

Eugenio Valencia Leonardo

RESUMEN

En el diseño de instalaciones de transporte neumático la determinación de las pérdidas de carga constituye un capítulo decisivo pues conociendo éstas, puede procederse a la selección y dimensionado de tuberías, codos, dispositivos de alimentación, ciclones, filtros, y finalmente el ventilador. El proceso de cálculo de las pérdidas de carga de un flujo de partículas arrastradas por un fluido impulsor (aire, corrientemente) consta de las mismas etapas que se siguen en cualquier tipo de flujo: en primer lugar éste debe ser caracterizado (permanente, no permanente, compresible, incompresible, etc); a continuación se distinguirán los diversos tipos de pérdidas que pueden presentarse (a lo largo de conductos, en singularidades) y finalmente se plantearán y discutirán las fórmulas que con más precisión representen el fenómeno.

El presente artículo se ha estructurado siguiendo el esquema anterior. Se inicia con una introducción que contiene la descripción de los principales flujos de transporte neumático que pueden darse: el de partículas, el de mechenes o sedimentos) y el de coágulos (conglomerados o paquetes de partículas). He procurado seguir en lo posible un mismo esquema de cálculo en todas las tasas, aplicando sucesivamente el método gráfico y el método analítico. El primero se ha incluido por ser el convencional y el más conocido; para mayor ilustración se aplica a la resolución de tres ejemplos de distintos autores, apreciándose la peculiar forma que cada una de ellas tiene para aplicar las fórmulas generales. El segundo método es el más reciente, de aplicación cada vez más extendida y que suplantará definitivamente al anterior, pues mediante él los cálculos pueden ser fácilmente programados, suprimiendo el engorro de los procedimientos clásicos.

Para el estudio de los flujos de mechenes y de coágulos existen modelos generales, semejantes al empleado para el flujo de partículas. Pero en situaciones bien definidas, pueden plantearse métodos simplificados de fácil comprensión y manejo; aquí se adjuntan dos de ellos.

Aparte de la pérdida de carga en conductos, he considerado con cierto detalle dos elementos de alimentación: el de válvula rotatoria y el de tipo Venturi; y un elemento separador: el ciclón. En todos ellos he procurado justificar todas las fórmulas y coeficientes adimensionales empleados.

Las citas bibliográficas contienen un comentario al margen que permite apreciar sus características y utilidad.

SUMMARY

In the designing of pneumatic transport plants the determination of losses of head constitutes a decisive chapter since knowing these the selection and dimensioning of pipes, elbows, feeding arrangements, cyclones, filters and finally the fan can be done. The process of calculating the losses of head of a flow of particles led by the propeller fluid (normally air) consists of the same stages followed in any type of flow, first this must be characterized (steady, unsteady, compressible, incompressible, etc) the the different kind of losses that can appear (through pipes, in singularities) will be distinguished and finally the formulas which represent the phenomenon with more precision will be laid out and discussed.

The present article has been organized following the former scheme. It starts with an introduction enclosing the description of the main pneumatic transport flows that can appear, particles flow, mops flow (or sediments) and coagulums flow (conglomerates or parcels of particles). I have tried as far as possible to follow the same calculation scheme in all cases applying successively the graphic method and the analytical method. The first has been included for being the conventional and the most known; for greater illustration it is applied to the solution of three examples of different authors being noticed the peculiar way each one follows when applying the general formulas. The second method is the most recent, each time with larger application and it will supplant definitively the former method as using this second method the calculations can be programed easily suppresing the nuisance of classical proceeding.

In order to study mops and coagulums flow there are general models similar to the ones used for particles flow. But in a well definite situation, simplified methods of easy comprehension and management can be laid out; two of them are enclosed here.

Besides the loss of head in pipies I have considered with certain detail two elements of feeding, the one of rotatory valve and the Venturi type. I have considered too a separator element, the cyclon. In all of them I have tried to justify all the formulas and non-dimensional coefficients used.

The bibliographical quotations enclose a commentary as a marginal note that allows to appreciate more their characteristics and utility.

INTRODUCCION

Este artículo está dedicado al estudio y determinación de las pérdidas de carga que experimentan fluido y producto al transitar por las conducciones de una instalación determinada. Sin embargo, antes de entrar en el tema propiamente dicho, repasaremos de forma breve los distintos tipos de flujo, cuyas características se han indicado en la figura 1.

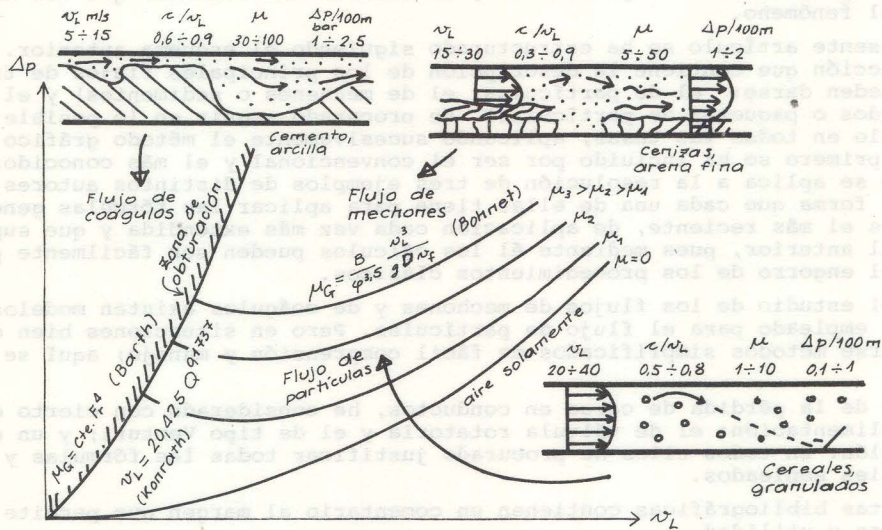


Fig.1

Vemos que existen tres situaciones fundamentales que corresponden a los casos conocidos como flujo de partículas, flujo de mechones y flujo de coágulos.

El *flujo de partículas* es apropiado para todo tipo de partículas secas, susceptibles de fluir sin dificultad y que no tienden a aglutinarse, como pueden ser los cereales y los materiales granulados. La velocidad del gas de impulsión (casi siempre aire) debe estar bien determinada, pues con valores excesivos de la misma se presentan graves problemas adicionales de mezcla y de desgaste. La energía consumida en la impulsión puede ser elevada; su determinación se lleva a cabo empleando las fórmulas de

flujo en tuberías, con las que se calcularán por separado las pérdidas de carga para el aire y para el producto y se sumarán ambos términos para hallar la pérdida de carga total. El proceso de cálculo no es complicado; pero si largo y engorroso, inconvenientes que pueden superarse utilizando ordenadores.

Cuando la concentración supera un valor límite μ_G se produce el flujo de mechones. Estos consisten en capas de partículas que se depositan en el fondo del conducto y que por la parte superior se ven impulsadas por las partículas libres que chocan contra ellas y por la parte inferior están frenadas por el rozamiento de la tubería. El flujo de mechones se da principalmente cuando las partículas son muy finas. El estudio de este tipo de flujo se lleva a cabo teniendo en cuenta que la sección del tubo se ha reducido (debido a los sedimentos de una parte del material transportado) y aplicando convenientemente las ecuaciones de continuidad y del equilibrio de fuerzas. Al determinar las pérdidas de carga hay que distinguir dos casos: aquel en que $\mu < 20$, donde es aplicable un modelo semejante al del flujo de partículas con pérdidas de carga para aire y para partículas calculadas por separado y sumadas, y aquel en que $\mu > 20$, caracterizado porque ahora las pérdidas se calculan de modo global para fluido y para partículas. Se aplica preferentemente en el transporte de partículas finas (pavesas, arenas etc.).

La peculiaridad del flujo de coágulos consiste en que se trata de un flujo no permanente. A través de la conducción no fluye una mezcla homogénea de gas y partículas, sino ciertos coágulos de material rodeados por el gas de impulsión que los separa unos de otros, formando en la parte inferior un cojín sobre el cual se deslizan aquellos. Este tipo de flujo es muy usado en la práctica, siendo el más indicado para transportar partículas permeables al gas, que pueden fluir sin dificultad tales como minerales pulverizados, cemento y arcillas. Para materiales plásticos y húmedos este es el único procedimiento útil de transporte neumático. Los métodos de cálculo que existen por ahora son escasos y no enteramente fiables, por lo que en el diseño de instalaciones hemos de basarnos en buena parte en los resultados obtenidos de otras ya en funcionamiento o mediante ensayos de modelos reducidos.

Ejemplos

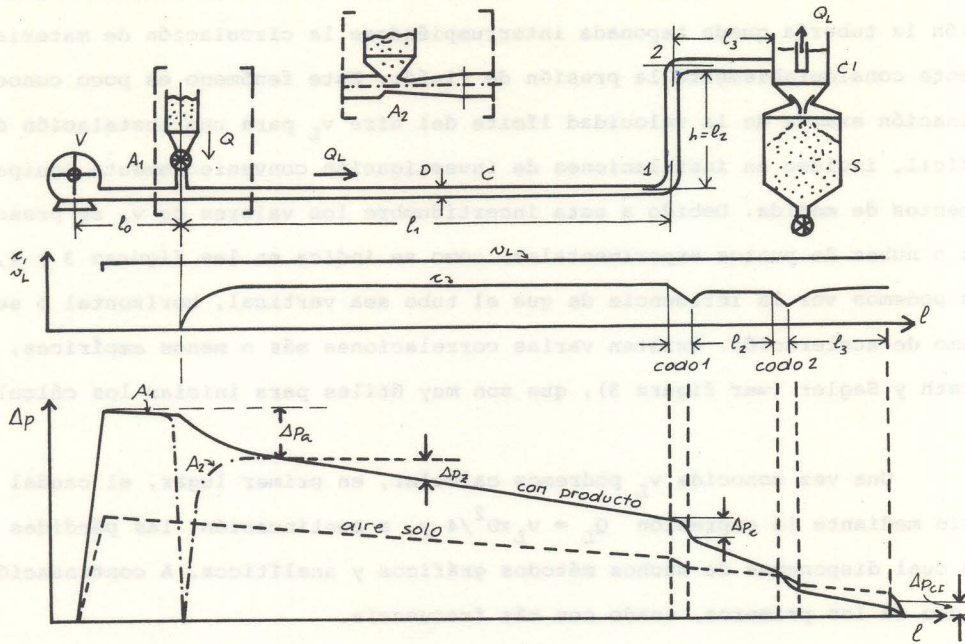
Con el fin de dar un orden de magnitud se adjuntan unos ejemplos obtenidos del trabajo de Muschelknautz (Chemie Ing. Tech. 46 (1.974) 6 p. 224)

Material	ϕ Partícula mm	Longitud tubo horizontal mm	Longitud tubo vertical mm	D mm	Q t/h	Q_L m ³ /h	ΔP bar	v_L m/s	$\mu = \frac{Q}{Q_L \rho_L}$	Tipo de flujo
Partículas de caucho;	25	45	6	125	1	1100	0,04	25	0,8	Flujo de
Partículas de plástico	3	30	12	65	1	200	0,14	17	4	partículas
Material de contacto;	1,2	-	16	100	9	460	0,1	16	16	Flujo de
ceniza	0,015	1200	15	200	50	4000	3,5	13	10	mechones
Sosa ;	0,075	25	-	65	20	200	0,3	13	83	Flujo de
cemento	0,05	333	30	125 \div 180	100	1500	5,5	8	55	coágulos

1.- PERDIDAS DE CARGA EN CONDUCTOS

Para conseguir el desplazamiento de las partículas de un determinado producto a través de una tubería es necesario comunicar a las mismas una cantidad de energía suficiente que contrarreste los efectos del rozamiento que tienden a anularlo. La energía que se precisará es igual al producto del caudal de fluido impulsor (aire u otro gas) por la pérdida de carga. Si suponemos una instalación elemental como la de la figura 2, las pérdidas de carga que experimentan fluido y partículas pueden dividirse para su estudio en dos categorías:

- las que tienen lugar a lo largo de los diversos tramos de la conducción de longitudes l_1, l_2, l_3 que pueden ser verticales u horizontales.
- las que se producen en las singularidades como pueden ser codos, ciclones, filtros, bifurcaciones, estrechamientos, ensanchamientos, etc.



