Generalidades sobre la distribución del gas de alumbrado y comparación con la distribución del agua potable

POR

ALFREDO DÉLANO FRÉDERICK

CAPITULO III

ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS FÓRMULAS DE ESCURRIMIENTO DEL GAS DE ALUMBRADO Y DEL AGUA EN CAÑERIAS

Definiciones

En un gas, la densidad es proporcional a la presión, cuando no cambia la temperatura (ley de Mariotte).

Como todo escurrimiento se establece en virtud de una diferencia de presiones, resulta que la densidad de un gas que escurre por una cañería, varía de un punto a otro y, por consiguiente, el gasto también varía (en razón inversa de la densidad).

Si las diferencias de presiones son pequeñas, las variaciones de densidad también lo son, y en tal caso, se puede considerar constante la densidad a lo largo de la cañería; de aquí que en gas de alumbrado, como ya hemos dicho más atrás, se distinguen dos clases de conductos, a saber:

a) CAÑERÍAS DE GAS A BAJA PRESIÓN.—Son aquellas en que la presión absoluta mayor que la atmosférica, tiene variaciones que no pasan de 1,6%. En tal caso, se considera con suficiente aproximación que la densidad es constante de un punto a otro de la cañería (ver más detalles en pág. 160).

b) CAÑERÍAS DE GAS A ALTA PRESIÓN. Son aquellas entre cuyos extremos se mantienen diferencias de presiones considerables durante el escurrimiento, lo que hace que la densidad varíe sensiblemente a lo largo de la cañería. (*)

(*) En las obras que tratan de distribución de gas se definen las designaciones «baja presión» y «alta presión» desde otro punto de vista las que preceden, sinembargo, son más apropiadas para el estudio teórico del escurrimiento.

Generalidades

Cuando escurre un fluido por una cañería, parte de su energía se pierde a causa de los rozamientos que se producen entre las moléculas y contra las paredes del conducto.

En hidráulica, se admite que la fuerza retardatriz debida a los rozamientos cumple las siguientes condiciones:

1.—*Es independiente de la presión*;
2.—*Es proporcional al área de contacto del líquido con las paredes*;
3.—*Es proporcional al cuadrado de la velocidad media u.*

Aceptando estas hipótesis se llega a la expresión:

$$1) \qquad J = \frac{\Psi}{\Omega} \cdot b_1 \cdot u^2$$

en que: J = pérdida de carga por unidad de longitud de cañería.

$\frac{\Psi}{\Omega}$ = radio medio. (Ψ = perímetro mojado, Ω = sección);

u = velocidad media;

b_1 = coeficiente que depende de la naturaleza del líquido y de las paredes del conducto.

En el caso de una cañería de diámetro D se tiene:

$$\frac{\Psi}{\Omega} = \frac{\pi D}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{4}{D}$$

Luego, tratándose de cañerías, la expresión 1) toma la forma:

$$2) \qquad J = \frac{4}{D} \cdot b_1 u^2$$

Si se realizaran rigurosamente las hipótesis enunciadas, b_1 debería ser independiente de la velocidad y de la sección. Pero estas hipótesis se verifican sólo aproximadamente: en realidad, los rozamientos están sometidos a leyes más complejas no bien conocidas. Por otra parte, estos mismos rozamientos hacen que los filetes líquidos vecinos a las paredes se muevan con menor velocidad que los más distantes de ellas, de modo que el movimiento es complicado y no puede quedar bien definido por la velocidad media que únicamente interviene en las fórmulas 1) y 2).

Por estas razones, resulta que, *el coeficiente b_1 determinado experimentalmente, depende, no solamente de la naturaleza de las paredes y del liquido, sino también es función de la velocidad* u *y de la sección, o sea, del diámetro D si se trata de cañerías.* Diversos investigadores han tratado de determinar b_1 en función de u i D y han llegado a diferentes expresiones empíricas que conducen a otras tantas fórmulas de escurrimiento.

