

**HBA\***

**ACUMULADOR DE BEXIGA**

## Informações gerais

### 1.1 – GENERALIDADES

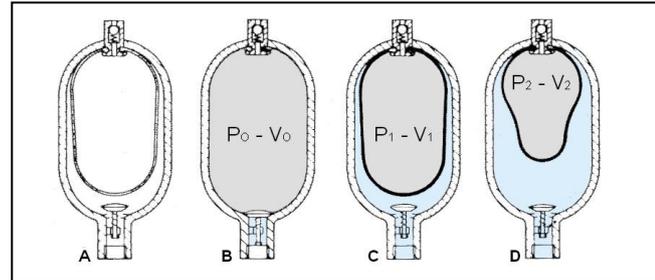
O acumulador hidropneumático é um equipamento que permite, nos circuitos hidráulicos, uma notável concentração de energia em espaços limitados. Visto que os líquidos praticamente são incompressíveis, não são aptos à concentração de energia. O objetivo se consegue aproveitando a grande compressibilidade dos gases.

**A)** Em um casco (corpo do acumulador) se monta um separador elástico (bexiga).

**B)** Por uma válvula se introduz gás inerte (nitrogênio) na bexiga a uma pressão  $P_0$ . A bexiga se expande ocupando todo o volume interno do corpo do acumulador  $V_0$ .

**C)** Quando a pressão  $P_1$  no circuito supera a pressão de pré-carga  $P_0$ , a válvula fungiforme se abre e comprime a bexiga provocando a redução do volume até  $V_1$ .

**D)** Aumentando a pressão do líquido até  $P_2$ , se produz uma reação de volume de gás até  $V_2$  com aumento de sua pressão para equilibrar a pressão do líquido. Isso significa que foi produzido um acúmulo de líquido com pressão  $\Delta V = V_1 - V_2$ , quer dizer, um acúmulo de energia potencial que pode ter diversas aplicações como definido na seção 2.



### 1.2 – CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

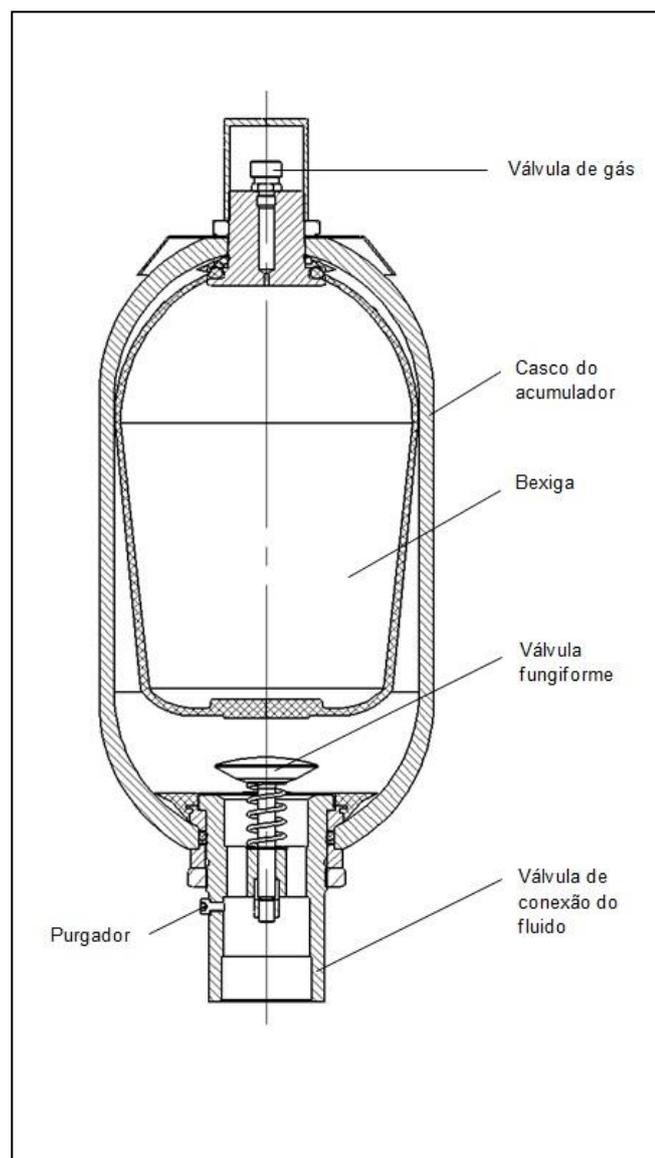
A realização prática do anteriormente exposto se consegue nos acumuladores da HT, que são formados essencialmente por: casco do acumulador, bexiga, válvula de gás e válvula de fluido, conforme figura ao lado.

**O corpo do acumulador:** é um recipiente a pressão, em geral de aço carbono de alta resistência, construído segundo normas específicas em vigor. Para usos especiais, o casco pode ser niquelado, de aço inoxidável e etc.

**A bexiga:** separa o gás do líquido. Na versão standard é fabricada em borracha nitrílica. Para usos especiais, há também bexigas de neoprene, viton, EPDM e etc.

**A válvula de gás:** é fabricada em aço, com retenção interna para carga do acumulador. A tampa serve de proteção para a válvula de retenção.

**A válvula fungiforme e de fluido:** realiza a função de contenção da bexiga anteriormente cheia de nitrogênio e ao mesmo tempo permite a passagem de líquido.



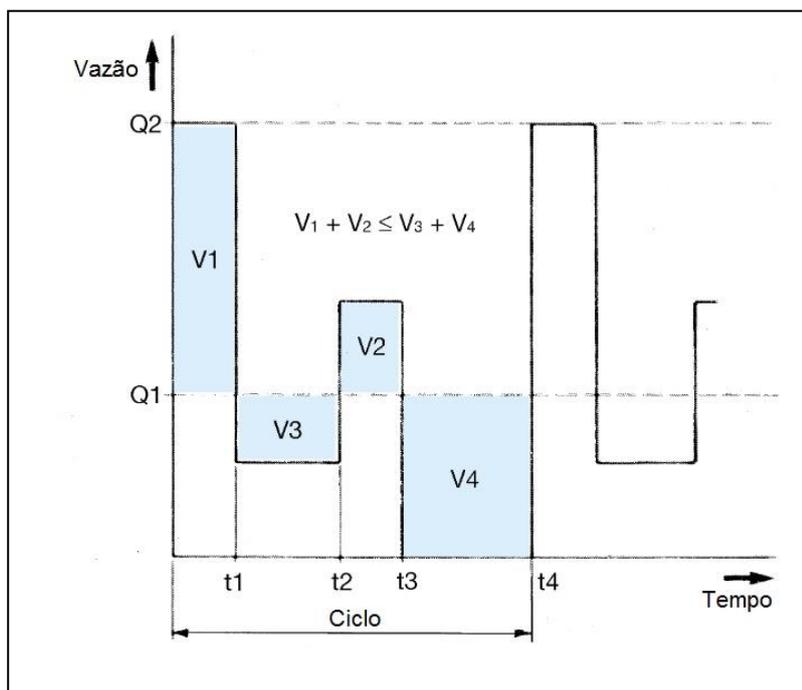
## 2 – APLICAÇÕES MAIS USUAIS

### 2.1 – ACUMULADOR DE ENERGIA

Nos Circuitos hidráulicos nos quais se apresente a necessidade de abastecer grandes vazões para breves períodos, alternados por períodos de baixa solicitação de vazão ou de parada, a utilização do acumulador se revela muito útil para reduzir tanto os custos da instalação (bombas e motores menores) como os outros custos de serviço.

O ciclo de operação da figura ao lado precisaria de uma bomba com vazão  $Q_2$ . Utilizando o acumulador hidropneumático se pode armazenar óleo durante os tempos  $(t_2 - t_1)$  e  $(t_4 - t_3)$ , no qual a necessidade é baixa ou nula, para fazer a utilização em  $t_1$  e  $(t_3 - t_2)$  quando a vazão requerida supera a vazão da bomba  $Q_1$ . Essa vazão deve ser proporcionada para conseguir os volumes  $V_1 + V_2 \leq V_3 + V_4$ .

