Instrumentação Industrial: As Válvulas de Controlo, um Importante "*Instrumento*"

3.ª Parte

Miguel Beco
Eng.º Electrotécnico, Ramo de Automação, Controlo e Instrumentação - FEUP

com o patrocínio da www.booki.pt

CAVITAÇÃO - LÍQUIDOS

A cavitação é um fenómeno indesejável que ocorre nas válvulas de controlo na presença de líquidos, em que devido à aceleração rápida do fluido na zona de secção contraída há uma grande baixa de pressão.

Quando a pressão estática na zona de secção contraída alcança a tensão de vaporização do líquido (ocorre a ebulição do líquido), poderá originar um desprendimento violento de **bolhas de vapor**.

As bolhas assim formadas, ao seguirem as linhas de corrente, entram a seguir em regiões onde a pressão volta a aumentar e colapsam, originando picos de pressão elevados dando origem a **ondas de choque**. Se estas ondas se formarem junto às paredes das válvulas estas vão sendo picadas, o que originará a erosão das superfícies, e mesmo, a furos.

Se o líquido tiver partículas em suspensão, dá-se também a projeção destas sobre as paredes da válvula. Poderão existir também ruídos e vibrações excessivas suficientemente grandes para destruir, em pouco tempo, a válvula.

A cavitação pode ser eliminada se não deixar que a pressão do líquido desça abaixo da tensão de vaporização. Em alternativa é possível atenuar a cavitação, não permitindo que a pressão do fluido desça substancialmente, nomeadamente:

- Pela modificação do circuito hidráulico para que a válvula não seja instalada numa zona em que a pressão possa ser muito baixa;
- Colocando a jusante da válvula uma placa perfurada que introduza uma perda de carga;
- Utilizando válvulas multi-queda de pressão ou com vários orifícios;
- Selecionando o tipo e material do corpo da válvula, de forma a resistir à erosão, em particular, em condições extremas de pressão diferencial e de temperatura.

As cavidades que nascem dentro do líquido e que colapsam subitamente limitam a capacidade da válvula a partir de um determinado **caudal crítico**.

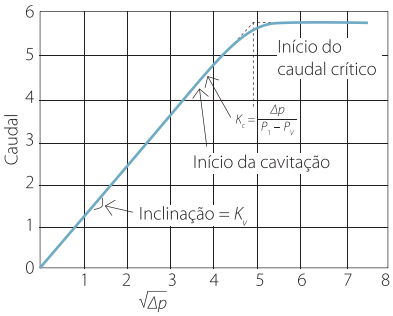

Figura 7. Curva de ensaio caudal – $\sqrt{\Delta p}$ para a água.

Nos ensaios realizados com a água determinou-se que a curva que relaciona o caudal Q com a $\sqrt{\Delta p}$, sendo Δp a perda de carga através da válvula. Esta curva está representada na Figura 7 podendo observar-se que a sua inclinação inicial é constante uma vez que corresponde à fórmula.

$$K_v = Q \times \sqrt{\frac{\rho}{\Delta_p}}, \text{ como } \rho = 1, K_v = \frac{Q}{\sqrt{\Delta_p}}$$

Ao aumentar gradualmente a perda de carga com uma pressão de entrada constante, a curva começa a desviar-se a partir de um ponto que revela o início da cavitação e que está definida pelo coeficiente K_c (**índice de cavitação**).

em que:

$$K_c = \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_v} = \frac{\Delta p}{p_1 - p_v}$$

p_1 = pressão na entrada da válvula
p_2 = pressão na saída da válvula
p_v = pressão de vapor do líquido na entrada (igual à pressão na secção contraída)
Δp = perda de carga através da válvula

Existe um coeficiente F_L (igual a C_f) denominado de **recuperação de pressão**, que depende da forma geométrica da válvula e que é igual a:

$$F_L = \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_{vc}}$$

sendo p_{vc} = pressão na secção contraída. Note-se que quanto maior for o valor do coeficiente, tanto menor será o risco de cavitação.

Uma válvula não deverá ser dimensionada pelo diâmetro da tubagem onde vai ser inserida. Quase sempre a válvula corretamente dimensionada para um local é de diâmetro nominal inferior ao diâmetro nominal da tubagem, pelo que há necessidade de construir e instalar segmentos de cone de adaptação.

