SECCIÓN 1: HIDRÁULICA APLICADA

INTRODUCCIÓN

En esta unidad se va a pasar un breve repaso a la hidráulica moderna, Ley Universal para después recordar las fórmulas exponenciales o empíricas que todavía tienen una gran aplicación en el dimensionamiento de las conducciones y por tanto son aplicables al cálculo de redes.

FÓRMULAS DE PRANTDL-KARMAN, NIKURADSE Y COLEBROOK

En el cálculo de las tuberías a presión es imprescindible tener en cuenta la forma del flujo, la temperatura y la viscosidad del fluido, para obtener un valor del coeficiente de fricción λ lo más riguroso posible.

Partiendo de la fórmula de Chézy, también conocida por Darcy-Weisbach:

$$J = \lambda \frac{V^2}{2gD}$$

$J = h_f /L$, es la pérdida de carga expresada en m/m, representa la pendiente de la línea de energía; el coeficiente λ es adimensional, es el coeficiente de fricción o rozamiento del fluido con la rugosidad de las paredes de la conducción, V es la velocidad media en m/s, g es la gravedad en m/s^2 y D el diámetro en m.

Como sabemos los regímenes de corriente se determinan mediante el número de Reynolds:

V = velocidad en m/s; D = diámetro en m y í = viscosidad cinemática m^2/s

$$Re_{kr} = 2320 = \frac{V\,D}{í}$$

Si Re < 2320 indica la existencia de un régimen laminar; las partículas del líquido se mueven sin mezclarse.

Si Re > 2320 indica la existencia de un régimen turbulento; el movimiento longitudinal del líquido se complica por la intervención de movimientos transversales. En las paredes de la tubería se originan torbellinos que se transmiten hacia el eje de la conducción, donde la turbulencia es mayor.

- **Régimen laminar**

La rugosidad de las paredes de la conducción carece de importancia en este régimen, ya que las diminutas depresiones del material están llenas por el fluido en reposo que forma una capa límite. La velocidad del fluido alcanza un valor máximo en el eje de la tubería.

En los cálculos prácticos se emplean las fórmulas siguientes:

$$V = Q / S \qquad \text{Re} = V \cdot D/\text{í} = 4Q/\text{ð}D\text{í} \qquad \text{ë} = 64/\text{Re}$$

Donde Q = al caudal en m^3/s. y S = la sección en m^2

- **Régimen turbulento**

En el régimen turbulento, la distribución de velocidades es más regular que en el régimen laminar. El espesor de la capa límite disminuye al aumentar Re. Se distinguen fácilmente los tres casos de comportamiento siguientes:

Tuberías hidráulicamente lisas

Si la velocidad existente supera la crítica por un escaso margen, la capa límite tiene tal espesor que las irregularidades de las paredes quedan rellenas por un fluido en reposo o dotado de un movimiento muy lento. Por lo tanto, la rugosidad de la pared no influye, sólo influyen las pérdidas por torbellinos en la corriente, λ es independiente del rozamiento con las paredes, sólo depende del número de Reynolds, y se calcula por la ecuación de Prantdl-Kármán para tubos lisos.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.\lg \frac{\text{Re}\sqrt{\lambda}}{2{,}51} = 2.\lg\,(\text{Re}\,.\sqrt{\lambda}) - 0{,}8$$

La solución de esta ecuación se facilita con el diagrama de Moody.

Según Colebrook, se puede aplicar la ecuación siguiente:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1{,}8.\lg \frac{\text{Re}}{7}$$

para rangos de $5.10^3 < \text{Re} < 1.10^8$, con un error máximo del $\pm 0{,}5\ \%$.

Tuberías hidráulicamente rugosas

Cuando la velocidad es muy elevada, la capa límite desaparece prácticamente. La rugosidad de la tubería tiene una gran influencia, desaparecen las partículas líquidas en reposo o movimiento lento que rellenaban las irregularidades de las paredes en la tubería. Ahora λ no depende de Reynolds, sino de la rugosidad de la pared, pudiéndose determinar por la ecuación de Prantdl-Kármán para tubos rugosos, que es la siguiente:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.\lg\frac{3{,}71.\,D}{k} = 1{,}14 - 2.\lg\frac{k}{D}$$

k, es la rugosidad absoluta de las paredes en m, D el diámetro libre de la tubería en m y k/D, la rugosidad relativa.

Es también factible una solución gráfica por el mismo diagrama. Puede observarse en él, que por encima de la curva ($\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}\cdot\frac{k}{D} = 200$) el coeficiente de fricción λ es constante.

