3
Válvulas de Alívio Tipo Mola

As válvulas de alívio de pressão projetadas para fluidos incompressíveis são denominadas em inglês como *Pressure Relief Valves* – PRV, e as válvulas para fluidos compressíveis são denominadas *Pressure Safety Valves* - PSV, enquanto as utilizadas para aplicações para ambos fluidos, compressíveis e incompressíveis, recebem o nome de *Safety Relief Valves* – SRV.

Estas válvulas são dispositivos de segurança passivos, pois são baseados na ação da força exercida por uma mola contra a força exercida pela pressão do duto atuando sobre um disco. O desequilíbrio das forças produz a atuação da válvula de forma automática, não necessitando de qualquer fonte de energia externa. O desequilíbrio de forças em sentido oposto produz o fechamento da válvula depois de restabelecidas as condições normais de pressão, evitando o alívio adicional de fluido.

O American Petroleum Institute, em sua norma API 520, apresenta uma terminologia que estabelece algumas diferenças conforme a abertura da válvula.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

3.1.
Terminologias

Para entender os diferentes tipos de válvulas de alívio é necessário conhecer a terminologia utilizada. A Figura 3.1 apresenta o regime de pressões em uma válvula de alívio com sobrepressão de 10%.

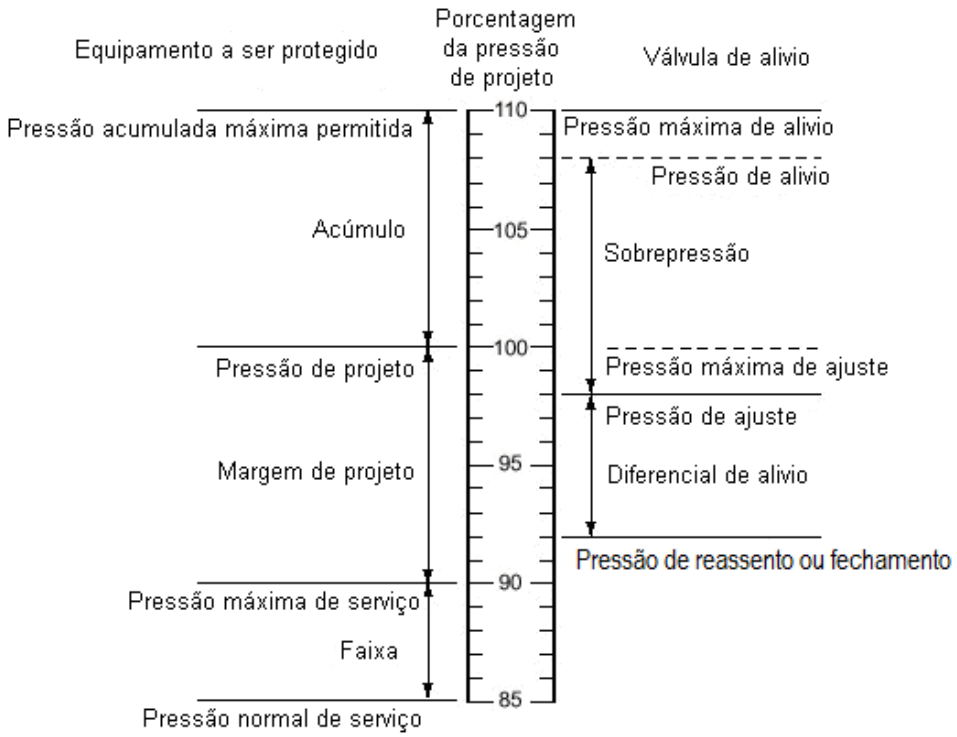

Figura 3.1 – Regime de pressões em uma válvula de alívio com sobre-pressão de 10%.

- **Pressão de projeto:** É a máxima pressão de trabalho, na temperatura considerada no projeto, utilizada no cálculo da resistência das partes sujeitas à pressão do equipamento a ser protegido. Também pode ser definida como a pressão utilizada no cálculo da espessura de um vaso de pressão ou um duto.

- **Pressão de ajuste:** É a pressão manométrica pré-determinada na qual a válvula de alívio começa a abrir.

- **Sobre-pressão:** É o incremento de pressão sobre a pressão de ajuste durante a abertura da válvula. O valor máximo de sobre-pressão corresponde a válvula completamente aberta. É expressa normalmente como uma porcentagem da pressão manométrica de ajuste.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

- **Pressão de alívio:** É a soma da pressão de ajuste com a sobrepressão.

- **Diferencial de alívio (*Blowdown*):** É a diferença entre a pressão de ajuste e a pressão na qual a válvula volta à sua posição normal de descanso. Este termo se expressa normalmente como uma porcentagem da pressão de ajuste.

- **Contrapressão:** É a pressão estática existente no bocal de saída da válvula de alívio. A contrapressão pode ser imposta pelas condições de escoamento da linha de descarga que interliga o bocal de saída ao tanque de alívio.