V	A ₁	A ₂	
Ventilador Fördergebläse Fan Ventilateur	Válvula rotativa Zellenradschleuse Rotary valve Boisseau	Venturi Injektorschleuse Venturi Venturi	
C	1, 2	CI	S
Conducción Leitung Pipe Conduite	Codos Krümmer Elbow Coude	Ciclón Zyklon Cyclone Cyclone	Silo silo (Bunker) Silo (Bin) Silo

Fig. 2

La determinación de las pérdidas de carga en una situación dada exige conocer previamente el tipo de flujo de que se trata: de partículas, de mechones ó de coágulos, pues en cada caso el planteamiento es distinto. En lo que sigue expondremos los métodos de cálculo específicos en cada circunstancia.

2.- CASO DE FLUJO DE PARTICULAS

En la figura 1 observamos que el campo de aplicación del sistema de flujo llamado de partículas está limitado por dos líneas: en la parte superior por la zona correspondiente al flujo de mechones, caracterizado por un valor de concentración μ_G , y a la izquierda por la zona de obturación definida también mediante otro μ_G . En todo diseño de transporte neumático del tipo de flujo de partículas el primer punto a decidir es la velocidad límite del aire impulsor, pues si su magnitud es insuficiente

ciente el transporte será imposible por estar dentro de la zona de obturación. En esta situación la tubería queda taponada interrumpiéndose la circulación de material aunque se aumente considerablemente la presión de fluido. Este fenómeno es poco conocido y la determinación exacta de la velocidad límite del aire v_L para una instalación dada es muy difícil, incluso en instalaciones de investigación convenientemente equipadas con instrumentos de medida. Debido a esta incertidumbre los valores de v_L se presentan en franjas o nubes de puntos experimentales, como se indica en las figuras 3 y 4, donde también podemos ver la influencia de que el tubo sea vertical, horizontal o se trate del tramo de aceleración. Existen varias correlaciones más o menos empíricas, como las de Konrath y Segler (ver figura 3), que son muy útiles para iniciar los cálculos.

Una vez conocida v_L podremos calcular, en primer lugar, el caudal de aire necesario mediante la expresión $Q_L = v_L \pi D^2 / 4$ y, a continuación, las pérdidas de carga, para lo cual disponemos de muchos métodos gráficos y analíticos. A continuación exponemos uno de los primeros, usado con más frecuencia.

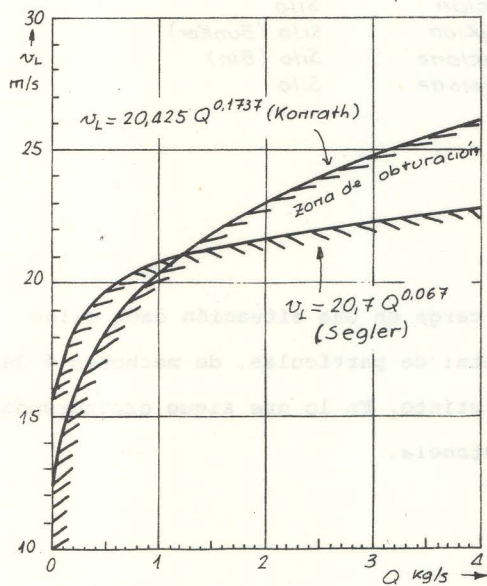


Fig. 3

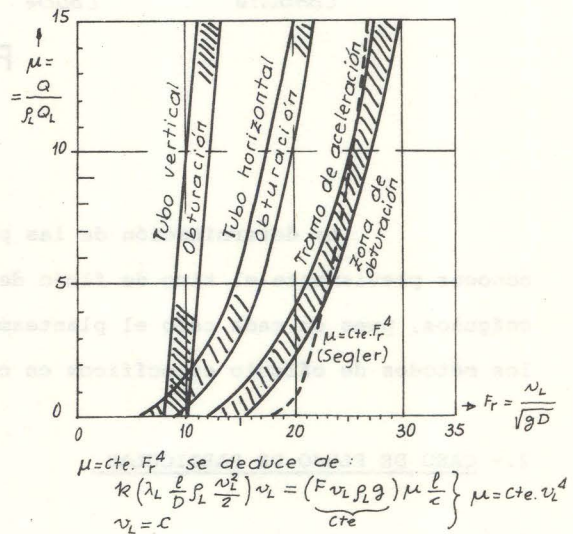


Fig. 4

2-1.- DETERMINACION DE LAS PERDIDAS DE CARGA MEDIANTE EL METODO GRAFICO

Supongamos una instalación como la de la figura 2. Según se ha indicado en la introducción para este tipo de flujo las pérdidas de carga se determinan calculando las respectivas al aire y al material, por separado, y sumándolas después para hallar la pérdida de carga total. Por tanto, en el caso indicado tendremos:

PERDIDAS DE CARGA PARA EL AIRE

- a) Pérdidas lineales a lo largo de los tramos l_0 , l_1 , l_2 y l_3 que se valoran mediante la fórmula de Darcy - Weisbach

$$\Delta P_{L1} = \lambda_L \frac{l}{D} \rho_L \frac{v_L^2}{2} ; \quad l = l_0 + l_1 + l_2 + l_3$$

El coeficiente λ_L es función del régimen del flujo (laminar o turbulento, es decir del número de Reynolds $Re = v_L D / \nu_L$) y de la rugosidad de la tubería;

- b) pérdidas singulares:

- en codos

$$\Delta P_{L2} = \zeta \rho_L \frac{v_L^2}{2}$$

en que el coeficiente $\zeta = 0,10 \div 0,18$

- en el ciclón o elemento separador:

$$\Delta P_{ci} = (\zeta_e + \zeta_i) \rho_L \frac{v_L^2}{2}$$

CICLONES

Los coeficientes ζ_e y ζ_i permiten valorar las pérdidas de carga en el cuerpo del ciclón y en el conducto de evacuación, respectivamente.

ζ_e depende del número de Reynolds Re_R y de la relación de velocidades u_i/v_i . La deducción y significado de Re_R puede verse en el cuadro adjunto, apartado de Parámetros adimensionales. La fuerza centrífuga que allí aparece es función del radio r_R y de la velocidad media u_m , magnitudes introducidas por Barth en su modelo matemático consistente en un cilindro de radio r_R y altura h , que sustituye al cuerpo del ciclón. De este modo la pérdida de carga en éste es equivalente a la que tiene lugar en una placa plana de dimensiones $(2 \pi r_R ; h)$ y bañado por una corriente cuya velocidad a la entrada vale $u_a \sqrt{r_a/r_i}$ y a la salida $u_i \sqrt{r_i/r_a}$. La fuerza de rozamiento del denominador es la correspondiente a la observada en capa límite de una placa plana (ver Schlichting p. 140).

El parámetro u_i/v_i es función de las dimensiones del ciclón y del coeficiente

de rozamiento λ . Su cálculo se lleva a cabo aplicando el teorema del momento de la cantidad de movimiento al modelo de Barth. Se obtienen dos expresiones, según se considere que circula aire solo ó aire y partículas. En este último caso supondremos que las partículas se deslizan formando una banda helicoidal de sección recta un semicírculo $F_s = \pi r_s^2 / 2$. W_s es la fuerza de impulsión, $g Q_s$ el peso de la banda, c su velocidad y R su resistencia al deslizamiento, proporcional a la fuerza centrífuga Z . $r_R / \cos^2 \delta$ es el radio de curvatura de la hélice. La masa Q_s se calcula aplicando la ecuación de continuidad (η es el grado de separación del ciclón).

La expresión adoptada para ζ_e es sencilla y no necesita más comentarios. En cambio, la de ζ_i requiere una aclaración; las magnitudes p_m y v_m se refieren a un punto aguas abajo en el conducto de evacuación y v_1^* es la velocidad del fluido en la capa límite de espesor Δr junto al conducto de evacuación. El fluido en la capa límite está sometido a la fuerza centrífuga μ_1^2 / r_i y circula con la velocidad v_1^* axial hacia abajo. Combinando adecuadamente las ecuaciones de energía y de continuidad ($2\pi r_i \Delta r v_1^* = \pi r_i^2 v_i$) obtenemos $\Delta r / r_i$, v_i^* y $P_1 - P_m - \frac{v_m^2}{2} \rho_L$. A partir de estas expresiones, la correspondiente ζ_i se deduce fácilmente.

El proceso de cálculo es iterativo y suele seguirse la marcha siguiente (Fig. 5):

5):

Se parte de los datos $r_a, r_i, r_e, b = (r_a - r_e)/2; h, l, Q_L, \rho_L$.

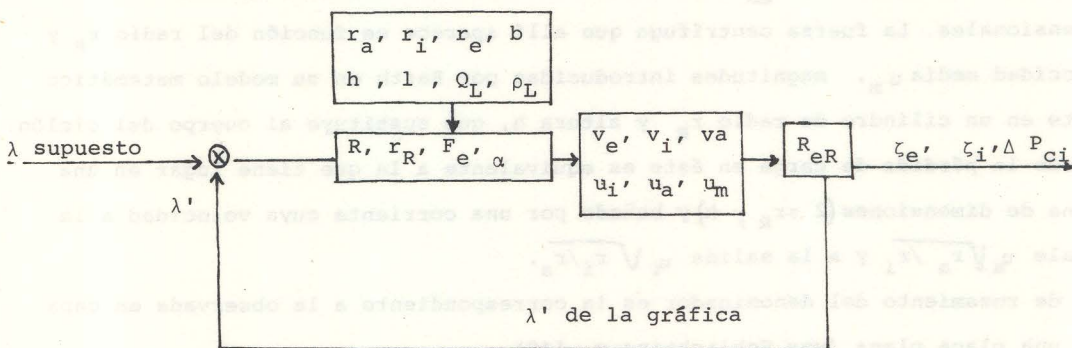
Se calculan $R = r_a / r_i; r_R = \sqrt{r_a r_i}; F_e; \alpha$;

Se supone un valor de λ

Se determinan $v_R, v_i, v_a, u_i, u_a, u_m, R_{eR}, \zeta_e, \zeta_i, \Delta P_{ci}$

Se calcula λ de la figura gráfica; si no coincide con el valor de λ supuesto se repite el cálculo con el λ hallado.

Esquemáticamente, estos cálculos se representan mediante el siguiente diagrama:



Como ilustración se incluyen los ejemplos de Barth y de Muschelknautz.

