compressor. Se a análise de vibrações não for possível, a
- inspeção de trincas pode ser usada se todas as outras possibilidades tiverem sido investigadas.
- O resfriador de óleo está operando corretamente ? É FÁCIL DESCONSIDERAR ISTO COMO POSSIBILIDADE COM UM SOFTWARE PARA COMPRESSORES. Se o valor da temperatura de descarga numa elevada temperatura do óleo é a prevista em projeto, é provável que o compressor esteja livre de problemas, mas o resfriador de óleo deve ser investigado.

### **O futuro dos compressores parafuso em refrigeração**

As condições na indústria estão se modificando e os compressores parafuso também estão mudando para satisfazer as demandas dos clientes. Algumas áreas oportunas são listadas abaixo.

Modernas máquinas-ferramentas e equipamentos de inspeção automatizados tornam possível tolerâncias estreitas na fabricação de componentes, tais como o melhoramento em ferramentas para tornearia e o próprio meio de fabricação com o advento de máquinas controladas por computador (CNC). Isto melhora o desempenho do compressor de parafuso, por permitir ajustes mais finos e um melhor acabamento superficial dos lóbulos.

A grande utilização da eletrônica está na economia de energia, simplificação da manutenção e na antecipação de problemas antes que eles ocorram, ou seja a eletrônica auxilia na manutenção preventiva e preditiva. Isso reduz o consumo de energia, custos operacionais e custos de manutenção e desgaste da máquina. Os computadores pessoais mudaram nossas vidas e estão também mudando a sala de máquinas. A indústria de refrigeração está significativamente atrás da indústria automotiva e agroindústria no que diz respeito ao uso da eletrônica, mas isto deve ser logo superado.

Os requisitos para a regulação e os projetos acerca dos vazamentos estão em novos níveis. Novos projetos de vedação do eixo, eliminação de tubos roscados, pequenas cargas e maior número de construções soldadas são áreas que estão avançando rapidamente, a simulação numérica por meio de elementos finitos, permite confeccionar partes dos compressores com maior rapidez, maior ajuste e minimizando as perdas de carga e o ruído.

Baixos níveis de ruído na sala de máquinas estão se tornando importantes. Compressores silenciosos estão sendo especificados para um grande número de aplicações. Podemos pensar em áreas hospitalares, aeroportos, portos, consultórios medico dentário.

É certo que estas mudanças acontecerão. O compressor parafuso tem provado que é um componente fundamental em sistemas pela sua eficiência, segurança e flexibilidade. A inovação contínua no projeto melhorará seu desempenho no futuro.

## **Atrito**

Sempre que uma superfície se move em relação à outra, haverá uma força contrária a esse movimento. Esta força denomina-se força de atrito ou resistência ao movimento, Carreteiro (1988).

Na conformação mecânica dos metais, o atrito está presente em todos os processos. Entre os aspectos relevantes da conformação mais diretamente ligados ao atrito, segundo Helman (1993) pode-se assinalar:

- Alteração, geralmente desfavorável, dos estados de tensão necessários para a deformação;
- Produção de fluxos irregulares de metal durante o processo de conformação;
- Aparecimento de tensões residuais no produto;
- Influência sobre a qualidade superficial dos produtos;
- Elevação da temperatura do material e do equipamento em geral a níveis capazes de comprometer-lhe as propriedades mecânicas;
- Aumento do desgaste da ferramenta;
- Aumento do consumo de energia necessária a deformação.

Apesar destes aspectos desfavoráveis, processos de conformação dependem do atrito, pois esta força é necessária para a conformação do material, Helman (1993).

Considerando o tipo de contato entre as superfícies em movimento, Carreteiro (1998), classifica o atrito em sólido e fluido.

### *Atrito sólido*

Quando há contato de duas superfícies entre si Figura 35 Pode ser dividido entre:

*Atrito de deslizamento* → Quando uma superfície se desloca diretamente em contato com a outra.

*Atrito rolante* → Quando o deslocamento se dá através de rotação de corpos cilíndricos e esféricos





colocados entre as superfícies em movimento.

*Figura 35. Superfície sem lubrificação, Castrol do Brasil.*

### *Atrito fluido*

Quando existir uma camada fluida (líquida ou gasosa) separando a superfície em movimento. O fluido que forma esta camada chama-se lubrificante Figura 35.

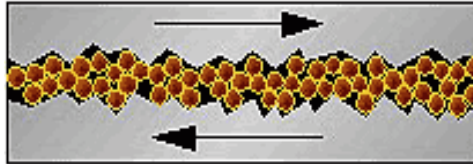


Figura 35. Superfície com lubrificação.