- **Acúmulo:** É o incremento de pressão sobre a pressão de projeto do equipamento durante a descarga através da válvula de alívio. O termo se refere ao equipamento a ser protegido e não ao dispositivo de alívio de pressão. O acúmulo máximo permitido está regulado pelas normas e códigos de projeto ou de trabalho dos equipamentos e sistemas. O acúmulo é o aumento permitido numa situação de emergência e pode variar de 10% da pressão de projeto até 25% para situações de incêndio.

- **Pressão acumulada máxima permitida:** É a soma da pressão de projeto e o acúmulo máximo permitido.

- **Vazão de alívio requerida:** É a vazão requerida na válvula de alívio nas condições de alívio para manter a pressão do equipamento protegido em nível inferior à pressão permitida ao equipamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

- **Pressão de trabalho ou serviço:** É a pressão normal de trabalho do equipamento ou sistema à temperatura de serviço.

- **Abertura:** Posição do disco com relação ao assento para uma determinada pressão de alívio.

3.2. Tipos de Válvulas de Alívio

Vários fabricantes desenvolveram diversos tipos de válvulas de alívio de pressão que utilizam mecanismos de funcionamento diferentes. O mais comum de ser encontrado em instalações industriais são as válvulas de alívio tipo mola.

A norma API 520 classifica as válvulas de alívio em três grupos conforme seja seu acionamento: Válvulas de Alívio de Mola (Figura 3.2), Válvulas de Alívio Piloto-Operada (Figura 3.3) e demais dispositivos de alívio de pressão, os quais serão descritos a seguir.

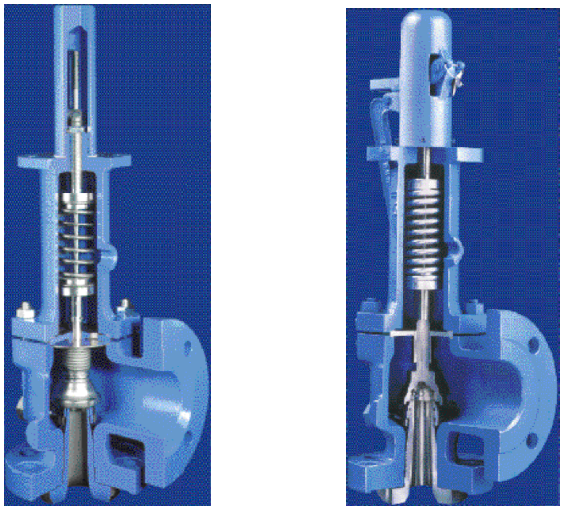

Figura 3.2 – Exemplos de válvulas de alívio de mola (Catálogo da fabricante Crosby).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

Figura 3.3 – Exemplos de válvulas de alívio piloto-operada (Catálogo da fabricante Crosby).

3.2.1.
Válvulas de Alívio Piloto-Operadas

As válvulas piloto-operadas ou de ação indireta possuem uma válvula principal que é combinada e controlada por uma pequena válvula de alívio. Estas válvulas podem ser de ação rápida ou modulante e o piloto pode ser com ou sem escoamento. Possuem alta capacidade de alívio e ocupam pouco espaço, suportam altas pressões, baixos diferencias de pressão e altas contrapressões. Porém, são pouco utilizadas e não terão seu comportamento estudado nesta dissertação. Os pilotos destas válvulas possuem tubos de monitoramento com pequenos diâmetros que podem ser obstruídos facilmente. Geralmente só são encontradas em dutos que transportam gás liquefeito de petróleo (GLP) devido à contrapressão da válvula ser alta pois a pressão de vapor do fluido é de 14,5 kgf/cm².

3.2.2.
Válvulas de Alívio de Mola ou de Ação Direta

As válvulas de alívio convencionais ou de ação direta estão disponíveis com ou sem fole, tendo em comum que a resistência à abertura é gerada por uma ação mecânica direta de uma mola. Estas são carregadas axialmente e ao atingir uma pressão pré-definida de ajuste se abrem automaticamente devido à ação do escoamento que exerce pressão sobre o disco de fechamento da válvula. A Figura 3.4 e a Figura 3.5 mostram os desenhos esquemáticos das válvulas sem e com fole respectivamente, descrevendo seus componentes.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