En el caso de los gases se aceptan las mismas hipótesis que en hidráulica y, por consiguiente, se llega a la misma ecuación (1) de escurrimiento, pero con esta salvedad: en los gases interviene un nuevo factor, *la densidad.*

En efecto, en hidráulica se trata siempre del escurrimiento del mismo líquido, el agua, de modo que no interesa averiguar el efecto de la densidad sobre los rozamientos, (*). Por el contrario, en los gases la densidad cambia no solamente al pasar de un gas a otro, sino que varía con la presión en un mismo gas. Tratándose de gases, además de las tres hipótesis mencionadas más atrás, se acepta que:

4.—*Los rozamientos son proporcionales a la densidad.*

No sabemos el origen de esta última hipótesis que sirve de base a todas las fórmulas de escurrimiento de gas de alumbrado: las obras que hemos consultado se limitan a enunciarla. Equivale a suponer que la fuerza retardatriz debida a los rozamientos es proporcional al número y masa de las móleculas en movimiento. En todo caso, parece que esta hipótesis da resultados aceptables. Agregándola a las 3 hipótesis que sirvieron para establecer la ecuación (2), ésta toma la forma:

$$3) \qquad J = \frac{4}{D} \, b_1' \, . \, \rho \, . \, u^2$$

Como J es función de ρ resulta que *en una cañeria de gas J varía de un punto a otro.*

Susbtituyendo en 2) el coeficiente b_1 por otro b_1' ligado al anterior por la relación:

$$4) \qquad b_1 = \rho \, b_1'$$

la fórmula (2) se identifica con (3). Se deduce, pues, que *la fórmula (3) es aplicable tanto al escurrimiento del gas como al del agua.*

Ahora bien, comparando los valores numéricos de b_1' que corresponden al movimiento del agua y al del gas de alumbrado, resulta que *esos valores coinciden a lo menos para determinadas condiciones y dentro de ciertos límites de velocidad y diámetro.* Al fin del capítulo haremos esta comparación.

(*) En el caso de cañerías con agua de mar o aguas sucias en alcantarillados las densidades cambian poco y las diferencias de rozamiento se deben, principalmente, a la mayor viscosidad.

Flamant (Hydraulique—pág. 558—edic. de 1909), dice que M. Stockalper había llegado a la conclusión de que *el mismo coeficiente b_1' sirve para los dos casos.* M. Stockalper basaba esta afirmación en el resultado de sus experiencias sobre el escurrimiento del aire comprimido (efectuadas en el túnel de San Gotardo) y tomaba para b_1' la fórmula de Darcy con los coeficientes correspondientes al escurrimiento del agua en cañerías nuevas de fierro fundido. Apoyándose en experiencias posteriores, el investigador inglés Unwin encontró que *los coeficientes de Darcy, aplicados a cañerías de gas, daban un valor exagerado de b_1'.*

Estimamos que no se puede admitir sin comprobación ninguna de estas dos conclusiones que por ser opuestas resultan menos aceptables. En realidad el estado actual de los conocimientos referentes al escurrimiento de los gases no permite establecer con precisión hasta qué grado se identifican los coeficientes correspondientes al agua y al gas de alumbrado. Por otra parte, los múltiples factores—muchos de ellos imposibles de precisar—que influyen sobre el movimiento de los fluidos en cañerías, hacen ilusoria una comparación rigurosa. Así, hay circunstancias que intervienen en un caso y no existen en el otro, como, por ejemplo, el grado de pureza del agua al que no corresponde ninguna condición equivalente en el gas. Otro factor muy importante y difícil de apreciar es el estado de rugosidad de las paredes que también se presenta en forma diferente en cañerías de gas y de agua.

En todo caso, como el asunto es interesante, incluiremos al fin del capítulo un cuadro comparativo de los valores de b_1' correspondientes a cañerías de agua, gas a baja presión y gas a alta presión, que demostrará la semejanza de estos coeficientes.

RESUMEN: *La fórmula*

$$3) \quad J = \frac{4}{D} b_1' \cdot \rho \cdot u^2$$

es aplicable al escurrimiento del agua y del gas en cañerías. En ambos casos el coeficiente b_1' conserva sensiblemente los mismos valores, a lo menos para determinadas condiciones y dentro de ciertos límites de velocidad y diámetro.

Observación sobre las unidades

Las unidades usuales en los cálculos de cañerías de gas son diferentes de las que se emplean en el caso de cañerías de agua. Por ejemplo, tratándose de gas de alumbrado, los gastos se expresan en m³ / hora, en tanto que en cañerías de agua se habla de lts/seg., etc.

Para comparar las fórmulas referentes a cañerías de agua y de gas es preciso tomar en todos los casos las mismas unidades, por lo que en los párrafos que siguen adoptaremos las que a continuación se expresan:

J = pérdida de carga en *metros de agua* por *metro de cañería*
l = longitud de la cañería en *metros*
H = $J.l$ = pérdida de carga total en *metros de agua*
D = diámetro en *metros*
u = velocidad media en *m/seg.*
Q = gastos en *m^3/seg.*
ρ = densidad absoluta en *kg/m^3*
s = densidad relativa del gas respecto del aire.