## **Lubrificação**

Lubrificar é aplicar uma substância (lubrificante) entre duas superfícies em movimento relativo, formando uma película, que evita o contato direto entre as superfícies, promovendo queda do coeficiente de atrito, e conseqüentemente do desgaste e da geração de calor.

Segundo Kobayashi (1989), a maioria do conhecimento da lubrificação da conformação de metal é empírica, com muito pouca informação baseada em análise.

A função precípua do lubrificante é possibilitar que o movimento se faça com um mínimo de aquecimento, ruído e desgaste. Isto é possível substituindo-se o atrito direto entre duas superfícies, [Figura 34], que, em geral, são metálicas, por uma camada lubrificante que deve ser superior à soma das alturas das rugosidades das mesmas, Carreteiro (1998).

A Figura 34 mostra uma superfície onde não se aplica nenhum tipo de lubrificante entre as duas faces do material, enquanto que na Figura 35 se vê o uso de um lubrificante entre as duas faces.

Os modernos lubrificantes são uma composição de óleos básicos que podem ser minerais ou sintéticos, com ou sem aditivos, Carreteiro (1998).

Esta substância interposta [Figura 35] pode ser fluida ou sólida

Segundo Carreteiro (1998), os lubrificantes se dividem em três grupos:

- Líquidos.
- Pastosos.
- Sólidos.

### *Lubrificantes Líquidos:*

Os lubrificantes líquidos utilizados na indústria, mais comumente chamados de Óleos lubrificantes,  
*Compressores*

são de origem mineral, derivados de petróleo e dependendo da cadeia química predominante podem ser naftênicos (cadeia aberta) ou parafínicos (cadeia fechada). Com o desenvolvimento de aditivos a indústria conseguiu desenvolver e melhorar as qualidades desejáveis dos óleos, Carreteiro (1998).

### *Características dos lubrificantes líquidos:*

#### *1- Viscosidade*

A característica mais importante de um óleo lubrificante é sua viscosidade que determina sua resistência interna oferecida pelas moléculas de uma camada do óleo, quando esta é deslocada em relação à outra, Carreteiro (1998).

O coeficiente de viscosidade – temperatura de todos os líquidos é alto e a temperatura deve ser cuidadosamente referida em qualquer medida de temperatura, Carreteiro (1998).

O quociente entre a viscosidade absoluta pelo peso específico do fluido é chamado de viscosidade cinemática e é medida em "stokes" ( $\text{cm}^2/\text{seg.}$ ). como os valores em stokes são muito grandes para os casos práticos, usa-se a indicação da viscosidade em centistokes (stokes/100), Carreteiro (1998).

Como os mecanismos são projetados para trabalharem protegidos por uma película contínua de lubrificante, entre as superfícies em contato, como foi descrito antes, a viscosidade do lubrificante tem que ser grande o suficiente para assegurar a formação da película sem permitir o contato entre as partes, Carreteiro (1998).

#### *2- Variação da viscosidade com a temperatura:*

Todos óleos são sensíveis a mudanças de temperatura no que diz respeito à viscosidade e esta variação não é linear e sim exponencial, como no trabalho com máquinas são freqüentes as variações de temperatura, torna-se fundamental e preciso conhecer bem as características da viscosidade nas várias temperaturas envolvidas, Carreteiro (1998).

A avaliação da variação da viscosidade com a temperatura é obtida através do índice de viscosidade que é um valor empírico obtido da relação entre a variação que a viscosidade sofre com a temperatura e as variações de dois óleos de referência, um relativamente sensível (Índice de viscosidade 0) e outro relativamente insensível (Índice de viscosidade 100), Carreteiro (1998)

#### *3- Grau API*

Freqüentemente mencionada em especificações ou análises de óleos lubrificantes, uma grandeza denominada grau API. Trata-se, não de uma grandeza, mas de uma unidade de densidade, se é que existe unidade para medir densidade, pois a densidade por ser uma relação, é expressa por número

abstrato, Carreteiro (1998).

#### *5- Ponto de fluidez*

O ponto de fluidez, também chamado de ponto de gota ou ponto de congelação, vem a ser a temperatura mínima na qual o óleo ainda flui.

#### *6- Ponto de fulgor*

O ponto de fulgor de um óleo é a menor temperatura na qual o vapor desprendido pelo mesmo, em presença do ar, inflama-se momentaneamente ao se lhe aplicar uma chama, formando-se um lampejo.

#### *Lubrificantes Pastosos:*

Os lubrificantes pastosos conhecidos como graxas resultam da emulsão de óleos em uma substancia espessante, geralmente um sabão e a natureza da base metálica que origina o sabão determinam a aparência, cor e textura da graxa, Carreteiro (1998).