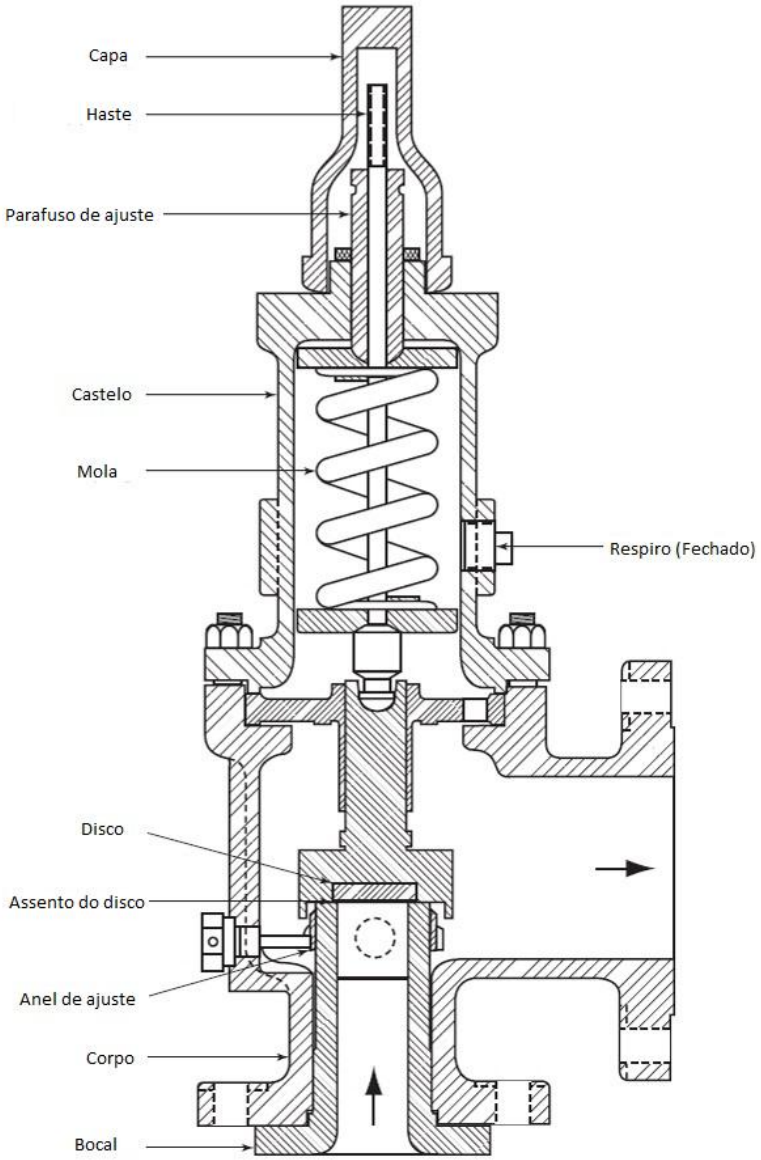

Figura 3.4 – Desenho esquemático da válvula de alívio de mola sem fole (API 520).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

