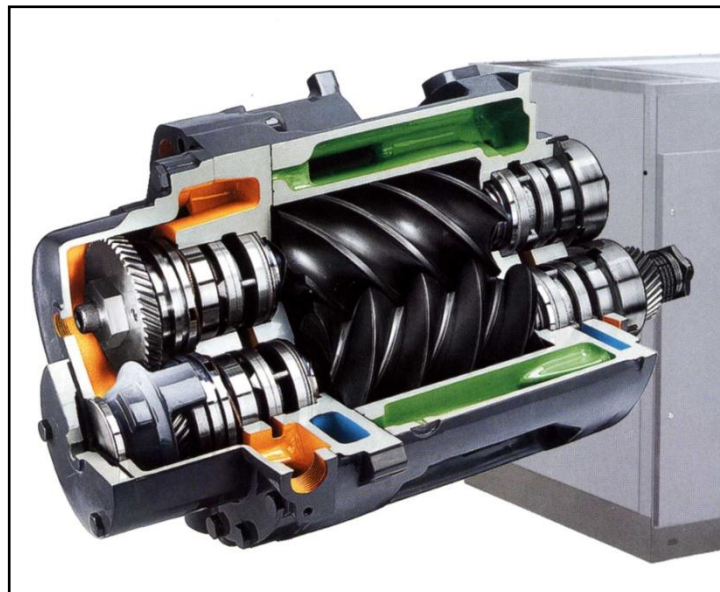


CURSO TÉCNICO EM ELETROMECCÂNICA

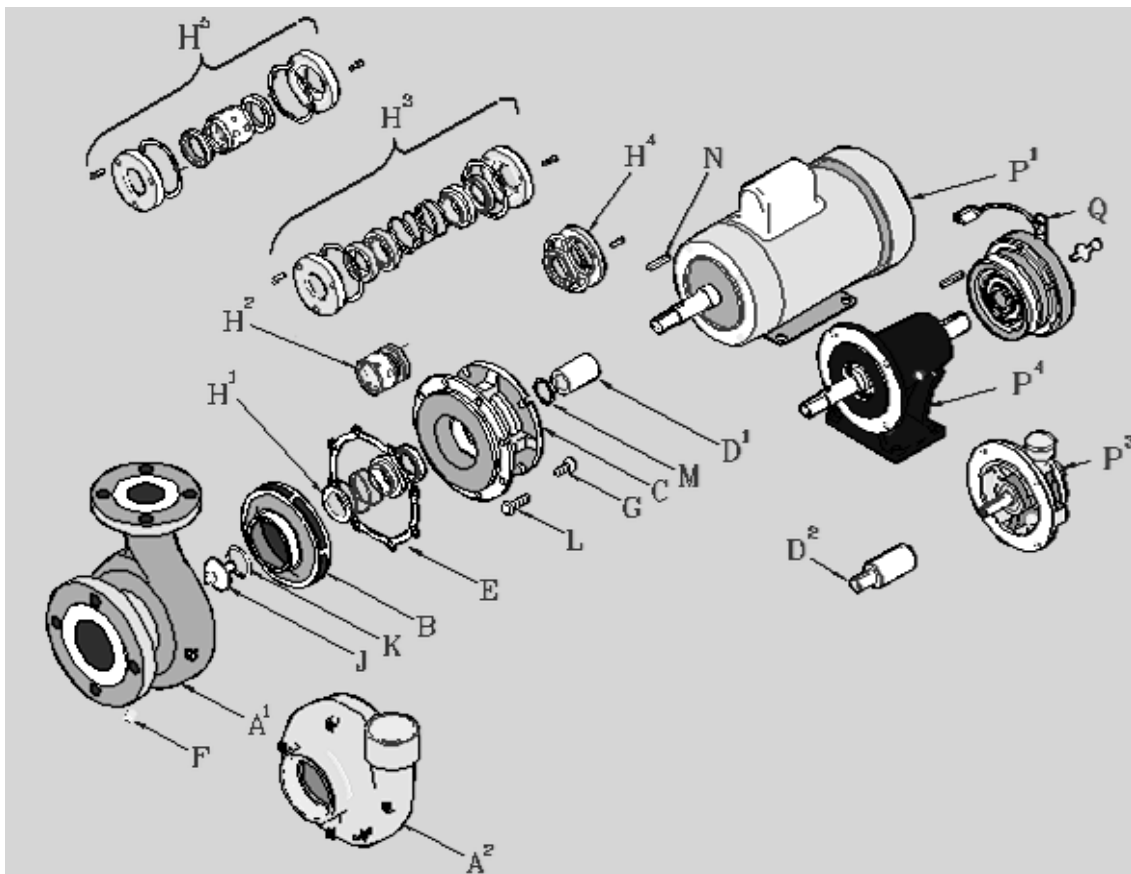
Disciplina de Equipamentos Hidráulicos e Pneumáticos

Prof^a Andrea Fischer



Unidade I

Bombas Hidrodinâmicas, Turbo-Bombas, de Deslocamento Não Positivo ou Centrífugas.



1.1 Generalidades

Desde a antiguidade, a disponibilidade de água é uma preocupação primária do homem. Nos tempos mais remotos, a água era basicamente utilizada para o consumo humano. Porém, este consumo foi aumentando gradualmente e, além disso, a água também passou a ser um elemento importante para a produção agrícola. Estes fatores fizeram com que o homem passa-se a utilizar a força animal aliada a vários artifícios para o fornecimento de água. Novas necessidades de fornecimento foram surgindo ao longo do tempo, fazendo com que a força animal se tornasse obsoleta.

O aumento do consumo humano, a necessidade crescente de irrigação e a industrialização emergente tornaram a força animal obsoleta e obrigaram o homem a pesquisar dispositivos para o fornecimento de água em larga escala. As primeiras bombas que historicamente foram utilizadas são a bomba de pistões e a bomba de Archimedes. A fabricação das bombas hidrodinâmicas (centrífugas) só foi possível após a construção de motores elétricos de alta rotação. Estas bombas são capazes não só de atender o consumo de água, bem como de outros líquidos utilizados nos processos industriais. Além disso, são bombas que se prestam para a fabricação em série, sendo, por isso, amplamente utilizadas em vários setores.

1.2 Classificação

1.2.1 Classificação segundo a trajetória do líquido no rotor:

a) Bomba Centrífuga Pura ou Radial

O líquido penetra no rotor paralelamente ao eixo, sendo dirigido pelas pás para a periferia, segundo trajetórias contidas em planos normais ao eixo. As trajetórias são, portanto, curvas praticamente planas contidas em planos radiais. A figura 01 mostra a trajetória do líquido no interior de uma bomba centrífuga pura.

As bombas deste tipo possuem pás cilíndricas (simples curvaturas), com geratrizes paralelas ao eixo de rotação, sendo estas pás fixadas a um disco apenas (rotor aberto), para bombas de água com impurezas.

Em algumas bombas radiais, a região inicial das pás pode apresentar-se com a forma de superfície de dupla curvatura, para melhor atender à transição das trajetórias das partículas líquidas, da direção axial para a radial, sem provocar choques, nem turbulências excessivas.

As bombas do tipo radial, pela sua simplicidade se prestam à fabricação em série, sendo generalizada sua construção e estendida sua utilização à grande maioria das instalações comuns de água limpa, com descarga entre 5 e 500 l/s e até mais, sendo utilizada para pequenas, médias e grandes alturas de elevação.

Quando se trata de descargas grandes e pequenas alturas de elevação, o rendimento das bombas radiais torna-se baixo, e o seu custo se eleva em virtude das dimensões que assumem as suas peças, tornando-se pouco conveniente o seu emprego.

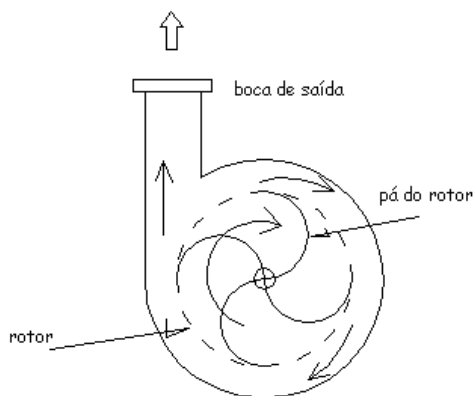


Figura 01 – Esquema do caracol e do rotor de uma bomba centrífuga

b) Bombas de Fluxo Misto ou Bombas Diagonais

b.1) Bombas Hélico-Centrífugas

Nestas bombas, o líquido penetra no rotor axialmente, atinge as pás cujo bordo de entrada é curvo e inclinado em relação ao eixo, segue uma trajetória que é uma curva reversa, pois as pás são de dupla curvatura e, atinge o bordo de saída que é paralelo ao eixo ou ligeiramente inclinado em relação a ele. Sai do rotor segundo uma trajetória ligeiramente inclinada em relação ao plano perpendicular ao eixo. A pressão é comunicada pela força centrífuga e pela ação de sustentação ou propulsão das pás. A figura 02 mostra a trajetória de uma partícula líquida na bomba hélico-centrífuga.

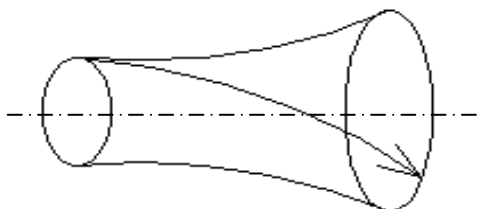


Figura 02 – Trajetória da partícula líquida numa bomba hélico-centrífuga

b.2) Bomba Helicoidal

Nestas bombas, o líquido atinge o bordo das pás que é curvo e bastante inclinado em relação ao eixo. A trajetória é uma hélice cônica, reversa, e as pás são superfícies de dupla curvatura. O bordo de saída das pás é uma curva bastante inclinada em relação ao eixo. O rotor normalmente possui apenas uma base de fixação das pás com a forma de um cone ou de uma ogiva.