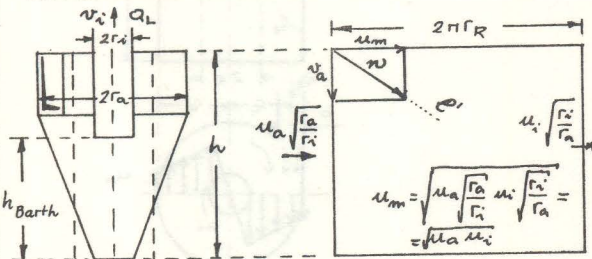
Pérdida de carga en ciclones

Parámetros adimensionales

$$a) \quad Re_R = \frac{\text{fuerza centrífuga}}{\text{fuerza de rozamiento}} \approx \frac{\rho r_R^3 b \frac{u_m^2}{r_R}}{\frac{2kb}{2} \sqrt{\frac{\nu l'}{\nu}} \mu \nu l'} \approx \frac{\rho r_R^2 \frac{u_m^2}{r_R}}{\mu \nu l'} = \frac{r_R v_a / \nu}{\frac{h}{r_R} [1 + (v_a / u_m)^2]} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{siendo} \\ v = \sqrt{v_a^2 + u_m^2} \\ l' = h \nu / v_a \end{array} \right.$$

b) u_i / v_i

aire solamente



$$M_a = \frac{Q_i \rho_i v_i r_i}{\alpha} = Q_i \rho_i v_a r_a$$

$$M_i = Q_i \rho_i u_i r_i$$

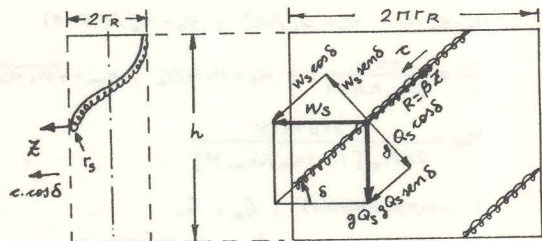
$$M_i = \int_0^{2\pi} r \tau dF = \int_0^{2\pi} r \rho_i \frac{u_m^2}{2} \lambda h r r d\varphi = \lambda_L \rho_i \frac{u_a u_i}{2} 2\pi r_R^2 h$$

$$M_i + M_L = M_a$$

$$1) \quad \frac{u_a r_a}{u_i r_i} = \frac{1}{1 - \lambda_L \frac{h}{r_i} \frac{u_i}{v_i}}$$

$$2) \quad \text{con } u_a r_a = \frac{v_i r_i}{\alpha} \quad v_e = Q_L / F_e = F_i / F_e \cdot v_i \quad \left. \vphantom{\frac{u_a r_a}{u_i r_i}} \right\} \frac{u_i}{v_i} = \frac{1}{\frac{F_e / F_i}{\alpha} + \lambda_L \frac{h}{r_i}}$$

aire y partículas



M_a y M_i como al lado

$$M_L = \lambda_L \rho_i \frac{u_a u_i}{2} 2\pi r_R^2 h$$

$$M_S = r_R W_s = r_R \zeta_S \rho_L \left(\frac{u_m - c \cos \delta}{2} \right)^2 h r_S$$

$$\left. \begin{array}{l} W_s \sin \delta - g Q_s \cos \delta = 0 \\ W_s \cos \delta + g Q_s \sin \delta = R \\ R = \beta Z \\ Z = \frac{Q_s c^2}{r_R \cos^2 \delta} \end{array} \right\} c = \sqrt{\frac{r_R}{\beta \cos^2 \delta}}$$

$$W_s = \zeta_S \rho_L \frac{u_m^2}{2} h r_S$$

$$u_m^2 = u_a u_i$$

$$Q_s = 2 \left(\pi r_i^2 v_i \rho_i \right) \frac{c}{2} = F_S \rho_L \zeta_S \beta$$

$$r_S = \sqrt{2 F_S / \pi}$$

$$\left. \begin{array}{l} r_S = \sqrt{2 \pi F_i \rho_i \frac{u_m^2}{2} h r_i} \\ r_S = \sqrt{2 \pi F_i \rho_i \frac{u_m^2}{2} h r_i} \end{array} \right\} r_S = \sqrt{2 \pi F_i \rho_i \frac{u_m^2}{2} h r_i} \quad \left(8 \beta \sin \delta \cos^2 \delta \right)^{1/4} \\ \lambda_S = \frac{\zeta_S}{2\pi} \left(8 \beta \sin \delta \cos^2 \delta \right)^{1/4} \quad \left. \vphantom{\lambda_S} \right\} \zeta_S = 0.25 \\ \lambda_S = 0.25$$

$$M_i + M_L + M_S = M_a$$

$$1) \quad \frac{u_a r_a}{u_i r_i} = \frac{1}{1 - \left[\lambda_L + \lambda_S \sqrt{2 \pi} \sqrt{\frac{F_i \rho_i}{\zeta_S \beta}} \left(\frac{r_i}{r_a} \right)^{5/8} \right] \frac{h}{r_i} \frac{u_i}{v_i}}$$

$$2) \quad \frac{u_i}{v_i} = \frac{1}{\frac{F_e / F_i}{\alpha} + \left[\lambda_L + \lambda_S \sqrt{2 \pi} \sqrt{\frac{F_i \rho_i}{\zeta_S \beta}} \left(\frac{r_i}{r_a} \right)^{5/8} \right] \frac{h}{r_i}}$$

Coeficientes

ζ_e

$$\Delta P_e = \frac{\rho_L}{2} \left[\left(u_a \sqrt{\frac{r_a}{r_i}} \right)^2 - \left(u_i \sqrt{\frac{r_i}{r_a}} \right)^2 \right]$$

$$\zeta_e = \frac{\Delta P_e}{\rho_L v_i^2 / 2} = \frac{r_i}{r_a} \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^2 \left[\frac{1}{\left(1 - \lambda_L \frac{h}{r_i} \frac{u_i}{v_i} \right)^2} - 1 \right];$$

substituyendo u_i / v_i por u_i / v_i ó u_i / v_i , según el caso, obtendremos ζ_e .
Con esta fórmula resultan valores de ζ_e bastante exactos

ζ_i

$$\Delta P_i = P_i + \frac{u_i^2}{2} \rho_L - \left(P_m + \frac{v_m^2}{2} \rho_L \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} P_i - \left(P_m + \frac{v_m^2}{2} \rho_L \right) = \frac{u_i^2}{r_i} \Delta r \rho_L \\ \frac{1}{2} \left[P_i - \left(P_m + \frac{v_m^2}{2} \rho_L \right) \right] = \frac{v_i^{*2}}{2} \rho_L \\ 2\pi r_i \Delta r v_i^* = \pi r_i^2 v_i \end{array} \right\} \frac{\Delta r}{r_i} = \left(\frac{v_i^*}{u_i} \right)^2 \\ v_i^* = \sqrt{\frac{v_i^2 u_i^2}{2}}$$

$$\zeta_i = \frac{\Delta P_i}{\rho_L v_i^2 / 2} = \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^2 + 2 \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^{4/3};$$

substituyendo u_i / v_i por u_i / v_i ó u_i / v_i , según el caso, obtendremos ζ_i .
Los valores de ζ_i resultantes son aproximados.

Pérdida de carga en ciclones

Gráficas

Proceso de cálculo de pérdidas de carga en ciclones.

Datos: $r_a, r_i, r_e, h, l, Q_L, \rho_L$

Cálculo de:

$$b = \frac{r_a - r_e}{2}; R = r_a / r_i; r_R = \sqrt{r_a r_i}; F_e = bl; \alpha; \lambda \text{ (supuesto)}$$

$$v_e = Q_L / F_e; v_i = Q_L / \pi r_i^2; v_a = v_i / (R^2 - R)$$

$$\frac{u_i}{v_i} = \frac{\pi r_i r_e}{F_e \alpha + h r_e \pi \lambda}; u_a = u_i r_i / r_a; u_m = \sqrt{u_a u_i}$$

$$Re_R = \frac{2 r_R v_a / \nu}{2 h / r_R [1 + (v_a / u_m)^2]}$$

λ (comprobado); ζ_e ; ζ_i

$$\Delta p_c = (\zeta_e + \zeta_i) \rho_L \frac{v_i^2}{2}$$

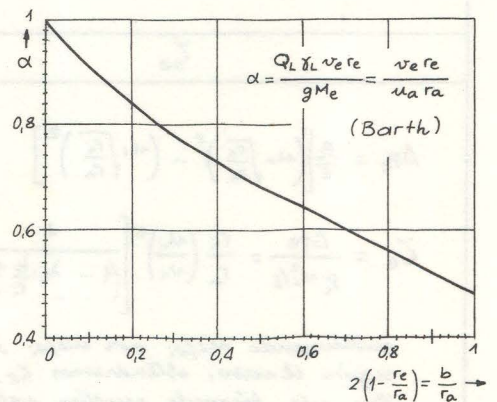
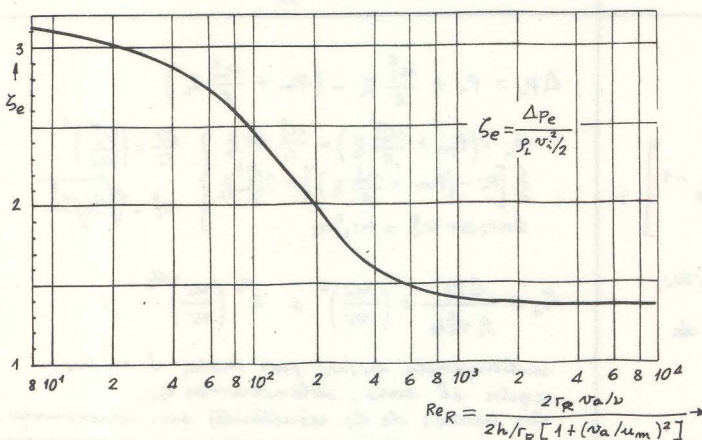
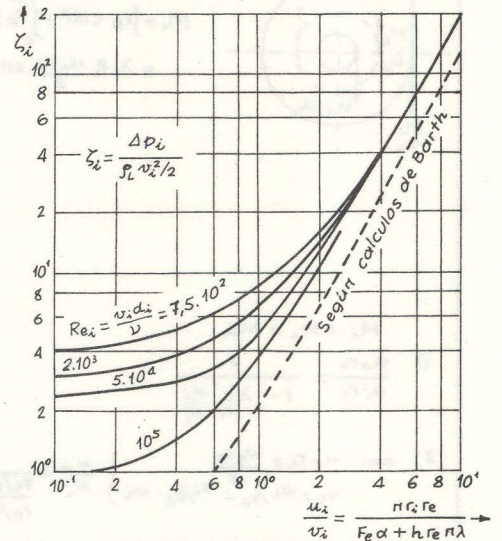
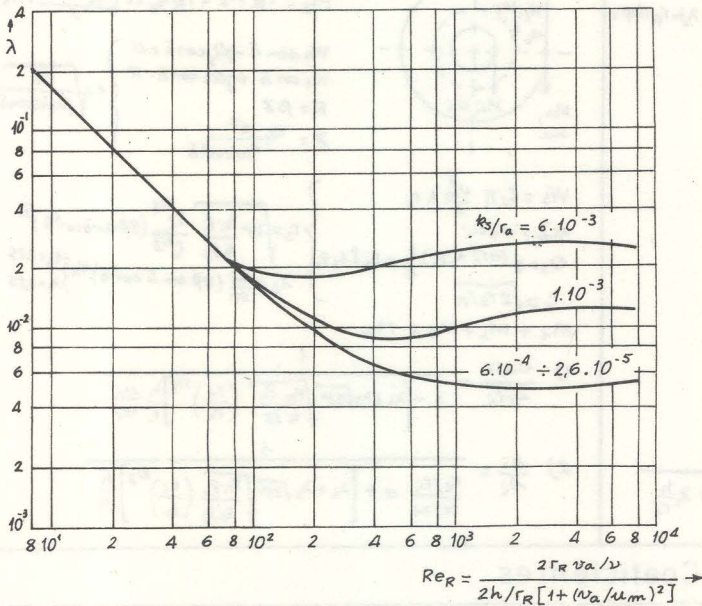
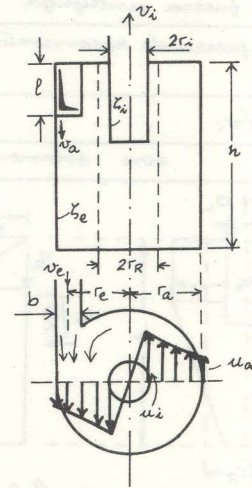