Tuberías hidráulicamente intermedias

Con frecuencia suelen presentarse situaciones intermedias entre las tuberías hidráulicamente lisas y las hidráulicamente rugosas. En este caso λ es función de Re y de k, siendo aplicable la fórmula de Prantdl – Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.\lg\left[\frac{2{,}51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3{,}71.D}\right]$$

cuya solución gráfica puede realizarse por el mismo ábaco. Se puede aplicar, según Colebrook, la expresión:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.\lg\left[\left(\frac{7}{\mathrm{Re}}\right)^{0.9} + \frac{k}{3{,}71.D}\right]$$

aunque afectada de un mayor error, es suficientemente válida.

- **Cálculo de la velocidad y del caudal**

Empleando la fórmula de Chézy:

$$J = \lambda \frac{V^2}{2\ g\ D}$$

despejando V y teniendo en cuenta el valor de $1/\sqrt{\lambda}$, obtenido de la expresión anteriormente indicada de Prandtl – Colebrook, resulta:

$$V = \sqrt{2\ g\ D\ J}\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{2\ g\ D\ J} \cdot \left[-2\ \lg\left(\frac{2{,}51\,\nu}{D\sqrt{2\ g\ D\ J}} + \frac{k}{3{,}71.D}\right)\right]$$

Aplicando la ecuación de continuidad deducimos el caudal:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4}\left[-2\lg\left(\frac{2{,}51\nu}{D\sqrt{2 g J D}} + \frac{k/D}{3{,}71}\right)\right]\sqrt{2 g J D}$$

A continuación exponemos algunos valores de la rugosidad absoluta k, para distintos materiales en las tuberías con agua limpia:

Valores de la rugosidad absoluta, k

Tuberías – Tipo de material	***k (mm)***
Acero laminado nuevo	0,05
Acero asfaltado	0,015
Acero galvanizado	0,125
Acero con incrustaciones	1,5 – 3
Cemento o recubrimiento de cemento	0,5
Cobre	0,0015
Fibrocemento	0,025
Fundición en uso sin recubrimiento	0,25
Fundición en uso con recubrimiento	0,125
Hormigón pretensado	0,25 – 0,04
Latón	0,025
PVC - PE	0,04 – 0,07

En el cálculo práctico de las conducciones de agua, los elementos singulares como curvas, válvulas de compuerta, etc., pueden ser estimados en una forma global, en cuyo caso los valores recomendables serían:

Tuberías – Tipo de material	***k (mm)***
Arterias principales de fundición y/o acero	0,1
Conducciones secundarias en redes de distribución urbana o similares	0,4
Materiales plásticos y de fibrocemento	0,1

DIAGRAMA O ÁBACO DE MOODY

En 1939 año de la publicación del trabajo de Colebrook, y en años posteriores hasta prácticamente 1972, la utilización de su fórmula resultaba obviamente dificultosa. En 1944 L.F. Moody hizo una representación gráfica de la misma, el diagrama resultante se conoce con el nombre de Moody.

Confeccionado a escala logarítmica, hace una distinción entre régimen laminar y turbulento y representa gráficas con rugosidad relativa desde k/D = 5.10^{-6} a 5.10^{-2}. Existen dos líneas que cruzan todo el diagrama, desde el ángulo superior izquierdo al inferior derecho, la primera representa a las tuberías hidráulicamente lisas y la segunda a la derecha de valor $Re\sqrt{\lambda}\,.\frac{k}{D} = 200$, en esta región del diagrama se encuentran recogidas las tuberías hidráulicamente rugosas líneas de rugosidad relativa, referidas anteriormente, que resultan prácticamente horizontales y cuyo valor λ se encuentra a la derecha.

La fórmula de Prandtl – Colebrook, aunque está determinada para conductos circulares, da también buenos resultados para no circulares e incluso pueden utilizarse para conducciones abiertas, basta para ello sustituir en las fórmulas el diámetro por cuatro veces el radio hidráulico D = 4.R, por tanto es también utilizable el diagrama de Moody en este caso, que representamos a continuación y más ampliamente en la página siguiente.