As bombas deste tipo prestam-se a grandes descargas e altura de elevação pequenas e médias. Por serem as pás de dupla curvatura seu projeto é mais complexo e sua fabricação apresenta certos problemas de fundição. A figura 03 mostra como ocorre a trajetória de uma partícula líquida no interior de uma bomba helicoidal.

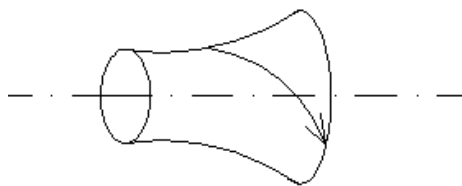


Figura 03 – Trajetória da partícula líquida numa bomba helicoidal

b.3) Bomba Axial ou Propulsora

Nestas bombas, as trajetórias das partículas líquidas, pela configuração que assumem as pás do rotor e as pás guias, começam paralelamente ao eixo e se transformam em hélices cilíndricas. Forma-se uma hélice de vórtice forçado, pois, ao escoamento axial, superpõe-se um vórtice forçado pelo movimento das pás. Não são propriamente bombas centrífugas, pois a força centrífuga decorrente da rotação das pás não é responsável pelo aumento de energia de pressão. Na figura 04 é possível visualizar o trajeto de uma partícula líquido no interior de uma bomba axial ou propulsora.



Figura 04 – Trajetória da partícula líquida numa bomba axial

1.2.2 Classificação segundo o posicionamento do eixo:

- Eixo Horizontal.
- Eixo Vertical

1.2.3 Classificação segundo o número de rotores:

- Simples Estágio (um rotor)
- Vários Estágios (dois ou mais rotores). Neste caso, o primeiro rotor aspira o fluido e, ao invés de recalcar o líquido, o encaminha aos outros rotores para que seja novamente energizado, sendo capaz de atingir maiores alturas.

1.2.4 Classificação segundo a pressão desenvolvida:

- Altura manométrica de até 15 mca aproximadamente.
- Altura manométrica entre 15 e 50 mca, aproximadamente.
- Altura Manométrica acima de 50 mca.

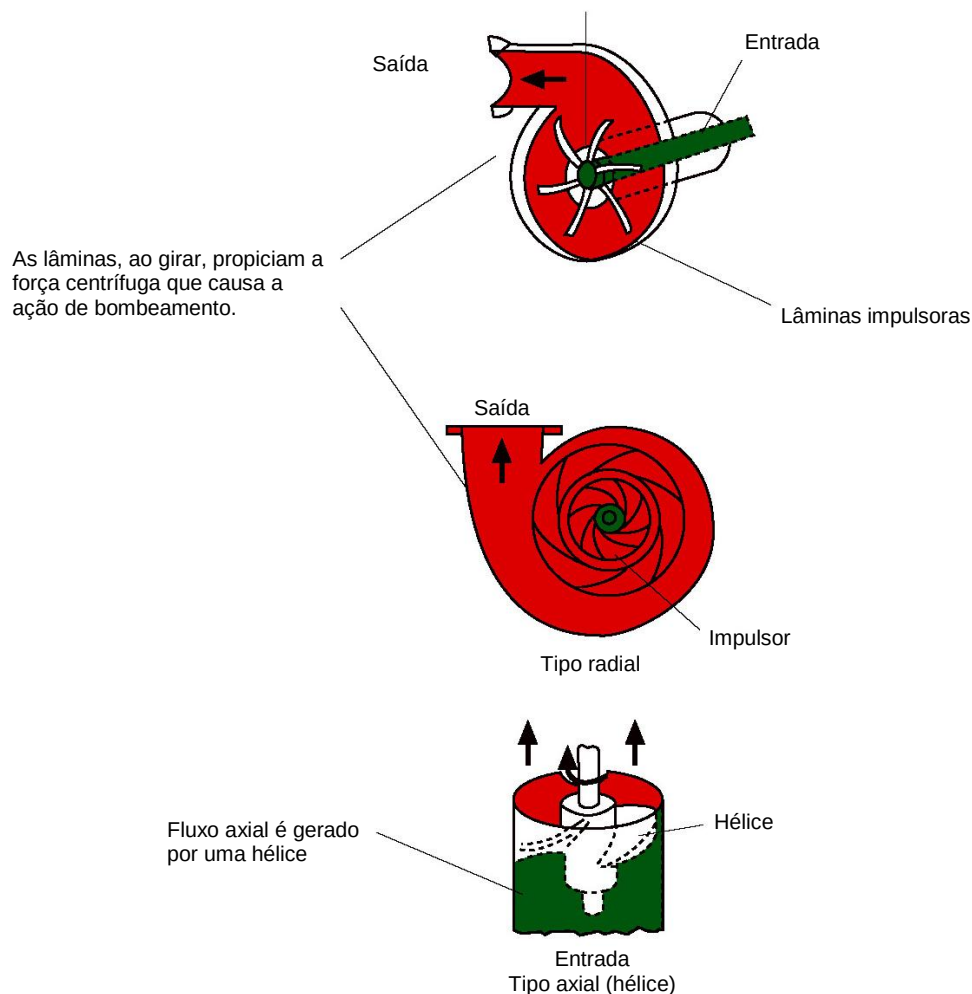
1.3 Bombas Centrífugas Puras ou Radiais

A bomba centrífuga tem como princípio de funcionamento a criação de duas zonas de pressão diferenciadas, uma de baixa pressão (sucção) e outra de alta pressão (recalque). Para que ocorra a formação destas duas zonas distintas de pressão, é necessário existir no interior da bomba a transformação da energia mecânica (de potência), que é fornecida pela máquina motriz (motor ou turbina), primeiramente em energia cinética, a qual irá deslocar o fluído, e posteriormente, em maior escala, em energia de pressão, a qual irá adicionar “carga” ao fluído para que ele vença as alturas de deslocamento.

Existem três partes fundamentais na bomba:

- Corpo ou carcaça, também denominada de voluta ou caracol: Envolve o rotor, acondiciona o fluído, e direciona o mesmo para a tubulação de recalque.
- Rotor ou impelidor: Constitui-se de um disco provido de pás que impulsiona o líquido.
- Eixo de acionamento: Irá transmitir a força motriz ao qual está acoplado o rotor, causando o movimento rotativo do mesmo.

1.3.1 Princípio de Funcionamento



Ao iniciar o processo de rotação, o rotor cede energia cinética à massa do fluído, deslocando as partículas líquidas para a extremidade periférica do rotor. Isto ocorre pela ação da

força centrífuga. Com isso, inicia-se a formação das duas zonas de pressão (baixa pressão e alta pressão) que são necessárias para desenvolver o processo de deslocamento do líquido.

Devido ao deslocamento da massa líquida do centro para a periferia do rotor, ocorre uma zona de vácuo (vazio) no centro do rotor, sendo esta, a zona de menor pressão da bomba onde acontece a sucção do líquido.

Ao mesmo tempo, a massa líquida é arrastada para a periferia do rotor, por ser envolvida entre as pás e as faces internas do mesmo, recebe uma crescente energia de pressão, derivada da energia potencial e da energia cinética, anteriormente fornecida ao sistema. O crescente alargamento da área de escoamento (Teorema de Bernoulli), assim como as características construtivas do interior da carcaça da bomba (voluta ou difusores) ocasionam a alta pressão na descarga da bomba, elevando o líquido até a altura desejada, efetuando desta forma o recalque do fluído.

1.3.2 Tipos de Rotor e de Difusor

O Rotor é um componente móvel da bomba que é acionado através de um eixo. Tem a função de transmitir energia ao líquido, criando uma depressão em seu centro para aspirar o líquido e uma sobrepressão na sua periferia para recalcar-lo.

Os rotores podem ser dos seguintes tipos:

- Fechado: são usados normalmente no bombeamento de líquidos limpos. Este tipo de rotor possui discos dianteiro e traseiro e pás fixas a ambos. É inadequado para bombear líquidos com substâncias em suspensão, pois a sua geometria facilita o entupimento.
- Semi-aberto: possui apenas um disco traseiro onde são fixadas as pás.
- Aberto: As pás são presas ao próprio cubo do rotor. Apresenta a desvantagem de possuir pequena resistência estrutural, o que faz com que seja necessária uma pequena parede traseira quando as pás são muito largas. Geralmente os rotores abertos são encontrados em bombas pequenas, de baixo custo, ou em bombas que recalcam líquidos com substâncias abrasivas, lamosas, areias e esgotos sanitários.

O Difusor se caracteriza por ser um canal de seção crescente que tem a função de receber o líquido expelido pelo rotor e encaminhar este líquido à tubulação de recalque, além disso, por ser de seção crescente (no sentido do escoamento) a energia cinética do líquido é transformada em energia de pressão.

Os Difusores podem ser dos seguintes tipos:

- de Caixa Espiral, Voluta ou Caracol: empregado em bombas de eixo horizontal e de um único estágio.
- de Palhetas Diretrizes: empregado em bombas de vários estágios, onde além de transformar a energia cinética em energia de pressão também direciona o líquido para que o mesmo não se choque perpendicularmente com a carcaça.
- Tronco-cônico: é o tipo empregado nas bombas com eixo vertical, constituindo-se de palhetas fundidas na própria carcaça da bomba.