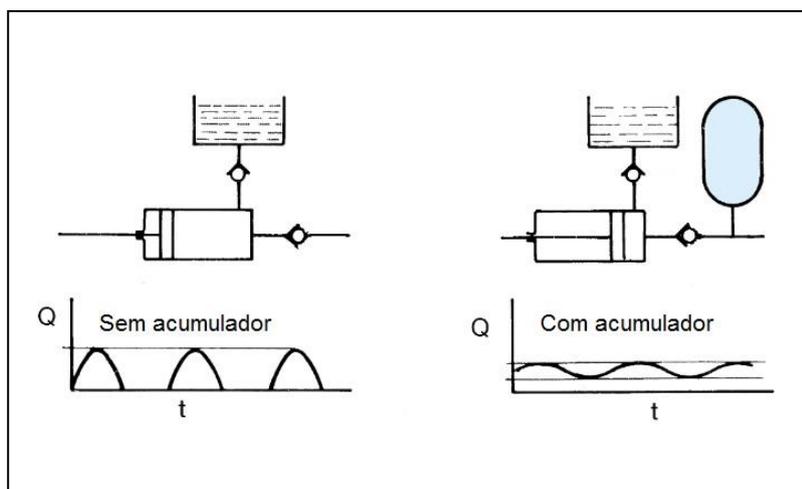
Numerosos são os campos de utilização como: prensas de injeção, máquinas para termoplásticos (troca de filtros), linhas de transporte, instalações para fábricas de aço, laminadores, máquinas ferramentas, prensas hidráulicas, etc.



### 2.2 – AMORTECIMENTO DE PULSAÇÕES

As bombas de pistão e de membrana produzem inevitavelmente uma pressão pulsante no circuito hidráulico. Esse fechamento prejudica o bom funcionamento da instalação e da duração dos componentes. A inserção de um acumulador de bexiga na linha de pressão perto da bomba amortece as oscilações a valores aceitáveis (figura ao lado).

Usos típicos: bombas com pequeno número de pistões, bomba de dosagem, etc.



### 2.3 – COMPENSADOR DE VOLUMES

Em um circuito hidráulico fechado, um aumento na temperatura pode provocar um aumento na pressão devido à expansão térmica. A utilização de um acumulador hidropneumático absorve a variação de volume do óleo, evitando possíveis danos às válvulas, às juntas, aos instrumentos de medição, etc. Pode-se, também, aplicar o acumulador em refinarias e oleodutos.

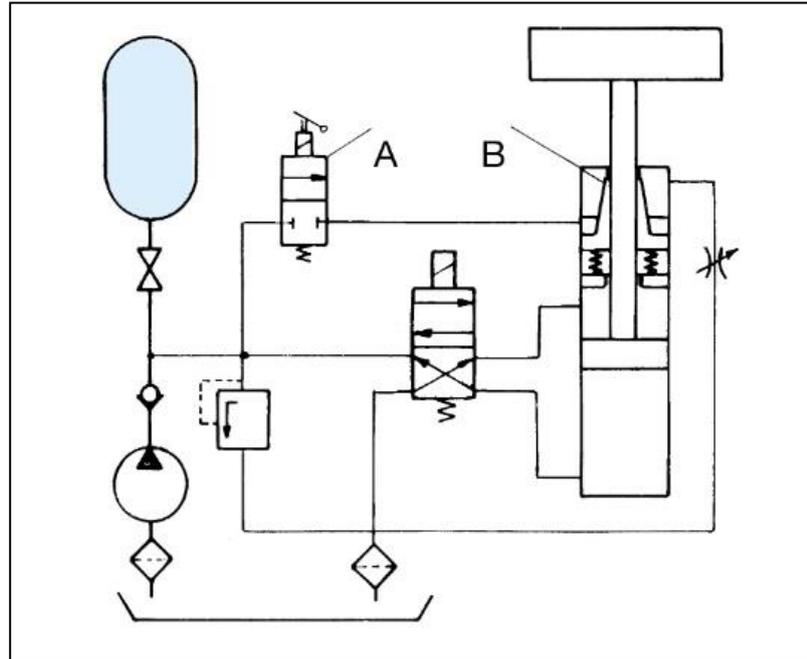
## 2.4 – RESERVA DE ENERGIA PARA EMERGÊNCIA

Nos casos de repentina falta de energia ou de defeito na bomba, o acumulador pode intervir como fonte de energia de reserva para completar o ciclo de operação, ou pelo menos para deixar os dispositivos na posição requerida para evitar os possíveis danos que uma brusca interrupção causaria na máquina ou no produto.

Além disso, ele pode ter sempre energia a disposição, conveniente nos casos nos quais se necessite acionar de forma rápida e imprevista uma porta de emergência, um interruptor elétrico, um desviador, uma válvula de segurança, um freio de emergência, etc.

Pode-se utilizar também como reserva de combustível para uma alimentação temporária dos queimadores das centrais térmicas.

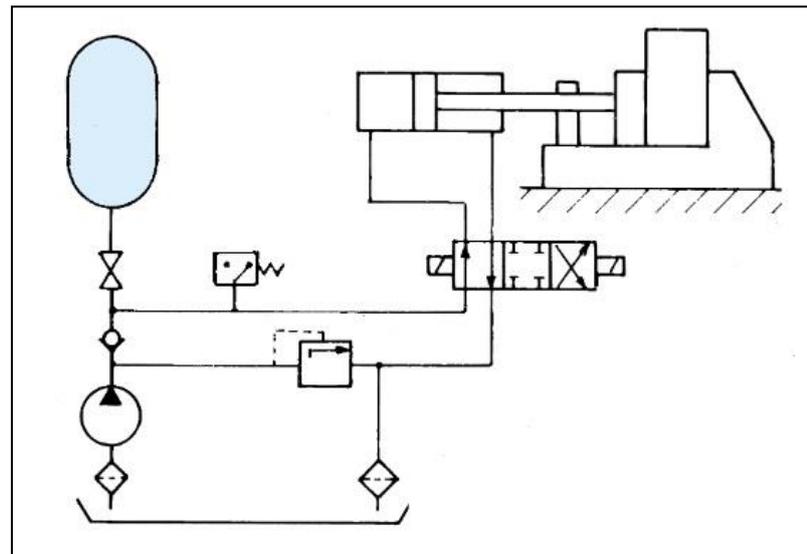
Na figura ao lado o bloco de segurança B pode ser afrouxado, no caso de faltar energia, acionando manualmente a eletroválvula A que utiliza a energia do acumulador.



## 2.5 – COMPENSADOR DE PRESSÃO

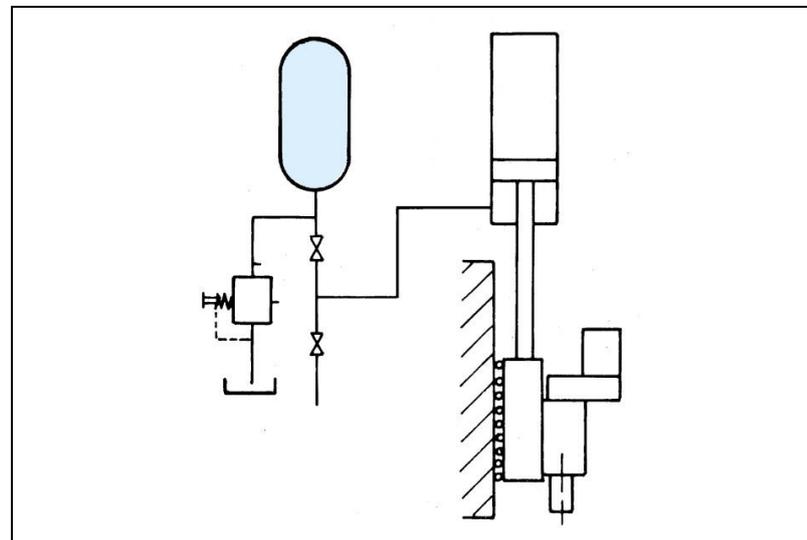
Onde for necessário manter uma pressão estática constante por um breve ou longo período de tempo, é indispensável o uso do acumulador para compensar as fugas de óleo, as drenagens, etc., bem como equilibrar picos de pressão que ocorrem no circuito durante o ciclo de operação.