Assim, se a válvula de controlo tem um diâmetro mais pequeno do que a tubagem, é necessário ter em conta o efeito de **cones redutores** que conectam a tubagem à válvula de controlo. Dando lugar a uma perda de carga adicional que proporciona um menor caudal com o mesmo K_v (ou C_v). Por este motivo aplica-se um coeficiente de correção F_p:

em que:

d = diâmetro da tubagem
D = diâmetro da válvula

Aumentando a perda de carga, a curva transforma-se numa reta horizontal indicando que se chegou à condição de caudal crítico (**chocked flow**), isto é, que uma diminuição da pressão posterior não aumenta o caudal.

Assim, a fórmula de K_v passa a ser:

$$K_v = \frac{Q}{F_p} \times \sqrt{\frac{\rho}{\Delta_p}}$$

Continuação da edição anterior.

O ponto de intersecção da reta com inclinação K_v e a reta horizontal obtém-se o valor C^2_f (ou F^2_L).

Logo:

$$C^2_f = \frac{\Delta p_s}{P_1 - P_{vc}}$$

com:
C_f = fator de caudal crítico
F_L = coeficiente de recuperação de pressão
Δp_s = perda de carga através da válvula necessária para obter o caudal crítico
P_{vc} = pressão na secção contraída

Assim, a condição de **caudal crítico** obtém-se quando,

$$\Delta p \geq C^2_f \times (P_1 - P_{vc})$$

com:
C_f = fator de caudal crítico
P_1 = pressão na entrada da válvula
P_{vc} = pressão na secção contraída

Isto é, o caudal crítico alcança-se pela relação entre as pressões anterior e posterior, respetivamente. Assim a perda de carga deve limitar-se, para que não existam condições de caudal crítico e evitar também o fenómeno de *cavitação*, aos valores calculados pela seguinte fórmula:

$$\Delta p \leq K_c \times (P_1 - P_v)$$

em que :
Δp = perda de carga
P_1 = pressão de entrada na válvula
P_v = pressão de vapor do líquido na entrada (igual também à pressão na secção contraída)

Experimentalmente, encontrou-se nos ensaios efetuados no ar e na água que C_f mantém-se em valores coincidentes, tanto para líquidos em condições de vaporização ou de cavitação, como em gases com caudais críticos.

Na Tabela 2 podem observar-se valores representativos para diferentes tipos de válvulas, no entanto é necessário assinalar que são valores apenas de referência e que diante um caso prático é conveniente consultar as tabelas publicadas pelos fabricantes.

Tabela 2. Fatores de caudal de válvulas de controlo.

Tipo de válvula	$C_f(F_L)$	F_s	K_c (Índice de cavitação)	Cones redutores			
				$d/D = 1,5$		$d/D = 2$	
				F_P	F_{LP}	F_P	F_{LP}
Globo, sede simples	0,9 0,85	1,05 1,09	0,65 0,58	0,96 0,96	0,85 0,80	0,94 0,94	0,85 0,80
Globo, sede dupla	0,9 0,98	0,85 0,84	0,7 0,8	0,96 0,96	0,85 0,89	0,94 0,94	0,76 0,89
Corpo partido	0,75 0,8		0,46 0,51	0,96 0,96	0,72 0,77	0,94 0,94	0,72 0,76
Ângulo	0,9 0,8	1,08 1,12	0,65 0,52	0,96 0,96	0,84 0,78	0,94 0,94	0,84 0,77
Borboleta Esfera	0,65 0,6	0,92 1,25	0,32 0,24	0,81 0,87	0,60 0,55	0,72 0,80	0,59 0,54

Fonte: Masoneilan

Assim, dos estudos anteriores deduz-se um método mais preciso do que o convencional para calcular as válvulas de controlo em condições próximas das críticas sem deixar de observar que depois é necessário escolher o tamanho da válvula entre os vários C_v ou K_v das válvulas comerciais, com a possibilidade de obter o mesmo tamanho aplicando qualquer um dos métodos.

A dedução desta fórmula nos líquidos é:

1. Condições subcríticas quando $\Delta_p < C^2_f \times (P_1 - P_{ve})$ sendo válidas as fórmulas convencionais
2. Condições críticas se $\Delta_p \geq C^2_f \times (P_1 - P_{ve})$ com *cavitação* ou *vaporização*

   Neste caso, $K_v = \frac{Q}{C_f} \times \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P_{vc}}}$

   E, $\Delta P_{vc} = P_1 - \left(0,96 - 0,28\sqrt{\frac{P_1}{P_{vc}}}\right) \times P_v$

   Se o caudal é crítico, o conjunto válvula e *cones redutores* têm um coeficiente F_{LP} que se encontra na Tabela 2.