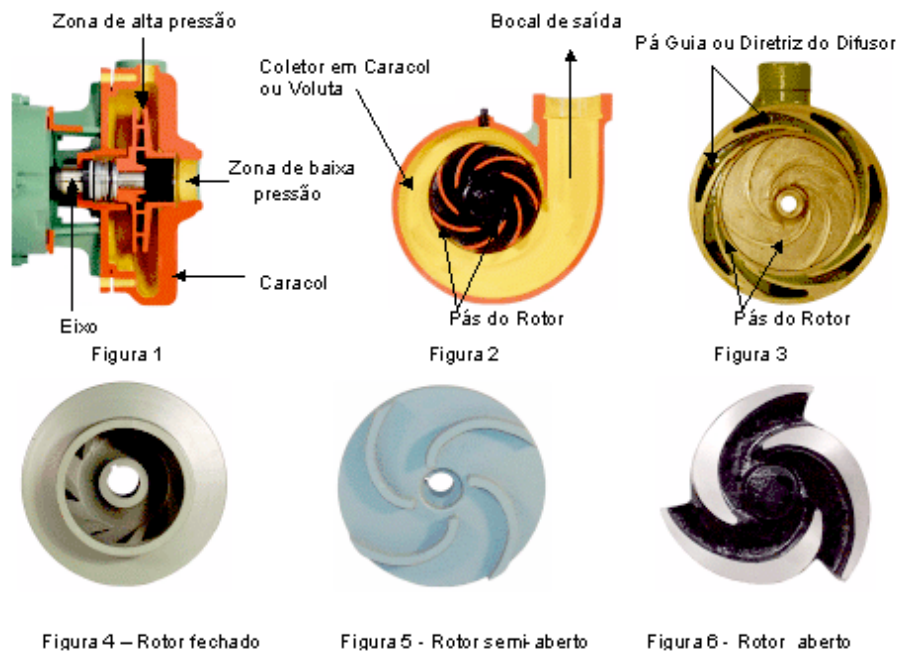


Figura 05 – Vistas do caracol e do rotor em bombas centrífugas

1.3.3 Procedimentos de Escorvamento

A escorva é um procedimento adotado antes de se colocar em funcionamento o sistema de bombeamento, onde é retirado o ar da tubulação de sucção e do interior da bomba, para que seja criado um vácuo e, conseqüentemente seja permitida a aspiração do líquido a ser bombeado. Para isto, a bomba e a tubulação de sucção são preenchidas com líquido. Os procedimentos típicos são os seguintes:

- a) Bomba trabalha afogada: Evidentemente se a bomba trabalha abaixo do nível livre do reservatório inferior, a escorva se faz automaticamente.
- b) Escorva manual: Feita manualmente através do dispositivo de escorva (copo ou funil). Este procedimento é feito em bombas de pequeno porte.
- c) Escorva com bomba auxiliar: Há uma pequena bomba auxiliar de êmbolo ou rotativa, que aspira o líquido do reservatório inferior e o recalca dentro da bomba principal e da tubulação de sucção.

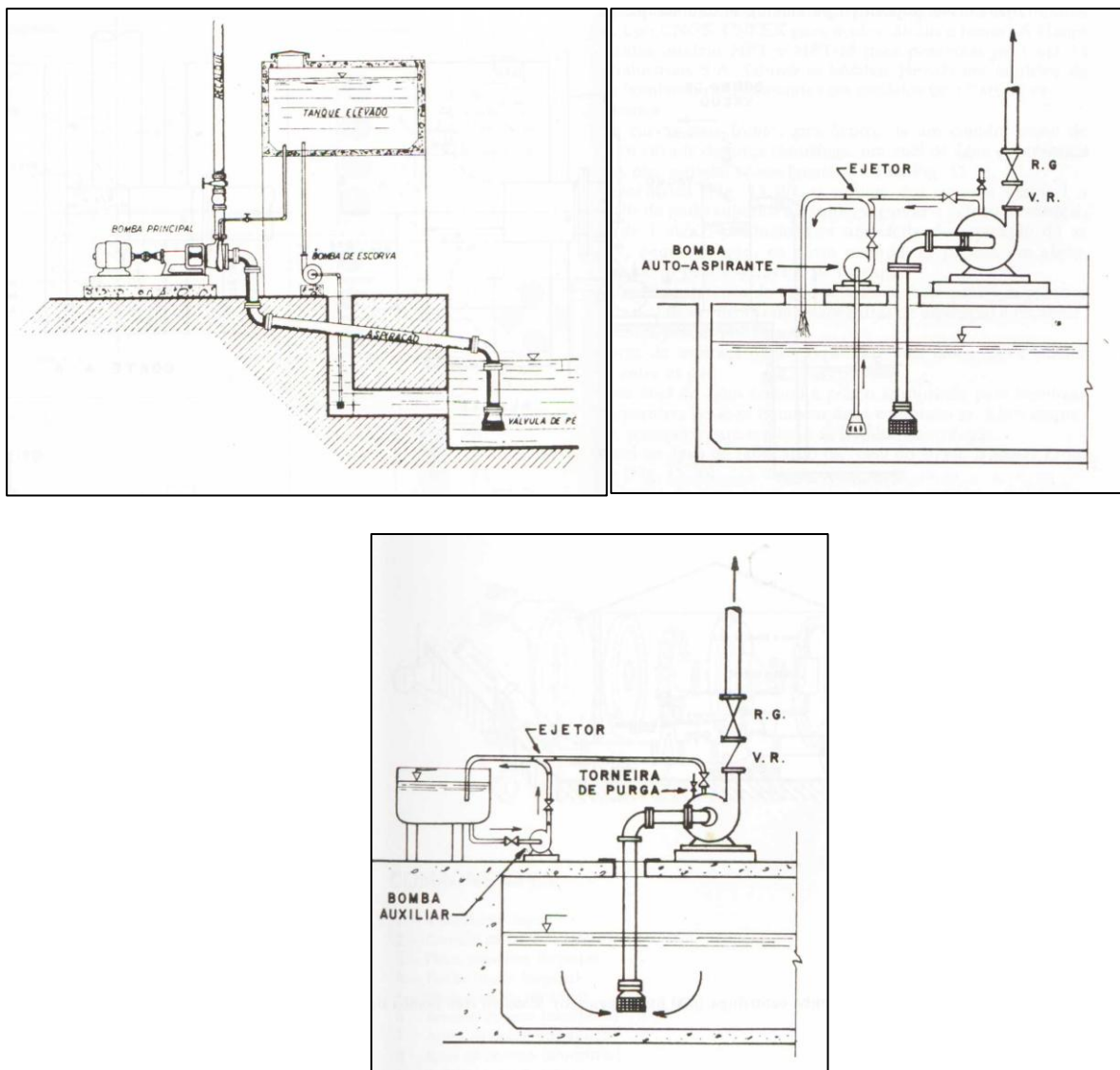


Figura 06 – Exemplos de escorva através de bomba auxiliar

- d) Escorva com bomba de vácuo: É o sistema mais utilizado para bombas de grande porte. Consiste em retirar o ar da tubulação de sucção e da bomba centrífuga.

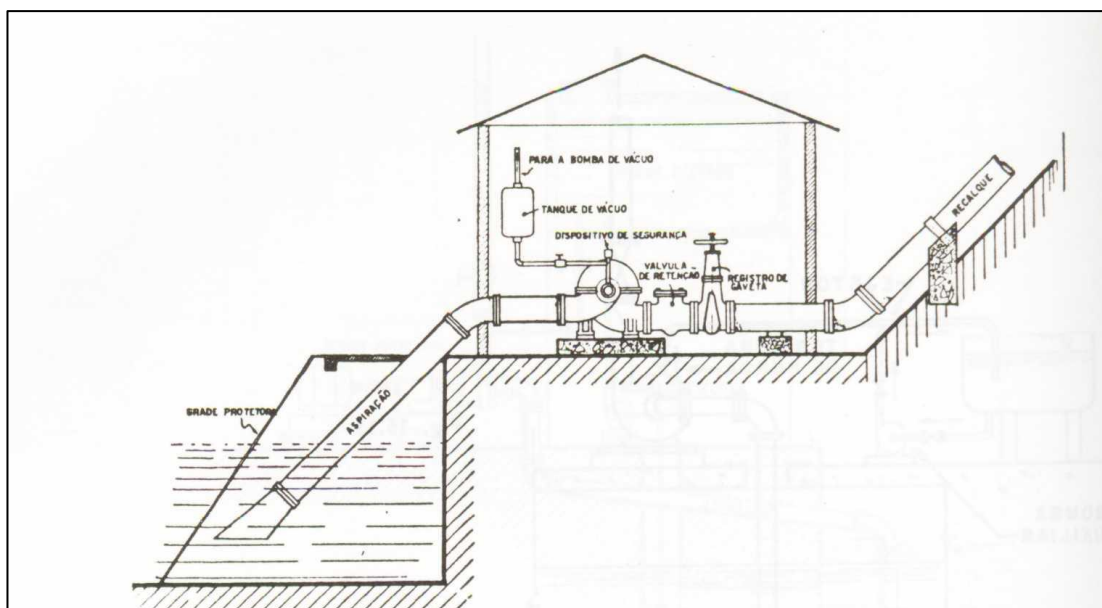


Figura 07 – Escorva através de bomba de vácuo

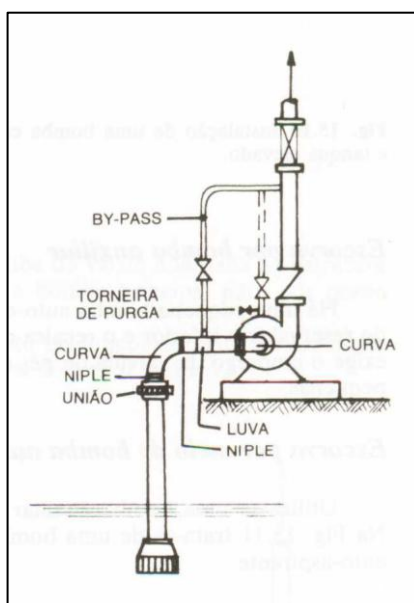


Figura 08 – Escorva através de by-pass ligado ao recalque.