Em geral, emprega-se o acumulador em sistemas de bloqueio, prensas para vulcanização, máquinas ferramentas, instalações de lubrificação, etc.



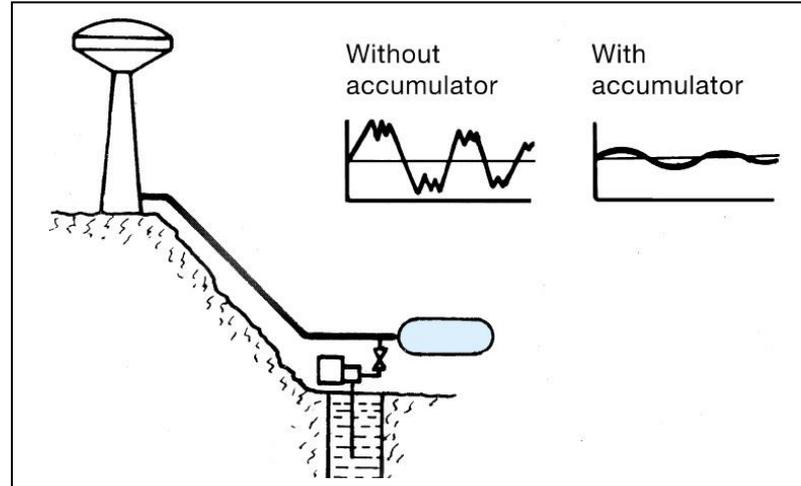
## 2.6 – EQUILÍBRIO DE FORÇAS

O equilíbrio de um peso ou de uma força se pode produzir mediante um cilindro unido a um acumulador. Dessa forma, é possível evitar grandes contrapesos com vantagem no que se refere às dimensões e ao peso das máquinas. Usos comuns para máquinas ferramentas, braços de graus, etc.



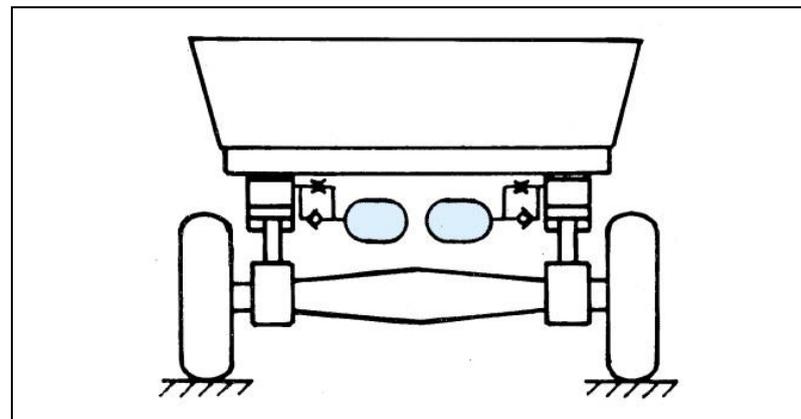
## 2.7 – RECEPTOR DE GOLPES DE ARÍETE

O rápido fechamento de uma válvula provoca uma onda de choque que se estende ao longo do interior da instalação. Essa pressão em excesso, pulsante, que danifica as peças e instalações, pode ser reduzida ou anulada usando um acumulador. Exemplos comuns: aquedutos, oleodutos, circuitos de distribuição de petroquímicos, instalações elevatórias.



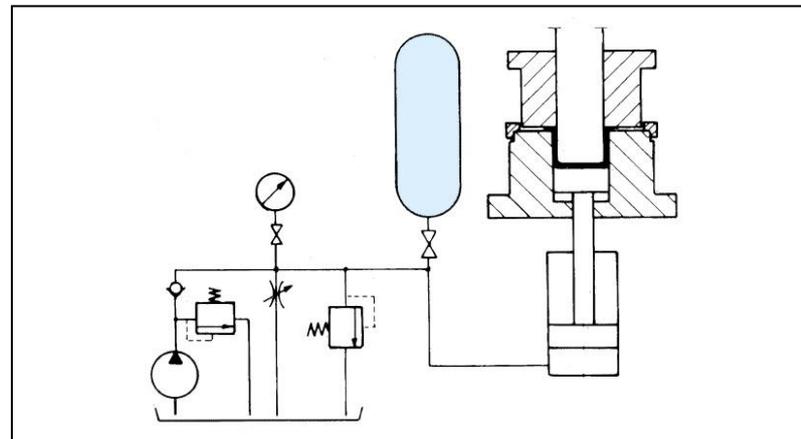
## 2.8 – AMORTECEDORES DE GOLPES

Os golpes mecânicos nas máquinas que funcionam hidráulicamente podem facilmente ser amortecidos com um acumulador. Habitualmente ele é empregado em elevadores, guas automáticas, cegadores, rastriladores, britadores, suspensão de máquinas agrícolas e etc.



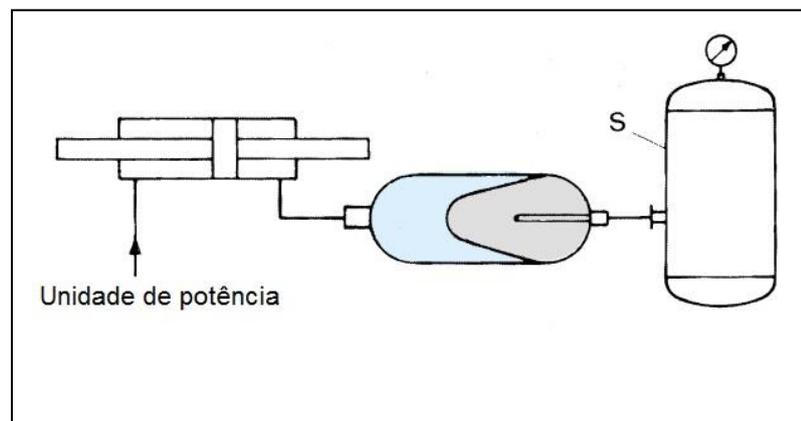
## 2.9 – MOLA HIDRÁULICA

O acumulador hidropneumático pode ser empregado com vantagens no lugar de molas mecânicas, por exemplo, na impressão com diminuição progressiva da seção (ver figura ao lado). O empuxo dos pisadores pode ser regulado com facilidade e precisão dentro de limites mais amplos, atuando só na pressão do óleo sem ter que substituir molas ou suportes.



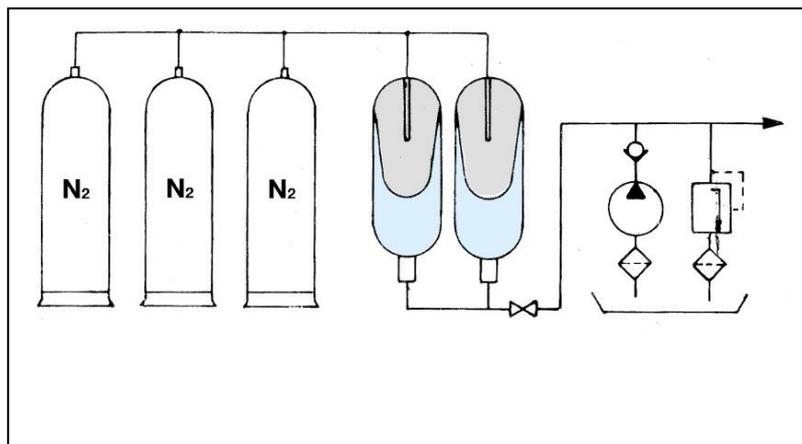
## 2.10 – SEPARADOR DE FLUIDOS

Pela forma como foi idealizado, o acumulador é um separador entre dois fluidos (em geral óleo e nitrogênio). Essa característica é aproveitada em todos os casos nos quais se tenha que levar energia em forma de pressão de um fluido a outro (líquidos ou gasosos) e que não devem entrar em contato. Daí o nome TRANSFER. Na figura ao lado se indica o esquema simplificado para um corpo de prova do depósito S submetido à pressão interna com água. O pulso de pressão inicial é gerado pelo pistão P utilizando óleo. Pressões e volumes iguais são transferidos à água no compartimento por meio do acumulador. Utilizado frequentemente em indústrias petroquímicas.