Fig. 5

$r_a = 0,6 \text{ m}$	$\lambda_L = 0,02$	$r_a = 0,525 \text{ m}$	$\mu = Q/Q_L \rho_L = 0,25$
$r_i = 0,2 \text{ m}$	$\alpha = 0,77$	$r_i = 0,175 \text{ m}$	$F_e/F_i = 0,9$
$r_e = 0,504 \text{ m}$	$\frac{u_{i0}}{v_i} = 2$	$r_e = 0,454 \text{ m}$	$\alpha = 0,75$
$b = 0,192 \text{ m}$		$b = 0,142 \text{ m}$	$\lambda_L = 0,005$
$h = 2 \text{ m}$	$v_i = 9,55 \text{ m/s}$	$h = 2,52 \text{ m}$	$\lambda_S = 0,25$
$Q_L = 1,2 \text{ m}^3/\text{s}$	$\zeta_e = 2,36$	$Q_L = 0,555 \text{ m}^3/\text{s}$	$\frac{u_i}{v_i} = 2,25 \left(\frac{u_{i0}}{v_i} = 3 \right)$
$\rho_L = 0,9 \text{ kg/m}^3$	$\zeta_i = 15,04$	$\rho_L = 1,2 \text{ kg/m}^3$	$v_i = 11,4 \text{ m/s}$
		$Q = 165,8 \text{ kg/s}$	$\eta = 0,997$
		$\rho_S = 1700 \text{ kg/m}^3$	$\zeta_e = 3,15$
		$\epsilon_S \rho_S = 600 \text{ kg/m}^3$	$\zeta_i = 11,6$

En el ejemplo de Muschelknautz el valor u_{i0}/v_i correspondiente al caso de que circule aire solamente vale $3 > 2,25$. Luego si tomamos u_{i0}/v_i en vez de u_i/v_i trabajamos con cierto coeficiente de seguridad, pues ζ_i aumenta con u_i/v_i crecientes.

c) FILTROS

Una vez separado en el ciclón el material transportado, el aire de impulsión debe limpiarse del polvillo residual con la eficacia que exijan las circunstancias. Para este fin, en los sistemas de transporte neumático se emplean preferentemente los filtros constituidos por mangas o colectores de tela, interponiendo una superficie apropiada en forma de saco a la corriente de aire con polvo en suspensión.

La pérdida de carga que experimenta el flujo de aire al atravesar el filtro es variable con el tiempo. Al atravesar el fluido la tela por primera vez la pérdida de carga vale, de acuerdo con la ecuación de Darcy,

$$\Delta p_{\beta} = \frac{\beta \mu}{F_1} \frac{dV}{dt} \left(\begin{array}{l} \frac{dV}{dt} \text{ caudal de aire} \\ \mu \text{ viscosidad dinámica} \end{array} \right)$$

Transcurrido un tiempo las partículas de polvo retenidas en el filtro se van acumulando hasta formar una capa (torta) de espesor h que ofrece una resistencia adicional.

$$\Delta p_{\alpha} = \frac{\alpha \mu h}{F_1} \frac{dV}{dt}$$

de modo que la pérdida de carga total será

$$\Delta p_f = \Delta p_{\alpha} + \Delta p_{\beta} = \frac{\mu}{F_1} (\alpha h + \beta) \frac{dV}{dt}$$

Para asegurar un proceso de filtrado eficiente es necesario sacudir de vez en cuando las telas, eliminando la capa de polvo adherida, con lo que disminuye Δp . El período de tiempo según el cual debe efectuarse esta operación lo determinaremos estudiando con detalle el fenómeno de deposición del polvo. A tal fin supongamos que c es la velocidad de sedimentación de las partículas de polvo. La ecuación de continuidad será:

$$(\lambda - \theta) F_1 \frac{dh}{dt} = \theta \left(\frac{dV}{dt} + cF_1 \right)$$

Eliminando dV/dt entre esta expresión y la de la pérdida de carga, obtenemos la ecuación diferencial

$$\frac{dh}{\frac{\theta}{\lambda - \theta} \left[\frac{\Delta P_f}{\mu (\alpha h + \beta)} + c \right]} = dt,$$

que integrada teniendo en cuenta las condiciones iniciales ($t = 0, h = 0$) nos da:

$$t = \frac{\lambda - \theta}{c \theta} \left[h - \frac{\Delta p}{c \alpha \mu} \ln \left(1 + \frac{c \alpha \mu h}{\Delta P_f + c \beta \mu} \right) \right]$$

De este modo, conociendo todos los demás valores, podremos saber cuánto valdrá t para un h determinado.

Para los filtros de la tela usados corrientemente Δp_f está comprendido ente $1.000 \div 1.500 \text{ N/m}^2$.

PERDIDAS DE CARGA PARA EL MATERIAL

a) Pérdidas lineales en los conductos horizontales l_0, l_1, l_3

$$\Delta P_h = \lambda_{zh} \frac{l_0 + l_1 + l_3}{D} \mu \rho_L \frac{v_L^2}{2};$$

id en los conductos verticales

$$\Delta P_v = \lambda_{zv} \frac{l_2}{D} \mu \rho_L \frac{v_L^2}{2}.$$

Los valores de λ_z se han representado en la figura 7.

b) Pérdidas singulares:

- en codos

$$\Delta P_c = \lambda_z \frac{l_c}{D} \mu \rho_L \frac{v_L^2}{2}$$

- en tramos de aceleración

$$\Delta P_a = \lambda_z \frac{l_a}{D} \mu \rho_L \frac{v_L^2}{2}$$

l_c y l_a son longitudes equivalentes del codo y del trayecto de aceleración respectivamente, y sus valores pueden obtenerse de la figura 6.

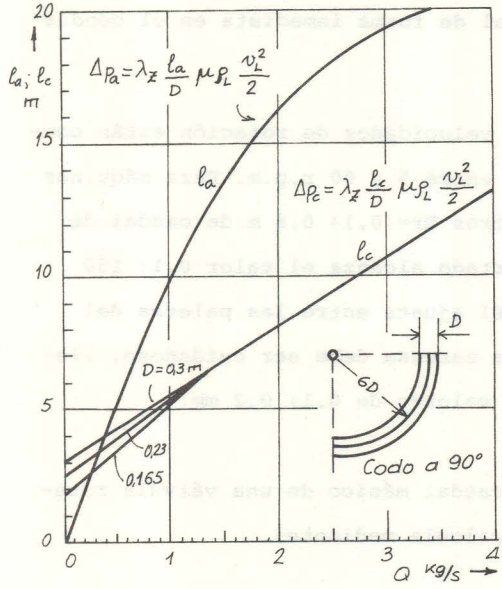


Fig. 6

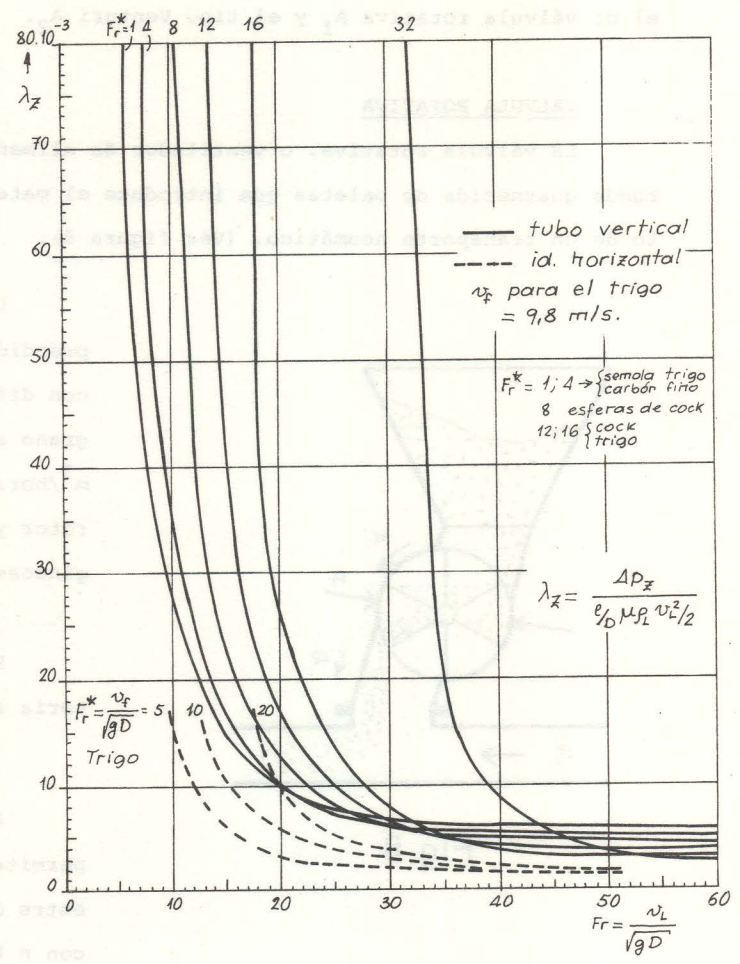


Fig. 7

A lo largo del conducto la pérdida de carga variará con la distancia de forma análoga a como se indica en la figura 2. La pérdida de carga total será la suma de todas las anteriores.

$$\Delta P_{ges} = \rho_L \frac{v_L^2}{2} \left(\lambda_L \frac{1}{D} + \zeta + \zeta_e + \zeta_i + \lambda_{zh} \frac{1_0 + 1_1 + 1_3}{D} \mu + \lambda_{zv} \frac{1_2}{D} \mu + \lambda_z \frac{1_c}{D} \mu + \lambda_z \frac{1_a}{D} \mu \right) + \Delta P_f$$

La potencia disipada debido a estas pérdidas de carga será la potencia necesaria que debe suministrar el ventilador, que vale:

$$N = Q_L P_{ges}$$

2.2.- ALIMENTADORES

Consideraremos ahora la influencia que tiene en la disipación de energía el

elemento de alimentación. En la figura 2 se han representado las dos más empleados: el de válvula rotativa A_1 y el tipo Venturi A_2 .

VALVULA ROTATIVA

La válvula rotativa, o ventilador de alimentación de material, consiste en una rueda guarnecida de paletas que introduce el material de forma inmediata en el conducto de un transporte neumático. (Ver figura 8).