I.—Fórmulas de cañerías de agua

No es del caso catalogar aquí las numerosas fórmulas que se han propuesto para cañerías de agua: a este respecto se encuentran datos muy completos en algunas obras de hidráulica (por ej. en A. Flamant Hydraulique—, R. Weyrauch-Hydraulisches Rechuen - , etc.)

Nos limitaremos, pues, a dar las referencias necesarias para poder establecer la comparación entre las fórmulas de cañerías de agua y cañerías de gas.

A todas las ecuaciones de cañerías de agua se les puede dar la forma general (2) ya indicada en la página 153

$$2) \qquad J = \frac{4}{D} b_1 . u^2$$

Las diferentes fórmulas se distinguen por el valor que en ellas se atribuye al coeficiente b_1: así, en algunas b_1 varía con el estado de las paredes y con el diámetro (fórmula de Darcy), en otras con la velocidad (fórmula de Weisbach), en otras b_1 depende de estos tres factores (fórmula de Flamant). Finalmente, algunos investigadores, hacen intervenir la temperatura además de u y D (fórmula de Hagen, fórmula de Lang).

Parece que hasta hoy día, la fórmula más rigurosa y que mayor crédito merece es la de H. Lang. Este investigador aprovechó para establecer su fórmula los resultados de todas las experiencias conocidas anteriores a 1910, a las que agregó alrededor de 300 efectuadas por él.

La fórmula de Lang presenta sobre las demás la ventaja de ser válida para *velocidades hasta 53 m/seg.* Esta circunstancia es importante para el estudio comparativo del escurrimiento del agua y del gas, por cuanto en el caso de cañerías de gas a alta presión se emplean grandes velocidades.

FÓRMULA DE LANG.—Lang, distingue dos casos:

1.º) *$D \leq 0{,}05$ m.*—Para diámetros pequeños, inferiores a 5 cm. existe una *velocidad crítica* a partir de la cual cambian las leyes del escurrimiento con velocidades inferiores, éste se verifica según filetes paralelos a las paredes y para velocidades superiores a la crítica se producen movimientos irregulares y los filetes líquidos no son rectos. La velocidad crítica v_k varía en razón inversa del diámetro y depende también de la temperatura. (Por ejemplo, para D = 25 mm. y 20° C la velocidad crítica vale v_k =0,08 m/seg).

Lang propone una fórmula para $v < v_k$ y otra para $v > v_k$.

No insistiremos sobre el caso $D < 0,05$ m. por cuanto rara vez se ofrece calcular cañerías de diámetros tan pequeños.

2.°) *$D \gtreqless 0,05$ m.*—En este caso el escurrimiento no puede verificarse según filetes paralelos, de modo que la velocidad crítica vale cero.

En tales condiciones Lang propone para b_1 la expresión: (*)

$$b_1 = \frac{1}{8g}\left(a + \frac{2b}{\sqrt{Du}}\right)$$

Las constantes *a* y *b* que figuran en esta expresión, tienen el siguiente significado: 2 *b* depende de la fluidez y temperatura del agua. Para t = 15° C se debe tomar

$$2b = 0,0019$$

a varía con el estado de las paredes interiores de la cañería. Para cañería nueva o en muy buen estado, con muy pequeñas asperezas en la superficie y en las uniones (buenos cañones de fierro fundido de bastante longitud, cuidadosamente centrados en las uniones) se debe tomar

$$a = 0,020$$

Este valor es aplicable tratándose de agua filtrada; en caso contrario es válido solamente para el primer tiempo de uso.

En caso de cañería bastante usada (incrustada), o que presente fuertes asperidades, se debe considerar para los cálculos el diámetro útil D_1 libre de depósitos o asperidades, o lo que es prácticamente equivalente, conservar los datos (D, u) correspondientes al diámetro nominal D. pero multiplicando el coeficiente b_1 por $\left(\frac{D}{D_1}\right)^5$

En resumen, para las condiciones corrientes la fórmula de Lang se escribe:

$$5) \qquad b_1 = \left(\frac{D}{D_1}\right)^5 \cdot \frac{1}{78,5}\left(0,02 + \frac{0,0019}{\sqrt{D \cdot u}}\right)$$

---

*) En realidad, Lang no emplea el coeficiente b_1 sino otro λ ligado a b_1 por la relación $b_1 = \frac{\lambda}{8g}$ Preferimos conservar la notación francesa que es la más conocida).

En caso de tubos limpios interiormente: $\frac{D}{D_1} = 1$.

