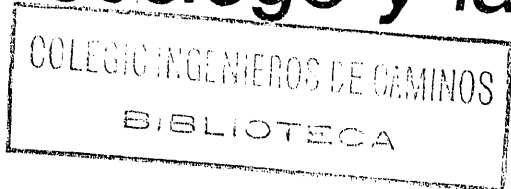


Entre el sosiego y la turbulencia^(*)



Por **LUIS TORRENT RODRIGUEZ**

Ingeniero de Caminos, C. y P.

La "universalidad" de la llamada fórmula universal de tubos es, a juicio del autor como la del esperanto, pues ningún técnico la emplea para calcular conducciones hidráulicas, pese a su contrastada exactitud. Por ello, propone el uso de fórmulas simplificadas de pérdidas de carga para diferentes clases de tuberías, pero deducidas todas ellas con el criterio de que sus resultados coincidan lo más posible con los que se obtendrían de dicha fórmula "universal", en un amplio entorno de aplicación. De esta forma se llegaría a una homogeneidad de cálculo, hoy inexistente, entre posibles soluciones alternativas de conducciones de agua.

ANTECEDENTES

Hace diez años publiqué en las páginas de esta Revista un trabajo sobre hidraulicidad de conducciones (1) con el que creía haber logrado establecer una base sólida para la unificación del cálculo de las pérdidas de carga de las tuberías mediante el empleo de las fórmulas universales:

$$i = \frac{f v^2}{2 g d} \text{ con } \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{R_c \sqrt{f}} + \frac{K_s}{3,7 d} \right)$$

El razonamiento simplista que entonces me hacía era el siguiente: puesto que todos los tratados de Hidráulica señalan como muy exactas y contrastadas las fórmulas universales, su escasa utilización en los ambientes técnicos se debe a la necesidad de recurrir a enojosos cálculos o ábacos para la determinación del parámetro f ; por lo tanto, si se logra simplificar esos ábacos, soslayar el cálculo auxiliar del número de Reynolds, etc., se habrá dado un gran paso para la "vulgarización" y aceptación del empleo sistemático de las fórmulas.

Este era el objetivo de mi trabajo y, sinceramente, creo que logré proporcionar un gráfico de cálculo sencillo, fácilmente particularizable para diferentes materiales de revestimiento, en el que se utilizaban solamente diámetros y velocidades del agua y se obtenía el parámetro sin más; donde las complicadas curvas de los ábacos de Rouse, Nikuradse, etc., quedaban reducidas a líneas rectas, sin perder por ello exactitud (al contrario, mejorando notablemente las imprecisiones gráficas

de dichos ábacos y facilitando la interpolación) y donde el fenómeno en estudio aparecía claramente enmarcado en la zona turbulenta, lisa o laminar, característica de su régimen.

Si mi razonamiento de entonces hubiese sido acertado, es indudable que, al cabo de los dos lustros transcurridos desde la publicación del trabajo, mi ábaco sería habitual en los gabinetes de cálculo y un instrumento imprescindible para el estudio hidráulico de conducciones que, posiblemente, habría sido mejorado, ampliado y discutido por los técnicos de tuberías. La prueba de que había un error de base en mi hipótesis inicial es que nada de esto ha ocurrido: el artículo pasó sin pena ni gloria, como una lucubración académica más, que no ha merecido la reproducción —salvo en el boletín de Cuba "Ingeniería Civil"— la discusión, ni el mínimo comentario.

LOS ABACOS

En la figura 1 se muestra el ábaco "rectilíneo" objeto de aquel trabajo. Entrecorrimos la palabra rectilíneo porque, en realidad, las líneas que lo forman no son rectas, si bien su curvatura es tan pequeña que el error que se comete al trazarlas como tales es inapreciable en el gráfico (dos por mil, en el caso más desfavorable).

Estas "rectas", cuyos coeficientes angulares difieren casi imperceptiblemente, son las que definen la zona en que tiene lugar el régimen hidráulico en estudio, que es función de la velocidad y de la rugosidad del conducto.

