



NTP 457: Discos de ruptura (II): dimensionado

Disques de rupture (II): dimensionnement
Bursting discs (II): sizing

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Redactor:

Emilio Turmo Sierra
Ingeniero Industrial

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

Este documento complementa a la NTP-456. Una vez conocidas las características de un proceso y decidida la instalación de un determinado disco de ruptura, se pueda realizar el cálculo del área necesaria de alivio, teniendo en cuenta una serie de parámetros dependientes del fluido y de sus condiciones de trabajo, junto a las características de diseño del recipiente a proteger.

Introducción

Para calcular el área necesaria del dispositivo de protección de un recipiente por alivio de presión mediante la descarga de fluido, se debe partir del tipo de fenómeno a proteger.

- Para la protección contra explosiones por combustión de polvos, se pueden emplear los nomogramas presentados en la NTP-428, teniendo en cuenta todos los parámetros necesarios y las excepciones indicadas.
- Para las explosiones por combustión de gases y vapores inflamables (deflagraciones) existen unos nomogramas similares, incluidos en el código 68 del National Fire Protection Association (NFPA), correspondientes a los gases: metano, propano, gas de coque e hidrógeno. En este caso se debe conocer el valor de la constante K_G del gas considerado, mediante el ensayo correspondiente y cuyo valor se determina según la expresión de la "ley cúbica" $(dp/dt)_{m\acute{a}x} \cdot V^{1/3} = K_G$ en la que $(dp/dt)_{m\acute{a}x}$ es el gradiente de presión máximo y V el volumen del recipiente normalizado de ensayo. Los valores de K_G , para que sean válidos y comparativos, se deben calcular a partir del ensayo realizado en un recipiente de igual volumen y con un foco de ignición de igual energía. Utilizar una de las gráficas de los cuatro gases patrones indicados cuya K_G se aproxime más por exceso o realizar una interpolación. En caso de no disponer de datos de ensayo se puede utilizar el nomograma del hidrógeno, ya que el área adicional de venteo suele ser pequeña. Se debe partir del volumen del recipiente, de la presión reducida P_{red} según la resistencia del recipiente y de la presión estática P_{stat} del dispositivo de venteo. Debe tenerse en cuenta que estos nomogramas sirven para unas condiciones iniciales de no turbulencia en el momento de la ignición, no turbulencia por obstáculos internos, un foco de ignición ≤ 10 J, situación a presión atmosférica y con una razón longitud L / diámetro $D \leq 5$.

$$K_G \text{ metano} = 55 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$K_G \text{ propano} = 75 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$K_G \text{ gas de coque} = 140 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$K_G \text{ hidrógeno} = 550 \text{ bar}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

- Para la protección contra estallidos por aumentos de presión, se efectúa un dimensionado a partir de unas expresiones deducidas de la mecánica de fluidos y adoptadas por los códigos de diseño más importantes. Entre estos hay que destacar la Norma ISO 6718: 1991, el Código ASME, la Norma API RP 520, la Norma BS 2915: 1990, la Norma AD-Merkblatt A 1, los Códigos NFPA (30, 58), etc.

Se hace la distinción entre líquidos por un lado y gases y vapores por otro. El caudal de alivio requerido puede venir impuesto por reglamentos específicos o se puede obtener examinando las posibles causas de sobrepresión, tales como fallo de la energía eléctrica, fallo de la refrigeración, incendio, etc, y haciendo el cálculo para cada una de las contingencias. Se puede recurrir a las Instrucciones Técnicas Complementarias del Reglamento sobre Almacenamiento de Productos Químicos, Reglamento de aparatos a presión y a las Normas y Códigos citados anteriormente, para disponer de recomendaciones o fórmulas de cálculo válidas para válvulas de seguridad y discos de ruptura. Por ejemplo, en el caso de incendio se deduce a partir del calor recibido y del calor o entalpía de vaporización del fluido (ver NTP-346). El caudal de alivio generalmente deberá ser el mayor de todos ellos. En bibliografía especializadas también se citan programas de cálculo para diversas situaciones. Un ejemplo sería el caso de flujo en doble fase, el cual entre otros documentos se trata en la Norma ISO 4126.-1:1991.