São muitas as aplicações onde a graxa é utilizada preferencialmente aos óleos . Uma de suas grandes vantagens está em proteger o mancal contra a entrada de pó , areia etc. , devido à camada protetora que se forma no ponto onde o eixo sai da caixa do mancal de rolamento, por exemplo, dispensando as vedações delicadas necessárias à lubrificação com óleos, Carreteiro (1998).

Uma outra vantagem é a proteção promovida em comparação com os óleos, onde os óleos contaminados podem servir de veículo para as impurezas arranhando e danificando os eixos e mancais. Um inconveniente no entanto é a baixa resistência das graxas a altas temperaturas, quando as graxas dependendo da natureza da emulsão tendem a dissociar o óleo do sabão, perdendo suas características e deixando de exercer sua função lubrificante, Carreteiro (1998).

#### *Lubrificantes Sólido:*

O lubrificante sólido é qualquer material usado como pó ou como um filme na superfície de forma a prover proteção e evitar danos durante o movimento relativo e para reduzir o atrito e o desgaste, Booser (1983).

Os lubrificantes sólidos devem apresentar uma dureza menor que os corpos a separar e possuir um baixo coeficiente de cisalhamento e estabilidade a altas temperaturas, Carreteiro (1998).

Sendo secos , são indicados onde os óleos tendem a fixar poeira e tornarem se gomosos. Evitam também que possa haver o derramamento lubrificante, pela sua característica de ser usado a seco. Entre outros destacam se a grafite, o bissulfeto de molibdênio, os plásticos como o nylon e o teflon, a

mica, o talco, o sulfato de prata e o bórax, Carreteiro (1998).

Helman (1993) descreve que as funções de um lubrificante são múltiplas e complexas. Descreve também que as características de um lubrificante ideal são:

- Manter inalteradas as condições de lubrificação, a altas temperaturas e pressões.
- Diminuir o atrito superficial até valores exigidos pelo processo.
- Dissipar o calor.
- Não apresentar características tóxicas.

### **Aditivos em lubrificantes**

Os aditivos são compostos químicos que adicionados aos óleos básicos, reforçam algumas de sua qualidades ou lhes cedem novas qualidades ou eliminam propriedades indesejáveis. Os aditivos são classificados em dois grupos, primeiro aqueles que modificam certas características físicas, tais como ponto de fluidez, espuma e índice de viscosidade; segundo aqueles cujo efeito final e de natureza química, tais como inibidores de oxidação, detergentes, agentes extrema pressão (EP) e outros, Carreteiro (1998).

### **Óleos sintéticos**

Carreteiro (1998), descreve que as necessidades industriais e especialmente militares de lubrificantes aptos a suportar as condições mais adversas possíveis conduziram ao desenvolvimento dos produtos sintéticos, isto é, obtidos por síntese química, sendo que os principais óleos sintéticos podem ser classificados como:

- Ésteres de ácidos dibásicos, sendo superiores aos óleos de petróleo na sua relação viscosidade – temperatura e menos voláteis, quanto ao poder lubrificante, estabilidade térmica e resistência a oxidação são comparáveis a um bom lubrificante de petróleo, não são corrosivos para os metais, porém age como solvente sobre borracha, verniz e plásticos.
- Ésteres de organofosfatos, tem um poder lubrificante muito alto e não são inflamáveis como os óleos de petróleo, sua volatilidade é baixa e sua relação viscosidade – temperatura é ligeiramente melhor que aos óleos de petróleo, tendo boa resistência a oxidação, mas sua estabilidade é até a 150 ° C.
- Ésteres de silicatos, possuem qualidades de baixa volatilidade e relação viscosidade – temperatura que os colocam entre os melhores sintéticos, entretanto sua estabilidade térmica e hidrolítica deixam a desejar.

- Silicones, o nome silicone é usado para designar fluidos que são polímeros de metil – siloxano, polímeros de fenil – siloxano ou polímeros de metil – fenil – siloxano, o aumento do teor de fenil aumenta a estabilidade ao calor mas diminui o índice de viscosidade, embora permanecendo acima dos óleos de petróleo. aplicados em campos que requerem a mínima variação possível da viscosidade com a temperatura.
- Compostos ésteres de poliglicol, tem excelente relação temperatura – viscosidade e superam os óleos minerais em baixa volatilidade, estabilidade térmica, resistência a inflamação e poder lubrificante, mas perdem na resistência a oxidação. Mas podem ser melhorados com aditivos antioxidantes.