El límite inferior de aplicación será el equivalente a la ecuación de Karman - Prandtl $\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log (R_c \sqrt{f}) - 0,8$ del régimen "hidráulicamen-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 30 de septiembre de 1979.

(1) "Contribución al cálculo hidráulico de tuberías". Revista de Obras Públicas, octubre 1968.

ENTRE EL SOSIEGO Y LA TURBULENCIA

te liso" (2), que coincide con la "recta" del ába-

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,760 \log \frac{d}{K_s} - 1,50$$

al parámetro $V K'_s = 0,001$ (para agua a 10° C). La frontera del régimen "hidráulicamente rugoso", establecida por la condición de Moody $R_e \sqrt{f} =$

$$= 200 \frac{d}{K_s}$$

es, en el gráfico, la recta de parámetro $V K'_s = 0,1$, cuya ecuación puede escribirse

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,898 \log \frac{d}{K_s} + 0,96.$$

(2) Denominar "hidráulicamente liso" a un régimen que se presenta en tuberías rugosas cuando la circulación es muy lenta, produce confusión de ideas. ¿Por qué no llamarlo "régimen sosegado?".

En las figuras 2 y 3 se ha realizado la "particularización" del ábaco para diversas rugosidades de las paredes de los conductos, asimiladas a diferentes materiales de fabricación. Se han separado los resultados en dos figuras, para evitar superposiciones de líneas y ángulos de corte muy agudo que dificultarían la apreciación. Para cada material se han trazado las rectas correspondientes a varias velocidades de circulación, supuesta una temperatura constante del agua de 10° C (3).

(3) Las variaciones de temperatura son irrelevantes para el cálculo, dentro de las pequeñas diferencias que se producen habitualmente en las conducciones de agua; si las diferencias son importantes, habrá que considerar el cambio que origina en la viscosidad cinemática del líquido. Por ejemplo, con agua a 40° C, la línea correspondiente a $v = 1$ metro por segundo sería la que en el ábaco se señala como $v = 2$ m/seg; con agua a 68° C, sería la marcada para $v = 3$ metros por segundo, etc.