En los discos de ruptura, la presión máxima de ruptura no debe exceder a la presión de diseño del recipiente y la presión mínima de ruptura debe exceder a la presión máxima de trabajo o servicio en un cierto margen, que depende del tipo de disco seleccionado.

Dimensionado de discos de ruptura para líquidos

Según la norma ISO 6718: 1991, el área de la sección del disco de ruptura debería ser:

$$A_0 = 0,6211 q_m / [f_u \cdot \alpha \cdot (\delta p \cdot \rho)^{1/2}]$$

Siendo:

A_0 = área del disco de ruptura (mm^2).

f_u = factor de corrección por viscosidad. Si la viscosidad es igual o menor que la del agua a 20°C , $f_u = 1$. Este factor depende del número de Reynolds Re y se puede obtener del gráfico de la figura 1. El número de Reynolds se obtiene de la expresión $Re = 0,3134 \cdot q_m / [\mu (A_0)^{1/2}]$ siendo μ = viscosidad dinámica en $\text{Pa} \cdot \text{s}$, lo cual nos indica que se ha de considerar un valor de partida de q_m o A_0 y hacer tanteos iterativos.

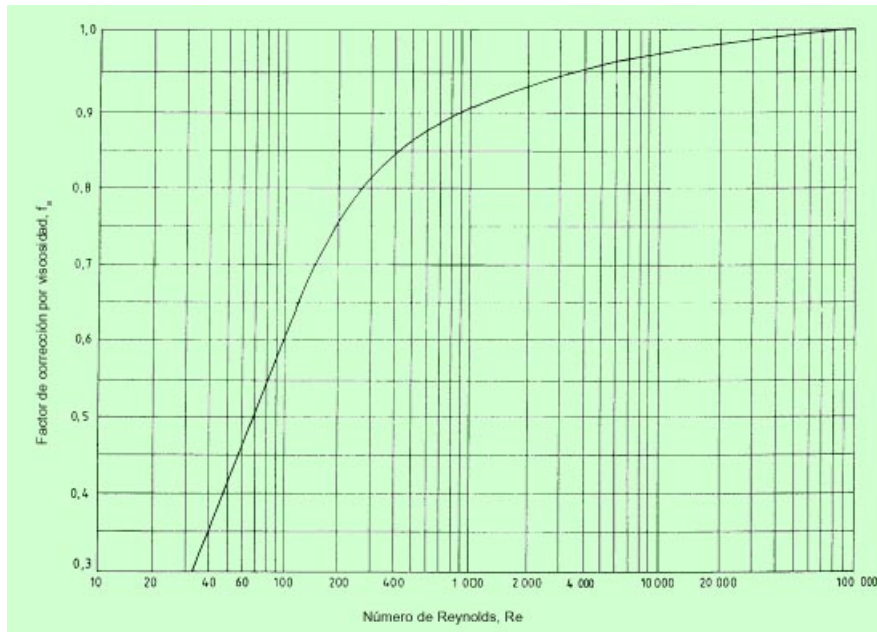


Figura 1. Factor de corrección f_u de la viscosidad dinámica del líquido según el Número de Reynolds Re .

δp = diferencia de presión entre el sistema a presión y la presión en el extremo del sistema de descarga o la atmósfera en bar.

q_m = flujo o caudal másico a descargar en kg/h .

α = coeficiente de descarga de la boquilla de salida (0,62 o según reglamentos o normas determinadas).

ρ = densidad en kg/m^3 .

Ejemplo

Dimensionar el disco de ruptura que se requiere para proteger un recipiente que contiene un líquido con las condiciones siguientes: caudal de alivio requerido 2000 L/min ; densidad $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$; presión máxima de trabajo permitida = 15 bar manométrico; coeficiente de descarga $\alpha = 0,62$; $f_u = 1$.