1.3.4 Procedimentos para Instalação e Operação

Para a instalação de uma bomba centrífuga são necessários alguns acessórios básicos:

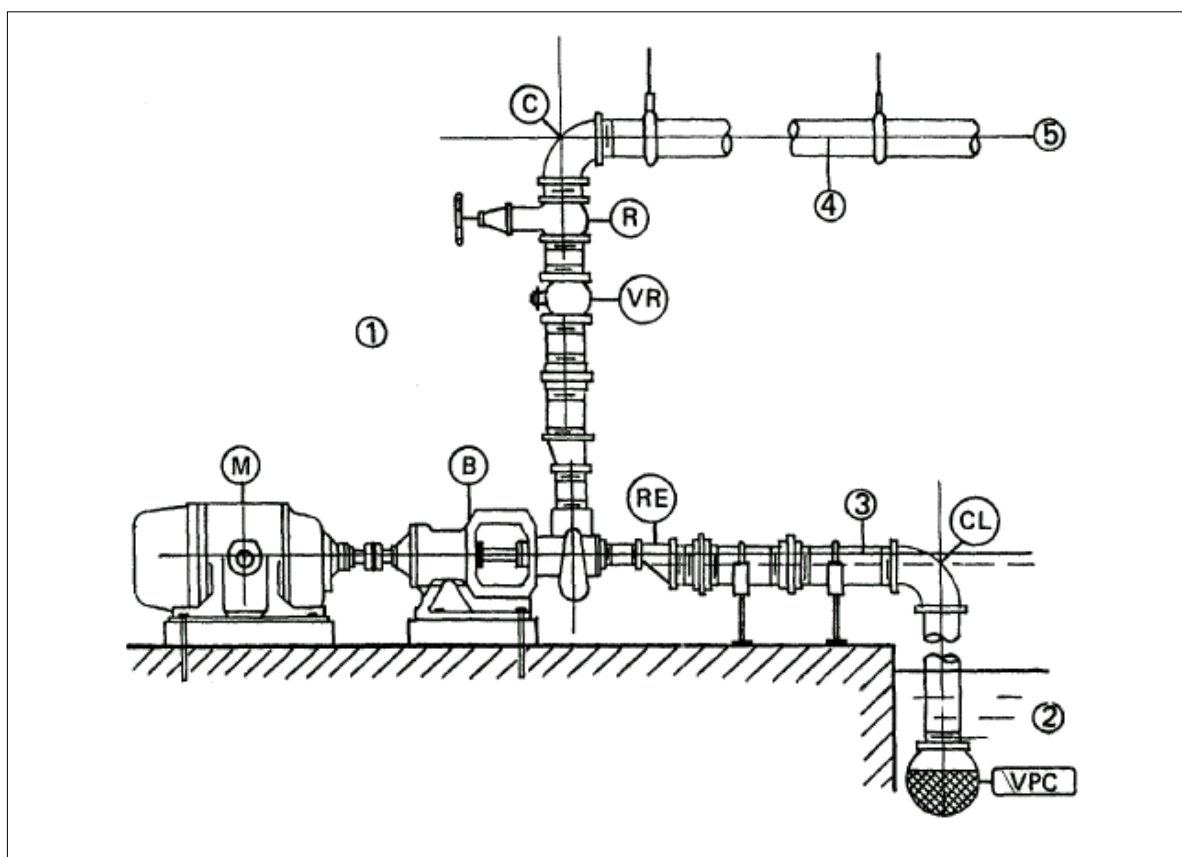


Figura 09 – Instalação Típica de Bomba Centrífuga.

1 - Casa de Bombas, 2 - Poço (fonte), 3 - Linha de Sucção, 4 - Linha de Recalque, 5 - Reservatório, RE - Redução Excêntrica, M - Motor de Acionamento, CL - Curva de 90°, B - Bomba Centrífuga, VR - Válvula de Retenção, R - Registro de Gaveta, VPC - Válvula de Pé com Crivo, C - Joelhos.

Alguns dos acessórios típicos são descritos abaixo:

a) Válvula de pé: É uma válvula de retenção, geralmente munida de um crivo (filtro), deve ser instalada no início da tubulação de sucção com o fim de impedir o esvaziamento da tubulação e da própria bomba, ao ser cheia, ou quando parar de funcionar, para que a escorva não seja perdida. O crivo colocado antes da válvula visa evitar a entrada de corpos sólidos ou materiais que possam afetar o funcionamento da bomba. É utilizada para diâmetros inferiores a 400 mm.

A válvula de pé pode ser dispensada nas seguintes situações:

- Quando a bomba trabalhar afogada, ou seja, abaixo do nível do reservatório inferior.
- Quando se utiliza dispositivo especial de escorva, ou seja, uma bomba de vácuo auxiliar.

b) Válvula de fechamento ou saída: Em instalações de pequeno porte, utiliza-se, no início da linha de recalque, um registro de gaveta, que serve tanto para bloqueio (mais indicado) quanto para regulagem do valor da descarga. Em instalações de grande porte utiliza-se uma válvula tipo borboleta. Para bombas com pressões muito elevadas são utilizadas válvulas de esfera.

c) Válvula de retenção: Utiliza-se este tipo de válvula no início do recalque, entre a bomba e o registro de saída.

A principal finalidade desta válvula é evitar o contrafluxo de líquido quando a bomba é desligada, evitando a sobrepressão na linha de recalque, ou seja, o golpe de aríete (líquido volta com energia de pressão). Em instalações de altura estática elevada, essa válvula evita que, quando a bomba estiver parada, haja fuga de líquido pelo sistema de vedação da bomba através de um selo mecânico ou engaxetamento.

d) Torneira de purga: É uma torneira colocada na parte superior da bomba destinada a permitir a saída de ar na fase de escorva, a fim de impossibilitar que se forme uma camada de ar na parte superior da bomba.

1.3.4.1 Instruções para a Instalação Hidráulica

- Instale a bomba o mais próximo possível da fonte do líquido a ser bombeado.
- Não exponha a bomba à ação do tempo. Proteja-a das intempéries (sol, chuva, poeira, etc).
- Mantenha espaço suficiente para a ventilação e fácil acesso para a manutenção.
- Nunca reduza a bitola de sucção da bomba. Utilize sempre canalização com bitola igual ou maior à indicada no catálogo. O diâmetro da tubulação deve ser compatível com a vazão desejada.
- Utilize o mínimo possível de conexões na instalação. Prefira a utilização de curva ao invés de joelhos.
- Recomenda-se o uso de uniões na canalização de sucção e recalque. Elas devem ser instaladas próximas à bomba para facilitar a montagem e desmontagem.
- Vede bem todas as conexões com vedante apropriado.
- Instale a canalização de sucção com um pequeno declive, no sentido da bomba para o local de captação.

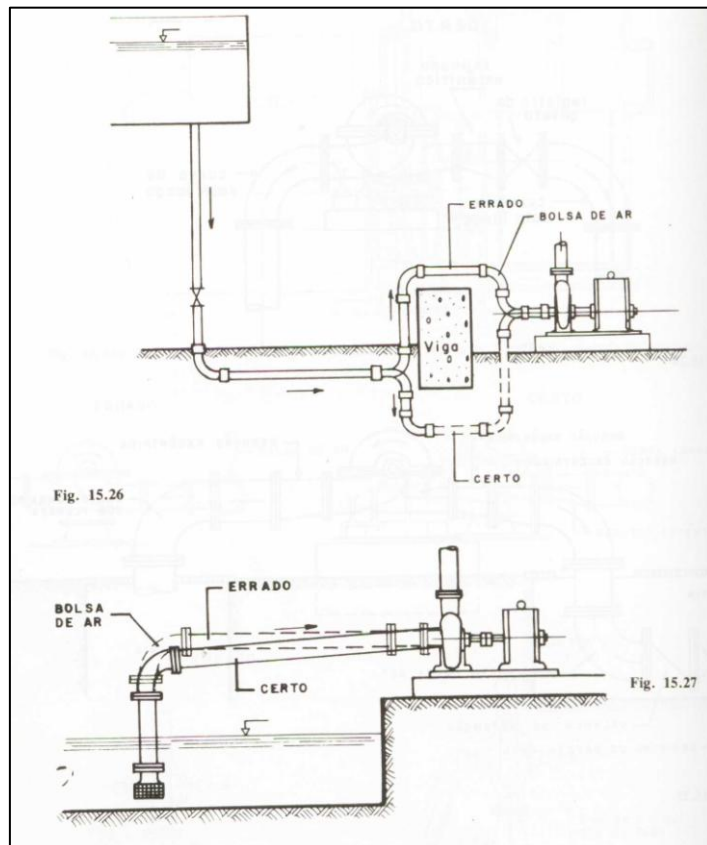


Figura 10 – Exemplo de cuidados na instalação hidráulica

- Use sempre válvula de pé (fundo de poço) com bitola maior que a da canalização de sucção da bomba. Instale a válvula no mínimo a 30 cm, acima do fundo do local da captação.
- Nunca deixe que a bomba suporte sozinha o peso da tubulação, utilize suportes.
- Instale válvulas de retenção na tubulação de recalque, quando a altura for maior que 20 m, ou, em casos de recalque na horizontal quando a perda de carga exceder a 20 mca.