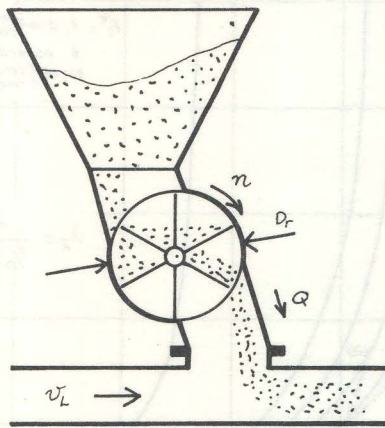


Fig. 8

Las velocidades de rotación están comprendidas entre 5 y 60 r.p.m. Para máquinas con diámetros $D_r = 0,1 \div 0,6$ m de caudal de grano aportado alcanza el valor $0,1 \div 150$ $m^3/hora$. El ajuste entre las paletas del rotor y la carcasa debe ser cuidadoso, llegando a valores de $0,1 \div 0,2$ mm.

El caudal másico de una válvula rotatoria se calcula mediante:

$$Q = f n V \rho$$

La dependencia de Q respecto a n nos permite regular Q variando n . La relación entre Q y n no es lineal sino que Q aumenta con n hasta alcanzar un valor máximo, lo

cual es debido a que el efecto de n viene contrarrestado por el grado de llenado f , característica que disminuye al aumentar n . El coeficiente f depende del comportamiento del material a la fluencia, de la forma constructiva de la válvula rotativa y del aire de fuga, que se crea a través de las juntas entre paletas y carcasa en sentido contrario al del giro del rotor. Por tanto, si seguimos aumentando n más allá del valor correspondiente al $Q_{m\acute{a}x}$, el caudal másico descenderá.

El rendimiento de las válvulas rotatorias es casi siempre la unidad.

Estos dispositivos se aplican para el manejo de productos blandos como cereales y legumbres. Los materiales abrasivos y fuertemente adhesivos, gruesos o con tendencia a plastificar dañan seriamente el rotor y causan innumerables problemas.

VENTURI

En la figura 9 se ha representado un alimentador tipo Venturi. Su funcionamiento es semejante al de un bomba de chorro: el aire (o fluido) de impulsión que llega

por a_1 arrastra el material y una parte, menor o mayor, de aire que desciende por a_2 .

Las velocidades del aire en a_1 pueden llegar a valer $150 \div 400$ m/s. El aire de a_1 , el de a_2 y el material se mezclan y aceleran en la zona b y se frenan en la zona c o difusor donde se regulariza el flujo.

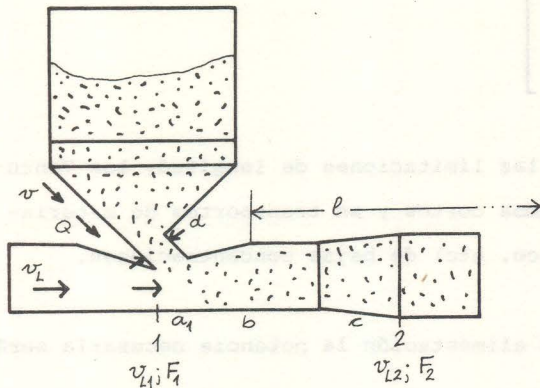


Fig. 9

El caudal másico suministrado por un inyector Venturi es igual a

$$Q = \rho \frac{\pi}{4} d^2 v \approx \rho \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{g d} \approx \rho \frac{\pi}{4} c_3 \sqrt{g(d-k)^5}$$

en que c_3 y k son características del material (Ver Wieghardt).

La regulación de Q se efectúa en este caso modificando d .

Se ha observado que la depresión en a_2 prácticamente no influye en el caudal másico Q , pues las presiones no se transmiten a través de una masa de material en grano debido a la formación de arcos y a las fuerzas de fricción entre los granos.

El rendimiento de los inyectores es pequeño. Según Segler el rendimiento de un Venturi con dimensiones óptimas que aspire aire solamente se calcula mediante la fórmula:

$$\eta = \frac{\rho F_{a2} \frac{v_{a2}^2}{2}}{\rho F_1 \frac{v_{L1}^2}{2}} = 2 \cdot \frac{F_1}{F_2} - \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2$$

El mismo Venturi empleado para introducir grano en el conducto tiene el rendimiento

$$\eta_s = \frac{\frac{v_{L2}^2}{2} \left(1 + \frac{\lambda l}{D} \right)}{\frac{v_{L1}^2}{2}} = \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^{0,21 + 0,418 Q} ; v_{L2} F_2 = v_{L1} F_1$$

cuyo valor está comprendido entre $0,40 \div 0,60$. De la última expresión deducimos la

longitud l máxima que puede tener una instalación.

$$l = \frac{D}{\lambda} \left[\frac{1}{\left(\frac{F_1}{F_2} \right)^{1,79} - 0,418 Q} - 1 \right]$$

Debido a los bajos rendimientos y a las limitaciones de longitud, los Venturis se usan solamente para conducciones de tramos cortos y en transportes de materiales granulados (cereales, partículas de plástico, etc) de bajas concentraciones.

Teniendo en cuenta el dispositivo de alimentación la potencia necesaria será igual a :

$$N = \frac{Q_L \Delta P_{ges}}{\eta_s}$$

EJEMPLOS

En página aparte se han reunido de forma comparativa tres ejemplos de distintos autores, que permitirán familiarizarnos con el proceso de cálculo de instalaciones de transporte neumático.

Todos los enunciados contienen los mismos términos. Sin embargo, existen ciertas peculiaridades en el modo de valorar las pérdidas de carga: unos autores calculan por separado las pérdidas debidas al aire de las propias del producto; otros las engloban en una misma expresión, etc. Donde existe a primera vista mayor disparidad de opinión es en el cálculo de las pérdidas en conductos horizontales y verticales; en ningún caso se aplica a cada tipo de conducto, horizontal o vertical, las expresión correspondiente indicada anteriormente:

$$\Delta P_h = \lambda_{zh} \frac{l_h}{D} \mu \rho_L \frac{v_L^2}{2}$$

y
$$\Delta P_v = \lambda_{zv} \frac{l_v}{D} \mu \rho_L \frac{v_L^2}{2}$$

sino que se simplifica el proceso considerando ya sea una reducción de tubo vertical a tubo horizontal equivalente $l_h = 2 l_v$ (primer ejemplo), ya $l_h = l_v$ (segundo ejemplo), o una expresión distinta en cada situación (tercer ejemplo).

A pesar de esta discrepancia todos los métodos aquí empleados tienen validez y están justificados, pues la aplicación de lo expuesto en este texto exige conocer los números de Fraude Fr y Fr*, lo cual no siempre es posible por ignorarse el valor de