Solución:

La normativa española del Reglamento de Aparatos a Presión y del Reglamento sobre Almacenamiento de Productos Químicos, igual que la norma ISO 6718:1991 y otras, establece que el caudal de descarga debe ser tal que, durante la actuación del dispositivo de protección, la presión máxima de alivio alcanzada no sobrepase el 10% de la presión máxima de trabajo permitida, con lo que: presión máxima de alivio permitida = 16,5 bar y flujo máximo de alivio requerido = 156.000 kg/h

El área de disco de ruptura debería ser como mínimo:

$$A_0 = 0,6211 [156.000 / [1 \cdot 0,62 (16,5 \cdot 1300)^{1/2}]] = 1067 \text{ mm}^2$$

equivalente a un diámetro de 36,9 mm. Se adoptaría el diámetro nominal normalizado superior DN 40 (1 1/2")

Dimensionado de discos de ruptura para gases y vapores

Considerando p la presión absoluta en el interior del recipiente y p_b la presión absoluta exterior o contrapresión, cuando $p_b/p = 1$ no hay flujo. Al incrementar la presión p el flujo va aumentando y decrece la razón p_b/p hasta llegar a un valor crítico que se llama razón crítica $p_{crit} = [2 / (k + 1)]^{k/(k-1)}$ siendo $k = c_p/c_v$ la razón de los calores específicos a presión y volumen constante. En ese punto el flujo alcanza la velocidad del sonido. La consecuencia es que se deben considerar dos casos de flujo: el sónico (condiciones críticas) cuando $p_b/p \leq [2 / (k + 1)]^{k/(k-1)}$ y el subsónico (condiciones subcríticas) cuando $p_b/p > [2 / (k + 1)]^{k/(k-1)}$.

a) Fluidos compresibles (gases y vapores). Capacidad de descarga con flujo subsónico (subcrítico).

El área de la sección del disco de ruptura según fórmulas derivadas de la mecánica de fluidos sería:

$$A_0 = 3,469 [[q_m / (C k_b \alpha)] [v / p]^{1/2}]$$

o su equivalente:

$$A_0 = [q_m / (C k_b \alpha p)] [T Z / M]^{1/2} \text{ (ISO 6718:1991)}$$

siendo:

A_0 = área del disco de ruptura (mm²)

$C = 3,948 [k / (k + 1)^{(k+1) / (k-1)}]^{1/2}$ (ver tabla 3)

$k_b = [2k / (k-1) [(p_b/p)^{2/k} - (p_b/p)^{(k+1)/k}] / [k^2 / (k+1)^{(k+1)/(k-1)}]]^{1/2}$ es un factor de corrección que reduce la capacidad de descarga debido a incrementos de la contra presión. Para flujo crítico $k_b = 1$. La tabla 1 da valores calculados de k_b .

TABLA 1. Factor de corrección k_b de la capacidad de descarga según la contrapresión.

P_b/P	Exponente isoentrópico κ																			
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,001	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	
Factor de corrección de la capacidad por contrapresión, K_b																				
0,45																	1,000	0,999	0,999	
0,50													1,000	1,000	0,999	0,999	0,996	0,994	0,992	0,989
0,55									0,999	1,000	0,999	0,997	0,994	0,991	0,987	0,983	0,979	0,975	0,971	
0,60							1,000	0,999	0,997	0,993	0,989	0,983	0,978	0,972	0,967	0,961	0,955	0,950	0,945	
0,65						0,999	0,995	0,989	0,982	0,974	0,967	0,959	0,951	0,944	0,936	0,929	0,922	0,915	0,909	
0,70			0,999	0,999	0,993	0,985	0,975	0,964	0,953	0,943	0,932	0,922	0,913	0,903	0,895	0,886	0,879	0,871	0,854	
0,75		1,000	0,995	0,983	0,968	0,953	0,938	0,923	0,909	0,896	0,884	0,872	0,861	0,851	0,841	0,832	0,824	0,815	0,808	
0,80	0,999	0,985	0,965	0,942	0,921	0,900	0,881	0,864	0,847	0,833	0,819	0,806	0,794	0,783	0,773	0,764	0,755	0,747	0,739	
0,82	0,992	0,970	0,944	0,918	0,894	0,872	0,852	0,833	0,817	0,801	0,787	0,774	0,753	0,752	0,741	0,732	0,723	0,715	0,707	
0,84	0,979	0,948	0,917	0,888	0,862	0,839	0,818	0,799	0,782	0,766	0,752	0,739	0,727	0,716	0,706	0,697	0,688	0,680	0,672	
0,86	0,957	0,919	0,884	0,852	0,800	0,779	0,759	0,742	0,727	0,712	0,700	0,688	0,677	0,667	0,667	0,658	0,649	0,641	0,634	
0,88	0,924	0,881	0,842	0,809	0,780	0,755	0,733	0,714	0,697	0,682	0,668	0,655	0,644	0,633	0,624	0,615	0,606	0,599	0,592	
0,90	0,880	0,831	0,791	0,757	0,728	0,703	0,681	0,662	0,645	0,631	0,617	0,605	0,594	0,584	0,575	0,566	0,558	0,551	0,544	
0,92	0,820	0,769	0,727	0,693	0,664	0,640	0,619	0,601	0,585	0,571	0,559	0,547	0,537	0,527	0,519	0,511	0,504	0,497	0,490	
0,94	0,739	0,687	0,647	0,614	0,587	0,565	0,545	0,528	0,514	0,501	0,489	0,479	0,470	0,461	0,453	0,446	0,440	0,434	0,428	
0,96	0,628	0,579	0,542	0,513	0,489	0,469	0,452	0,438	0,425	0,414	0,404	0,395	0,387	0,380	0,373	0,367	0,362	0,357	0,352	
0,98	0,426	0,422	0,393	0,371	0,353	0,337	0,325	0,314	0,305	0,296	0,289	0,282	0,277	0,271	0,266	0,262	0,258	0,254	0,251	
1,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