   O seu valor também pode ser calculado pela Fórmula:

$$F_{LP} = \left(\frac{1}{C^2_f} - \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \times \left(\frac{K_v}{0,056 \times d^2}\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}}$$

Assim a Fórmula de K_v passa a ser:

$$K_v = \frac{Q \times F_{LP}}{C_f} \times \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P_{vc}}}$$

VAPORIZAÇÃO (*FLASHING*) – LÍQUIDOS

O fluido de acordo com a sua pressão e a sua temperatura está no estado líquido ou no estado de vapor. Para temperaturas inferiores ao ponto de ebulição é líquido e para temperaturas superiores é vapor. Por outro lado, o ponto de ebulição é em função da pressão; quanto mais alta, tanto maior é a temperatura do ponto de ebulição.

Em algumas aplicações de válvulas de controlo, o fluido antes da válvula está em estado líquido e depois em estado de vapor. É evidente que nestas circunstâncias verificou-se uma vaporização parcial ou completa numa parte da válvula devido à sua estrangulação, ao existir na saída uma pressão inferior ou igual à pressão de vapor do líquido.

Assim, o *flashing* é um fenómeno devido à vaporização do líquido por efeito de baixa pressão, diferindo da cavitação por não haver em seguida um aumento suficiente da pressão. Na Figura 8 representa-se a perda de carga no circuito hidráulico próximo da válvula para os casos em que não há nem cavitação nem *flashing*, para o caso em que há cavitação e para o caso em que há *flashing*.

É difícil precisar se deste ponto de vista o fluido deve ser considerado como líquido ou como vapor e, portanto, não se podem aplicar as fórmulas convencionais anteriores.

Em água quente, com uma temperatura próxima da saturação e tendo em conta as considerações termodinâmicas, a saída da válvula é uma mistura de água e vapor. Para a determinação do coeficiente da válvula calcula-se empiricamente a

perda de carga admissível e compara-se com a real, utilizando no cálculo a mais pequena das duas.
As fórmulas empíricas de perda de carga são as seguintes:

1. Se a temperatura de entrada é inferior a menos de 2,8º C à temperatura de saturação da água, isto é, se $\Delta T < 2{,}8^{o}$ C, a perda de carga admissível é:

$$\Delta_p = 0{,}06 \times P_1$$

2. Quando a temperatura de entrada é inferior a mais de 2,8º C à temperatura de saturação da água, isto é, se $\Delta T > 2{,}8^{o}$ C, a perda de carga admissível é:

$$\Delta_p = 0{,}9 \times (P_s - P_1)$$

Nestas fórmulas:
ΔT = diferença entre a temperatura de saturação correspondente à pressão de entrada P_1 e à temperatura de entrada (º C)
P_1 = pressão de entrada (bar absolutos)
P_s = pressão de saturação correspondente à temperatura de entrada (bar absolutos)

A vaporização de outros líquidos diferentes da água é difícil de avaliar e não existe uma fórmula totalmente exata. Só existem métodos empíricos que constituem uma aproximação da solução do problema.

O fenómeno de vaporização dá lugar à passagem, a grande velocidade, através da válvula de uma mistura de líquido – vapor, em que o choque das bolhas do líquido sobre o material das paredes da válvula e da tubagem provocam uma erosão na superfície, dando um aspeto embaciado e liso, e provocando vibrações. Embora as consequências não sejam tão graves como as da cavitação.

Quanto à redução do *flashing* faz-se com técnicas semelhantes às utilizadas para a cavitação.

GASES

Os gases são fluidos no estado de sobreaquecimento em que se pode aplicar as leis dos gases perfeitos (ar, oxigénio, nitrogénio, árgon, hélio, e outros).

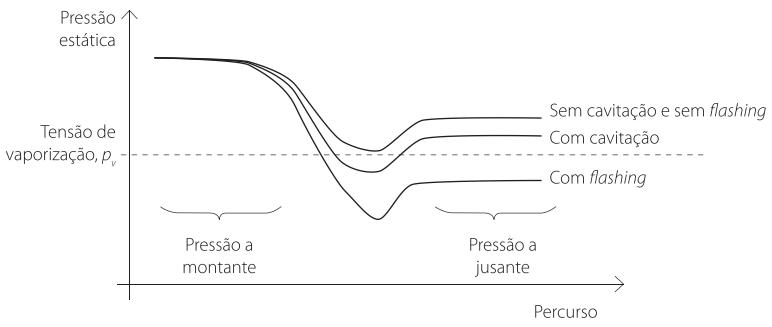

Figura 8. Pressão estática em válvulas com cavitação e *flashing*.