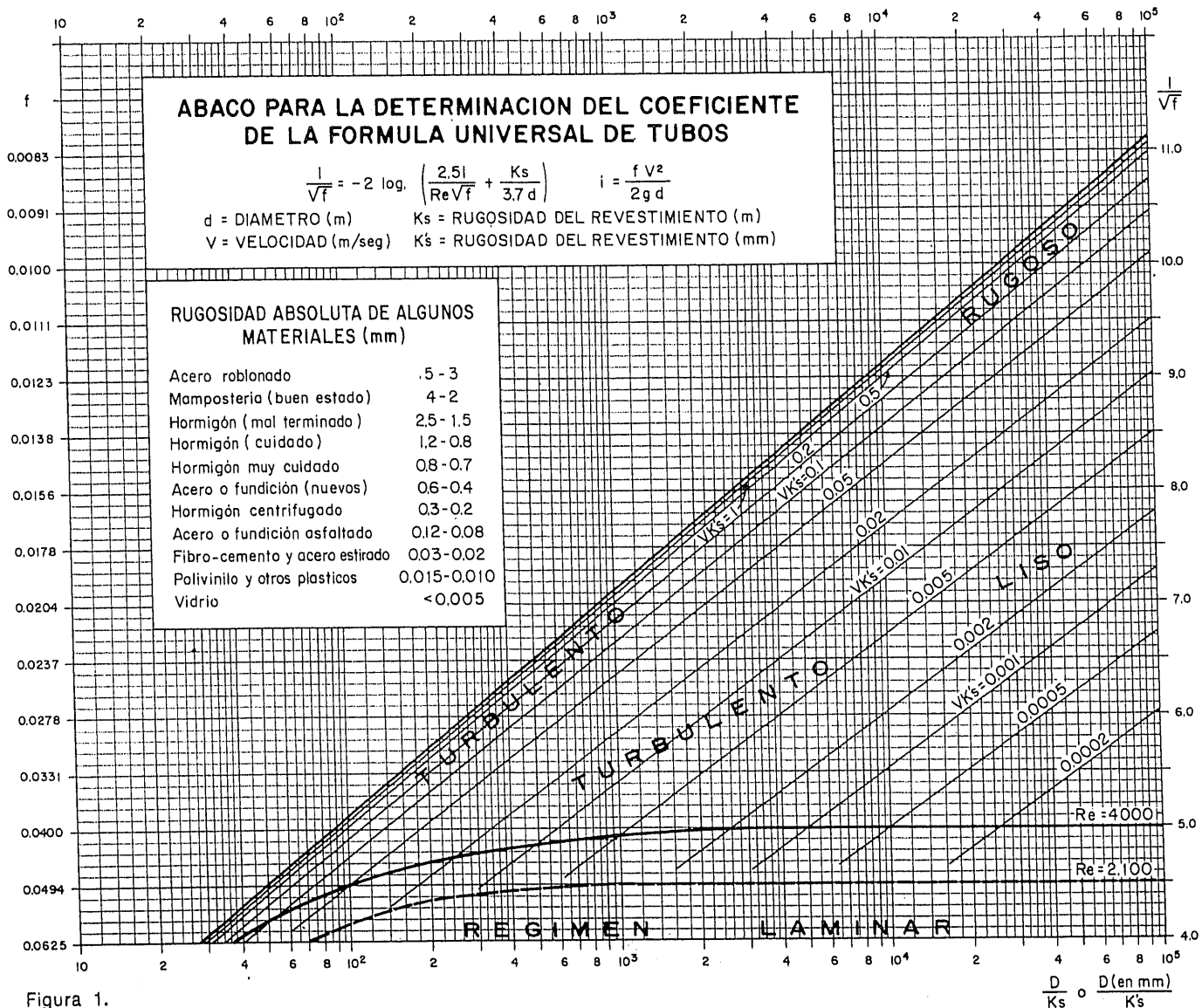


Figura 1.

ENTRE EL SOSIEGO Y LA TURBULENCIA

Aparentemente, ya está todo resuelto y bien resuelto. Disponemos de unos utensilios de cálculo de pérdidas de carga en cualquier tipo de conducción que, si la asimilación de rugosidades absolutas (equivalentes de arena de Nikuradse) es acertada, proporcionan con gran exactitud, el valor del parámetro de la fórmula universal de tubos, la más exacta de las fórmulas, según numerosos experimentadores. ¿Dónde, pues, está el fallo?

ASPECTOS NEGATIVOS

Del examen de los ábacos "particularizados" se desprende una primera dificultad: En los materiales muy rugosos, las rectas correspondientes a cada velocidad del agua están muy próximas entre sí y son prácticamente paralelas. En consecuencia, al adoptar como si fuera única, la recta correspondiente a $v = 2$ m/seg., por ejemplo, los errores que se cometen cuando varía la velocidad del agua

dentro de un entorno razonable son de muy escasa entidad; comienza a tener importancia el error con regímenes muy lentos, del orden de centímetros por segundo, pero entonces son tan pequeñas las pérdidas de carga de la conducción, que no tienen influencia práctica en los cálculos.

No ocurre lo mismo con materiales de revestimiento de mínima rugosidad, como son polivinilos, fibrocementos, aceros estirados, etc., pues la variación de velocidad del agua produce sensibles cambios del coeficiente de la fórmula universal. Por ejemplo: En una conducción de polivinilo de diámetro 0,50 m, dicho coeficiente varía entre 0,0159 y 0,0115 al aumentar la velocidad del líquido de 0,5 a 4 m/seg.

Esta dispersión proviene, como es sabido, de que se trata de regímenes turbulentos-lisos, en los que la pérdida de carga no es proporcional al cuadrado de la velocidad, sino a una potencia v^m que está comprendida entre 1,75 (régimen liso) y 2 (tur-