A fin de apreciar la diferencia de valores de b_1 que resulta aplicando la fórmula de Lang y otra, como ser, la de Flamant—ambas son muy usadas—hemos formado el cuadro que sigue:

CUADRO I

Velocidades	Diámetro	Valores de b_1 para cañerías en muy buen estado		Diferencias
		Lang $b_1 = \frac{1}{78,5}\left(0,02 + \frac{0,0019}{\sqrt{D.u}}\right)$	Flamant $b_1 = \frac{0,00074}{4\sqrt[4]{D u}}$	
1 m/seg	0,05 m.	0,000 363	0,000 391	8 %
	0,15	0,000 317	0,000 297	7
	0,50	0,000 289	0,000 220	31
	1,50	0,000 275	0,000 167	65
20 m/seg	0,05	0,000 279	0,000 185	51
	0,15	0,000 269	0,000 140	92
	0,50	0,000 269	0,000 104	153

Como se ve, las dos fórmulas dan resultados parecidos para diámetros y velocidades moderadas. En cambio, para diámetros importantes, los valores de b_1 que se obtienen aplicando la fórmula de Flamant, son bajos. Masoni, había notado este hecho ya en 1893 y recomendaba elevar el coeficiente de Flamant en 50 % en caso de grandes diámetros (Ver Flamant—Hydraulique—pág. 153, nota—edición de 1909).

Se observa que en el caso de u = 20 m seg., las dos fórmulas dan resultados absolutamente diferentes. Esta falta de concordancia se explica, puesto que la fórmula de Flamant es válida solamente para velocidades inferiores a 4 m/seg. (*) que son las usuales en cañerías de agua potable.

En general, se nota que la fórmula de Lang da valores de b_1 mucho más uniformes que la fórmula de Flamant.

Para el objeto que nos proponemos, es decir, para comparar la formula de Lang con las de cañerías de gas, debemos reducirla a la forma general (3) expuesta en la pág 154

$$3)\ J = \frac{4}{D}\, b_1' \,.\, \rho \,.\, u^2$$

El coeficiente b_1' que aquí figura está ligado con b_1 por la relación (4) de la pág 154

$$4)\ b_1' = \frac{b_1}{\rho}$$

Para el agua potable a temperatura corriente puede tomarse

$$\rho = 1\,000 \text{ kg m}^3$$

Por consiguiente:

$$b_1' = \frac{b_1}{1\,000}$$

valor que, introducido en la fórmula de Lang—ecuación (5),—permite escribirla en la forma:

$$6)\ b_1' = \left(\frac{D}{D_1}\right)^5 . \frac{10^{-3}}{78,5} \left(0,02 + \frac{0,0019}{\sqrt{D\,u}}\right)$$

Aceptaremos, pues, esta fórmula de cañerías de agua para la comparación con las fórmulas de cañerías de gas.

(*) Las tablas de Flamant están calculadas para velocidades hasta 3 m seg. Sin embargo. en una nota del texto de Flamant (pág. 153—edición de 1909)—dice el autor que, según las experiencias de Vidal y Kauffmann la fórmula propuesta por él coincide con las observaciones para velocidades hasta 4 m seg. En caso de velocidades mayores, la fórmula no concuerda con las experiencias.

II.—Fórmulas de cañerías de gas a baja presión

La ecuación fundamental de escurrimiento en cañerías, establecida en la pág. 154 se escribe:

$$3) \qquad J = \frac{4}{D} b_1 \ \rho \cdot u^2$$

En el caso de *cañerías de gas a baja presión* (ver definición, pág. 152) la densidad ρ se puede considerar invariable de un punto a otro. De aquí resulta según (3) que la pérdida de carga unitaria J es constante a lo largo de la cañería siempre que D lo sea. Esto permite reemplazar J por la razón $\frac{H}{l}$, si se designa por l la longitud de la cañeria y por H la pérdida de carga disponible entre los extremos. Con estas notaciones la ecuación (3) toma la forma:

$$3_a) \quad \frac{H}{l} = \frac{4}{D} b_1' \cdot \rho \cdot u^2$$

Conviene expresar la densidad absoluta ρ del gas en función de su densidad relativa s. Aceptando como unidad la densidad del aire, s vale por definición:

$$s = \frac{\rho}{\rho_{\text{aire}}}$$

$$7) \quad \rho = \rho_{\text{aire}} \cdot s$$

Antes de seguir adelante haremos una observación referente a la densidad.