A fórmula geral que podemos aplicar nos gases quando a pressão de entrada é muito próxima da pressão de saída, isto porque nestas condições o caudal Q_s e a densidade ρ_s não variam apreciavelmente, é:

$$K_v = Q_s \times \sqrt{\frac{\rho_s}{\Delta_p}}$$

em que,
Q_s = caudal (m^3/h)
ρ_s = densidade (Kg/dm^3)
Δp = perda de carga para o caudal máximo de passagem do fluido através da válvula (bar)

No entanto os gases são fluidos compressíveis que podem chegar a alcançar uma velocidade de saturação igual ou próxima à do som quando passam através da restrição da válvula. A velocidade do gás aumenta à medida que cresce a perda de carga e a saturação que existe quando a pressão posterior P_2 baixa aproximadamente 50% ou menos da pressão absoluta anterior P_1, isto é, quando a perda de carga Δp é igual ou maior do que $\frac{P_1}{2}$.

Na Figura 9 representa-se um estrangulamento numa válvula, em que o fluido se move à velocidade do som na restrição e as ondas sónicas que existem no gás não podem deslocar-se a uma maior velocidade. Portanto, ainda que a pressão de saída P_2 seja menor do que P_0, não é possível passar maior quantidade de caudal de gás.

Assim, em condições de velocidade de saturação do gás, uma diminuição da pressão posterior e, portanto uma maior perda de carga, não aumenta apreciavelmente o caudal. Diz-se que a válvula trabalha em condições de **queda de pressão crítica** ou de **velocidade crítica** ou de **caudal crítico**.

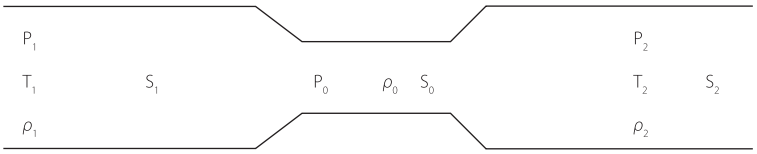

Figura 9. Tubagem com estrangulamento.

Nestes casos a fórmula resultante que se obtém é:

$$K_v = \frac{Q_n}{328} \times \sqrt{\frac{G \times T_s}{\Delta p \times (P_1 + P_2)}} = \frac{Q_n \times \sqrt{G \times T_s}}{284 \times P_1}$$