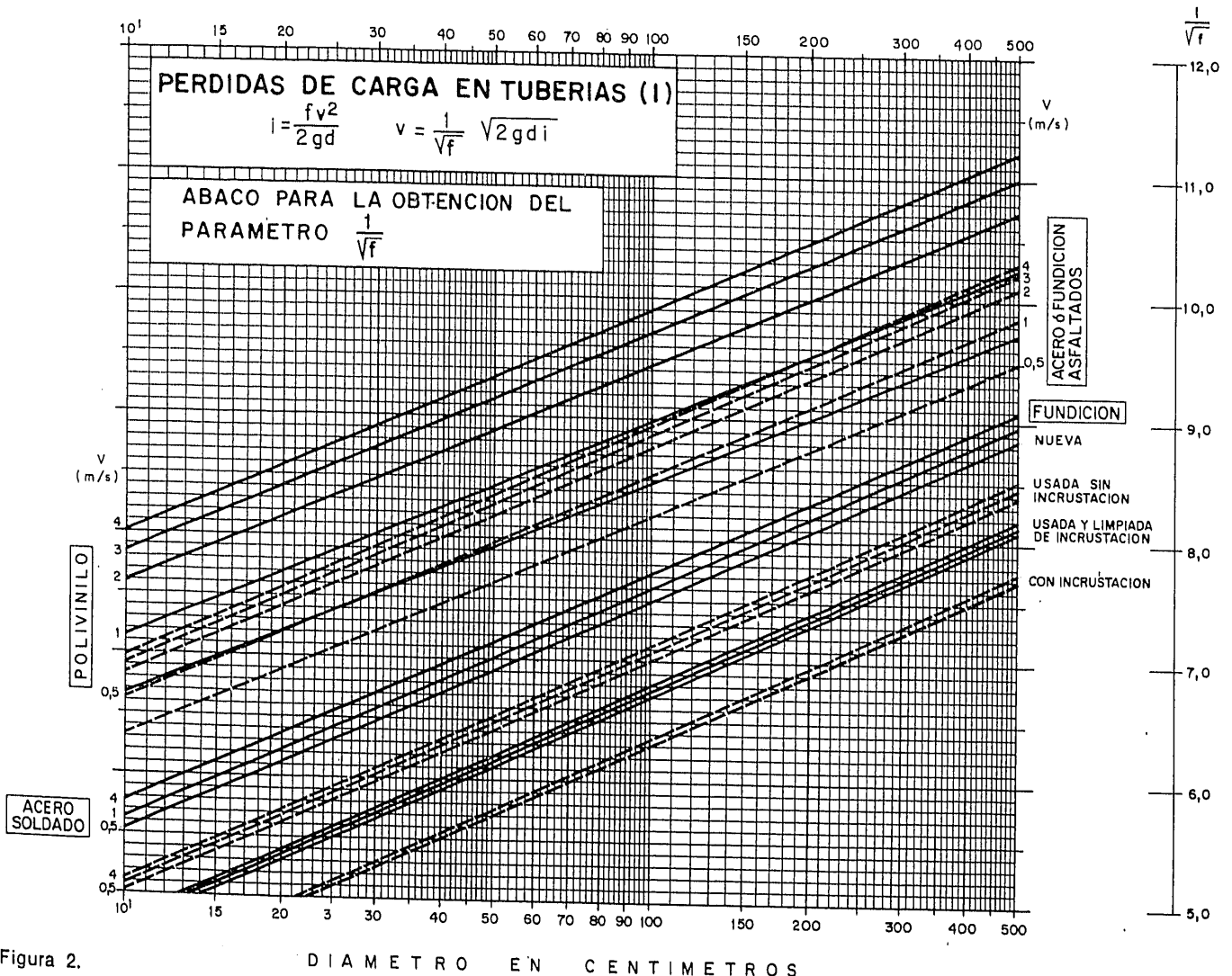


Figura 2.