Se acostumbra determinar la densidad relativa s *considerando el gas y el aire a igualdad de presión y temperatura.* De aquí resulta, de acuerdo con las leyes de Mariotte y Gay-Lussac, que *el valor de s permanece constante para cualquier presión y temperatura* (*). Se deduce que, para calcular mediante la relación (7) la densidad absoluta ρ del gas que escurre en una cañería, *se debe introducir en (7) el valor de la densidad absoluta del aire* - ρ_{aire} — *que corresponde a la presión y temperatura del gas cuyo escurrimiento se considera.*

Precisadas las cantidades que intervienen en (7), podemos aprovechar esa relación que permite escribir la ecuación (3a) bajo la forma:

$$3\,b) \qquad \frac{H}{l} = \frac{4}{D} \cdot b_1' \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot s \cdot u^2$$

(*) En efecto, los cambios de presión y temperatura afectan proporcionalmente a las densidades absolutas del gas y del aire (ρ y ρ_{aire}). Por consiguiente, el cuociente $\rho : \rho_{\text{aire}}$ que vale s, queda invariable.

En cañerías de gas no interesa tomar en cuenta la velocidad como en cañerías de agua (*): se acostumbra operar directamente con el gasto Q que está relacionado a la velocidad media u por la identidad.

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 . u$$

Despejando u de la ecuación (3 b) y substituyendo en el valor de Q se obtiene:

$$Q = \frac{\pi}{8 \sqrt{b_1' \cdot \rho_{aire}}} \sqrt{\frac{D^5 H}{s l}}$$

Si finalmente se pone:

$$8) \qquad K = \frac{\pi}{8 \sqrt{b_1' \cdot \rho_{aire}}}$$

resulta:

$$9) \qquad Q = K \sqrt{\frac{D^5 H}{s l}}$$

que es la forma corriente de la ecuación de escurrimiento para cañerías de gas de alumbrado a baja presión.

El coeficiente K ha sido determinado experimentalmente: la mayor parte de los investigadores le han asignado un valor constante para diferentes condiciones de diámetro, velocidad, temperatura, presión, etc., aunque algunos lo consideran variable con el diámetro.

A continuación damos una lista de los valores de K, debidos a los más conocidos investigadores, valores que hemos reducido a las unidades expresadas en la página 155

(*) Esto se debe a que en el caso del escurrimiento del gas no hay razón para asignar a la velocidad un límite máximo o mínimo como sucede en cañerías de agua.

CUADRO II

Fórmulas	Valores de K	
Pole........................	585	Constante para dif. diámetros
Monnier..................	606	» »
Redtenbacher y Schilling.....	624	» »
Manual de Inj. Metalurgistas...	585	» »
Unwin........................	$\dfrac{732.5}{\sqrt{1+\dfrac{1}{23\,D}}}$	
Niemann (diagramas).........	439 para D = 0,04 m.	
»	468 » D = 0,05	
»	509 » D = 0,07	
»	556 » D = 0,10	
»	567 » D = 0,125	
»	585 » D $\geq$ 0,15	
Cripps (diagramas)..........	413 » D = 0,0254	
»	457 » D = 0,0508	
»	518 » D = 0,0762	
»	518 » D = 0,102	
»	553 » D = 0,127	
»	616 » D $\geq$ 0,152	

Para cotejar entre sí los valores de K que acabamos de dar, limitaremos la comparación á diámetros comprendidos entre 0,1 m. y 1 m. que son los que más se emplean en distribuciones de alguna importancia. El cuadro siguiente muestra para cada diámetro el mayor y menor valor atribuído a K.

CUADRO III

Diámetros	VALORES DE K		Diferencias
	Maximos	Mínimos	
0,1 m.	624 Redtenbacher y Schilling	518 Cripps	20 %
0,125 m.	624 Redtenbacher y Schilling	553 Cripps	13 %
0,15 m.	645 Unwin	585 Pole, M. de Ing. Metal., Niemann	10 %
0,25 m.	676 Unwin	585 Pole, M. de Ing. Metal., Niemann	18 %
0,50 m.	703 Unwin	585 Pole, M. de Ing. Metal., Niemann	20 %
1,0 m.	718 Unwin	585 Pole, M. de Ing. Metal., Niemann	23 %

Como se ve, para diámetros de 0,15 m. o mayores, el valor máximo de K corresponde a la fórmula de Unwin y el valor minimo a las fórmulas de Pole, Manual de Ingenieros Metalurgistas y diagramas de Niemann (estas tres últimas fórmulas coinciden para $D \geq 0,15$ m.). La diferencia entre los valores máximo y mínimo fluctúa de 10% a 23%.