1.3.4.2 Instruções para a Instalação Elétrica

- Para a escolha correta da bitola do fio de ligação do motor da bomba, observe as condições do local (tensão da rede e distância até a entrada de serviço) e leia a potência do motor. A indicação da bitola do fio é indicada no manual do fabricante da bomba.
- Observe o esquema de ligação na placa do motor e faça as ligações compatíveis com a tensão da rede elétrica do local.
- Instale fusíveis e chaves de partida para dar segurança e proteção ao motor elétrico.
- Sempre que for possível instale uma chave-bóia no sistema, cuja instalação deve obedecer às recomendações do fabricante, evitando o uso de chaves com mercúrio no seu interior.
- É obrigatório o aterramento do motor elétrico da bomba. Deve-se utilizar uma haste de cobre aterrada no mínimo 50 cm no solo, ligada ao terminal de aterramento do motor com um fio de cobre de bitola mínima de 10 mm².

1.3.4.3 Instruções para Operação de uma Instalação.

- Antes de acionar a bomba, faça a escorva da mesma, preenchendo com líquido todo o corpo da bomba e a tubulação de sucção, para eliminar o ar existente no seu interior.
- Verifique novamente todas as instalações hidráulicas e elétricas antes de acionar a bomba.
- Verifique o sentido de giro.
- As peças internas das bombas recebem uma película de graxa para evitar oxidação durante o período de armazenamento, por isto, recomenda-se bombear o líquido por uns 3 minutos para fora do reservatório, antes da conexão final com o mesmo.
- No início do funcionamento deve-se fechar o registro da tubulação de recalque, afim de que, a instalação adquira a pressão de serviço e, também para que não haja uma grande aceleração da massa líquida. Este procedimento também faz com que a corrente de partida do motor seja menor do que se a bomba estivesse partindo com carga.
- Durante o funcionamento deve-se inspecionar periodicamente a leitura dos instrumentos para verificar se permanecem nos limites desejados. Deve-se também examinar freqüentemente os indicadores do funcionamento do motor elétrico para controlar a potência que esta sendo solicitada.
- Durante o período de operação deve-se observar se aparecem ruídos ou vibrações anormais, que são indicadores de mau funcionamento. Em caso afirmativo, parar imediatamente a bomba para eliminar a causa.
- Antes de desligar a motobomba, fechar lentamente o registro de recalque, reduzindo assim o efeito da energia cinética, que esta sendo transformada em energia de pressão.

1.3.5 Procedimentos para Seleção de uma Bomba Centrífuga

Escolha da Bomba

A escolha primária de uma ou mais bombas é feita em função da vazão (Q) e da altura manométrica (H_{man} ou H_T), utilizando-se mapas de aplicação, fornecidos pelos fabricantes.

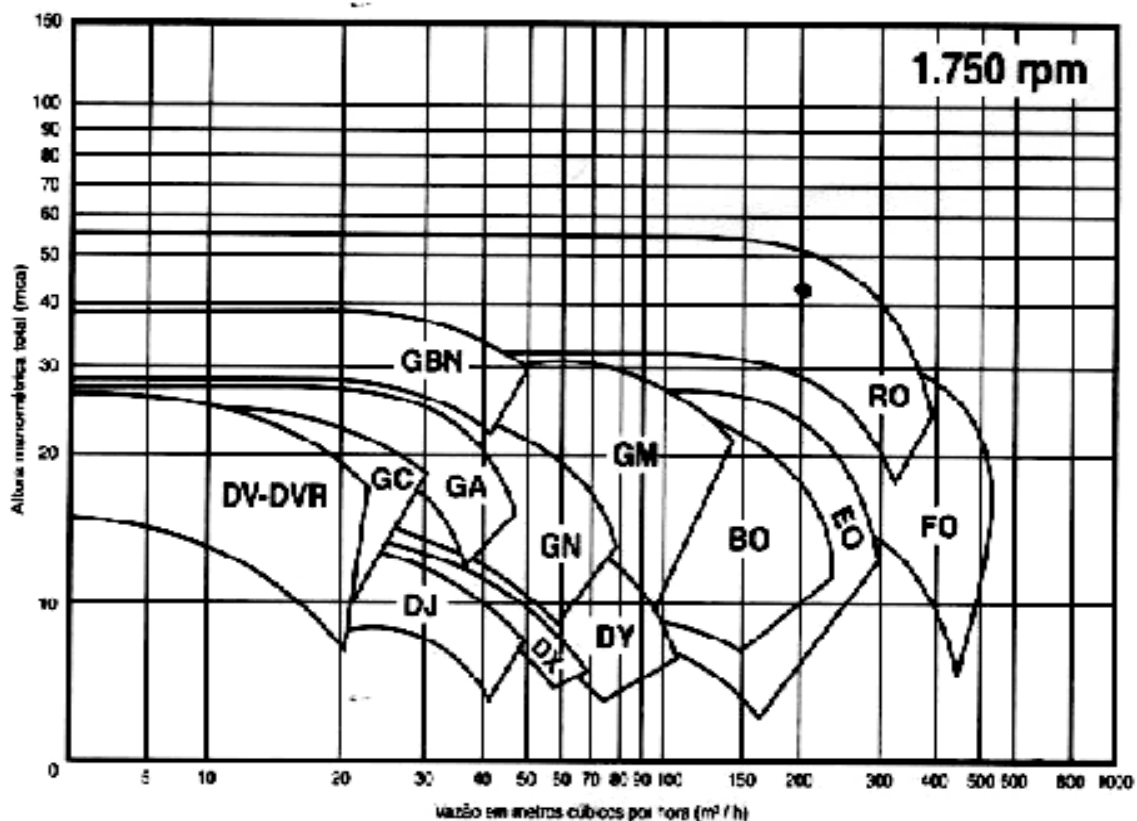


Figura 11 – Curva “ $H_{\text{man}} \times Q$ ” para escolha primária de uma bomba centrífuga

Definição de alguns termos

Altura Manométrica Total (H_{man}) ou (H_T): é a quantidade de energia que deve ser entregue pela bomba e absorvida pelo líquido que atravessa a bomba, para que o líquido vença o desnível da instalação (Z), a diferença de pressão entre dois reservatórios (caso exista) e a resistência natural que a tubulação oferece ao escoamento do líquido (perda de carga).

Altura Manométrica de Sucção (H_s): Somatório das resistências a movimentação do fluido desde o ponto de captação até a entrada da bomba. No caso de instalações com bombas afogadas, esta altura manométrica é uma energia adicional à bomba.

Altura Manométrica de Recalque (H_r): Somatório das resistências à movimentação do fluido desde a saída da bomba até o ponto final de recalque.

Perda de carga linear (h_l): Perda de carga em trechos retos da tubulação devido ao atrito do fluido com as paredes internas dos tubos.

Perda de carga localizada (h_e): Perda de carga nos acessórios da tubulação (válvulas, curvas...) devido ao atrito.

Comprimento equivalente (Le): Comprimento fictício que um tubo de igual diâmetro que o acessório deverá possuir para promover a mesma perda de carga que um determinado acessório de mesmo diâmetro.

NPSH – “Net Positive Suction Head”: Significa “Altura Positiva Líquida de Sucção”. Caracteriza as condições para que ocorra uma “boa” aspiração do líquido. É a disponibilidade de energia com que o líquido penetra na boca de entrada da bomba e que a ele permitirá atingir a borda da pá do rotor. O líquido perde energia na entrada da bomba, o rotor ainda não está fornecendo energia ao líquido, então a instalação da bomba deverá fornecer esta energia. É a energia requerida pela bomba. É o $NPSH_{requerido}$ ou NPSH da bomba, para que a pressão da bomba não diminua até a pressão de vaporização do líquido. Quanto maiores à vazão da bomba e a altura de sucção, maior a possibilidade da bomba “cavitar” em função do NPSH.

Em termos técnicos, o NPSH define-se como a altura total de sucção referida à pressão absoluta local (pressão atmosférica) existente no centro da conexão de sucção, menos a pressão de vapor do líquido.

$$NPSH = (H_o - Z_s - h_s - R) - (H_v)$$

Onde:

H_o – pressão atmosférica local (em mca)

Z_s – altura da sucção (em metros)

h_s – perdas de carga na sucção (em metros)

R – perdas de carga no escoamento interno da bomba, dado pelo fabricante (em metros)

H_v – pressão do vapor do líquido escoando (em mca)

Para que o NPSH proporcione uma sucção satisfatória à bomba, é necessário que a pressão em qualquer ponto da linha nunca venha reduzir-se à pressão do vapor do líquido. Isto é evitado tomando-se providências na instalação de sucção para que $(H_o - H_v)$, que é a pressão útil para a movimentação do fluido, seja maior do que as perdas de carga na tubulação com a altura de sucção, mais as perdas na bomba, ou seja, $(Z_s + h_s + R)$, portanto:

$$NPSH_{disponível} = H_o - Z_s - h_s - H_v$$

$$NPSH_{disponível} > NPSH_{requerido}$$

Cavitação: Quando o $NPSH_{requerido}$ é maior do que o $NPSH_{disponível}$, ocorre o fenômeno chamado cavitação. Ocorre quando a pressão do líquido cai abaixo da pressão de vapor do mesmo, ocorrendo a formação de bolhas de vapor (bolhas de ar). Quando estas bolhas são arrastadas e dirigem-se para a zona de alta pressão, elas voltam rapidamente ao estado líquido (condensação). Esta mudança de estado ocorre de maneira brusca, o choque entre as bolhas e as partes internas da bomba (carcaça e rotor) e o choque entre as próprias partículas, causa a erosão do material de construção da bomba e, conseqüentemente, vai ocorrendo uma queda do rendimento da bomba. O ruído de uma bomba cavitando é diferente do ruído de operação normal da mesma, pois dá a impressão de que ela está bombeando areia, pedregulho ou outro material que causa impacto.