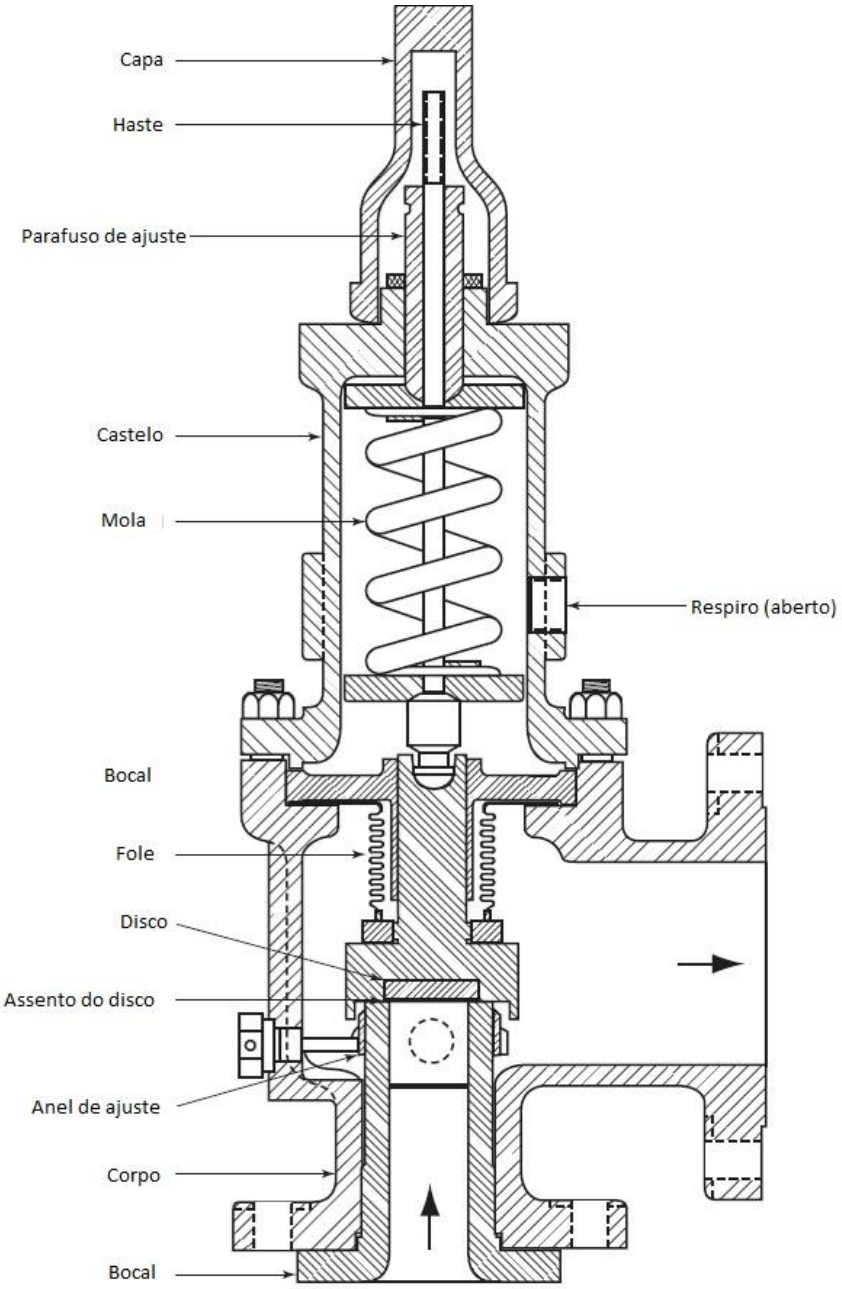

Figura 3.5 – Desenho esquemático da válvula de alívio de mola com fole (API 520).

A força devido à pressão do fluido atua na parte inferior do disco de fechamento da válvula e é contrabalançada por uma força mecânica direta que atua em sentido contrário devido à mola, pelo peso do disco e por uma força imposta pela contrapressão do fluido, caso a válvula não possua fole. Normalmente estas válvulas atingem sua capacidade de descarga certificada com uma sobre-pressão de 10% para gases e vapores de 10 a 25% para líquidos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

São fabricadas com diâmetros de orifício do bocal de entrada padronizados segundo a norma API 526 conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Padrões de orifícios das válvulas de alívio de mola (API 526).

Orifício	Área (pol²)	Diâmetro (mm)
D	0,110	9,5
E	0,196	12,7
F	0,307	15,9
G	0,503	20,3
H	0,785	25,4
J	1,287	32,5
K	1,838	38,8
L	2,853	48,4
M	3,6	54,4
N	4,34	59,7
P	6,38	72,4
Q	11,05	95,3
R	16	114,65
T	26	146,1

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

3.2.3. Válvulas de Alívio de Mola sem Fole

Este tipo de válvula de alívio é o mais comum na indústria química de processos. É uma válvula mantida fechada pela ação de uma mola sobre um disco assentado em um bocal, com castelo fechado envolto pela mola e por roscas de ajuste, como indicado na Figura 3.4.

A parte superior do disco de fechamento da válvula está submetida à contrapressão existente na saída da válvula. A força aplicada pela mola deve equilibrar com as forças ocasionadas pela pressão do fluido e pela

contrapressão. Se a contrapressão muda, também mudará a pressão de abertura ou de ajuste. Adotando-se a simbologia descrita a seguir,

F_S : Força da mola

P_V : Pressão interna do lado do equipamento protegido

P_B : Contrapressão no lado da descarga

A_N : Área do bocal de entrada

A_D : Área do disco, sendo $A_D > A_N$

Estabelece-se o equilíbrio de forças no instante em que a válvula abre, desaparecem as forças de reação no assento, como pode-se observar de forma esquemática na Figura 3.6.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

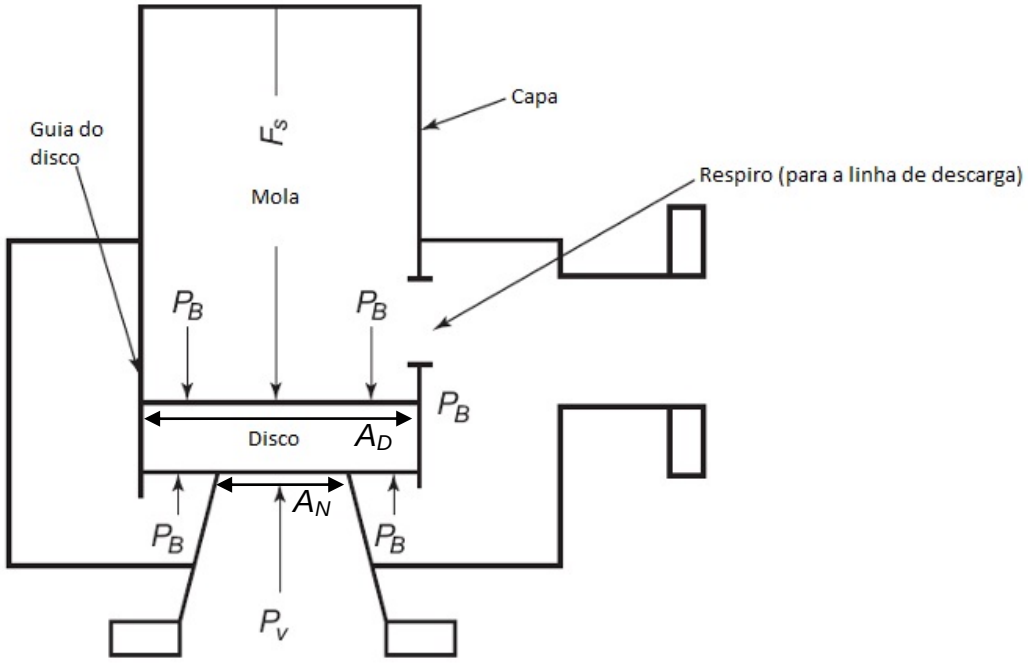

Figura 3.6 – Equilíbrio de forças para válvulas de alívio de mola sem fole no instante de abertura (API 520).