INFLUENCIA DEL DIÁMETRO.—En algunas de las fórmulas de cañerías de gas a baja presión se acepta K constante para cualquier diámetro, pero en realidad este coeficiente depende del valor de D y así está considerado en la fórmula de Unwin y, para pequeños diámetros ($D < 0,15$ m.), en los diagramas de Niemann y Cripps. También hemos efectuado algunas experiencias, aunque solamente con diámetros hasta 5 cm., que nos permiten afirmar que el valor de K varía con el diámetro.

Hasta ahora no existe, desgraciadamente, ninguna fórmula basada en un número suficiente de observaciones bien precisas, de modo que no se conoce con exactitud la influencia del diámetro sobre el valor de K. Sólo se puede decir que este coeficiente crece con el diámetro.

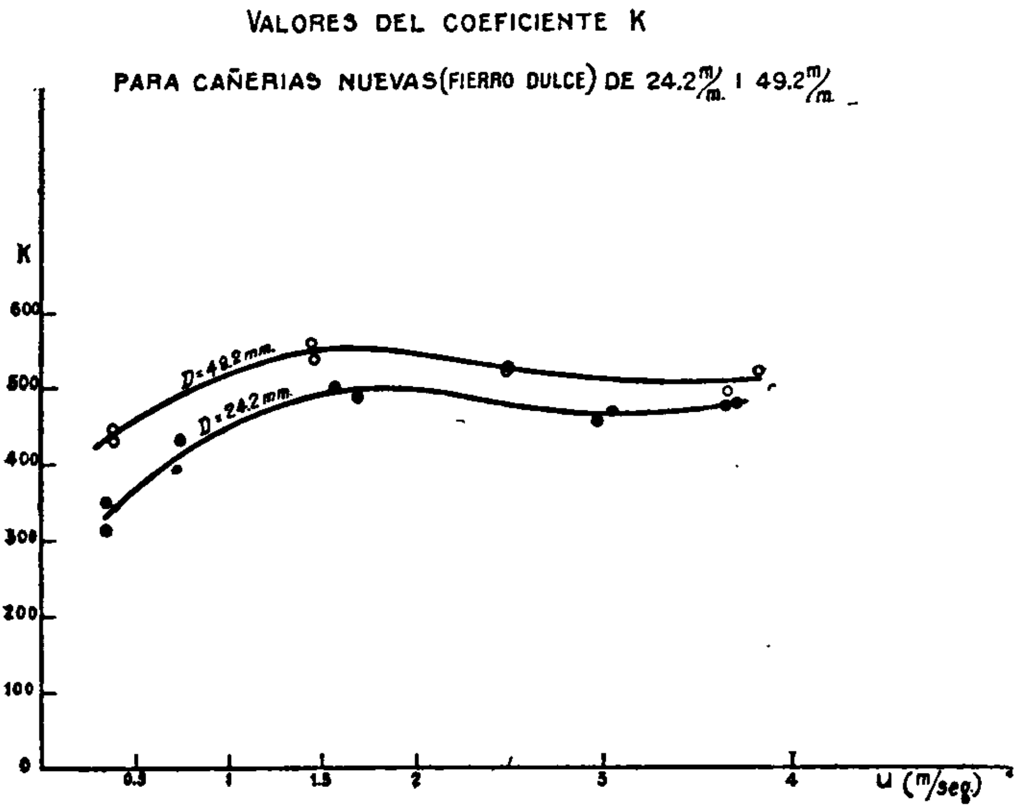

Fig. 5

Influencia de la velocidad.—En todas las fórmulas de cañerías de gas a baja presión se admite que K es independiente de la velocidad. Sin embargo, este coeficiente varía con la velocidad como lo hemos comprobado experimentando con cañerías de pequeño diámetro. Las curvas de la fig. 5 representan el resultado de estas experiencias. Como se ve, en los casos observados (D = 24,2 mm. y D = 49,2 mm.) el valor de K' crece bastante ligero para velocidades hasta 1,70 m/seg. A partir de este valor el coeficiente se mantiene aproximadamente constante, a lo menos hasta u = 3,80 m/seg. que fué la más alta velocidad observada.

La comparación de las dos curvas indica que *la variación del valor de K es más acentuada para el diámetro menor.* Si esta ley fuera general, resultaría que en el caso de cañerías de 10 cm. o mayores (que son las más empleadas en redes de distribución de gas de cierta importancia), la variación de velocidad tendría poca influencia sobre el valor de K.

La tabla siguiente permite comparar los coeficientes por nosotros obtenidos con los de las fórmulas indicadas en el Cuadro II.