Ejemplos

<p>Friedrich A. Gumbertow Föden & Heben 16 (1966) p. 232-</p> <p>Datos: $Q = 2 \text{ kg/s}$ (Trigo) $D = 0,2 \text{ m}$ $v_{lim} = Q \cdot 4007 = 20,7$; $v_L = v_{lim} + 4,5 \text{ m/s}$ $\rho_L = 1,23 \text{ kg/m}^3$ Tubo horizontal: $12+30 \text{ m}$ id vertical: 8 m codos: 2 Numero de aceleración: 1 $\lambda_{mat} = \lambda_2 \mu = 0,03$ $\Delta P_{resaca} = 588 \text{ N/m}^2$ $\lambda_{ventilador} = 0,75$</p> <p>Calcular: 1) Q_L; μ; λ_2 2) ΔP_{gas} 3) N_{th}</p>	<p>Frank J. Gerchow Chemical Engineering 17 (1975) p. 79</p> <p>Datos: $Q = 0,13 \text{ kg/s}$ (no especifica tipo de material) $D = 0,1016 \text{ m}$ $v_{lim} = 25,14 \text{ m/s}$ (Tubos) $\rho_L = 1,23 \text{ kg/m}^3$ Tubo horizontal + vertical = $18,29 \text{ m}$ codos: 1 Numero de aceleración: 1 $\lambda_{mat} = \lambda_2 \mu$ (a determinar) $\Delta P_{resaca} = 197,84 + 746,76 \text{ N/m}^2$ $\Delta P_{frot} = 995,68 + 1493,52 \text{ N/m}^2$</p> <p>Calcular: 1) Q_L; μ; λ_2 2) ΔP_{gas}; comprobar valor de λ_2 3) N_{th}</p>	<p>Varios Autores: EEA "Transporte neumático de materiales pulverulentos" Editorial Labor 1974; p. 151</p> <p>Datos: $Q = 2,778 \text{ kg/s}$ (polvo fluidizable) D desconocida $v_{lim} = 15,2 \text{ m/s}$ (Tubos) $\rho_L \mu = 34,7 \text{ kg/m}^3$ (de amperes $\rho_L = 1,23 \text{ kg/m}^3$) Tubo horizontal: $16,5 \text{ m}$ id vertical: $12,2 \text{ m}$ codos: 2 Numero de aceleración: 1 $\lambda_{mat} = \lambda_2 \mu = 0,03$ $\Delta P_{resaca} = 228,92 + 1617,98 \text{ N/m}^2$ (Tubos) $\Delta P_{frot} = 490 + 4140 \text{ N/m}^2$ (Tubos)</p> <p>Calcular: 1) D; Q_L; μ; λ_2 2) ΔP_{gas} 3) N_{th}</p>
<p>1) $v_{lim} = 20,7 \cdot Q^{0,067} = 20,7 \cdot 2^{0,067} = 21,7 \text{ m/s}$ $v_L = 21,7 + 4,5 = 23,2 \text{ m/s}$ $Q_L = \frac{\pi D^2 v_L}{4} = \frac{\pi \cdot 0,2^2 \cdot 23,2}{4} = 0,728 \text{ m}^3/\text{s}$ $\mu = \frac{Q}{\rho_L Q_L} = \frac{2 \text{ kg/s}}{1,23 \cdot 0,728} = 2,2335$ $F_f = \frac{v_L}{\sqrt{gD}} = \frac{23,2}{\sqrt{9,8 \cdot 0,2}} = 16,57$; $F_f^k = \frac{v_L}{\sqrt{gD}} = \frac{9,8}{\sqrt{9,8 \cdot 0,2}} = 7$ $\lambda_{2k} = \frac{F_f^k}{\sqrt{gD}} = \frac{7}{\sqrt{9,8 \cdot 0,2}} = 1,23$</p>	<p>1) $Q_L = \frac{\pi D^2 v_L}{4} = \frac{\pi \cdot 0,1016^2 \cdot 25,14}{4} = 0,21 \text{ m}^3/\text{s}$ $\mu = \frac{Q}{\rho_L Q_L} = \frac{0,13}{1,23 \cdot 0,21} = 0,503$ $F_f = \frac{v_L}{\sqrt{gD}} = \frac{25,14}{\sqrt{9,8 \cdot 0,1016}} = 25,45$; $F_f^k = \frac{v_L}{\sqrt{gD}} = \frac{9,8}{\sqrt{9,8 \cdot 0,1016}} = 9,82$ $\lambda_{2k} = 0,0035$ $\lambda_{2v} = 0,008$</p>	<p>1) $D = \sqrt{\frac{Q}{\frac{\pi}{4} \rho_L \mu v_L}} = \sqrt{\frac{2,7778}{\frac{\pi}{4} \cdot 34,7 \cdot 15,2}} = 0,0819 \rightarrow 0,082 \text{ m}$ $Q_L = \frac{\pi D^2 v_L}{4} = \frac{\pi \cdot 0,082^2 \cdot 15,2}{4} = 0,0803 \text{ m}^3/\text{s}$ $\mu = \frac{Q}{\rho_L Q_L} = \frac{34,7}{1,23 \cdot 0,0803} = 28,2114$ $F_f = \frac{v_L}{\sqrt{gD}} = \frac{15,2}{\sqrt{9,8 \cdot 0,082}} = 16,956 \rightarrow \left. \begin{matrix} \lambda_{2k} = 0,009 \\ \lambda_{2v} = 0,022 \end{matrix} \right\}$</p>
<p>2) Conducto: $\Delta P_{R+V} = \frac{Q_L \lambda_2 \mu \rho_L v_L^2}{D} = 58 \cdot 0,0134 \cdot 2,2335 \cdot 1,23 \cdot \frac{23,2^2}{0,2} = 2873,03 \text{ N/m}^2$ 2 Codos: $\Delta P_C = 2 \cdot \frac{Q_L \lambda_2 \mu \rho_L v_L^2}{D} = 2 \cdot \frac{8 \cdot 0,0134 \cdot 2,2335 \cdot 1,23 \cdot \frac{23,2^2}{0,2}}{2} = 792,56 \text{ N/m}^2$ Aceleración: $\Delta P_A = \frac{Q_L \lambda_2 \mu \rho_L v_L^2}{D} = \frac{1,23 \cdot \frac{23,2^2}{0,2}}{2} = 802,467 \text{ N/m}^2$ Aire: $\Delta P_E = \rho_L \frac{v_L^2}{2} = 1,23 \cdot \frac{23,2^2}{2} = 331,0176 \text{ N/m}^2$ Absorben: 588 N/m^2 $\Delta P_{gas} = \Delta P_{R+V} + \Delta P_C + \Delta P_A + \Delta P_E + \Delta P_{resaca} = 5387,07 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ $N_{th} = \frac{Q_L \Delta P_{gas}}{\rho_L} = 5229 \text{ W}$</p>	<p>2) Conducto: $N_{th+V} = g(v_L + v) Q = 9,8(25,14 + 140,95) = 140,95 \text{ N} = 140,95 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 0,1016 = 14,3 \text{ N}$ $\Delta P_{HV} = \frac{N_{th+V}}{Q_L} = \frac{14,3}{0,21} = 68,1 \text{ N/m}^2$ Codo: $N_C = Q \frac{v_L^2}{2} = 0,13 \cdot \frac{25,14^2}{2} = 413,25 \text{ N} = 413,25 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 0,1016 = 41,9 \text{ N}$ $\Delta P_C = \frac{N_C}{Q_L} = \frac{41,9}{0,21} = 199,52 \text{ N/m}^2$ Aceleración: $N_A = Q \frac{v_L^2}{2} = 0,13 \cdot \frac{25,14^2}{2} = 413,25 \text{ N} = 413,25 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 0,1016 = 41,9 \text{ N}$ $\Delta P_A = \frac{N_A}{Q_L} = \frac{41,9}{0,21} = 199,52 \text{ N/m}^2$ Aire: $N_E = Q \frac{v_L^2}{2} = 0,13 \cdot \frac{25,14^2}{2} = 413,25 \text{ N} = 413,25 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 0,1016 = 41,9 \text{ N}$ $\Delta P_E = \frac{N_E}{Q_L} = \frac{41,9}{0,21} = 199,52 \text{ N/m}^2$ Codos: $N_C = 2 \cdot \frac{Q \frac{v_L^2}{2}}{Q_L} = 2 \cdot \frac{413,25}{0,21} = 3949,6 \text{ N/m}^2$ Absorben: $N_{abs} = 500 \text{ N/m}^2$ Fillos: 1000 N/m^2 $\Delta P_{gas} = \Delta P_{HV} + \Delta P_C + \Delta P_A + \Delta P_E + \Delta P_{resaca} + 41,916 + 500 + 1000 = 2948,4 \text{ N/m}^2$ $N_{th} = Q_L \Delta P_{gas} = 619,16 \text{ W}$</p>	<p>2) Conducto: $\frac{N_{th+V}}{Q_L} = g \frac{v_L + v}{v_L} = 9,8 \frac{15,2 + 165}{15,2} = 23,30 \text{ W} \rightarrow$ $\Delta P_{HV} = \frac{N_{th+V}}{Q_L} = \frac{23,30}{0,0819} = 284,86 \text{ N/m}^2$ Codo: $N_C = Q \frac{v_L^2}{2} = 2,778 \cdot \frac{15,2^2}{2} = 318,25 \text{ N} = 318,25 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 0,0819 = 26,07 \text{ N}$ $\Delta P_C = \frac{N_C}{Q_L} = \frac{26,07}{0,0819} = 318,25 \text{ N/m}^2$ Aceleración: $N_A = Q \frac{v_L^2}{2} = 2,778 \cdot \frac{15,2^2}{2} = 318,25 \text{ N} = 318,25 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 0,0819 = 26,07 \text{ N}$ $\Delta P_A = \frac{N_A}{Q_L} = \frac{26,07}{0,0819} = 318,25 \text{ N/m}^2$ Aire: $N_E = Q \frac{v_L^2}{2} = 2,778 \cdot \frac{15,2^2}{2} = 318,25 \text{ N} = 318,25 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 0,0819 = 26,07 \text{ N}$ $\Delta P_E = \frac{N_E}{Q_L} = \frac{26,07}{0,0819} = 318,25 \text{ N/m}^2$ Absorben: $N_{abs} = 264,65 \text{ N/m}^2$ $\Delta P_{gas} = \Delta P_{HV} + \Delta P_C + \Delta P_A + \Delta P_E + \Delta P_{resaca} + 26,07 + 264,65 + 36 \text{ N/m}^2 = 2121,47 \text{ W}$</p>

la velocidad de caída v_f de las partículas a transportar. En consecuencia, han aparecido en la literatura técnica esta multitud de sistemas de cálculo mediante los cuales se pueden llegar más o menos a los mismos resultados.

3.- FLUJO DE MECHONES

3.1.- Pérdidas en conductos horizontales.

El flujo de mechones se presenta cuando la concentración de las partículas (finas de por sí) sobrepasan la llamada carga límite.

$$\mu_G = \frac{B}{\psi^{3,5}} \frac{v_L^3}{gDv_f} \quad ; \quad B = 10^{-3}$$

Es decir, en el momento en que $\mu > \mu_G$ empiezan a depositarse parte de ellas sobre el fondo del conducto constituyendo los "mechones". La expresión para μ_G se deduce a partir de la relación

$$\left[\begin{array}{l} \text{Potencia necesaria} \\ \text{para mantener a las} \\ \text{partículas en suspensión} \end{array} \right] = \text{cte.} \left[\begin{array}{l} \text{Potencia del} \\ \text{fluido de} \\ \text{impulsión} \end{array} \right]$$

$$N_Q = \text{cte.} \quad N_L$$

Teniendo en cuenta que

$$N_Q = G_F v_f$$

$$N_L = \Delta P_L \psi^2 F v_{FL} = \lambda_L \frac{1}{D_F} \cdot \frac{\rho_L}{2} v_{FL}^2 \psi^2 F v_{FL}$$

$$\left. \begin{array}{l} G_F = \psi F l \rho_s g \\ \mu_G = \frac{c_F F \rho_s}{v_{FL} F L} \end{array} \right\} G_F = \psi F v_{FL} \rho_L \mu_G \frac{1}{c_F} g$$

$$\frac{D_F}{D} = \sqrt{\frac{\psi F}{F}} = \sqrt{\psi}$$

Y que $c_F \approx v_{FL}$, sustituyendo y englobando todas las constantes en B, obtenemos la expresión propuesta para μ_G .

Una vez formados los mechones, la pérdida de carga a lo largo de un conducto horizontal es la suma de tres efectos:

- la debida al aire (o fluido) impulsor
- la debida al material en suspensión
- la debida al mechón que se desliza sobre el fondo del tubo.

a) Si $\mu > 20$ pueden despreciarse los dos primeros frente al tercero que es el decisivo. En este caso se calcula la pérdida de carga aplicando la ecuación de equilibrio de fuerzas al volumen de control de la figura 10 de la forma siguiente:

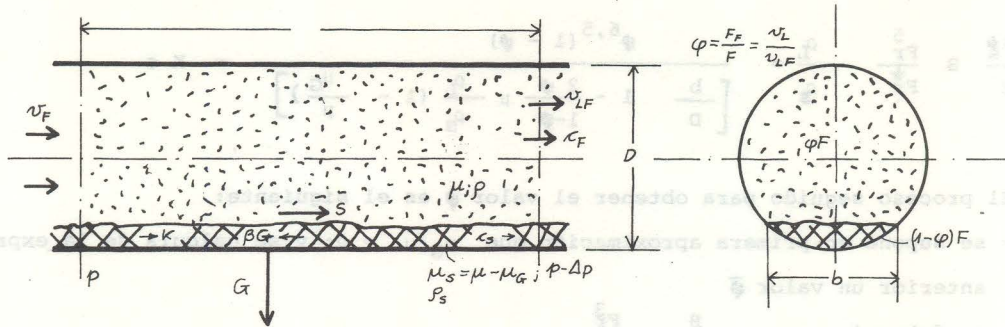


Fig. 10

$$\begin{aligned}
 K + S &= \beta G \\
 K &= \Delta P (1 - \varphi) F \\
 S &= \Delta P \varphi F \\
 G &= (1 - \varphi) F l \rho_s g
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} K + S \\ K \\ S \\ G \end{aligned}} \right\}
 \begin{aligned}
 \Delta P (1 - \varphi) F + \Delta P \varphi F &= (1 - \varphi) F l \rho_s g \beta \\
 \Delta P &= (1 - \varphi) l \rho_s g \beta
 \end{aligned}$$

β es un coeficiente de deslizamiento de valor $\beta = 0,5 \div 0,8$.

El coeficiente de reducción de sección φ depende de las concentraciones μ , μ_G , de las densidades ρ_L , ρ_s y de los números de Fraude Fr y Fr^* . A continuación se incluye un procedimiento sencillo para obtener su expresión. Se basa en admitir que la fuerza sobre el material sedimentado $S = \Delta P \varphi F$ es igual también a $S = [(1 - \varphi) F \rho_s g \beta] \varphi F$ si sustituimos Δp ; y a $S = b l \tau_s$, si la identificamos con una fuerza cortante.

La tensión de cortadura τ_s se hace igual a:

$$\tau_s = \lambda_s^* \mu_G \rho_L v_{LF} (v_{LF} - 2 c_s)$$

De la ecuación de continuidad

$$\varphi F v_{LF} \rho_L (\mu - \mu_G) = (1 - \varphi) F c_s \rho_s$$

se deduce la relación c_s/v_{LF} , que sustituida en c_s nos da

$$c_s = \lambda_s^* \mu_G \rho_L v_{LF}^2 \left[1 - \frac{2 \varphi}{1 - \varphi} \mu \frac{\rho_L}{\rho_s} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu} \right) \right]$$

Introduciendo estas expresiones en la fórmula anterior

$$S = \Delta P \varphi F = b l \tau_s$$

llegamos fácilmente a la relación:

$$\frac{4}{\pi} \frac{\lambda_z^*}{\beta} B \frac{Fr^5}{Fr^*} \frac{\rho_L}{\rho_S} = \frac{\psi^{6,5} (1 - \psi)}{\left[\frac{b}{D} \left(1 - \frac{2\psi}{1-\psi} \mu \frac{\rho_L}{\rho_S} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu} \right) \right) \right]} = K_s$$

El proceso seguido para obtener el valor ψ es el siguiente:

- se supone en primera aproximación que $\mu_G/\mu = 0$; y se calcula de la expresión anterior un valor $\bar{\psi}$
- se determina $\mu_G = \frac{B}{\bar{\psi}^{3,5}} \frac{Fr^3}{Fr^*}$
- aceptando $\mu_G/\mu =$ (función de $\bar{\psi}$) se obtiene otro valor de ψ .