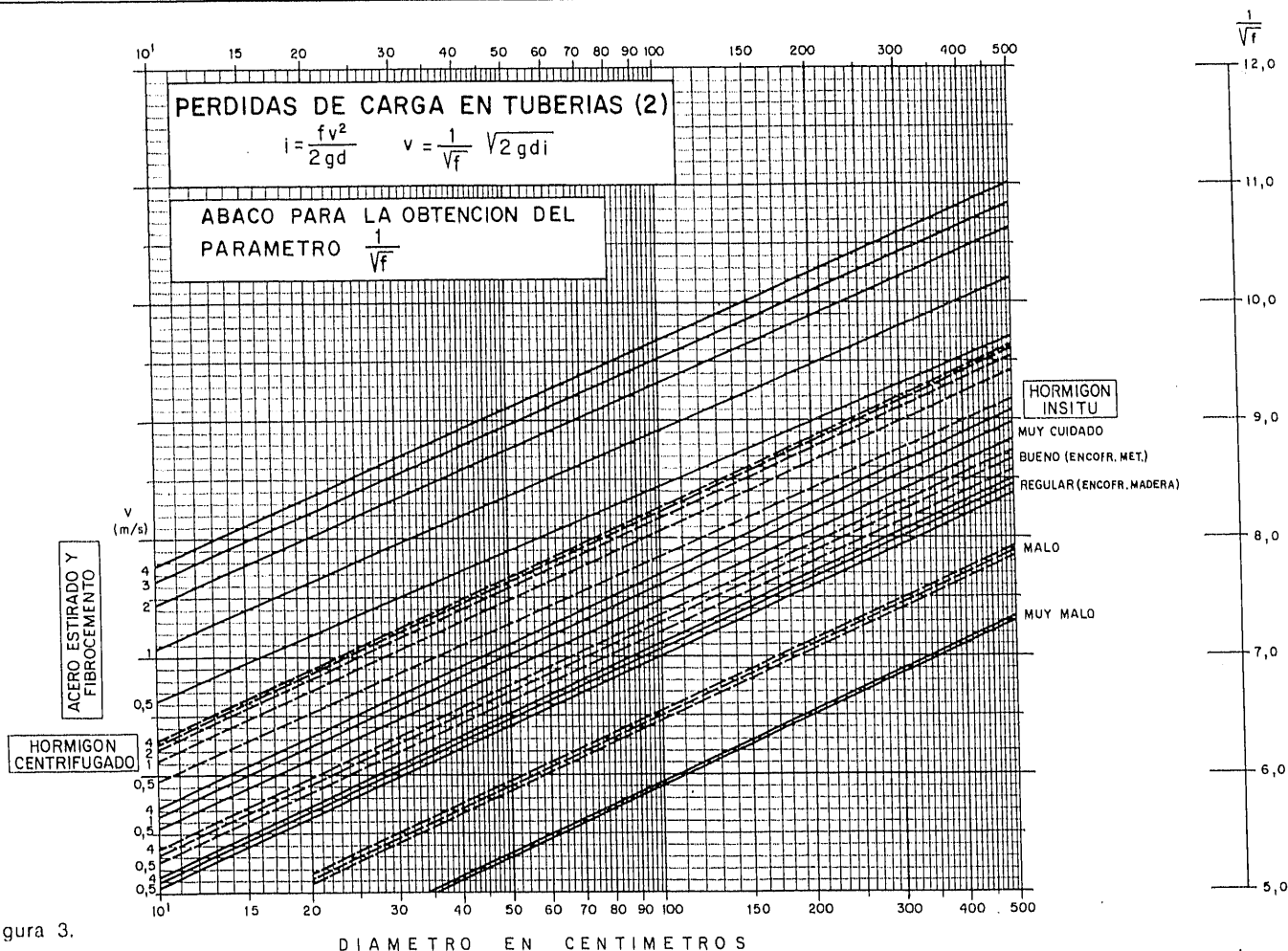


Figura 3.

bulento-rugoso) (4). Cuanto más lisas son las paredes de los conductos, más bajo resulta el exponente y, por tanto, mayor será la fluctuación del coeficiente de la fórmula universal, que está expresada en función de v^2 .

Desde un punto de vista operativo, esto es un grave inconveniente: Si bien los ábacos permiten hallar con gran exactitud las pérdidas de carga de cualquier régimen no se puede sistematizar el cálculo de una tubería en la que a cada velocidad corresponde un parámetro diferente. Aunque hayamos obtenido una serie de puntos de funciona-

miento de la conducción, su único enlace sigue estando en la engorrosa fórmula universal que requiere un programa de cálculo iterativo para cada variación de los datos.