A equação do equilíbrio de forças pode ser escrita como:

$$P_V A_N + P_B (A_D - A_N) = F_S + P_B A_D \quad (2)$$

No momento em que a válvula abre, P_V passa a ser a pressão de abertura e a relação fica:

$$P_V = F_S / A_N + P_B \quad (3)$$

A contrapressão incrementa a pressão de abertura, pois além da pressão de ajuste prevista F_S / A_N soma-se a contrapressão P_B. Este fato pode levar ao risco da válvula não abrir quando necessário, ou abrir com retardo a uma pressão superior àquela ajustada.

Quando a contrapressão excede os 10% da pressão de abertura, a norma API recomenda utilizar válvulas de alívio especiais que permitem contrapressões de até 50% da pressão absoluta de ajuste. A partir desse valor, a capacidade de descarga dessas válvulas decresce notavelmente. Os limites em casos particulares dependerão do fabricante e da proporção relativa entre a contrapressão estática e em regime de alívio.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

3.2.4.
Válvulas de Alívio de Mola com Fole

As válvulas de alívio de mola com fole são aquelas onde se consegue equilibrar o efeito da contrapressão mediante a instalação de um fole sobre o disco.

Este tipo de válvula, mostrado na Figura 3.5, conta com um fole que evita que a pressão de descarga da válvula se comunique com o interior do castelo. O fole possui uma área efetiva igual à área do assento, o que faz com que o efeito da contrapressão sobre a pressão de ajuste seja eliminado. Os foles são

projetados para que as forças ocasionadas pelas pressões em ambos os lados do disco se igualem. O equilíbrio de forcas pode ser visto esquematicamente na Figura 3.7, adotando a simbologia anterior, sendo A_B a área do fole. Note-se na equação (4) que as pressões indicadas são manométricas.

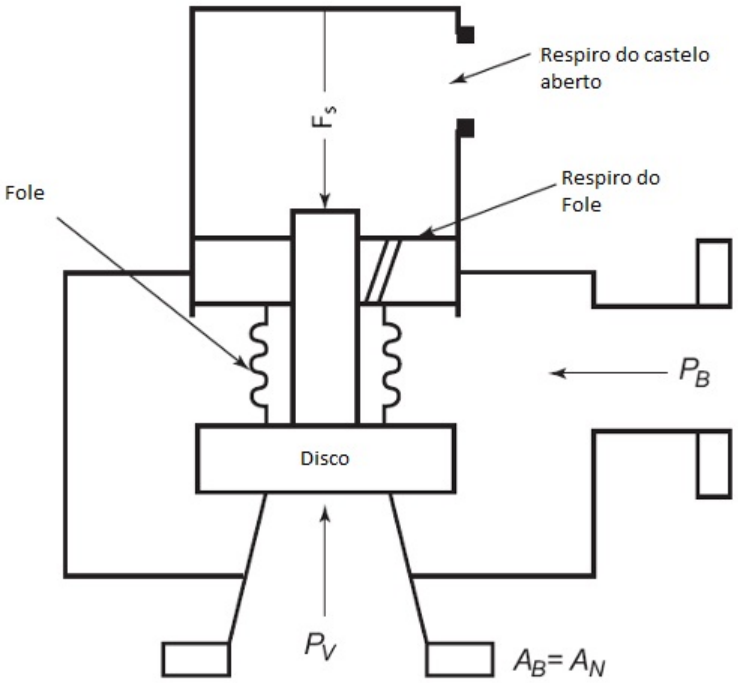

Figura 3.7 – Equilíbrio de forças para válvulas de alívio de mola com fole (API 520).

Estabelecendo o equilíbrio de forças:

$$P_V A_N + P_B (A_D - A_N) = F_S + P_B (A_D - A_B) \qquad (4)$$

Como $A_B = A_N$, tem-se:

$$P_V = F_S / A_N \qquad (5)$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

Como pode ser observado na equação (5), a contrapressão P_B não influi na pressão de abertura P_V.

É importante notar que o castelo apresenta um respiro aberto para a atmosfera o qual não deve ser fechado, pois, neste caso, alteraria a pressão de ajuste devido ao aumento da pressão no interior do castelo durante a ascensão do disco.