A figura ao lado mostra uma aplicação típica do TRANSFER entre um líquido e um gás utilizando um acumulador com depósitos adicionais de gás. Essa aplicação é conveniente nos casos os quais a quantidade de líquido necessária é mais elevada em relação a pequena diferença entre as pressões de serviço.

Para limitar a capacidade global e, portanto, a quantidade de acumuladores necessários, aumenta-se o volume de gás disponível unindo os acumuladores com depósitos adicionais (ver seção 3.11).



### 3 – ESCOLHA DO ACUMULADOR

#### 3.1 – CRITÉRIOS DE SELEÇÃO

Para selecionar um acumulador, é preciso levar em consideração muitos fatores, os quais os mais importantes são:

##### A) Pressão de serviço mínima $P_1$ e máxima $P_2$ :

O valor de  $P_2$  deve ser menor ou igual à pressão de serviço máxima do acumulador a selecionar, por razões de segurança. O valor de  $P_1$  deve estar contido na relação  $\frac{P_2}{P_0} \leq 4$ .

$$\frac{P_2}{P_0}$$

Esses são os valores para os quais se consegue maior eficiência e durabilidade do acumulador (a determinação da pré-carga  $P_0$  se encontra na seção 3.2).

##### B) Volume $\Delta V$ do líquido a acumular ou a restituir:

Dado indispensável, além dos valores da pressão máxima e mínima, para determinar o tamanho do acumulador.

##### C) Modo e/ou campo de emprego:

É importante estabelecer se o gás durante o ciclo está submetido à transformação isotérmica ou adiabática. Se a compressão (ou expansão) é lenta (superior a 3 minutos), de maneira que permita ao gás manter a temperatura quase constante, se produz a transformação **ISOTÉRMICA** (EX: estabilizador de pressão, equilíbrio de forças, compensador de volume, alimentação nos circuitos de lubrificação). Em todos os demais casos (reserva de energia, compensador de pulsações, receptor de golpes de aríete, etc.) a transferência de calor com o ambiente é insignificante pela velocidade com que ela ocorre. Então, se produzem, ao mesmo tempo, variações de pressão e temperatura do gás, ou seja, ocorre a transformação **ADIABÁTICA**. A transformação adiabática se produz quando a duração da compressão ou expansão é menor que 3 minutos.

##### D) Temperatura de serviço:

Pode ser determinante para a seleção dos materiais (bexiga, recipiente) e influir na pressão de pré-carga e conseqüentemente no volume do acumulador.

##### E) Tipo de líquido:

Determinante para a seleção dos materiais.

##### F) Vazão máxima requerida:

O tamanho ou a conexão do acumulador pode variar em função da velocidade instantânea necessária.

##### G) Local da instalação:

É importante saber o país onde será instalado o acumulador e, conseqüentemente, os testes de aceitação requeridos.

Depois do exposto, o acumulador estará completamente definido, determinando assim seu volume e a pressão de pré-carga em função de sua aplicação.

#### 3.2 – PRESSÃO DE CARGA

A seleção da pressão de pré-carga do acumulador tem vital importância na obtenção do rendimento máximo de operação e condições que não prejudiquem a durabilidade de suas peças. O máximo acúmulo (ou liberação) de líquido se produz, teoricamente, com uma pressão de pré-carga  $P_0$  mais parecida possível com a pressão mínima útil de funcionamento. Na prática, para se conseguir certa margem de segurança e evitar o fechamento da válvula fungiforme durante o funcionamento, adota-se (exceto em casos especiais) o valor:

$$P_0 = 0,9 \cdot P_1$$

Os valores limites de  $P_0$  são:

$$P_{\min} \geq 0,25 \cdot P_2$$

$$P_{\max} \leq 0,9 \cdot P_1$$

Produzem-se valores especiais para:

**Compensador de pulsações e amortecedor:**

$$P_0 = 0,6 + 0,75 \cdot P_m \text{ ou } P_0 = 0,8 \cdot P_1$$

Sendo  $P_m$  = Pressão média de funcionamento.

**Receptor de golpes de aríete:**

$$P_0 = 0,6 + 0,9 \cdot P_m$$

Sendo  $P_m$  = Pressão média de serviço a fluxo livre.

**Acumulador + depósitos adicionais:**

$$P_0 = 0,95 + 0,97 \cdot P_1$$

O valor de  $P_0$  é válido para a **TEMPERATURA MÁXIMA DE FUNCIONAMENTO PREVISTA PELO USUÁRIO**. O controle da carga do acumulador se efetua quase sempre a temperaturas diferentes das de funcionamento  $\Theta_2$  pela qual o valor  $P_0$  à temperatura de controle  $\Theta_c$  se converte em:

$$P_{oc} = P_0 \cdot \frac{\Theta_c + 273}{\Theta_2 + 273}$$

Sendo  $\Theta_c = 20^\circ\text{C}$  se consegue:

$$P_{o(20^\circ\text{C})} = P_0 \cdot \frac{293}{\Theta_2 + 273}$$

Nota: pressão de pré-carga dos acumuladores administrados diretamente na fábrica se refere a uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

**3.3 – PRINCÍPIOS DE CÁLCULO**

A compressão e a expansão do gás no acumulador se produzem segundo a relação de Boyle-Mariotte sobre as trocas de estado dos gases perfeitos:

$$P_0 \cdot V_0^n = P_1 \cdot V_1^n = P_2 \cdot V_2^n$$

No diagrama de trabalho ao lado se expressa graficamente a constante do produto pressão x volume no interior do acumulador.

$V_0$  = Volume de nitrogênio a baixa pressão  $P_0$  de pré-carga (litros). É o volume máximo de gás que pode conter o acumulador e coincide, ou é ligeiramente inferior, à capacidade nominal.

$V_1$  = Volume de nitrogênio, pressão  $P_1$  (litros).

$V_2$  = Volume de nitrogênio, pressão  $P_2$  (litros).

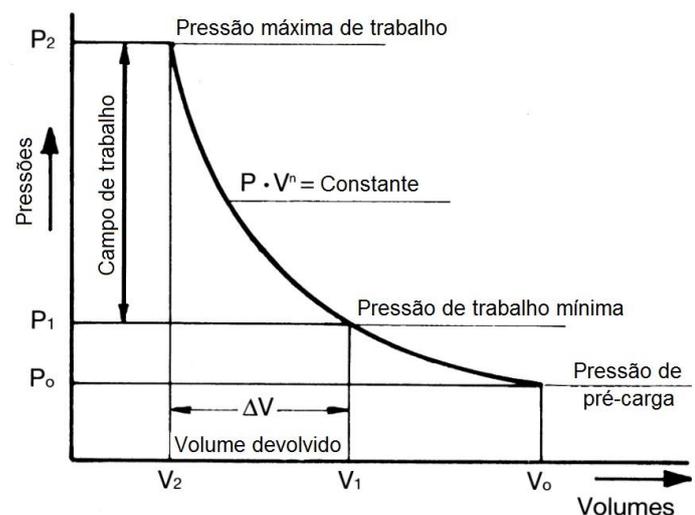
$\Delta V$  = Volume de nitrogênio devolvido/armazenado (litros).

$P_0$  = Pressão de pré-carga (bar).

$P_1$  = Pressão de trabalho mínima (bar).

$P_2$  = Pressão de trabalho máxima (bar).

$n$  = Expoente politrópico.