k = exponente isoentrópico = c_p/c_v

M = masa molecular en kg/kmol

p = presión de alivio en bar absolutos

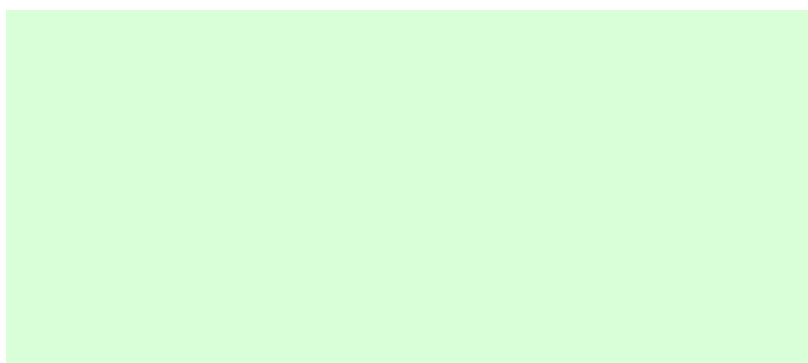
p_b = contrapresión inmediatamente aguas abajo del área de la sección transversal mínima en bar absolutos

q_m = flujo máximo a descargar o la capacidad requerida de descarga del disco de ruptura en kg/h

T = temperatura absoluta de alivio en K

v = volumen específico a la presión y temperatura de alivio en m³/kg

Z = factor de compresibilidad (ver fig. 2).