3.2.5. Características Dinâmicas da Válvula de Alívio

A Figura 3.8 apresenta um desenho simplificado da válvula de alívio de mola indicando algumas variáveis. *K* é o coeficiente da mola, *D* o diâmetro do disco e *L* o comprimento do duto de ingresso do fluido.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

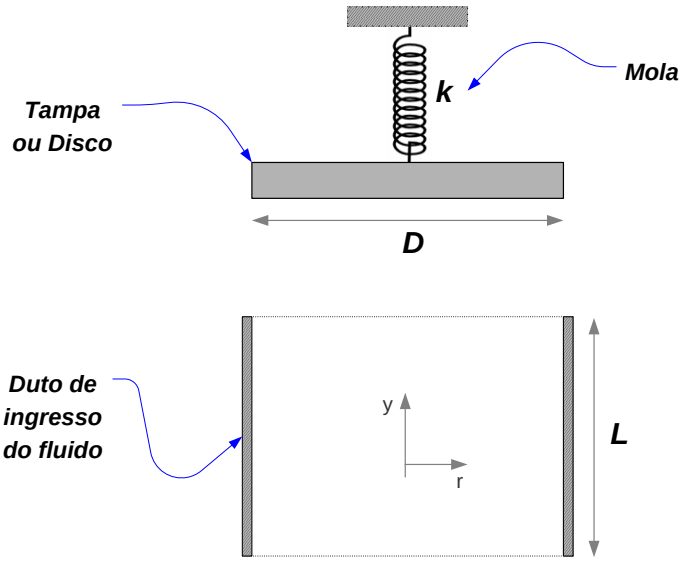

Figura 3.8 – Sistema simplificado da válvula de alívio.

Pode-se realizar um balanço de forças no disco no instante da abertura da válvula, como mostrado na Figura 3.9. Nesse instante existe um equilíbrio de forças no disco, o qual gera a relação apresentada na Equação (6).

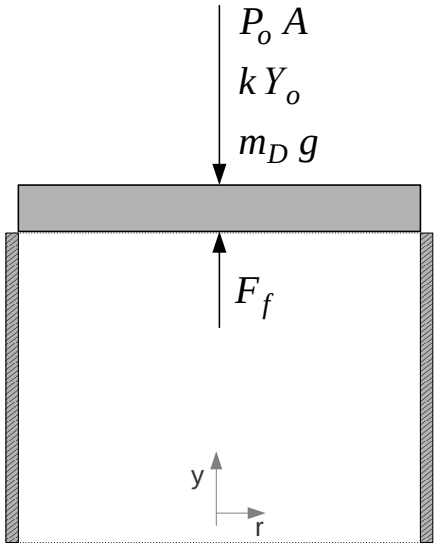

Figura 3.9 – Balanço de forças no disco no instante da abertura da válvula de alívio.

$$P_o A + k \mathrm{Y}_o + m_D g = F_f \qquad (6)$$

onde:

P_o : Pressão Atmosférica / Pressão externa (Pa).

A : Área da secção transversal do duto / área da superfície do disco (m²).

D : Diâmetro do disco (m).

k : Constante da mola (N/m).

Y_o : Deformação inicial da mola (m).

m_D : Massa do conjunto móvel (disco+haste) (kg).

g : Aceleração da gravidade (m/s²).

F_f : Força que o fluido aplica ao disco (N).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

Aplicando agora o princípio de conservação de quantidade de movimento linear na direção y ao fluido no interior do pequeno duto, Figura 3.10, obtemos:

$$\sum F_y = \frac{\partial}{\partial t}\int_{VC} v\rho d\forall + \int_{SC} v\rho \vec{u}.d\vec{A} \qquad (7)$$

Como neste instante não há fluxo de massa através da superfície de controle, a equação da quantidade de movimento linear se resume a um balanço de forças,

$$-\rho g A L - F_f + P_{sp} A = 0 \qquad (8)$$

onde:

ρ : massa específica do fluido (kg/m³).

L : Comprimento do pequeno duto a montante da válvula de alívio (m).

F_f : força que o disco aplica sobre o fluido (N).

P_{sp} : Pressão abertura da válvula ou pressão de *set point* (Pa).

Combinando as Equações (6) e (8) obtemos a deformação inicial da mola:

$$\mathrm{Y}_o = \frac{1}{k}\left[\left(P_{sp} - P_o\right)A - \rho g A L - m_D g\right] \qquad (9)$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

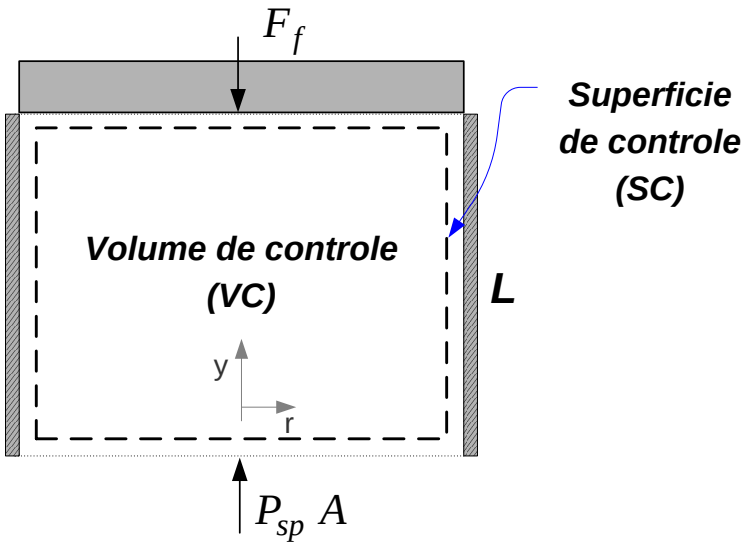

Figura 3.10 – Volume de controle no duto no instante da abertura da válvula de alívio.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