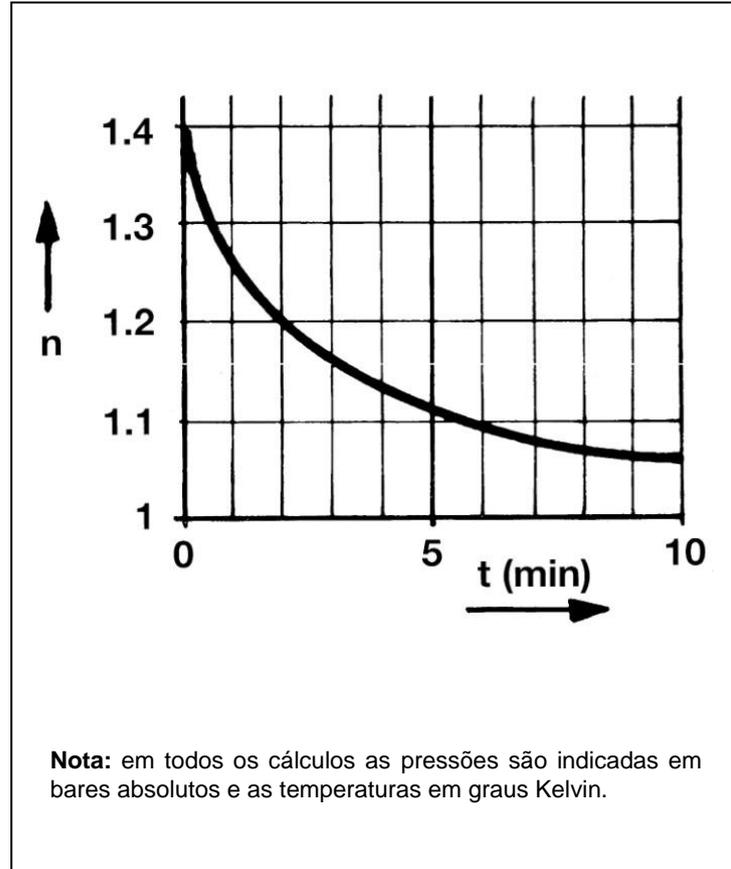
A curva da variação do volume em relação à pressão depende do expoente  $n$ , que para o nitrogênio, está compreendido entre os valores limites de:

**$n = 1$ :** no caso em que a compressão e a descompressão do nitrogênio se produzam tão lentamente que permite uma completa troca térmica entre o gás e o ambiente externo, quer dizer, se trabalha à temperatura constante e em **transformação isotérmica**.

**$n = 1,4$ :** quando se trabalha de forma tão rápida que não se permite nenhuma troca térmica com o ambiente exterior. Nesse caso se produz a **transformação adiabática**.

Na realidade essas condições ótimas não ocorrem nunca. Entretanto, pode-se afirmar, com razoável aproximação, que usando o acumulador como compensador de volume, compensador de descarga, a condição de trabalho é **ISOTÉRMICA**. Nas demais aplicações como acumulador de energia, amortecedor de golpes, compensador de pressão dinâmica, regime propulsor em casos de emergência, receptor de golpes de aríete, mola hidráulica, etc., é possível afirmar com razoável precisão que a condição de trabalho é **ADIABÁTICA**.

Nos casos em que falta um cálculo mais exato, pode-se utilizar os valores intermediários de  $n$  em função de  $t$ , que é a duração da compressão ou expansão segundo o diagrama ao lado.



### 3.4 – CÁLCULO DO VOLUME EM TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA

Sendo  $n = 1$  a relação de Boyle-Mariotte, tem-se:

$$P_0 \cdot V_0 = P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

Portanto:

$$V_1 = V_0 \cdot P_0/P_1$$

e

$$V_2 = V_0 \cdot P_0/P_2$$

A diferença entre o volume  $V_1$  (pressão de serviço mínima) e  $V_2$  (pressão de serviço máxima) resulta na quantidade de líquido acumulada (ver seção 1.1):

$$\Delta V = V_1 - V_2 = V_0 \cdot \frac{P_0}{P_1} - V_0 \cdot \frac{P_0}{P_2}$$

Então:

$$\Delta V = V_0 \cdot \left( \frac{P_0}{P_1} - \frac{P_0}{P_2} \right)$$

O volume  $V_0$  do acumulador será:

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\left( \frac{P_0}{P_1} - \frac{P_0}{P_2} \right)}$$

que pode ser escrito como

$$V_0 = \frac{\Delta V}{P_0 \left( \frac{1}{P_1} - \frac{1}{P_2} \right)}$$

Evidenciando que o volume do acumulador aumenta quando  $\Delta V$  está aumentando, quando  $P_0$  está diminuindo e quando a diferença entre  $P_1$  e  $P_2$  está diminuindo.

### 3.5.1 – COMPENSADOR DE VOLUME (ISOTÉRMICO)

Um típico exemplo de cálculo em transformação isotérmica se consegue empregando o acumulador como compensador de volume.

Tem-se uma tubulação de  $\varnothing = 77,7\text{mm}$ , de 120m de comprimento pela qual passa petróleo a 10 bar de pressão a uma temperatura de  $\Theta_1 = 10^\circ\text{C}$  e  $\Theta_2 = 45^\circ\text{C}$ . A variação de pressão admitida é de  $\pm 8\%$ . A variação do volume será:

$$\Delta V = V_T(\Theta_2 - \Theta_1) (\beta - 3\alpha) = 596(45 - 10)(0,00095 - 3.0,000012) = 18,2 \text{ litros}$$

Sendo:

$V_T$  = Volume da tubulação (litros).

$\Theta_2$  = Temperatura máxima ( $^\circ\text{C}$ ).

$\Theta_1$  = Temperatura mínima ( $^\circ\text{C}$ ).

$\beta$  = Coeficiente de dilatação cúbica do fluido ( $1/^\circ\text{C}$ ).

$\alpha$  = Coeficiente de dilatação linear da tubulação ( $1/^\circ\text{C}$ ).

$P_1$  = Pressão de trabalho mínima admitida (bar).

$P_2$  = Pressão de trabalho máxima admitida (bar).

Com:

$$P_0 = 0,9 \cdot 10 = 9,0 \text{ bar.}$$

$$P_1 = -8\% \text{ de } 10 = 9,2 \text{ bar.}$$

$$P_2 = +8\% \text{ de } 10 = 10,8 \text{ bar.}$$

O volume necessário será:

$$V_0 = \frac{\Delta V}{P_0 \left( \frac{1}{P_1} - \frac{1}{P_2} \right)} = \frac{18,2}{10 \left( \frac{1}{10,2} - \frac{1}{11,8} \right)} = 137 \text{ litros}$$

A solução do problema requer a aplicação de uma bateria de 3 acumuladores do tipo **HBA★- 55P**.

### 3.5.2 – COMPENSADOR DE VAZAMENTO

a) Supondo uma prensa de molde que trabalha a 200 bar e que precisa ser mantida durante todo o tempo de vulcanização com pressão constante. A pressão mínima admitida é 198 bar. Depois de fechar o molde, a bomba de alimentação é desligada. As perdas de óleo são de  $2 \text{ cm}^3/\text{min}$ . O tempo de vulcanização é 60 min.

$$\Delta V = Q_1 \cdot T = 0,002 \times 60 = 0,12 \text{ litros}$$

Sendo:

T = tempo de vulcanização (min.).

$$P_0 = 0,9 \times 198 = 178 \text{ bar.}$$

$$P_1 = 198 \text{ bar.}$$

$$P_2 = 200 \text{ bar.}$$

$$V_0 = \frac{\Delta V}{P_0 \left( \frac{1}{P_1} - \frac{1}{P_2} \right)} = \frac{0,12}{179 \left( \frac{1}{199} - \frac{1}{201} \right)} = 13,41 \text{ litros}$$

A capacidade do acumulador standard mais próxima do valor calculado é 15 litros. Então, o acumulador escolhido é o **HBA★15P360**.

b) Se fosse necessário calcular o tempo que a bomba deveria ser acionada novamente para recarregar o acumulador de 15 litros a fim de manter a condição exposta em a), ter-se-ia:

$$t = \Delta V / Q_1$$

$V_0 = 14,5$  litros de nitrogênio para o acumulador **HBA\*15** (ver tabela de acumuladores).

Sendo:

$$\Delta V = V_0 \cdot \left( \frac{P_0}{P_1} - \frac{P_0}{P_2} \right) = 14,5 \cdot \left( \frac{179}{199} - \frac{179}{201} \right) = 0,13 \text{ litros}$$

Portanto:

$$t = 0,13 / 0,002 = 65 \text{ minutos}$$

### 3.6 – CÁLCULO DO VOLUME EM TRANSFORMAÇÃO ADIABÁTICA

Partindo da fórmula básica:

$$P_0 \cdot V_0^n = P_1 \cdot V_1^n = P_2 \cdot V_2^n$$

Seguindo o indicado para o cálculo isotérmico, é possível se obter:

$$\Delta V = V_0 \cdot \left\{ \left( \frac{P_0}{P_1} \right)^{1/n} - \left( \frac{P_0}{P_2} \right)^{1/n} \right\}$$

Sendo  $1/n = 0,7143$ .