En definitiva: A pesar de los ábacos, no hemos avanzado nada en nuestra finalidad de unificar los cálculos hidráulicos. Tenemos que emprender otro camino, sacrificando la exactitud en aras de la operatividad.

FORMULAS APROXIMADAS

Vamos a aceptar como norma la fórmula universal de tuberías y a tratar de encontrar otras que permitan una resolución fácil, con cualquier calculadora técnica, y se ajusten lo más posible a los resultados de aquélla. La mayor coincidencia debe darse en el entorno de aplicación de cada uno de los materiales que constituyen las tuberías. Por ejemplo: para revestimientos de hormigón buscaremos una fórmula cuya proximidad de resultados respecto de la universal sea máxima para grandes diámetros y velocidades moderadas; para tubos de acero estirado, la coincidencia se buscará

(4) Esta potencia coincide precisamente con el coeficiente angular de las "rectas" del ábaco, definidas por el producto $V \times K_s$:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = m \cdot \log \cdot \frac{d}{K_s} + C$$

En conductos de rugosidad prácticamente nula y velocidades

bajas $\left(R_r \text{ próximo a } 4.000; \frac{1}{\sqrt{f}} = 5 \right) m$ desciende a 1,75.

Para regímenes turbulentos puros, m vale 2.

ENTRE EL SOSIEGO Y LA TURBULENCIA

en zona de menores diámetros y mayores velocidades.

Con estos criterios hemos ensayado fórmulas monomías, del tipo de las de Scobey, Scinemi, etc. Partiendo del cálculo exacto de pérdidas de carga de la fórmula universal para diferentes regímenes, dentro de cada rugosidad específica se han establecido leyes de variación de diámetros y veloci-

dades para determinar los exponentes más adecuados. De este análisis resultan las siguientes tablas de valores, que hemos deducido para los dos tipos de fórmulas más usuales:

$$j = 1.000 i = \frac{v^m}{M d^n}$$

$$v = B d^b j^c$$

Rugosidad (mm)	$1.000 i = \frac{V^m}{M d^n}$			$V = B d^b j^c$			Materiales
	<i>m</i>	<i>M</i>	<i>n</i>	<i>B</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
0,0125	1,854	1,58	1,169	53,1	0,631	0,539	Polivinilo y otros plásticos.
0,025	1,878	1,55	1,177	50,0	0,627	0,532	Fibrocemento y acero estirado.
0,10	1,930	1,42	1,193	43,0	0,618	0,518	Acero o fundición asfaltados.
0,25	1,961	1,28	1,204	38,4	0,614	0,510	Hormigón centrifugado.
0,5	1,980	1,13	1,213	34,8	0,613	0,505	Acero soldado, fundición nueva.
0,5	—	—	—	34,0	0,600	0,5	Hormigón excelente (prefabricado).
1,0	1,992	0,98	1,220	31,5	0,607	0,5	Hormigón "in situ" bien terminado.
2,0	2,000	0,84	1,230	28,9	0,616	0,5	Hormigón mal acabado.

OBSERVACIONES

En tuberías de rugosidades absolutas inferiores a 0,5 mm no es posible adoptar un exponente constante $c = 0,5$ (o sea, suponer proporcionalidad de las pérdidas de carga al cuadrado de la velocidad) pues los errores serían inadmisibles en una gran parte del ámbito de aplicación. De aquí que los experimentadores de tubos de materiales muy lisos hayan establecido fórmulas de cálculo cuyos exponentes, igual que sucede con los nuestros, no son las cifras redondas de las antiguas fórmulas hidráulicas.

Para esta rugosidad límite $K'_s = 0,5$ mm, damos las dos series de valores de los parámetros que resultan de considerarla como perteneciente

al grupo "liso" o al grupo "rugoso". El cálculo de los parámetros de este último grupo, puede hacerse directamente, mediante las fórmulas:

$$B = 31,5 - 8,5 \log K'_s$$

$$b = 0,5 + \log \frac{4,57 - \log K'_s}{3,57 - \log K'_s}$$

$$c = \text{Constante} = 0,5$$

que coinciden, muy aproximadamente, con las reseñadas en nuestro artículo "Discusión de las fórmulas de rugosidad. Propuesta de fórmula simplificada". (*Revista de Obras Públicas*, abril 1966.)