Quando a pressão de operação supera o *set point*, começa a abertura da válvula de alívio e o deslocamento do disco. A dinâmica do disco da válvula de alívio pode ser representada por um modelo matemático como o descrito a seguir. Aplicando a segunda lei de Newton ao disco durante seu deslocamento, Figura 3.11, a seguinte equação da dinâmica do sistema mola – disco é obtida, Equação (10).

$$F_f - k\left(\mathrm{Y}_D + \mathrm{Y}_o\right) - c\frac{d\mathrm{Y}_D}{dt} - m_D g - P_o A = m_D \frac{d^2\mathrm{Y}_D}{dt^2} \qquad (10)$$

onde:

F_f : Força que o fluido aplica ao disco (N).

Y_D : Deslocamento do disco (m).

c : Coeficiente de amortecimento. (N – s/m).

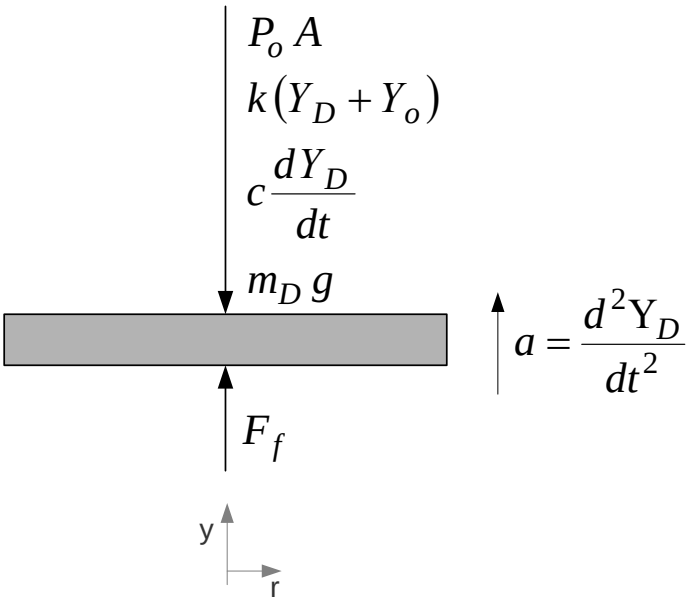

Figura 3.11 – Diagrama de corpo livre do disco durante seu deslocamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

Aplicando-se o princípio de conservação de quantidade de movimento linear na direção y ao fluido, Equação (11), no volume de controle no interior da válvula de alívio, mostrado na Figura 3.12, obtemos a relação mostrada na Equação (12).

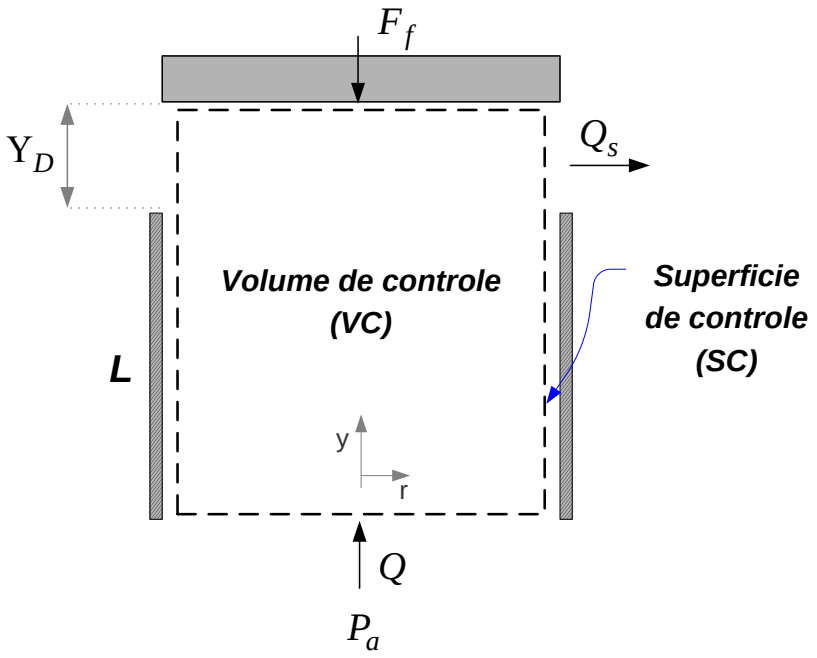

Figura 3.12 – Volume de controle no interior da válvula de alívio durante a atuação da mesma.

$$\sum F_y = \frac{\partial}{\partial t}\int_{VC} v\rho d\forall + \int_{SC} v\rho \vec{u}.d\vec{A} \qquad (11)$$

$$-\rho g A\left(L + \mathrm{Y}_D\right) - F_f + P_a A = \frac{\partial}{\partial t}\int_{VC} u\rho d\forall - u_e \rho u_e A \qquad (12)$$

onde:

u_e : Velocidade média entrando no volume de controle (m/s).