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\left( \frac{P_0}{P_1} \right)^{1/n} - \left( \frac{P_0}{P_2} \right)^{1/n}}$$

As fórmulas são válidas quando se trabalha em transformação adiabática tanto em fase de expansão como em compressão. Apesar disso, tenha em mente que o rendimento do acumulador e, portanto, o cálculo dele são influenciados tanto pela pressão quanto pela temperatura de serviço (ver seção 3.6 e 3.7).

### 3.7 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Deve ser previsto que a temperatura de serviço do acumulador mudará consideravelmente durante o ciclo e essa variação deve ser levada em consideração quando o volume é calculado.

Se um acumulador é dimensionado para a temperatura máxima, a pressão de pré-carga se referirá a essa temperatura. Quando a temperatura cai, haverá uma diminuição da pressão de pré-carga de acordo com a **lei de Gay Lussac** sobre a relação entre pressões e volumes. Portanto, a capacidade do acumulador será menor.

Assim, será necessário ter um  $V_0$  maior para acumular ou fornecer a mesma quantidade de líquido  $\Delta V$  (ver seção 3.5).

A relação entre os volumes e as temperaturas é:

$$V_{0T} = V_0 \cdot T_2 / T_1$$

Sendo:

$T_2 = \Theta_2(^{\circ}\text{C}) + 273 =$  temperatura máxima de funcionamento ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$T_1 = \Theta_1(^{\circ}\text{C}) + 273 =$  temperatura mínima de funcionamento ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$V_0 =$  Volume calculado sem levar em consideração a variação térmica (litros).

$V_{0T} =$  Volume aumentado pela variação térmica (litros).

**Exemplo:**

Deseja-se calcular o volume do acumulador com os seguintes dados:

Volume armazenado:  $\Delta V = 1,7$  litros em 2 segundos.

Pressão mínima:  $P_1 = 50$  bar.

Pressão máxima:  $P_2 = 115$  bar.

Temperatura de trabalho:  $+25^\circ\text{C}$  a  $+70^\circ\text{C}$ .

A pressão de pré-carga referente à temperatura máxima é:  $P_0 = 0,9 \cdot P_1 = 45$  bar.

O volume, calculado em condições adiabáticas, será:

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{1/n} - \left(\frac{P_0}{P_2}\right)^{1/n}} = \frac{1,7}{\left(\frac{46}{51}\right)^{0,7143} - \left(\frac{46}{116}\right)^{0,7143}} = 4,12 \text{ litros}$$

Levando em consideração a temperatura, tem-se:

$$V_{0T} = V_0 \cdot T_2/T_1 = 4,12 \cdot (343 / 298) = 4,74 \text{ litros.}$$

A pressão de pré-carga a  $20^\circ\text{C}$  será:

$$P_{0(20^\circ\text{C})} = 46 \cdot (293 / 343) = 39,3 \text{ bar abs.} = 38,3 \text{ bar rel.}$$

O acumulador é do tipo **HBA\*5**.

**3.8 – COEFICIENTE DE CORREÇÃO PARA ALTAS PRESSÕES**

As fórmulas apresentadas são válidas para gás ideal, mas o nitrogênio industrial utilizado em acumuladores não se comporta segundo as leis para gás ideal quando a pressão aumenta. É conveniente levar em consideração essa característica para a pressão  $P_2 > 200$  bar, tanto para a transformação isotérmica quanto para a transformação adiabática.

O valor de  $V_0$  se torna:

$$V_{or} = V_0/C_i \text{ (isotérmica).}$$

$$V_{or} = V_0/C_a \text{ (adiabática).}$$

O rendimento do volume  $\Delta V$  se torna:

$$\Delta V_r = \Delta V \cdot C_i \text{ (isotérmica).}$$

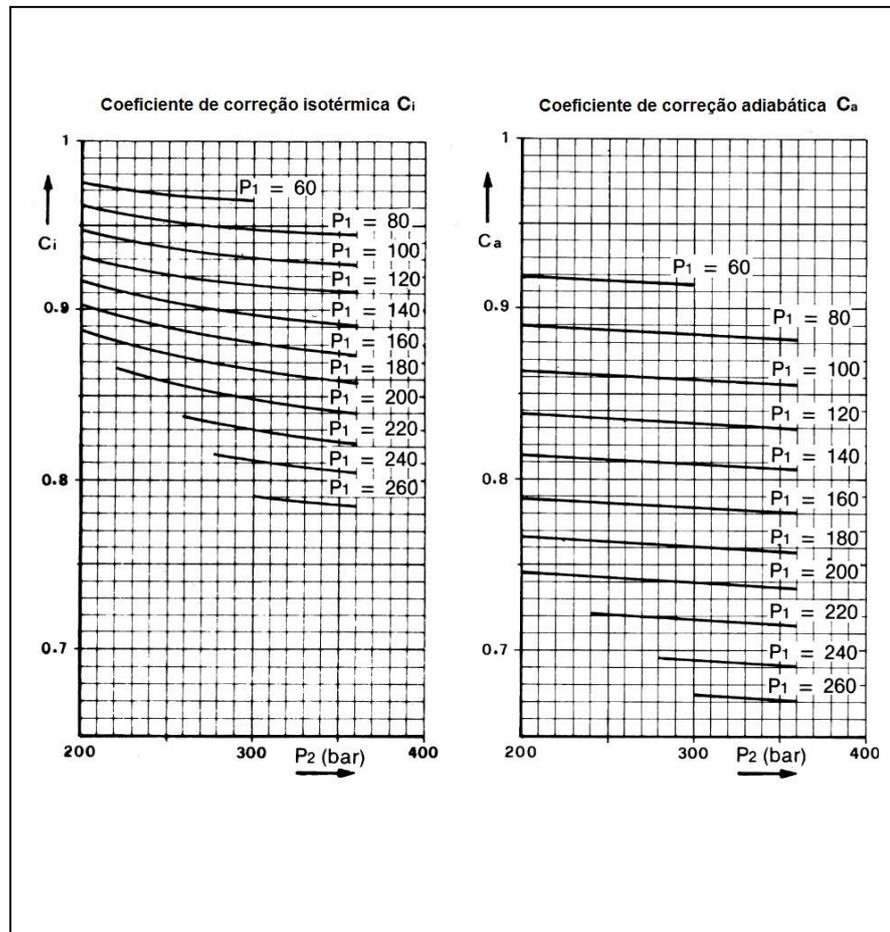
$$\Delta V_r = \Delta V \cdot C_a \text{ (adiabática).}$$

Sendo:

$V_{or}$  = Volume real do acumulador a ser utilizado para as pressões de serviço  $P_1$  e  $P_2$ .

$\Delta V_r$  = Rendimento real obtido pelo acumulador para as mesmas pressões.

$C_i, C_a$  = Coeficientes a serem obtidos pelos diagramas ao lado.



### 3.9 – RESERVA DE ENERGIA PARA EMERGÊNCIA

Típico caso no qual o armazenamento é lento (isotérmico) e a descarga é rápida (adiabática).

O volume será dado por:

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\left(\frac{P_0}{P_2}\right)^{1/n_c} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/n} - 1 \right\}}$$

E o volume armazenado por:

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{P_0}{P_2}\right)^{1/n_c} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/n} - 1 \right\}$$

Sendo:

$n = 1,4$  coeficiente adiabático (fase de descarga rápida).

$n_c = 1$  a  $1,4$  coeficiente politrópico (fase de armazenamento lento).

O valor varia em função do tempo e é obtido do diagrama anterior.