ENTRE EL SOSIEGO Y LA TURBULENCIA

En la columna "Materiales" que figura al fin de la tabla se proponen unas equivalencias de rugosidades basadas, en una pequeña parte, en nuestras experiencias y, en mayoría, en experimentaciones ajenas, tomadas de diversas publicaciones.

Existen muchas fórmulas de cálculo de pérdidas en las conducciones y cada fabricante preciza la que considera más adecuada al material de revestimiento de sus tubos.

No pretendemos que las que en este trabajo ofrecemos sean más exactas que todas las existentes; lo que sí proporcionan es una unidad de criterio para poder comparar entre sí las posibilidades de cada material, cosa harto difícil si las bases de cálculo no son homogéneas (todavía se

utilizan las fórmulas de Manning o Strikler para dimensionar tuberías de hormigón).

Queremos señalar, por último, que así como en revestimientos de galerías de presión la lucha contra la rugosidad de las paredes es un punto importante, que puede representar una diferencia del rendimiento hidráulico de la instalación hasta del 25 por 100, en los materiales muy lisos como el fibrocemento y el polivinilo, aunque se lograsen fabricar con rugosidad cero, apenas se mejorarían las pérdidas de carga en un 6 o un 3 por 100, respectivamente. Nos referimos, claro está, al material nuevo; el deterioro de la hidraulicidad de las conducciones con el tiempo, por envejecimiento de los productos, incrustaciones, erosiones, etc., es, en estos casos, mucho más trascendente que la lisura inicial.



A. BIANCHINI, INGENIERO, S. A.

FUNDADA EN 1908

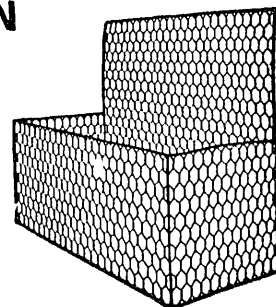
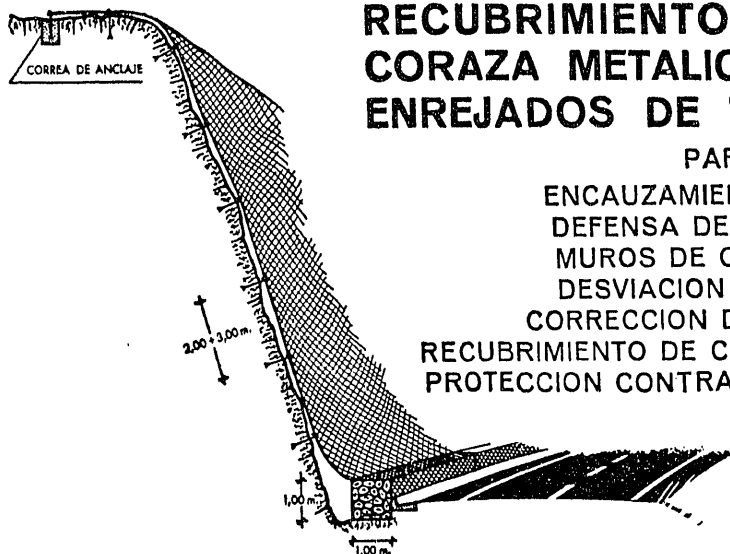
• PRODUCTOR NACIONAL N.º 7013

• EXPORTADOR N.º 10699

GAVIONES METALICOS RECUBRIMIENTOS "BIANCHINI" CORAZA METALICA "BIANCHINI" ENREJADOS DE TRIPLE TORSION

PARA

ENCAUZAMIENTO DE RIOS
DEFENSA DE MARGENES
MUROS DE CONTENCION
DESVIACION DE CAUCES
CORRECCION DE TORRENTES
RECUBRIMIENTO DE CANALES Y DESAGÜES
PROTECCION CONTRA DESPRENDIMIENTOS



Gran Vial, 8 (Concentración Industrial Vallesana) - Tel (93) 568 06 08 (3 líneas) - MONTORNES DEL VALLES (Barcelona)