CUADRO IV

Fórmulas		D=0,025 m.	D=0,050 m.
		K	K
Pole		= 585	= 585
Monnier		= 606	= 606
Redtenbacher y Schilling		= 624	= 624
Manual de Ing. Metalurjistas		= 585	= 585
Unwin		= 443	= 536
Niemann		—	= 468
Cripps		= 413	= 457
	Para:		
Valores obtenidos por nosotros (*)	u = 0,50 m/seg.	= 370	= 460
	u = 1,00 »	= 450	= 520
	u = 1,50 »	= 490	= 550
	u = 2,00 »	= 500	= 545
	u = 3,00 »	= 465	= 510

Se comprueba que la fórmula de Unwin es la que mejor concuerda con los resultados de nuestras experiencias. Los coeficientes por nosotros obtenidos para u = 1 m/seg. apenas difieren 1,6 % y 3 % de los de Unwin. En cuanto a las demás fórmulas, se puede decir que las cuatro primeras dan valores muy altos y las dos últimas (diagramas de Niemann y Cripps) muy bajos para los diámetros considerados.

INFLUENCIA DE LA PRESIÓN Y TEMPERATURA.—La relación (8)—pág. 160:

$$K = \frac{\pi}{8\sqrt{b_1' \cdot \rho_{aire}}}$$

muestra que K es función de ρ_{aire}. Ahora bien, si se recuerda que es preciso introducir en las fórmulas el valor de ρ_{aire} correspondiente a la presión y temperatura del gas considerado, se comprende que *el coeficiente K varía con la presión y temperatura del gas que escurre* (*).

(*) Los valores anotados (representados en las curvas de la fig. 5) son $3\frac{1}{2}$ % más altos que los obtenidos directamente de las experiencias. Esta corrección corresponde a la presión y temperatura y se explicará luego.

(**) Este resultado, por ser una consecuencia de la relación (8), está sujeto a la exactitud de esa relación. Dicha relación proviene de la ecuación fundamental (3) y, por consiguiente, se establece admitiendo que los rozamientos son proporcionales a la densidad. (Las demás hipó-

Sin embargo, en todas las fórmulas de cañerías a baja presión *se acepta que el coeficiente K es independiente de la presión y temperatura.*

Estimamos que ésta es una aproximación destinada a abreviar los cálculos. Dada la escasa precisión de las fórmulas de cañerías de gas, el error a que da lugar esta simplificación resulta admisible—como lo demostraremos luego—siempre que la temperatura y la presión se mantengan dentro de ciertos límites que en la práctica se propasan en casos muy contados.

Respecto de este punto y de muchos otros, no hemos encontrado ninguna referencia en las obras que han llegado a nuestras manos (**).

Vamos a hacer un ligero cálculo para fijar la magnitud del error que se comete al considerar el coeficiente K independiente de la presión y temperatura. Para operar con precisión sería necesario conocer las condiciones de temperatura y presión bajo las cuales fueron determinados experimentalmente los valores de K. que figuran en las fórmulas del cuadro II. A falta de estas informaciones, aceptaremos los siguientes valores que probablemente no se alejen mucho de los efectivos:

Presión atmosférica(columna de mercurio)......	755 mm. (***)
Temperatura del gas en las cañerías..	15°

En rigor se debería agregar a la presión atmosférica el exceso de presión del gas sobre la atmósfera, pero en cañerías de gas a baja presión este exceso alcanza a lo más a 1% (de la presión atmosférica). En atención a lo incierto del valor aceptado para la presión atmosférica, no es lógico agregar esa cantidad insignificante.

Designemos por ρ_1 la densidad absoluta del aire, considerado a la presión y temperatura anotadas (755 mm. y 15°).

$$\rho_1 = 1{,}293 \times \frac{273}{273 + 15} \times \frac{755}{760}$$

---

tesis que se aceptan para deducir la ecuación (3) no tienen nada que ver con la influencia de la densidad). Parece que la hipótesis de la proporcionalidad de los rozamientos y la densidad, se verifica a lo menos aproximadamente. En efecto, aplicada a cañerías de gas a alta presión a lo largo de las cuales se producen variaciones importantes de densidad, da resultados que los investigadores consideran de acuerdo con las experiencias. Se puede, pues, aceptar que la relación (8) se verifica aproximadamente, o lo que es lo mismo, que K es inversamente proporcional a $\sqrt{\rho_{\text{aire}}}$.

(**) No conocemos ninguna obra que trate de un modo riguroso lo referente a las fórmulas de cañerías de gas. Los libros que hemos consultado, de caracter industrial o práctico, se limitan a dar las fórmulas, apoyándose en el mejor de los casos, en una ligera deducción.