Na maioria dos casos é possível supor  $n_c = 1$  para simplificar os cálculos sem afetar o resultado:

$$V_0 = \frac{\Delta V \frac{P_2}{P_0}}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{0,7143} - 1}; \Delta V = \frac{V_0 P_0 \left(\frac{P_2}{P_0}\right)^{0,7143} - 1}{P_2}$$

#### Exemplo:

Um acumulador deve descarregar 4,6 litros de óleo em 3 segundos passando de uma pressão  $P_2 = 280$  bar a  $P_1 = 220$  bar. O tempo de descarga é de 4 minutos. Definir sua capacidade levando em consideração que a temperatura variará de 20°C para 50°C.

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\left(\frac{P_0}{P_2}\right)^{1/1,1} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/1,4} - 1 \right\}} = \frac{4,6}{\left(\frac{199}{281}\right)^{0,9091} \left\{ \left(\frac{281}{221}\right)^{0,7143} - 1 \right\}} = 33,63 \text{ litros}$$

$P_1 = 221$  bar abs.       $P_2 = 281$  bar abs.       $P_0 = 0,9 \times 220 = 198 = 199$  bar abs.       $n_c = 1,1$  (pelo diagrama anterior).

$T_1 = (273 + 20) = 293^\circ\text{K}$ .       $T_2 = (273 + 50) = 323^\circ\text{K}$ .

Levando em consideração o coeficiente de correção para altas pressões e a variação da temperatura, tem-se:

$$V_{oT} = (V_0 / C_m) \times (T_2 / T_1) = (33,63 / 0,777) \times (323 / 293) = 47,7 \text{ litros}$$

Sendo:

$C_a = 0,72$ .       $C_i = 0,834$ .       $C_m = (C_a + C_i) / 2 = 0,777$ .

A pressão de pré-carga a 20°C será:

$$P_{0(20^\circ\text{C})} = 199 \times (293 / 323) = 180,5 \text{ bar} = 179,5 \text{ bar rel.}$$

O acumulador é do tipo **HBA\*50**.

### 3.10 – COMPENSADOR DE PULSAÇÕES Q

Caso típico de cálculo em transformação adiabática devido à alta velocidade de carga e descarga. A quantidade de líquido  $\Delta V$  a ser levada em consideração no cálculo depende do tipo e da capacidade da bomba:

$$\Delta V = K \cdot q$$

O volume se torna:

$$V_0 = \frac{K \cdot q}{\left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{0,7143} - \left(\frac{P_0}{P_2}\right)^{0,7143}}$$

Sendo:

$q$  = Capacidade da bomba (litros)

=  $A \times C$  (superfície do pistão x curso do pistão)

=  $Q / n = \frac{\text{Vazão da bomba (litros / min)}}{\text{cursos / min}}$

$P$  = Pressão média da bomba.

$P_1 = P - X$  (bar).

$P_2 = P + X$  (bar).

$X = \alpha \cdot P / 100$  (bar) variação da pressão média.

$\alpha$  = Pulsação residual  $\pm$  (%).

$K$  = Coeficiente levando em consideração o número de pistões e se a bomba é de simples ou duplo efeito.

Tipo de bomba	K
1 pistão, simples efeito	0,69
1 pistão, duplo efeito	0,29
2 pistões, simples efeito	0,29
2 pistões, duplo efeito	0,17
3 pistões, simples efeito	0,12
3 pistões, duplo efeito	0,07
4 pistões, simples efeito	0,13
4 pistões, duplo efeito	0,07
5 pistões, simples efeito	0,07
5 pistões, duplo efeito	0,023
6 pistões, duplo efeito	0,07
7 pistões, duplo efeito	0,023

#### Exemplo:

Uma bomba de 3 pistões, simples efeito, tem uma vazão  $Q = 8\text{m}^3/\text{h}$  e pressão de trabalho de 20 bares. Calcular o volume necessário para limitar a pulsação residual para  $\alpha = \pm 2,5\%$ . Rotação da bomba: 148 RPM e temperatura de serviço  $40^\circ\text{C}$ .

$P = 20$  bar.

$q = 8000 / (60 \times 148 \times 3) = 0,3$  litros.

$P_2 = (20 - 0,5) = 19,5$  bar.

$P_2 = (20 + 0,5) = 20,5$  bar.

$P_0 = (0,7 \cdot 20) = 14$  bar.

$K = 0,12$ .

$X = 2,5 \times 20 / 100 = 0,5$  bar.

$$V_0 = \frac{0,12 \cdot 0,3}{\left(\frac{15}{20,5}\right)^{0,7143} - \left(\frac{15}{21,5}\right)^{0,7143}}$$

$V_0 = 1,345$  litros

$P_{0(20^\circ\text{C})} = 15 \times (293 / 313) = 14$  bar abs. = 13 bar rel.

O acumulador mais adequado é o tipo **HBA\*1,5**.

### 3.11 – Receptor de golpes de aríete

Define-se comumente golpe de aríete o fenômeno de subida rápida da pressão devido à aceleração ou desaceleração elevada do fluxo. A sobrepressão,  $\Delta P_{\text{máx}}$ , que se origina na instalação quando uma válvula é fechada, é influenciada pelo comprimento da instalação, pela vazão, pela densidade do líquido e pelo tempo de fechamento da válvula.

O valor será dado por:

$$\Delta P_{\text{máx}} \text{ (bar)} = 2 \cdot y \cdot L \cdot v / (t \times 10^5)$$

O volume do acumulador necessário para reduzir a pressão de choque dentro de limites pré-estabelecidos se calcula com:

$$V_0 = \frac{\frac{Q}{7,2} \left( \frac{2 y L v}{\Delta P_0 \times 10^5} - t \right)}{\left( \frac{P_0}{P_1} \right)^{0,7143} - \left( \frac{P_0}{P_2} \right)^{0,7143}}$$

Sendo:

$V_0$  = Volume de nitrogênio a ser empregado no acumulador (litros).

Q = Vazão da instalação (m<sup>3</sup>/h).

L = Comprimento total da instalação (m).

y = Peso específico do líquido (kg/m<sup>3</sup>).

V = (Q / S) x (10<sup>3</sup> / 3,6) = Velocidade do fluxo (m/s).

S = ( $\pi \cdot d^2$ ) / 4 = seção interna da instalação (mm<sup>2</sup>).

d = Diâmetro interno da instalação (mm<sup>2</sup>).

$\Delta P$  = Sobrepressão admissível (bar).

$P_1$  = Pressão de trabalho em fluxo livre (bar).

$P_2 = P + \Delta P$  = Pressão máxima admissível (bar abs.).

t = Tempo de desaceleração (s) (fechamento da válvula, etc.).

#### Exemplo:

Um conduto de água (y = 1000 kg/m<sup>3</sup>) com diâmetro interno d = 80 mm, comprimento L = 450 m, vazão Q = 17 m<sup>3</sup>/h, pressão de trabalho  $P_1 = 5$  bar, sobrepressão admissível  $\Delta P = 2$  bar e tempo de fechamento da válvula 0,8 s.

$$\Delta P_{\text{máx}} \text{ (bar)} = \frac{2 \times 1000 \times 450 \times 0,94}{0,8 \times 10^5} = 10,57 \text{ bar}$$

O volume do acumulador necessário para reduzir  $\Delta P_{\text{máx}}$  para 2 bar é:

$$V_0 = \frac{\frac{17}{7,2} \left( \frac{2 \times 1000 \times 450 \times 0,94}{2 \times 10^5} - 0,8 \right)}{\left( \frac{5,5}{6} \right)^{0,7143} - \left( \frac{5,5}{8} \right)^{0,7143}} = 46,4 \text{ litros}$$

Sendo:

S = ( $\pi \times 80^2$ ) / 4 = 5026,5 mm<sup>2</sup>.

V = (17 x 10<sup>3</sup>) / (5026,5 x 3,6) = 0,94 m/s

$P_0 = 5 \times 0,9 = 4,5 = 5,5$  bar abs.

$P_1 = 6$  bar abs.

$P_2 = 5 + 2 = 7$  bar = 8 bar abs.

Um acumulador de 50 litros será do tipo **HBA\*50**.