Si $\bar{\psi} = \psi$, se da el cálculo por terminado. De no ser así, se seguiría iterando hasta que la aproximación fuera aceptable. Todas estas operaciones se facilitan si se dispone de una representación gráfica de $K_s = K_s(\psi)$. (Ver Muschelknautz (1969) y (1974))

Si $\mu \leq 20$, es importante la pérdida de carga debida al rozamiento de las partículas en suspensión con las paredes. En este caso $\psi \approx 1$ y la ecuación de equilibrio será:

$$\Delta p_F = G_F \frac{c_F^2}{2g} \frac{\lambda_z^*}{D} + G_S \beta$$

sustituyendo estas expresiones

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta p = \lambda_z \mu \frac{v_L^2}{2} \rho_L \frac{1}{D} \\ G_F = Q \frac{1}{c_F} g ; \quad \frac{Q}{v_L F \rho_L} = \mu_G ; \quad (Q = c_F F \rho_F) \\ G_S = Q_S \frac{1}{c_S} g ; \quad \frac{Q_S}{v_L F \rho_L} = \mu_S ; \quad (Q_S = c_S F_S \rho_S) \end{array} \right.$$

obtenemos, sucesivamente:

$$\lambda_z \mu \frac{v_L^2}{2} \rho_L \frac{1}{D} F = Q \frac{1}{c_F} g \frac{c_F^2}{2g} \frac{\lambda_z^*}{D} + Q_S \frac{1}{c_S} g \beta$$

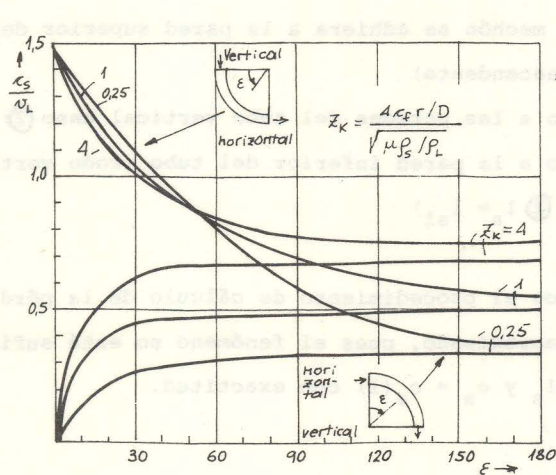
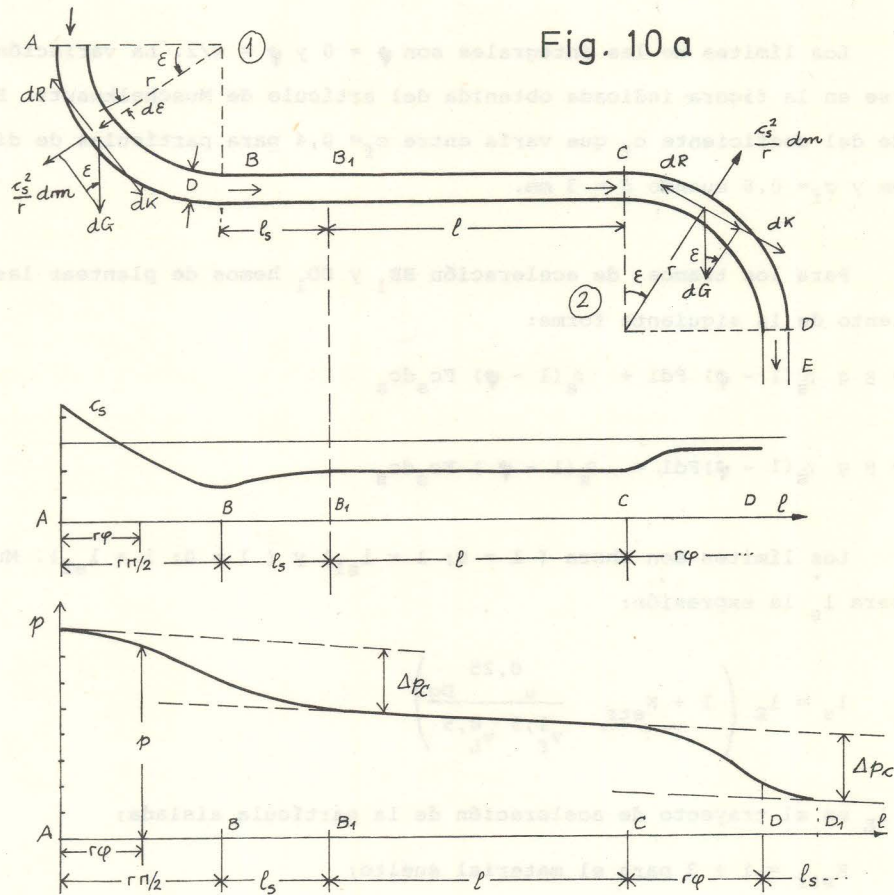
$$\lambda_z \mu \frac{v_L}{2} \frac{1}{D} (v_L F \rho_L) = Q \frac{1}{2D} \lambda_z^* c_F + Q_S \frac{1}{c_S} g \beta$$

$$\lambda_z = \frac{\mu_G}{\mu} \frac{c_F}{v_L} \lambda_z^* + \frac{\mu_S}{\mu} \frac{2\beta}{\left(\frac{c_S}{v_L} \right) Fr^2}$$

λ_z es el nuevo coeficiente de rozamiento; λ_z^* es el coeficiente representado en la figura 7.

3.2.- PERDIDAS EN CODOS Y TRAMOS DE ACELERACION

Suponiendo $\mu > 20$, la influencia del codo se manifiesta de dos formas: como un frenado del mechón (en la figura 10a corresponde al caso ①) y como una aceleración del mismo (caso ② de la figura 10a)



Caso ①:
 $Fdp + dG \cos \epsilon =$
 $= \beta \left(\frac{\kappa_s^2}{r} dm + dG \cos \epsilon \right) +$
 $+ \frac{d\kappa_s}{dt} dm$

Caso ②:
 $Fdp + dG \sin \epsilon =$
 $= \beta \left(-\frac{\kappa_s^2}{r} dm + dG \cos \epsilon \right) +$
 $+ \frac{d\kappa_s}{dt} dm$

siendo: $r d\epsilon = \kappa_s$
 $dm = \beta_s (1-\phi) F r d\epsilon$
 $dG = g dm$
 $\frac{dm}{dt} = \beta_s (1-\phi) F r \frac{d\phi}{dt} =$
 $= \beta_s (1-\phi) F \kappa_s$

La variación de presión en los tramos AB y CD se obtiene integrando las correspondientes ecuaciones de movimiento, que de acuerdo con el esquema de la figura 10a, tendrán las expresiones siguientes:

$$\textcircled{1} F dp + \cos \epsilon g \rho_s (1 - \psi) Fr d \epsilon = \beta \left[\frac{c_s^2}{r} \rho_s (1 - \psi) Fr d \epsilon + \operatorname{sen} \epsilon g \rho_s (1 - \psi) Fr d \epsilon \right] + \rho_s (1 - \psi) F c_s d c_s$$

$$\textcircled{2} F dp + \operatorname{sen} \epsilon g \rho_s (1 - \psi) Fr d \epsilon = \beta \left[-\frac{c_s^2}{r} \rho_s (1 - \psi) Fr d \epsilon + \cos \epsilon g \rho_s (1 - \psi) Fr d \epsilon \right] + \rho_s (1 - \psi) F c_s d c_s$$

Los límites de las integrales son $\psi = 0$ y $\psi = \pi/2$. La variación $c_s = c_s(\epsilon)$ puede verse en la figura indicada obtenida del artículo de Muschelknautz. El parámetro Z_K depende del coeficiente c_f que varía entre $c_f = 0,4$ para partículas de diámetro $d = 100$ mm y $c_f = 0,8$ cuando $d = 3$ mm.

Para los tramos de aceleración BB_1 y DD_1 hemos de plantear las ecuaciones de movimiento de la siguiente forma:

$$\textcircled{1} F dp = \beta g \rho_s (1 - \psi) F dl + \rho_s (1 - \psi) F c_s d c_s$$

$$\textcircled{2} F dp + \beta g \rho_s (1 - \psi) F dl = \rho_s (1 - \psi) F c_s d c_s$$

Los límites son ahora ($l = 0; l = l_{s1}$) y ($l = 0; l = l_{s2}$). Muschelknautz propone para l_s la expresión:

$$l_s = l_E \left(1 + K_{str} \frac{0,25}{\frac{\mu}{v_f^{1,5}} \frac{Dg}{v_L^{0,5}}} \right)$$

en donde l_E es el trayecto de aceleración de la partícula aislada;

$K_{str} = 1 \div 3$ para el material suelto;

5 para el mechón

10 caso de que el mechón se adhiriera a la pared superior del tubo (codo vertical-horizontal ascendente)

15 mechón adherido a las paredes del tubo vertical caso $\textcircled{2}$: $l_s = l_{s2}$.

30 mechón adherido a la pared inferior del tubo (codo vertical-horizontal descendente caso $\textcircled{1}$ $l_s = l_{s1}$)

Hay que aclarar que el procedimiento de cálculo de la pérdida de carga en los tramos de aceleración es aproximado, pues el fenómeno no está suficientemente estudiado como para determinar l_s y $c_s = c_s(l)$ con exactitud.

4.- FLUJO DE COAGULOS

Ya se indicó en la introducción, que mediante este tipo de flujo se consigue impulsar a cortas distancias y pequeñas velocidades (hasta $1 \div 3$ m/s) una columna continua de material formando conglomerados, paquetes o coágulos. Al final de la conducción la columna de material se prensa ligeramente mediante una válvula de compuerta de modo que no quede interrumpida. La concentración de los coágulos alcanza valores de hasta:

$$\mu = \frac{2 \rho_s}{L} = 30 \div 100$$

Existe un método sencillo de cálculo de las pérdidas de carga basado en la proporcionalidad entre estas y el rozamiento debido al peso del conglomerado; en conjunto se supone que dependen del peso del coágulo. Teniendo en cuenta estas ideas consideremos a la figura 11.