A cavitação provoca assim a sua erosão da superfície sólida das fronteiras de uma máquina hidráulica (hélice de um barco, rotores e difusores de bombas e turbinas, por exemplo), além de induzir vibrações e ruídos característicos. Com o surgimento da cavitação a operação da máquina de fluxo torna-se instável, com oscilações de vazão e, conseqüentemente, de pressão. A eficiência e potência útil se reduzem sensivelmente. Em casos extremos, há a erosão total de partes da máquina, como o rotor ou o difusor espiral de uma bomba centrífuga, ou o rotor e o tubo de sucção de uma turbina hidráulica. O processo de erosão resulta do choque inelástico dos micro-jatos de líquido com superfícies no interior da máquina.

As figuras seguintes ilustram a cavitação ocorrendo em dispositivos variados.

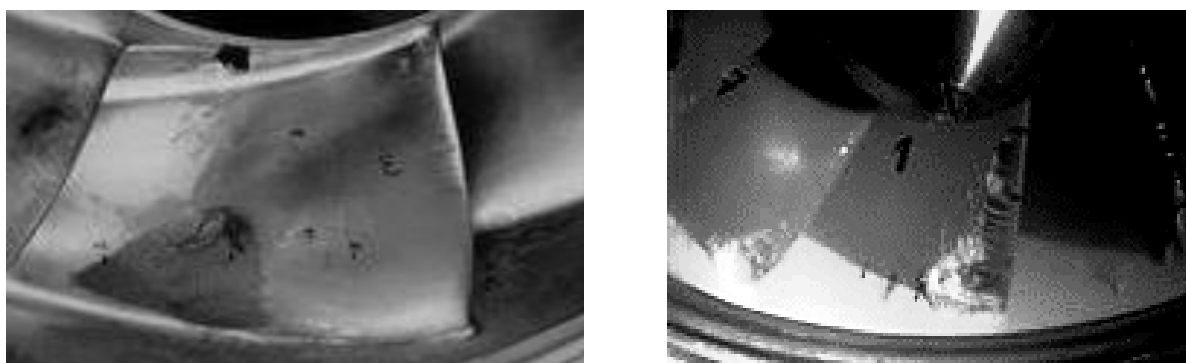


Figura 12 – Cavitação nas pás de rotores de bombas centrífugas

Medidas para evitar a cavitação:

- a) Reduzir a altura de sucção, aproximando tanto quanto possível a bomba do local de captação;
- b) Reduzir as perdas de carga na sucção (aumento dos diâmetros dos tubos e conexões);
- c) Refazer o cálculo do sistema e da bomba.

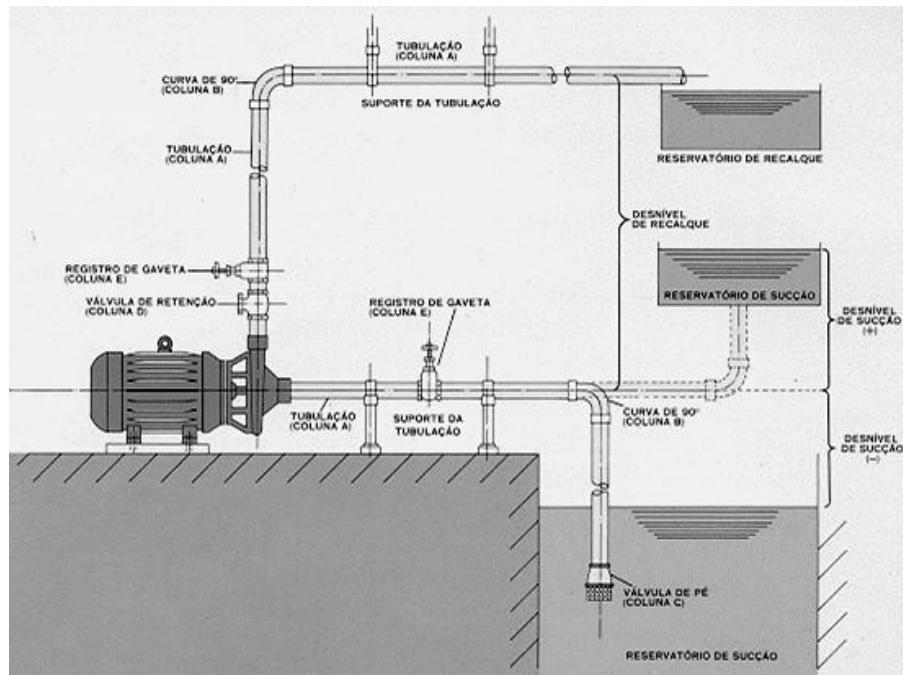
Especificação de Bomba Centrífuga

1º Passo: Cálculo da Vazão (Q). É realizado em função das necessidades de consumo.

PRÉDIO	CONSUMO	PRÉDIO	CONSUMO
Alojamentos provisórios	80 lts/pessoa	Jardins	1,5 lts/m ²
Apartamentos	200 lts/pessoa	Lavanderias	30lts/kg roupa
Cinemas	2 lts/lugar	Matadouros (grandes)	200 lts/cabeça
Ambulatórios	25 lts/pessoa	Matadouros (pequenos)	150 lts/cabeça
Creches	50 lts/pessoa	Mercados	5 lts/m ²
Ginásios esportivos	4 lts/lugar	Orfanatos	150 lts/pessoa
Escolas	100 lts/pessoa	Quartéis	150 lts/pessoa
Escritórios	50 lts/pessoa	Residências populares	120 lts/pessoa
Garagens	50 lts/veículo	Residências urbanas	200 lts/pessoa
Edifícios públicos	50 lts/pessoa	Restaurantes	25 lts/refeição
Hotéis	200 lts/pessoa	Teatros	2 lts/lugar
Lavoura de arroz	2,5 l/s/ha	Fábrica de Refrigerantes	7,6 l/l de refrig.

$$Q = \text{consumo} / \text{período de trabalho}$$

2º Passo: Cálculo das alturas geométricas de sucção (Z_s) e recalque (Z_r). Tomando como referência a linha de centro da bomba.



3º Passo: Cálculo dos diâmetros econômicos das tubulações de sucção e recalque. Através de experimentos, os fabricantes avaliaram que para obter-se um custo mínimo total, as velocidades mínimas devem ser:

Velocidade de Sucção < 1,5 m/s (máximo 2 m/s)

Velocidade de recalque < 2,5 m/s (máximo 3 m/s)

$$Q = V.A \Rightarrow V = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}$$

4º Passo: Cálculo dos trechos retos das tubulações de sucção e recalque.

5º Passo: Cálculo dos comprimentos equivalentes dos acessórios na tubulação de sucção (L_{es}) e na de recalque (L_{er}). Com o auxílio da tabela de perda de carga em acessórios.

COMPRIMENTO EQUIVALENTE EM METROS - CONEXÕES METÁLICAS -										
Diâmetro	Tipo de acessório ou conexão									
Pol	CRL 90°	CRL 45°	Joelho 90°	Luva de redução	Válvula gaveta	Válvula de pé	Válvula retenção	Válvula globo	Tê direto	Tê bilateral
½	0,3	0,2	0,6	0,10	0,1	3,6	1,1	4,9	03,	1,0
¾	0,4	0,3	0,7	0,12	0,1	5,8	1,6	6,7	0,4	1,4
1	0,5	0,4	0,8	0,16	0,2	7,3	2,1	8,2	0,5	1,7
1 ¼	0,6	0,5	1,1	0,29	0,3	10,0	2,7	11,3	0,7	2,3
1 ½	0,9	0,6	1,3	0,38	0,3	11,5	3,2	13,4	0,9	2,8
2	1,1	0,8	1,7	0,64	0,4	14,0	4,2	17,4	1,1	3,5
2 ½	1,3	0,9	2,0	0,71	0,4	17,0	5,2	21,0	1,3	4,3
3	1,6	1,2	2,5	0,78	0,5	20,0	6,3	24,0	1,8	5,2
4	2,1	1,5	3,4	0,9	0,7	23,0	8,4	34,0	2,1	6,7
5	2,7	1,9	4,2	1,07	0,9	30,0	10,4	43,0	2,7	8,4
6	3,4	2,3	6,4	2,20	1,1	39,0	12,5	51,0	3,4	10,0
8	4,3	3,0	7,9	3,35	1,4	52,0	16,0	67,0	4,3	13,0
10	5,5	3,8	9,5	4,05	1,7	65,0	20,0	85,0	5,5	16,0
12	6,1	4,6	10,7	5,10	2,1	78,0	24,0	102,0	6,1	19,0
14	7,2	5,3	12,0	5,80	2,4	90,0	29,0	120,0	7,3	22,0

6º Passo: Cálculo dos comprimentos totais da tubulação de sucção (L_{ts}) e da de recalque (L_{tr}). Que é o somatório dos trechos retos mais os comprimentos equivalentes.