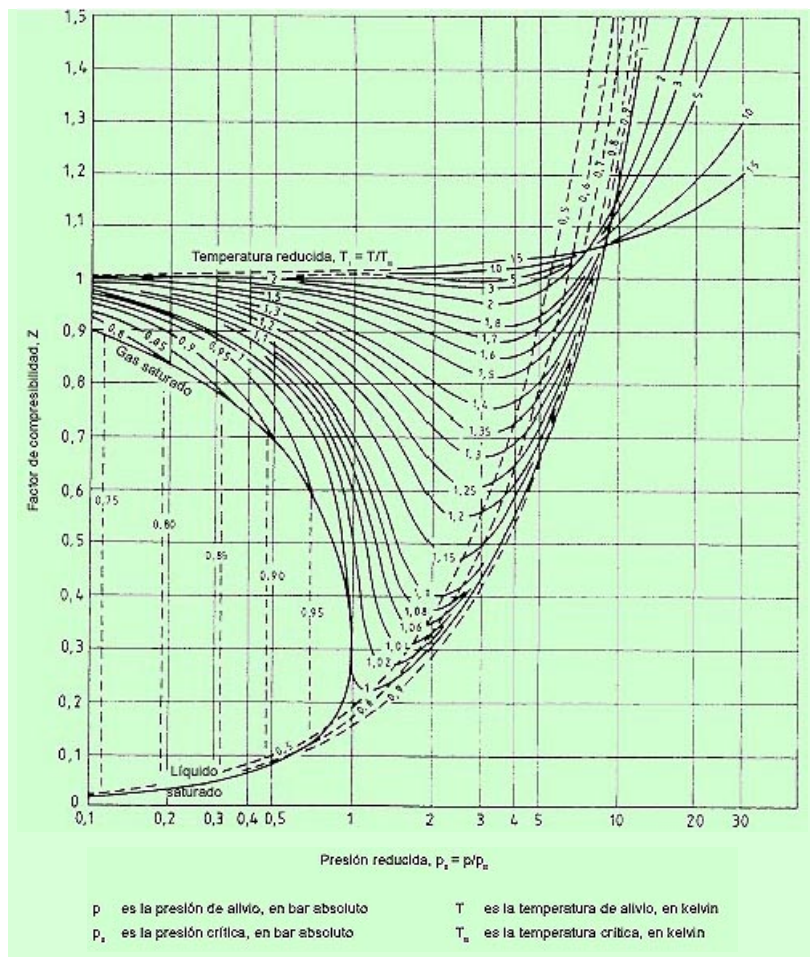


Fig. 2: Factor de compresibilidad Z en función de la presión y temperatura reducidas

α = coeficiente de descarga según tabla 2 y debiéndose cumplir $0,5 A_1 \leq A_0 \leq A_1$ siendo A_1 el área de la sección transversal del conducto de entrada en mm^2 . Para configuraciones distintas de las de la tabla 2 se requieren ensayos. El coeficiente establecido experimentalmente debe multiplicarse por 0,9 antes de aplicar las fórmulas de cálculo de A_0 .

Tabla 2. Coeficientes de descarga α

Nº	Tipo de boquilla	Coeficiente de descarga α (fluidos compresibles)
1	Boquilla saliente	0,68
2	Boquilla encastrada o rebajada y también una brida maciza (formando bloque) con diseño de configuración no hidrodinámica	0,73
3	Brida maciza (formando bloque) de configuración hidrodinámica, p.e. con bordes de entrada redondeados o achaflanados y también con orificio rebordeado hacia fuera.	0,80

Ejemplo

Dimensionar el disco de ruptura que se requiere para proteger un recipiente a presión que contiene gas nitrógeno en las condiciones de proceso siguientes: presión máxima de trabajo permitida: 5 bar manométrico; caudal de alivio requerido: 300.000 L/min en las condiciones de salida; temperatura del flujo de salida: 200 °C; contrapresión del sistema durante el venteo: 4,5 bar manométrico; coeficiente efectivo de descarga $\alpha = 0,62$; coeficiente isoentrópico $k = c_p/c_v = 1,404$; masa molecular del N_2 : $M = 28$; temperatura crítica $T_c = -146,95 \text{ °C} = 126,2 \text{ K}$; presión crítica $P_c = 33,94 \text{ bar}$

Solución

Presión máxima de alivio: $p = 6,513 \text{ bar abs.}$; $p_b = 5,513 \text{ bar abs.}$

$$p_b/p = 0,846; r_{crit} = [2 / (1,404 + 1)]^{1,404/(1,404-1)} = 0,528$$

Al ser $0,846 > 0,528$ se deduce que el flujo es subsónico.

Se deben calcular los parámetros que intervienen en la fórmula que da A_0 . El valor q_m en kg/h se calcula a partir de los 300.000 L/min dados en las condiciones de salida a 200 °C y 6,513 bar, aplicando las leyes de los gases perfectos:

$$p V / T = p_0 V_0 / T_0$$

$$(6,513 / 1,013) \cdot 18.000.000 / (273,15 + 200) = 1 \cdot V_0 / 273,15$$

$$V_0 = 66.796.853 \text{ L/h} = 66\,796 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (a } 0 \text{ °C y } 1 \text{ atm).}$$

En estas condiciones 1 mol ocupa 22,4 L:

$$(66\,796\,853 \text{ L/h}) / (22,4 \text{ L/mol}) = 2.982.002,4 \text{ mol/h}$$