### 3.12 – ACUMULADORES + DEPÓSITOS ADICIONAIS (TRANSFERÊNCIA)

Em todos os casos nos quais se queira conseguir uma considerável quantidade de líquido com uma pequena diferença entre  $P_1$  e  $P_2$ , o volume  $V_0$  resultante é bem maior em relação ao  $\Delta V$ . Nesses casos, pode ser conveniente alcançar o volume de nitrogênio requerido usando depósitos adicionais. O cálculo do volume se realiza em função do uso, tanto na transformação isotérmica quanto na transformação adiabática, com as fórmulas anteriormente expostas, sempre levando em consideração a temperatura. Para se conseguir o rendimento máximo, é conveniente fixar para a pré-carga um valor muito alto. No caso de **reserva de energia, compensador de volume, receptor de golpes de ariete**, etc. se pode adaptar:

$$P_0 = 0,97 \cdot P_1$$

Uma vez calculado o volume de gás necessário, é necessário reparti-lo entre a parte mínima indispensável  $V_A$ , que estará contido no acumulador, e o restante  $V_B$  que representa o volume dos depósitos adicionais.

$$V_{oT} = V_{oA} + V_{oB}$$

Sendo:

$$V_{oA} \geq (\Delta V + (V_{oT} - V_0)) / 0,75$$

Isso significa que a soma do volume de líquido requerido mais a variação do volume causada pela temperatura deve ser **inferior a 3/4 da capacidade do acumulador**. O volume dos depósitos resulta da diferença:

$$V_{oB} = V_{oT} - V_{oA}$$

#### Exemplo:

Um  $\Delta V = 30$  litros deve ser conseguido em 2 segundos, passando de uma pressão  $P_2 = 180$  bar para uma  $P_1 = 160$  bar. As temperaturas  $\Theta_1 = 20^\circ\text{C}$ ;  $\Theta_2 = 45^\circ\text{C}$ .

$$P_{0(50^\circ\text{C})} = 0,97 \times 160 = 155 \text{ bar.}$$

$$V_0 = \frac{\Delta V}{\left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{0,7143} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{0,7143}} = \frac{30}{\left(\frac{156}{161}\right)^{0,7143} - \left(\frac{156}{181}\right)^{0,7143}} = 382,4 \text{ litros}$$

$$V_{oT} = 382,4 \times (318 / 293) = 415 \text{ litros.}$$

$$V_{oA} = 30 + \frac{(415 - 382,4)}{0,75} = 83,5 \text{ litros}$$

Dois acumuladores **HBA\*50** se adaptam com  $V_{o\text{total}} = 100$  litros, **mais 6 depósitos adicionais de 50 litros**.

### 3.13 – VAZÃO

Depois de definir o tamanho do acumulador como indicado anteriormente, é necessário verificar se a vazão requerida (L/min) é compatível com a vazão admissível do acumulador esvaziado, segundo a tabela ao lado.

A velocidade máxima se consegue com o acumulador instalado na posição vertical com a válvula de gás no alto. Mesmo assim, é indispensável que no acumulador tenha um volume residual  $\geq 0,1 \times V_0$ .

Volume	Vazão média (L/min)	Vazão média admissível (L/min)
1 a 1,5 (litros)	150	300
3 a 5 (litros)	300	500
10 a 50 (litros)	500	1000

### 3.14 – MATERIAL DA BEXIGA

O elastômero base com o qual se fabrica a bexiga dependerá do fluido usado e da temperatura de trabalho (e às vezes do armazenamento). Na tabela ao lado se identifica com uma letra, a mesma que referencia o produto, cada material das bexigas, das vedações e das peças vulcanizadas. Para fluidos particulares é aconselhável recorrer ao nosso departamento técnico.

Código	Tipo	Sigla ISO	Alcance de temperatura (°C)	Alguns líquidos compatíveis com o elastômero
P	Nitrílica (standard)	NBR	-10 a +90	Óleo mineral, vegetal, lubrificante, silicones, água industrial, glicol, líquidos não inflamáveis, (HFA – HFB – HFC), hidrocarbonetos alifáticos, butano, gás/óleo, querosene, óleo combustível, gasolina ligeiramente aromática de grau normal ou premium, etc.
K	Nitrílica hidrogenada	HNBR	-30 a +130	Os mesmos da nitrílica standard, mas com excelente performance em ambas altas e baixas temperaturas.
N	Neoprene	CR	-20 a +110	Freon (12-21-22-113-114-115), água e soluções aquosas, amoníaco, dióxido de carbono, óleo mineral parafínico, silicones.
V	Viton	FKM	-10 a +150	Óleos de alta temperatura, solventes aromáticos e serviço químico. Baixíssimo valor de formação permanente à compressão.
E	EPDM	EPDM	-20 a +90	Líquidos de freios, água quente, líquidos limpadores, água glicol (HFC), detergentes, muitos ácidos e bases, soluções salinas, skydrol 500.

### 3.15 – DURAÇÃO DA BEXIGA

Para realizar uma escolha completa, não se pode deixar de analisar as condições de trabalho do equipamento, uma vez que elas influem sensivelmente na duração da bexiga. Supondo que o fluido esteja limpo e que é compatível com o material da bexiga, a vida útil dela depende de vários fatores, tais como:

**O valor de pré-carga  $P_0$ :** na maior parte dos casos são válidos os valores recomendados na seção 3.2, ainda que, com o aumento de pressão e, sobretudo, da velocidade de aumento do rendimento necessária, há o perigo de a bexiga ser pressionada contra a válvula fungiforme a cada ciclo. Nesse caso, é possível utilizar  $P_0 = 0,8 \div 0,7 P_1$ .

**A relação  $P_2 / P_0$ :** qualquer aumento nesse valor aumentará a solicitação a que a bexiga é submetida a cada ciclo. Apenas em aplicações especiais é possível ultrapassar a relação  $P_2 / P_0 = 4$  (nesse caso, consultar nosso departamento técnico).

**A pressão máxima de trabalho  $P_2$ :** qualquer aumento nesse valor irá submeter à bexiga a uma maior solicitação.

**Vazão:** a vazão não tem influencia na vida útil da bexiga se não forem superados os valores médios indicados na tabela da seção 3.12. Nas proximidades dos valores máximos é necessário atuar de forma que, tanto na fase de esvaziamento como de carregamento, deixe-se no acumulador uma reserva maior ou igual a 10% do volume útil  $V_0$ .

**A frequência:** ou número de ciclos por dia.

**Instalação:** é aconselhável a posição vertical com a válvula de gás no alto. Em posição horizontal ou oblíqua a bexiga tende a se apoiar e se arrastar sobre o corpo do acumulador, podendo causar desgaste prematuro.

**A temperatura de serviço:** é um dos fatores que mais influenciam na duração da bexiga. Com uma temperatura muito baixa, a bexiga tenderá a ser frágil; com o aumento da temperatura até se equilibrar ou superar o limite do próprio elastômero, a tensão a que é submetida a bexiga aumenta de forma exponencial, induzindo a uma ruptura em pouco tempo. Deve-se levar em consideração que a temperatura do acumulador é, em muitos casos, superior à temperatura na instalação e cresce com o aumento de  $P_2$ , de  $P_2 / P_1$  e do volume (pode-se dizer que com o aumento do tamanho do acumulador a capacidade de dissipação de calor diminui). Todos os modelos de bexiga HT, na sua versão borracha nitrílica são submetidos a seguinte prova de fadiga:  $P_0 = 65$  bar;  $P_1 = 90$  bar;  $P_2 = 200$  bar; frequência = 10 ciclos/min; temperatura do óleo 45°C, duração da bexiga superior a 1.000.000 ciclos.

### 3.16 – MATERIAL DO CORPO E DA VÁLVULA

Na Versão standard o corpo é de aço carbono protegido externamente com pintura antióxido; a válvula é de aço carbono bicromatizado. Isso é válido para óleo e líquidos não corrosivos e vem codificado com a letra C. Na presença de fluidos corrosivos, o corpo do acumulador e a válvula deverão estar recobertos com níquel químico com uma espessura mínima de 25 microns. A letra de designação é N (para outras espessuras, indicar o valor). Para líquidos agressivos, é prevista fabricação em aço inox (indicar X).

- 1 – A HT se reserva a direito de alterar as informações contidas neste catálogo sem aviso prévio.  
2 – Reprodução proibida.