P_a : Pressão de operação ou pressão na entrada da válvula de alívio (Pa).

Na equação (12) foram desprezadas as forças que atuam na superfície de controle coincidente com a parede do tubo. Desprezando-se ainda a variação com o tempo da quantidade de movimento dentro do volume de controle, , obtemos a seguinte relação:

$$-\rho g A\left(L + \mathrm{Y}_D\right) - F_f + P_a A = -u_e \rho u_e A \qquad (13)$$

Substituindo a Equação (10) na da Equação (13) e reordenando obtemos a seguinte equação:

$$\begin{aligned} 0 &= m_D \frac{d^2 \mathrm{Y}_D}{dt^2} + c\frac{d\,\mathrm{Y}_D}{dt} + \left(k + \rho g A\right)\mathrm{Y}_D ... \\ &... + k\,\mathrm{Y}_o + \rho g A L + m_D g - \left(P_a - P_o\right)A - Q^2 \frac{\rho}{A} \end{aligned} \qquad (14)$$

onde:

Q : é a vazão entrando no volume de controle (m³/s).

Substituindo a Equação (9) da deformação inicial da mola, na da equação (14) obtemos a relação apresentada na Equação (15).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

$$0 = m_D \frac{d^2 \mathrm{Y}_D}{dt^2} + c \frac{d \mathrm{Y}_D}{dt} + \left(k + \rho g A\right) \mathrm{Y}_D ... \\ ... - \left(P_a - P_{sp}\right) A - Q^2 \frac{\rho}{A} \quad (15)$$

Aplicando o princípio de conservação de massa, Equação (16), no volume de controle no interior da válvula, mostrado na Figura 3.12, obtemos a relação apresentada na equação (17)

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho d\forall + \int_{SC} \rho \vec{u} . d\vec{A} \quad (16)$$

$$0 = A \frac{d \mathrm{Y}_D}{dt} - Q + Q_s \quad (17)$$

onde:

Q_s : é a vazão saindo do volume de controle (m³/s), a qual é definida mediante a seguinte equação:

$$Q_s = C_d A \sqrt{2 \frac{\left(P_a - P_o\right)}{\rho}} \quad (18)$$

sendo:

A : Área de referência. Neste trabalho foi usada a área do orifício da válvula (m²).

C_d : Coeficiente da válvula (adimensional).

O coeficiente da válvula foi obtido experimentalmente para diversas posições de abertura da válvula, originando uma curva que o relaciona com a porcentagem da abertura da válvula.

Substituindo a Equação (18) na da Equação (17) e esta, por sua vez, na da Equação (15) obtemos a seguinte equação:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA

$$0 = m_D \frac{d^2 \mathrm{Y}_D}{dt^2} + \left(c - 2C_d A\sqrt{2\rho\left(P_a - P_o\right)}\right)\frac{d\,\mathrm{Y}_D}{dt} \ldots$$
$$\ldots + \left(k + \rho g A\right)\mathrm{Y}_D - \left(P_a - P_{sp}\right)A - \left(\frac{d\,\mathrm{Y}_D}{dt}\right)^2 \rho A \ldots \qquad (19)$$
$$\ldots - 2C_d{}^2 A\left(P_a - P_o\right)$$

A equação acima representa um modelo matemático simples que governa o comportamento dinâmico da válvula de alívio de mola durante sua atuação, onde os parâmetros relevantes podem ser identificados. Assim, observa-se que o deslocamento da válvula, Y_D, depende da massa do conjunto movél, $m_{D,}$, da área do bocal, A, da diferença de pressões no interior do duto e na descarga da válvula, P_a-P_o, da diferença de pressões no interior do duto e da pressão de abertura da válvula, P_a-$P_{sp,}$, da massa específica do fluido, ρ, do coeficiente de descarga da válvula, C_d, da constante da mola, k, e do coeficiente de amortecimento do sistema, c.

Adimensionalizando-se a equação (19), o comportamento dinâmico da válvula é governado pelo seguinte conjunto de parâmetros,

$\omega_o^* = \omega_o \dfrac{D^2}{\nu}$ — Frequência natural adimensional

$\xi^* = \dfrac{c}{2\sqrt{k m_D}}$ — Taxa de amortecimento

$\psi^* = \dfrac{\rho g A}{k}$ — Relação entre o peso do fluido por unidade de longitude e a constante da mola

$m_D^* = \dfrac{m_D}{\rho D^3}$ — Massa do conjunto móvel adimensional

$C^* = \dfrac{c}{\mu D}$ — Coeficiente de amortecimento adimensional.

C_d — Coeficiente da válvula.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821295/CA