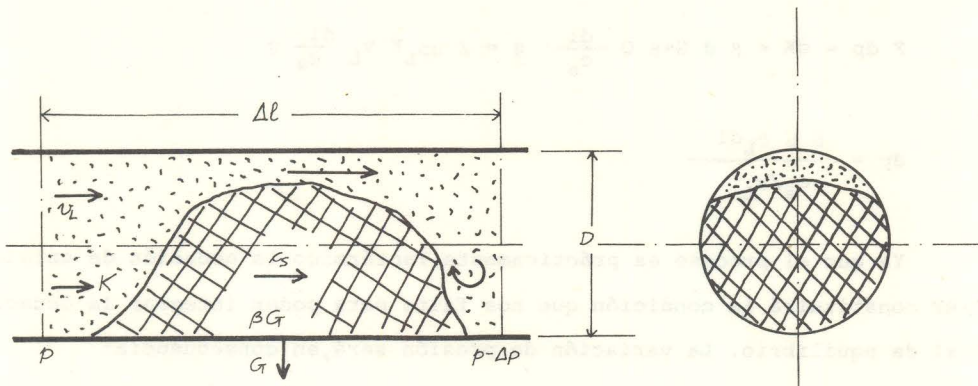


Fig.11

La longitud del coágulo oscila entre $1 \div 2$ veces el diámetro del conducto. Se trata evidentemente de una distancia finita pero en nuestro caso podemos suponer es un infinitésimo d_1 , si el conglomerado actúa (pesa y roza) uniformemente sobre toda su longitud Δl

Debido a la elevada concentración del coágulo emplearemos la misma hipótesis simplificativa que ya utilizamos al estudiar el flujo de mechones: que la velocidad del coágulo es constante y que las tensiones de rozamiento con la pared del conducto experimentadas por el aire y las partículas en suspensión son despreciables, con lo cual el equilibrio dinámico de un "paquete" cualquiera (ver figura 11) quedará establecido gracias a las siguientes fuerzas:

- fuerza debida a la presión $F_{\Delta p}$
- resistencia del aire K que es igual a la anterior

- rozamiento del paquete con la pared del conducto, proporcional a su peso y de expresión βG
- peso del paquete G igual al producto del flujo másico Q por $g \Delta l/c_s$, es decir:

$$\left. \begin{aligned} G &= F \Delta l \rho_s g \\ \mu &= \frac{c_s F \rho_s}{v_L F \rho_L} \end{aligned} \right\} G = Q \frac{\Delta l}{c_s} g = \mu \rho_L F v_L \frac{\Delta l}{c_s} g$$

En la determinación de Q se ha tenido en cuenta que la fracción de partículas que andan flotando en el aire de impulsión y no forman parte del coágulo es muy pequeña.

Con tales supuestos las ecuaciones de equilibrio serán:

$$F dp = dK = \beta dG = \beta Q \frac{dl}{c_s} g = \beta \mu \rho_L F v_L \frac{dl}{c_s} g$$

o sea:

$$dp = \frac{\beta \mu \rho_L dl}{c_s/v_L}$$

Ya que el proceso es prácticamente isotérmico la ecuación de estado $\rho_L = P/RT$ constituirá la condición que nos falta para poder integrar la ecuación diferencial de equilibrio. La variación de presión será, en consecuencia:

$$p_1 = p_2 e^{[\beta \mu (l_2 - l_1)/(RTC)]};$$

en donde p_1 es la presión inicial, p_2 la final y $C = c_s/v_L = cte.$

Los valores de C están comprendidos entre 0,1 y 1, y dependen fundamentalmente de la concentración μ y del factor $\mu \rho_L/\rho_s$. Por ejemplo para la arcilla se han obtenido los resultados experimentales siguientes:

μ	$\mu \rho_L/\rho_s$	$C = c_s/v_L$
300	0,48	0,650
100	0,16	0,316
30	0,048	0,195

Según indica Muschelknautz en sus artículos, el método de cálculo simplificado descrito anteriormente se introdujo en 1.965 para estudiar el fenómeno del flujo de coágulos. Esta teoría, sencilla y clara, ha dado tan buenos resultados que se ha aplicado también al flujo normal de partículas finas con elevada concentración. Sin embargo, es deficiente en el sentido de que no tiene en cuenta la finura del material

a transportar, lo cual ha sido motivo de nuevas investigaciones.

CONCLUSION

Los procedimientos expuestos en este trabajo para determinar las pérdidas de carga en conductos de transporte neumático son los más sencillos y por tanto los de uso más extendido. Se ha omitido la justificación de muchas fórmulas que puede consultarse en los diversos artículos incluidos en la bibliografía. Con ello se ha pretendido dar una visión general de la problemática de las pérdidas de carga en los diversos tipos de flujo que pueden presentarse y de los recursos analíticos de que se dispone para resolverla. Todos estos métodos tienden a sistematizarse y presentar una expresión única, aunque en algunos casos persisten todavía singularidades por ahora no absorbidas.

BIBLIOGRAFIA

- Walther Barth _____ Diseño de ciclones
"Berechnung und Auslegung von _____
Zykhonabscheidern auf Grund neuerer _____
Untersuchungen" _____
Brennstoff-Wärme-Kraft 8 (1956) 1 p. 1-9
- E.E.U.A. (Engineering Equipment Users _____ Descripción de los sistemas de transpor-
Association) _____ te y sus componentes. Un ejemplo numéri-
"Transporte neumático de materiales _____
pulverulentos" _____
Editorial Labor, S.A. 1974.
- Frank K. Gerchow _____ Descripción de todos los componentes de
"How to select a pneumatic-conveying _____
system" _____ una instalación. Con ejemplos numéricos.
Chemical engineering 17 (1975) 2, p. 72-86.
- Friedrich A. Günther _____ Introducción histórica, clasificación de
"Die pneumatische Förderung-Dünnstrom- und _____
Dichtstromförderanlagen und ihre Abwandlun- _____
gen" _____ lo.
Fördern & Heben 16 (1966) p. 229-243
- W. Konrath _____ Estudio del fenómeno de la obturación
"Druckverluste in Förderrohren pneumatis- _____
cher Förderanlagen" _____
Fördern & Heben 10 (1960) 8 p. 609-613.
- Werner Müller _____ Descripción de todos los tipos de flujo.
"Zur Berechnung von pneumatischen Förde- _____
ranlagen mit niedrigem Betriebsdruck _____
(Flugförderanlagen)" _____ Estudio de codos y bifurcaciones.
Fördern & Heben 17 (1967) 8 p. 442-448
- E. Muschelknautz, W. Krambrock _____ Cálculo de pérdidas de carga en el flujo
"Vereinfachte Berchnung horizontaler _____
pneumatischer Förderleitungen bei hoher _____
Grutbeladung mit feinkörnigen Produkten" _____ de mechones y en el de coágulos.
Chemie Ing- Techn. 41 (1969) 6 p. 1164-1172

- E. Muschelknautz, H. Wojahn _____ Descripción y estudio de todos los tipos de flujo. Estudio de la válvula rotatoria.
 "Auslegung pneumatischer Förderanlagen"
 Chemie - Ing. - Techn. 46 (1974) 6 p. 223-235.
- E. Muschelknautz, K. Brunner _____ Diseño de ciclones. Ejemplo numérico.
 "Untersuchungen an Zyklonen"
 Chemie- Ing.- Technik 39 (1967) 9-10 p. 531-538.
- E. Muschelknautz, W. Krambrock _____ Diseño de ciclones.
 "Aerodynamische Beiwerte des Zyklonabscheiders aufgrund neuer und verbesserter Messungen"
 Chemie- Ing.- Technik 42 (1970) 5 p. 247-255.
- G. Segler _____ Cálculo gráfico de pérdidas de carga. Estudio de Venturis y ventiladores.
 "Konstruktion landwirtschaftlicher Fördergebläse"
 Landtechnische Forschung 1 (1951) 1, p. 2-10
- R. Straumann _____ Estudio de filtros.
 "Einfluß der Sedimentation auf die Filtration"
 Chemie- Ing.- Technik 35 (1963) 10 p. 715-720.
- Eugenio Valencia _____ Justificación de las ecuaciones de la pérdida de carga en tramos rectos y curvos en planos verticales y horizontales.
 "Transferencia de momento"
 Curso sobre transporte neumático p.39-49.
 E.T.S.I.I. Barcelona 1979
- K. Wieghardt _____ Estudio del flujo de arena en tolvas. Aplicación a Venturis.
 "Über einige Versuche an Strömung in Sand"
 Ing- Arch. 20 (1952) p. 109-115.

NOMENCLATURA

Letra	Descripción	Símbolo	Referencia
B	Constante	$\Delta P_f, \Delta P_\alpha, \Delta P_\beta$	Id. en el filtro
b	Ancho entrada ciclón	ΔP_h	Id. del material, tubo horizontal
c_3	Coefficiente tolva	ΔP_v	Id. tubo vertical
c_f	Coefficiente	ΔP_a	Id. tramos de aceleración
c_s	Velocidad del mechón o del coágulo.	ΔP	Id. total
c	Velocidad de sedimentación de las partículas de polvo	ΔP_z	Id. material
$C = c_s/v_L$		Q	Caudal másico
D	Diámetro del tubo	$Q_L; dV/dt$	Caudal de aire
d	Diámetro del cuello de la tolva	R, r_R, r_a, r_i, r_e	Radio de ciclón
F	Sección tubo	R, R_{eR}	Números de Reynolds
F_1	Sección filtro	S	Fuerza sobre material sedimentado
F_{a2}	Sección cuello de la tolva		
Fr, Fr^*	Número de Fraude	u_a, u_e, u_m	Velocidades en el ciclón
$F_e = bl$	(Ciclón)	v_L	Velocidad del aire
f	Grado de llenado de la válvula rotatoria	v_{a2}	Id. en el cuello de la tolva (aire)
$F_s = \pi r_s^2 / 2$		v_a, v_e, v_i	Velocidad en el ciclón
G	Peso	v	Volumen de la válvula rotatoria
h	Altura del ciclón; espesor capa de polvo	v	Velocidad de vaciado de la tolva
k	Coefficiente tolva		
K	Fuerza sobre sección recta del mechón	v_1^*	Velocidad en la capa límite
K_{srt}	Constante	v_f	Velocidad de caída del material
Δl	Incremento de longitud; Longitud del coágulo	α	Coefficiente ciclón; coeficiente de resistencia de la capa de polvo (torta)
l_s	Tramo de aceleración mechón	β	Coefficiente de rozamiento; coeficiente de resistencia del medio filtrante (tela)
l_E	Tramo partícula aislada	δ	Angulo
l_0, l_1, l_2	Longitudes	ϵ_s, ρ_s	Densidad material en la franja (ciclón)
l_C	Longitud equivalente a los codos	ϵ	Angulo
l_a	Longitud al tramo aceleración	$\zeta_i, \zeta_e, \zeta, \zeta_s$	Coefficientes pérdida de carga
l_h	Tramo horizontal	η, η_s	Rendimientos, Grado de separación
l_v	Tramo vertical	θ	Porcentaje volumétrico de polvo en el aire (en suspensión)
M_i, M_L, M_s, M_a	Momento de la cantidad de movimiento	λ_{zv}	Coefficiente pérdida de carga en tubo vertical
N	Potencia	λ_{zh}	Coefficiente pérdida de carga en tubo horizontal
n	Número de vueltas		
ΔP	Variación de presión		
ΔP_{L1}	Pérdida de carga lineal		
ΔP_{L2}	Id. en codos		
ΔP_{ci}	Id. en el ciclón		

λ_L Coeficiente pérdida de carga aire

$$\lambda_S = \frac{\zeta_S}{2 \pi} (8 \beta \text{sen } \delta \cdot \cos^2 \delta)^{1/4}$$

λ Porcentaje volumétrico de polvo en la capa (torta)

μ Concentración; viscosidad dinámica

μ_G Id. límite

ν_L Viscosidad cinemática aire

ρ_L Densidad del aire

ρ Id. producto

ρ_S Id. mechón

ϕ Relación superficie ocupada por material y por mechón