7º Passo: Cálculo das perdas de carga na tubulação de sucção (h_s) e de recalque (h_r). Poder ser calculada utilizando-se tabelas fornecidas por algum fabricante, que relacionam as perdas de carga com a vazão (Q) e com o diâmetro (d) da tubulação.

$$h_s = L_{ts} \cdot \text{Valor tabelado}/100$$

$$h_r = L_{tr} \cdot \text{Valor tabelado}/100$$

PERDAS DE PRESSÃO POR ATRITO EM TUBULAÇÕES Valores para tubos novos de ferro fundido ou galvanizados em, metros por 100 metros de tubos															
Vazão			Diâmetro nominal em polegadas												
lts/seg	lts/min	m³/hr	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	3	4	5	6	8	10	12
0,28	16,7	1	7,5	2,70	0,75	0,22	0,08								
0,42	25,0	1,5	16,0	6,00	1,60	0,50	0,17								
0,56	33,4	2	27,0	10,0	2,70	0,80	0,28	0,07							
0,84	50,0	3	58,0	21,5	6,00	1,80	0,60	0,16	0,05						
1,11	66,6	4	100,0	27,0	10,0	3,00	1,05	0,27	0,10						
1,39	83,4	5		55,0	15,5	4,70	1,60	0,42	0,15	0,05					
1,67	100	6		80,0	22,0	6,60	2,20	0,60	0,20	0,07					
2,22	133	8			37,0	11,5	3,90	1,00	0,35	0,13					
2,78	167	10			56,0	17,0	5,70	1,50	0,50	0,20	0,06				
3,47	209	12,5			85,0	26,0	8,50	2,30	0,80	0,28	0,09				
4,16	250	15				37,0	12,5	3,30	1,10	0,40	0,13	0,05			
4,86	291	17,5				47,0	16,0	4,20	1,40	0,50	0,17	0,06			
5,55	334	20				63,0	21,5	5,70	2,00	0,70	0,23	0,09			
6,95	416	25				95,0	33,0	8,50	3,00	1,10	0,35	0,13			
8,34	500	30					45,0	12,0	4,20	1,50	0,50	0,20	0,05		
9,72	584	35					51,0	16,0	5,70	2,00	0,65	0,24	0,06		
11,10	666	40					78,0	20,5	7,00	2,50	0,80	0,30	0,08		
12,50	750	45					100,0	26,0	9,00	3,10	1,00	0,40	0,10		
13,90	834	50						32,0	11,0	3,80	1,25	0,50	0,12		
16,70	1000	60						45,0	16,0	5,50	1,80	0,70	0,16	0,05	
19,50	1170	70						60,0	21,0	7,20	2,40	0,90	0,21	0,07	
22,20	1335	80						75,0	26,5	9,20	3,10	1,20	0,27	0,09	
25,00	1500	90							34,0	12,0	3,80	1,40	0,35	0,12	
27,80	1670	100							40,0	14,0	4,70	1,80	0,42	0,14	
33,40	2000	120							58,0	20,0	6,60	2,50	0,60	0,20	0,08
38,90	2335	140							80,0	27,0	9,00	3,30	0,80	0,26	0,10
44,50	2670	160								35,0	11,5	4,25	1,00	0,34	0,13
50,00	3000	180								43,0	14,0	5,30	1,25	0,42	0,17
55,60	3335	200								50,0	17,5	6,50	1,50	0,50	0,20
69,50	4165	250								60,0	26,5	10,0	2,30	0,80	0,32
83,40	5000	300									36,0	14,0	3,30	1,10	0,45
97,20	5835	350										19,0	4,50	1,50	0,60
111,0	6670	400											5,80	1,90	0,80
125,0	7515	450											7,00	2,40	1,00
138,7	8340	500												2,90	1,20

Obs: - Para tubos de aço carbono sem costura, de alumínio ou de plástico rígido, as perdas são reduzidas em 20 % (multiplicar por 0,8).

- Para tubos usados, considerar um acréscimo de 3% ao ano.
- Para sucção não devemos utilizar diâmetros abaixo da linha assinalada, afim de que a velocidade na sucção não exceda a 2 m/seg.

8º Passo: Cálculo da altura manométrica total (H_T). É a quantidade de energia que deve ser entregue pela bomba e absorvida pelo líquido que atravessa a bomba, para que ele vença todas as dificuldades impostas pelo sistema.

$$H_s = (h_s + Z_s) \cdot d$$

$$H_r = (h_r + Z_r) \cdot d$$

$$H_T = H_s + H_r$$

Onde:

H_s = Altura Manométrica na Sucção

H_r = Altura Manométrica no Recalque

H_T = Altura Manométrica Total

d = densidade do líquido

9º Passo: Cálculo da potência consumida pela bomba

$$N(cv) = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_T}{75 \cdot \eta}$$

10º Passo: Escolha da bomba com os valores de (Q) e (H_T), mediante o auxílio das Curvas Características de Funcionamento (fornecidas pelos fabricantes). Dentre as bombas que foram escolhidas primeiramente, deve-se escolher aquela que apresentar o $NPSH_{requerido}$ menor do que o $NPSH_{disponível}$. Se mais de uma bomba satisfizer este requisito, escolhe-se a bomba em função do maior rendimento, menor custo inicial e custo operacional (consumo de energia, manutenção, etc.)

11º Passo: Cálculo do $NPSH_{disponível}$ na instalação e compará-lo com o $NPSH_{requerido}$.

$$NPSH_{disponível} = H_0 - Z_s - h_s - H_v$$

$$NPSH_{disponível} > NPSH_{requerido}$$

Onde:

H_0 = é a pressão atmosférica, será utilizado 10,33 metros (pressão atmosférica ao nível do mar)

H_v = pressão de vapor de água, relacionado com determinadas temperaturas, conforme tabela a seguir:

Temperatura da água (°C)	0	4	10	20	30	40	50	60	80	100
Pressão de vapor da água (metros)	0,06 2	0,08 3	0,12 5	0,23 9	0,43 3	0,75 3	1,25 8	2,03 3	4,83 1	10,3 3

12º Passo: Cálculo da potência do motor de acionamento da bomba.

Motores a Diesel: Adicionar 25% de potência de reserva;
Motores a Gasolina: Adicionar 50% da potência de reserva;

Motores Elétricos: Conforme tabela abaixo:

Potência	Potência de Reserva
Até 2 cv	50%
De 2 a 5 cv	30%

De 5 a 10 cv	20%
De 10 a 20 cv	15%
Mais de 20 cv	10%

Obs. Utilizar o motor comercial de potência superior a calculada.

1.4 Defeitos Comuns em Instalações com Bombas Centrifugas e Causas Prováveis

- **Bomba funciona mas não há recalque, vazão e pressão nulas ou insuficientes.**

1. Tubulação de sucção e a bomba não estão cheias de água (escorvadas).
2. Profundidade de sucção elevada.
3. Entrada de ar pela tubulação de sucção.
4. Válvula de pé presa, entupida ou mal dimensionada.
5. Altura de recalque maior do que a qual a bomba foi indicada.
6. Tubulação de sucção e recalque com pequeno diâmetro.
7. Rotor da bomba furado ou entupido.
8. Junta defeituosa provocando entrada de ar.
9. Selo mecânico com vazamento.
10. Viscosidade do líquido diferente do que a indicada.

- **Bomba perde escorvamento após a partida.**

1. Profundidade de sucção elevada.
2. Entrada de ar pela tubulação de sucção ou válvula de pé.
3. Selo mecânico com vazamento.

- **Bomba com corpo super aquecido.**

1. Tubulação de sucção e a bomba estão vazias ou com pouca água (perda da escorva).
2. Eixos desalinhados.
3. Rotor raspando na carcaça.
4. Mancais com defeito.
5. Motor com sentido de rotação invertido.
6. Altura de recalque maior do que a qual a bomba foi indicada.
7. Tubulação de recalque obstruída.

- **Mancal com corpo super aquecido.**

1. Rolamentos com falta ou excesso de lubrificação, ou com lubrificante inadequado.
2. Eixo desalinhado ou empenado.
3. Rolamentos montados com excesso de interferência.
4. Rotação de uso maior do que a especificada.

- **Motor Elétrico não gira.**

1. Eixo empenado ou preso.
2. Energia elétrica deficiente (queda de voltagem ou ligação inadequada).

3. Rotor raspando na carcaça.
4. Mancais de rolamento defeituosos ou sem lubrificação.
5. Motor em curto ou queimado.

- **Motor elétrico com super aquecimento.**

1. Excesso de vazão.
2. Condutores de ligação muito finos.
3. Energia elétrica deficiente.
4. Falta de lubrificação ou defeito nos rolamentos do motor.
5. Rotor preso ou raspando na carcaça.
6. Ventilação do motor bloqueada ou insuficiente.
7. Gaxetas muito apertadas
8. Eixos desalinhados ou empenados.

1.5 Sistemas de Vedação para Bombas Centrífugas

Dependendo do tipo de bomba e do líquido que será bombeado, as bombas centrífugas podem ser vedadas, no espaço compreendido entre o eixo (luva) e a carcaça, por Gaxetas ou por Selos Mecânicos.

1.5.1 Vedação por Gaxetas

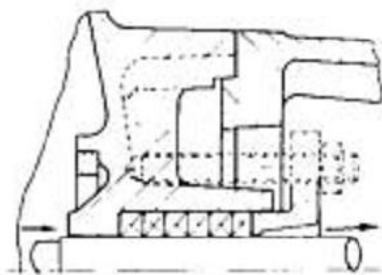
Gaxetas podem ser definidas como um material deformável, utilizado para prevenir ou controlar a passagem de fluidos entre duas superfícies que possuam movimentos, uma em relação à outra.

Gaxetas são construídas de fios trançados de fibras vegetais (juta, rami, algodão), fibras minerais (amianto) ou fibras sintéticas. De acordo com o fluido a ser bombeado, temperatura, pressão, ataque químico, etc, determina-se um ou outro tipo de gaxeta.