Y al ser 28 el peso molecular del nitrógeno, tendremos:

$$q_m = 83\,496,066 \text{ kg/h}$$

El volumen específico v en las condiciones de salida (200 °C y 6,513 bar) será:

$$v = (18.000 \text{ m}^3/\text{h}) / (83.496,066 \text{ kg/h}) = 0,215\,579 \text{ m}^3/\text{kg}$$

La constante $C = 2,70$ (Tabla 3 para $k = 1,404$). De la tabla 1 para $k = 1,4$ y $p_b / p = 0,84$ se obtiene el valor aproximado $k_b = 0,752$. Aplicando la fórmula correspondiente daría:

$$k_b = 0,740$$

La sección mínima del disco de ruptura sería:

$$A_0 = 3,469 \left[\frac{83.496,066}{(2,70 \cdot 0,740 \cdot 0,62)} \right] \left[\frac{0,215579}{6,513} \right]^{1/2} = 42.539,8 \text{ mm}^2$$

que corresponde a un diámetro de 232,7 mm. Se tomaría un diámetro nominal DN 250 (10").

Tabla 3. Valores de C según el coeficiente isoentrópico k

κ	C	κ	C	κ	C
0,40	1,65	1,02	2,41	1,42	2,72
0,45	1,73	1,04	2,43	1,44	2,73
0,50	1,81	1,06	2,45	1,46	2,74
0,55	1,89	1,08	2,46	1,48	2,76
0,60	1,96	1,10	2,48	1,50	2,77
0,65	2,02	1,12	2,50	1,52	2,78
0,70	2,08	1,14	2,51	1,54	2,79
0,75	2,14	1,16	2,53	1,56	2,80
0,80	2,20	1,18	2,55	1,58	2,82
0,82	2,22	1,20	2,56	1,60	2,83
0,84	2,24	1,22	2,58	1,62	2,84
0,86	2,26	1,24	2,59	1,64	2,85
0,88	2,28	1,26	2,61	1,66	2,86
0,90	2,30	1,28	2,62	1,68	2,87
0,92	2,32	1,30	2,63	1,70	2,89
0,94	2,34	1,32	2,65	1,80	2,94
0,96	2,36	1,34	2,66	1,90	2,99
0,98	2,38	1,36	2,68	2,00	3,04
0,99	2,39	1,38	2,69	2,10	3,09
1,001	2,40	1,40	2,70	2,20	3,13

b) Fluidos compresibles (gases y vapores). Capacidad de descarga con flujo sónico (crítico)

En este caso la razón de las presiones $p_b/p \leq r_{crit}$ y la fórmula a emplear es según la norma ISO 6718:1991:

$$A_0 = 3,469 \left[\frac{q_m}{C \alpha} \right] \left[\frac{v}{p} \right]^{1/2}$$

o su equivalente $A_0 = [q_m / (C \alpha p)] [T Z / M]^{1/2}$ siendo los parámetros los mismos que en el caso anterior, excepto el k_b que por ser igual a la unidad no aparece.

Ejemplo

Dimensionar el disco de ruptura que se requiere para proteger un recipiente a presión que contiene gas helio en las condiciones siguientes: presión máxima de trabajo permitida: 10 bar manométrico; caudal de alivio requerido: 1.500.000 L/min medidos a 1 atm y 15,5° C; contrapresión del sistema durante el venteo: 0 bar manométrico (presión atmosférica); temperatura del flujo: 40° C; coeficiente de descarga: $\alpha = 0,62$; coeficiente isoentrópico: $k = c_p / c_v = 1,66$; masa molecular del He: $M = 4$; temperatura crítica $T_c = -267,95^\circ \text{C}$; presión crítica $P_c = 2,275 \text{ bar}$

Solución

$$p_b = 1,013 \text{ bar abs.}; p = 12,013 \text{ bar abs.}$$

$$p_b / p = 1,013 / 12,013 = 0,084$$

$$r_{\text{crit}} = [2 / (1,66 + 1)]^{1,66/(1,66-1)} = 0,488$$

$$p_b / p = 0,084 < r_{\text{crit}} = 0,488. \text{ El flujo es sónico}$$

Para aplicar la expresión $A_0 = 3,469 [(q_m / (C \alpha))] [v / p]^{1/2}$ es necesario calcular los parámetros en los pasos siguientes:

El flujo másico q_m en kg/h se puede conocer a partir del número de moles que corresponden al caudal de alivio requerido. Aplicando la ley de los gases perfectos $p V / T = p_0 V_0 / T_0$.