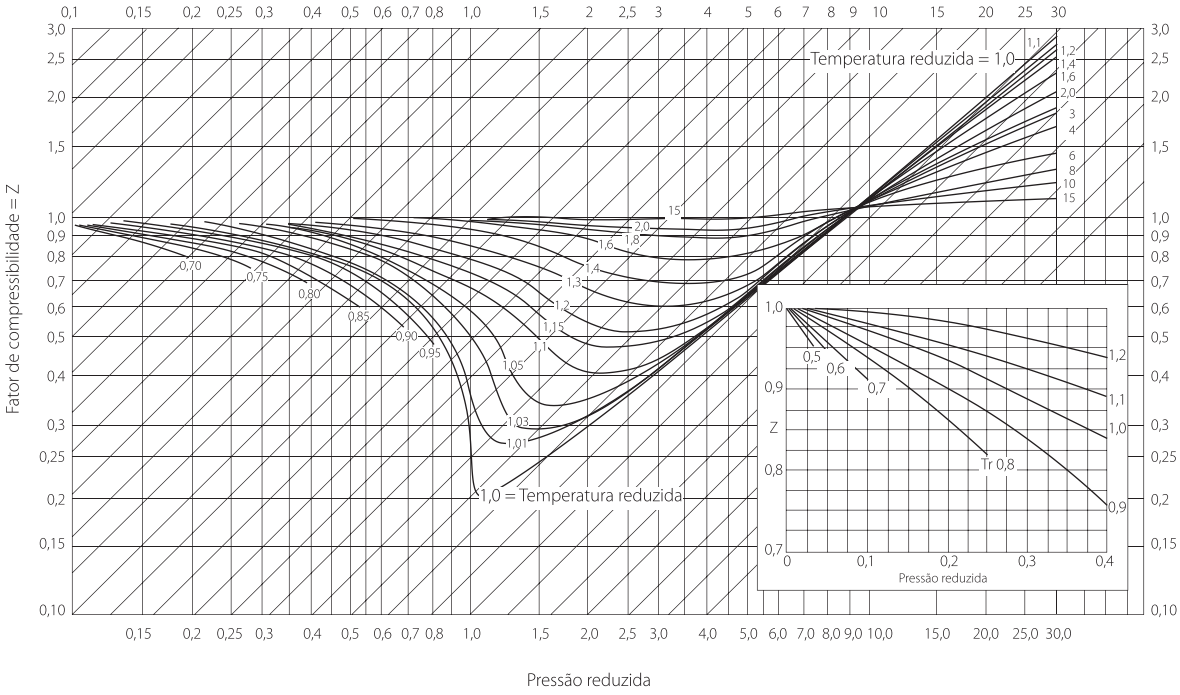

Figura 10. Fator de compressibilidade Z.

em que:

Q_n = caudal em m³/h referido a 1 atmosfera e 15º C

G = peso específico relativo (relativamente ao ar $G = 1$)

Δ_p = perda de carga (bar)

P_1 = pressão anterior (bar absolutos)

P_2 = pressão posterior (bar absolutos).

T_s = temperatura em graus *Kelvin* (+273º C).

As fórmulas anteriores para gases foram deduzidas aplicando as leis gerais dos gases perfeitos. Estas leis não são satisfatórias a partir de **pressões superiores a 7 bar**, por isso nestes casos é necessário aplicar um fator de correção de compressibilidade Z, de tal modo que a equação dos gases perfeitos passa a ser:

$$K_v = \frac{Q_n}{328} \times \sqrt{\frac{G \times T_s \times Z}{\Delta p \times (P_1 + P_2)}} = \frac{Q_n \times \sqrt{G \times T_s \times Z}}{284 \times P_1}$$

O fator Z representado na Figura 10 está relacionado em função da temperatura reduzida e da pressão reduzida, T_r e P_r, respetivamente, cujos valores são:

$$T_r = \frac{\textit{Temperatura de entrada absoluta}}{\textit{Temperatura crítica absoluta}}$$

$$P_r = \frac{\textit{Pressão de entrada absoluta}}{\textit{Pressão crítica absoluta}}$$

Na Tabela 3 podem ver-se as pressões e temperaturas críticas de gases típicos.

Aplicando o coeficiente de recuperação C_f para uma **determinação mais precisa do caudal** em condições próximas do caudal crítico obtém-se:

1. Condições subcríticas se $\Delta_p < 0{,}5 \times C_f^2 \times P_1$ e aplica-se as fórmulas convencionais,
2. Condições críticas se $\Delta_p \geq 0{,}5 \times C_f^2 \times P_1$ e aplica-se a fórmula,

$$K_v = \frac{Q_n \times \sqrt{G \times T_s}}{284 \times P_1 \times C_f}$$

ou considerando o fator de compressibilidade Z:

$$K_v = \frac{Q_n \times \sqrt{G \times T_s \times Z}}{284 \times P_1 \times C_f}$$

Elementos	Pressão crítica - P_c	Temperatura crítica - T_c
	bars (ABS)	ºC
Ácido acético	58,0	322
Acetona	47,6	235
Acetileno	62,9	36
Ar	37,8	-141
Amoníaco	113,0	132
Argo	48,6	-122
Benzeno	48,4	289
Butano	36,5	153
Dióxido de carbono	74,0	31
Monóxido de carbono	35,5	-139
Cloro	77,0	144
Etano	49,5	32
Álcool etílico	64,0	243
Etileno	51,2	10
Éter etílico	36,0	195
Flúor	25,3	-155
Hélio	2,29	-268
Heptano	27,2	267
Hidrogénio	13,0	240
Ácido clorídrico	82,6	51
Isobutano	37,5	134
Álcool isopropílico	53,7	235
Metano	46,4	-83
Álcool metílico	79,6	240
Nitrogénio	34,0	-147
Óxido nitroso	72,7	37
Octano	25,0	296
Oxigénio	50,4	-119
Pentano	33,5	197
Fenol	61,3	419
Fosgênio	56,7	182
Propano	42,6	97
Propileno	45,6	92
Dióxido de enxofre	78,8	157
Água	221,0	374

Tabela 3. Pressões e temperaturas críticas de gases típicos.

Continua na próxima edição.

ALPHA ENGENHARIA - Equipamentos e Soluções Industriais
Tel. 220 136 963 | Tlm: 933 694 486
info@alphaengenharia.pt | www.alphaengenharia.pt