(***) Es de suponer que los investigadores ingleses, franceses y alemanes hayan efectuado sus experiencias en las respectivas capitales que están situadas a una altura de pocos metros sobre el nivel del mar. La presión atmosférica aceptada de 755 mm., corresponde a una cota de unos 50 metros sobre el mar.

$$\rho_1 = 1{,}218 \text{ k/m}^3$$

Supongamos ahora un caso extremo: sea una cañería de gas a una temperatura de 25° en un lugar situado 1 500 metros sobre el nivel del mar, lo que corresponde a una presión atmosférica de unos 635 mm. de mercurio. Para estas condiciones la densidad absoluta del aire vale:

$$\rho_2 = 1{,}293 \times \frac{273}{273+25} \times \frac{635}{760} = 0{,}990 \text{ k/m}^3$$

Si se comparan los valores de K correspondientes a los dos casos considerados, suponiendo igualdad de las demás condiciones de escurrimiento (diámetro, velocidad, etc., o sea, igual valor de b_1'), la relación (8) permite escribir la proporción:

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{\sqrt{\rho_1}}{\sqrt{\rho_{aire}}} = \frac{\sqrt{1{,}218}}{\sqrt{0{,}990}} = 1{,}11$$

o bien:

$$\frac{K_2 - K_1}{K_2} = \frac{0.11}{1{,}11} = 0{,}1$$

de donde:

$$K_2 - K_1 = 0{,}1\ K_2$$

De aquí se deduce que al calcular una cañería sometida a las condiciones extremas supuestas (1 500 m. sobre el mar y 25°), aplicando el valor K_1 en lugar del valor adecuado K_2, *se comete un error de 10%*.

Este error, aunque importante, no es mayor que la divergencia que resulta para el valor de K, según se acepte una u otra de las fórmulas propuestas para cañerías a baja presión. (Según el cuadro III esa divergencia puede llegar a 23% para diámetros comprendidos entre 0,1 m. y 1 m.).

Si se trata de determinar el diámetro de una cañería dado el gasto, el error de 10% sobre K produce un error de 4% sobre el valor del diámetro, lo que es aceptable en la práctica.

Resumiendo, se puede decir que *al introducir en los cálculos de cañerías de gas a baja presión un valor de K constante para diferentes temperaturas y presiones atmosféricas, se comete a lo sumo, un error de 10% sobre el verdadero valor de K.*

VALORES DE b_1'.—De la fórmula (8)—pág. 160

$$K = \frac{\pi}{8\sqrt{b_1' \cdot \rho_{aire}}}$$

se obtiene despejando b_1':

8 bis) $$b_1' = \frac{1}{\rho_{aire}} \left(\frac{\pi}{8\,K} \right)^2$$

Esta relación permite calcular el coeficiente b_1' conociendo K y ρ_{aire}. Como las fórmulas de cañerías a baja presión no especifican la presión y temperatura bajo las cuales han sido determinados los valores de K, aceptaremos, a falta de datos exactos:

$$\rho_{aire} = 1{,}218 \text{ k/m}^3$$

valor que se tomó como base en el párrafo precedente y que corresponde a una temperatura de 15° y una presión atmosférica de 755 mm. o sea, a una altura de unos 50 m. sobre el mar. Introduciendo en (8 bis), se obtiene:

$$b_1' = \frac{1}{1{,}218} \times \frac{9{,}8696}{64\,K^2}$$

o bien:

$$b_1' = \frac{0{,}1266}{K^2}$$

Aplicando esta ecuación se pueden deducir los valores de b_1' correspondientes a los de K anotados en el cuadro III. Así se ha formado el cuadro siguiente (*):

(*) Obsérvese, que según la última ecuación a un máximo de K corresponde un mínimode b_1' y vice-versa.

CUADRO V

Diámetros	Valores de b_1'		Diferencias
	Máximos	Mínimos	
0,10 m.	472.10^{-9} Cripps	325.10^{-9} Redtenbacher y Schilling	45 %
0,15 m.	370.10^{-9} Pole, M. de Ing. Metal., Niemann	304.10^{-9} Unwin	22 %
0,25 m.	370.10^{-9} Pole, M. de Ing. Metal., Niemann	277.10^{-9} Unwin	34 %
0,50 m.	370.10^{-9} Pole, M. de Ing. Metal., Niemann	257.10^{-9} Unwin	44 %
1,00 m.	370.10^{-9} Pole, M. de Ing. Metal., Niemann	246.10^{-9} Unwin	50 %
1,50 m.	370.10^{-9} Pole, M. de Ing. Metal., Niemann	243.10^{-9} Unwin	52 %

Más adelante compararemos estos valores de b_1' con los que corresponden a cañerías de agua.

(Continuará)