El volumen V_0 a 0° C y 1 atm sería:

$$V_0 = p V T_0 / (p_0 T) = 1 \cdot 1.500.000 \cdot 273,15 / [1 \cdot (273,15 + 15,5)] = 1.419.452,6 \text{ L}$$

y en flujo volumétrico 1.419.452,6 L/min. Sabiendo que 1 mol de helio = 4g ocupa 22,4 L a 0° C y 1 atm, el flujo másico de helio sería:

$$q_m = 15.208,421 \text{ kg / h}$$

El valor de C se puede calcular con la fórmula dada en el apartado a) **Fluidos compresibles (gases y vapores). Capacidad de descarga con flujo subsónico (subcrítico)** o con la tabla 3 para $k = 1,66$; $C = 2,86$; $p = 12,013 \text{ bar absolutos}$ (valor a sustituir en A_0); $p = 12,013 \text{ bar a } (1,013 \text{ bar/atm}) = 11,856 \text{ atm absolutas}$; $T = 40^\circ \text{C} = 273,15 + 40 = 313,15 \text{ K}$

El caudal de alivio requerido de 1.500.000 L/min. = 90.000 m³/h (a 1 atm y 15,5°C). Aplicando la ley de los gases perfectos $p V / T = p_0 V_0 / T_0$:

$$11,856 \cdot V / (273,15 + 40) = 1 \cdot 90.000 / (273,15 + 15,5); V = 8.235,30 \text{ m}^3/\text{h}$$

El volumen específico v sería:

$$v = (8.235,30 \text{ m}^3/\text{h}) / (15.208,421 \text{ kg/h}) = 0,541 \text{ m}^3/\text{kg}$$

La sección mínima del disco de ruptura debería ser:

$$A_0 = 3,469 [(15.208,421 / (2,86 \cdot 0,62))] [0,541 / 12,013]^{1/2} = 6.316,81 \text{ mm}^2$$

Equivalente a un diámetro de 89,68 mm. Se tomaría el diámetro nominal inmediato superior DN 100 (4").

Bibliografía

(1) LEES, F.P.

Loss Prevention in the Process Industries

Oxford, ButterworthHeinemann, 1996, 3 Vols.

(2) PARRY, C.F.

Relief Systems Handbook

Rugby, England, Institution of Chemical Engineers, 1992

(3) TURMO, E.

NTP 427 y 428. Paramentos débiles para el venteo de alivio de explosiones (I y II)

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 1996

(4) CEJALVO, A.

NTP 346. Válvulas de seguridad (II). Capacidad de alivio y dimensionado

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 1994

(5) **Reglamento sobre Instalaciones de almacenamiento de gases licuados del petróleo (GLP) en depósitos fijos**

Madrid. M° de Industria, Comercio y Turismo

(6) **Reglamento sobre Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias**

Madrid, M° de Industria, Comercio y Turismo

(7) **Reglamento de Aparatos a Presión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias**

(8) Código NFPA 68.

Guide for Venting of Deflagrations

(9) Código NFPA 30.

Flammable and Combustible Liquids Code

(10) Código NFPA 58.

Standard for the Storage and Handling of Liquefied Petroleum Gases

Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Association, 1989.

(11) Norma ISO 6718: 1991.

Bursting discs and bursting disc devices

(12) Norma ISO 41261:1991.

Safety valves. Part 1. General requirements

(13) Código ASME. Section VIII. Division 1.

Pressure Relief Devices

(14) Norma API RF 520.

Sizing, Selection and Instalation of Pressure Relieving Devices in Refineries. Part I. Sizing and Selection

(15) Norma API 521.

Guide for pressure relieving and depressuring systems

(16) Norma API 2000.

Venting atmospheric and low pressure storage tanks

(17) Norma BS 2915: 1990.

Specification for Bursting Discs and Bursting Disc Devices

(18) Norma ADMerkblatt A1.

Safety devices against excess pressure. Bursting Safety Devices. Berlin