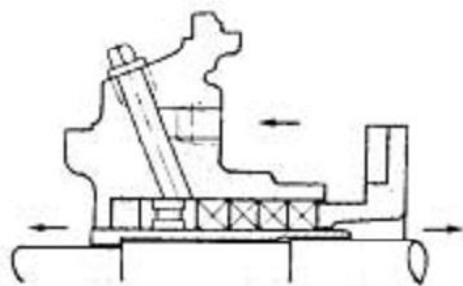
Para bombas de serviços gerais, a caixa de gaxetas usualmente tem a forma de uma caixa cilíndrica que acomoda um determinado número de anéis de gaxeta em volta do eixo ou da luva protetora do eixo.

A gaxeta é comprimida para dar o ajuste desejado no eixo ou na luva protetora do eixo por uma peça denominada sobreposta que se desloca na direção axial. Vedações de eixo por gaxetas necessitam de um pequeno vazamento para garantir a lubrificação e a refrigeração na área de atrito das gaxetas como eixo ou como a luva protetora do eixo.

Geralmente entre os anéis de gaxetas, faz-se a utilização de um anel cadeado ou anel lanterna. Sua utilização se faz necessária, quando, por exemplo, o líquido bombeado contiver sólidos em suspensão, que poderão se acumular e impedir a livre passagem de líquido e impedindo a lubrificação da gaxeta. Com isto, ocorrerá o desgaste excessivo no eixo e na gaxeta por esmerilhamento. Este sistema consiste na injeção de um líquido limpo na caixa de gaxetas. Este líquido chega até os anéis de gaxetas através de um anel perfurado chamado de anel cadeado. Este líquido pode ser o próprio fluido bombeado injetado sobre o anel cadeado por meio de furações internas ou por meio de uma derivação retirada da boca de descarga da bomba. O anel cadeado pode também ser utilizado quando a pressão interna na caixa de gaxetas é inferior a atmosférica, impedindo assim a entrada de ar na bomba. A posição do anel cadeado no engastamento é definida durante o projeto da bomba pelo fabricante.



engaxetamento sem anel cadeado



engaxetamento com anel cadeado

As gaxetas podem ser constituídas de diversos materiais, entre eles:

- amianto grafitado;
- amianto trançado com fios metálicos antifricção, impregnado e grafitado;
- amianto de alta resistência e flexibilidade, impregnado com composto especial e acabado com grafite;
- amianto impregnado com teflon e lubrificado, não grafitado;
- teflon puro trançado em filamentos e lubrificado, não grafitado;
- grafite puro.



A vedação do eixo por engaxetamento só pode ser feita para pressões até 15 kgf/cm² na entrada da caixa de gaxeta. Para pressões maiores, devem ser utilizados selos mecânicos. Quando o líquido bombeado for inflamável, corrosivo, explosivo, tóxico ou quando é exigido que vazamentos não sejam permitidos, é necessário o uso de selos mecânicos.

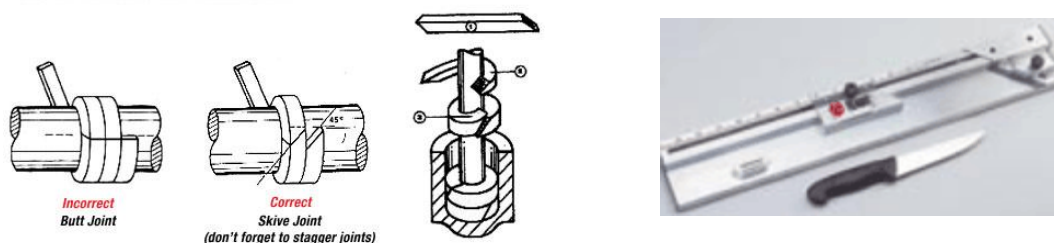
Para avaliação rápida de uma gaxeta é importante observar alguns pontos:

1. Densidade: Somente é possível comparar a densidade entre duas gaxetas quando estas forem fabricadas de um mesmo material e tiverem a mesma composição. Quanto maior for a densidade de uma gaxeta, melhor seu efeito de selabilidade.
2. Integridade de Entrelaçamento: Neste caso, a gaxeta deve ser inteiramente trançada e ter boa estabilidade dimensional. Além disso, a alma não deve ultrapassar 25% da seção transversal da gaxeta, quanto menor a quantidade de fios na alma, melhor será seu efeito de vedação. Desta forma, as gaxetas inteiramente trançadas vedam mais do que as tradicionais capa/alma.
3. Tolerância Dimensional: A variação dimensional da bitola de uma gaxeta deve ser baixa: no máximo 0,4 mm para bitolas até 6,4 mm e de 0,8 mm para bitolas acima de 6,4 mm. A gaxeta deve ter os cantos vivos e a superfície lisa, o que permite aumentar a área de contato da gaxeta com o eixo e evitar que este seja danificado por irregularidade da superfície da gaxeta.

4. Integridade da composição: A formulação correta das matérias-primas utilizadas (fios, impregnantes e lubrificantes) é fundamental para o bom desempenho da gaxeta. O bom desempenho das gaxetas ocorre devido as seguintes propriedades: Ampla faixa de temperatura; Boa resistência ao desgaste; Baixo coeficiente de atrito; Boa resistência química; Boa condutividade térmica; Baixa expansão térmica; Moldabilidade; Resistência ao escoamento.

O sistema de vedação por gaxetas requer alguns cuidados:

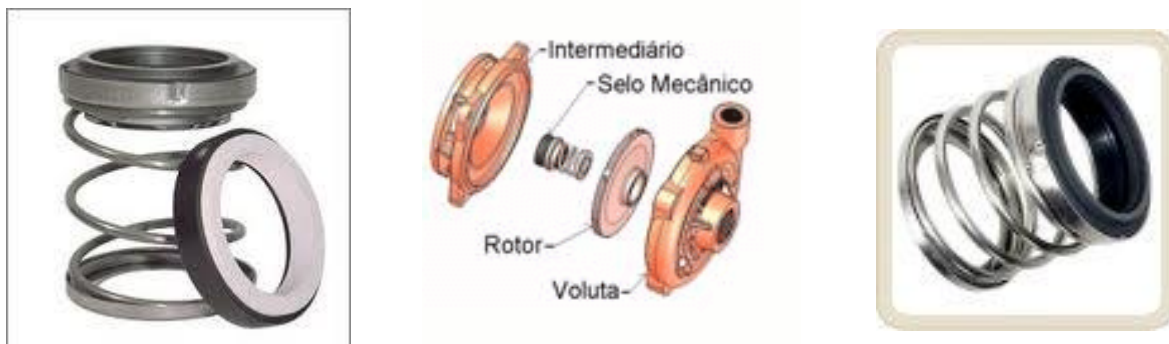
- As gaxetas devem trabalhar umedecidas, tanto para o auxílio na vedação quanto para a refrigeração da gaxeta evitando o seu aquecimento devido ao atrito.
- As gaxetas devem ser cortadas no comprimento do perímetro do eixo que vão envolver, os cortes devem ser chanfrados a 45° e deverão ser instalados desencontrados.
- Após a instalação dos anéis de gaxetas, o ajuste final é feito através da sobreposta, onde são regulados os pingos por minuto (30 a 60 pingos por minuto).



1.5.2 Selos Mecânicos

Quando o líquido bombeado não pode vazar para o meio externo da bomba, por um motivo qualquer (líquido inflamável, tóxico, corrosivo, mau cheiroso ou quando não se deseja vazamentos) utiliza-se um outro sistema de selagem chamado de selo mecânico.

Embora os selos mecânicos possam diferir em vários aspectos físicos, todos têm o mesmo princípio de funcionamento. As superfícies de selagem são localizadas em um plano perpendicular ao eixo e usualmente consistem em duas partes adjacentes e altamente polidas; uma superfície ligada ao eixo e a outra à parte estacionária da bomba (carcaça). Estas superfícies altamente polidas são mantidas em contato contínuo por molas, formando um filme líquido entre as partes rotativas e estacionárias com pequena perda por atrito.



O vazamento é praticamente nulo quando o selo é novo. Com o uso prolongado, algum vazamento pode ocorrer, obrigando a substituição dos selos.

Os selos mecânicos podem ser de dois tipos:

- Selos de Montagem Interna: Neles o anel rotativo, ligado ao eixo, fica no interior da caixa e em contato como líquido bombeado.
- Selos de Montagem Externa: O elemento ligado ao eixo se acha no lado externo da caixa.

Em ambos os tipos de montagem, a selagem se realiza em três locais:

A) entre o anel estacionário e a carcaça. Para conseguir esta selagem, usa-se uma junta comum ou o chamado “anel em O” (O’ring).

B) Entre o anel rotativo e o eixo ou a luva protetora do eixo, quando usada. Empregam-se O’rings, foles ou cunhas.

C) Entre as superfícies de contato com elementos de selagem. A pressão mantida entre as superfícies asseguram o mínimo desejável de vazamento.

Os selos mecânicos necessitam, para um adequado funcionamento, que uma película de filme do líquido bombeado seja formado entre as faces de selagem. Além disso, alta temperatura de bombeamento, presença de abrasivos, líquidos com tendência a formação de cristais e serviços em que a bomba permaneça parada por muito tempo, são características negativas para o emprego de selos.

1.6 Referências Bibliográficas

CARVALHO, Djalma F., *Instalações Elevatórias. Bombas*. 3ª Ed., Depto. de Engenharia Civil, PUC- MG, Belo Horizonte, 1977. 355 p.

LIMA, Epaminondas P. C., *Mecânica das Bombas*. Rio de Janeiro, 2ª Ed., Editora Interciência, PETROBRAS, 2003. 610 p.

MACINTYRE, Archibald Joseph. *Máquinas Motrizes Hidráulicas*. Rio de Janeiro: Guanabara, 1983. 648 p.

MACINTYRE, Archibald Joseph. *Bombas e Instalações de Bombeamento*. 2a Ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1987.