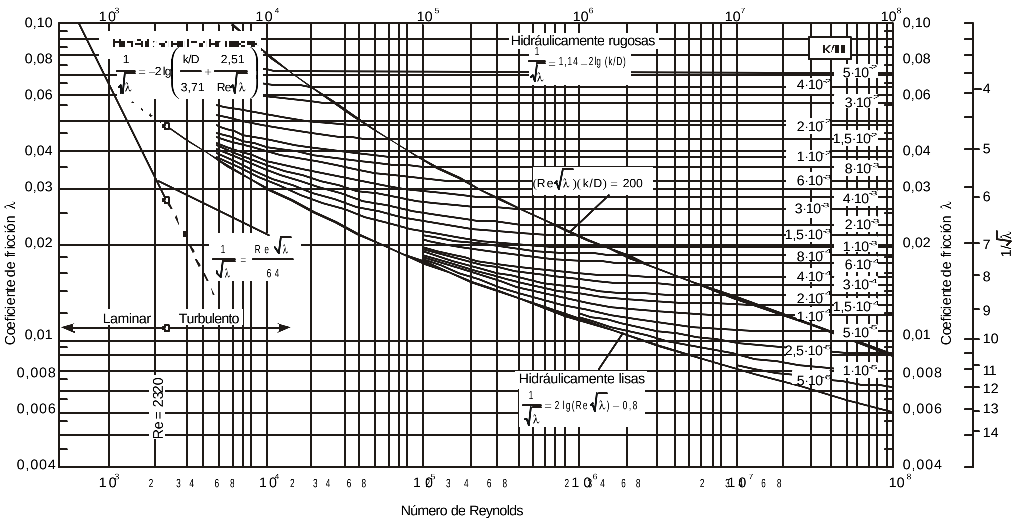

DIAGRAMA DE MOODY

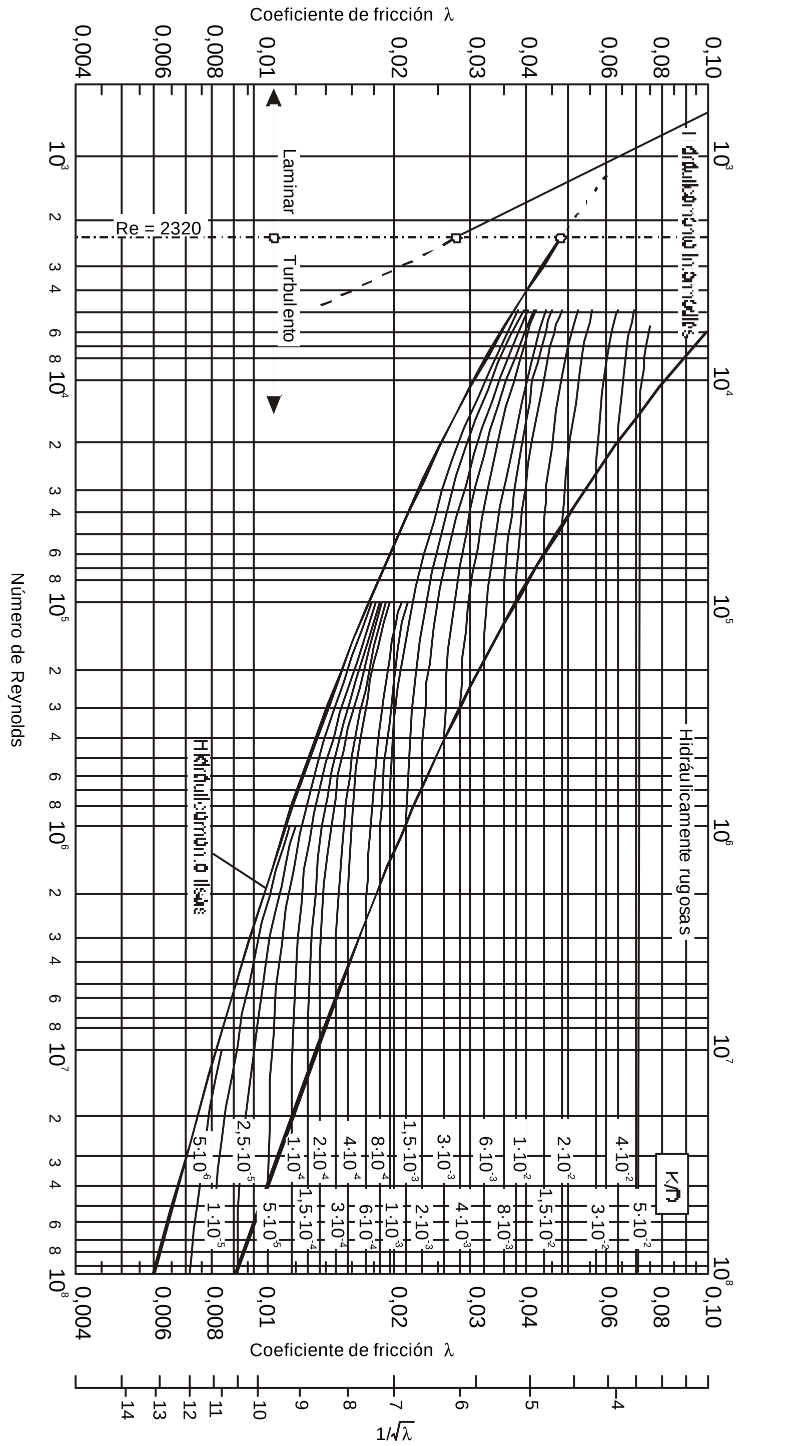

DIAGRAMA DE ROUSE

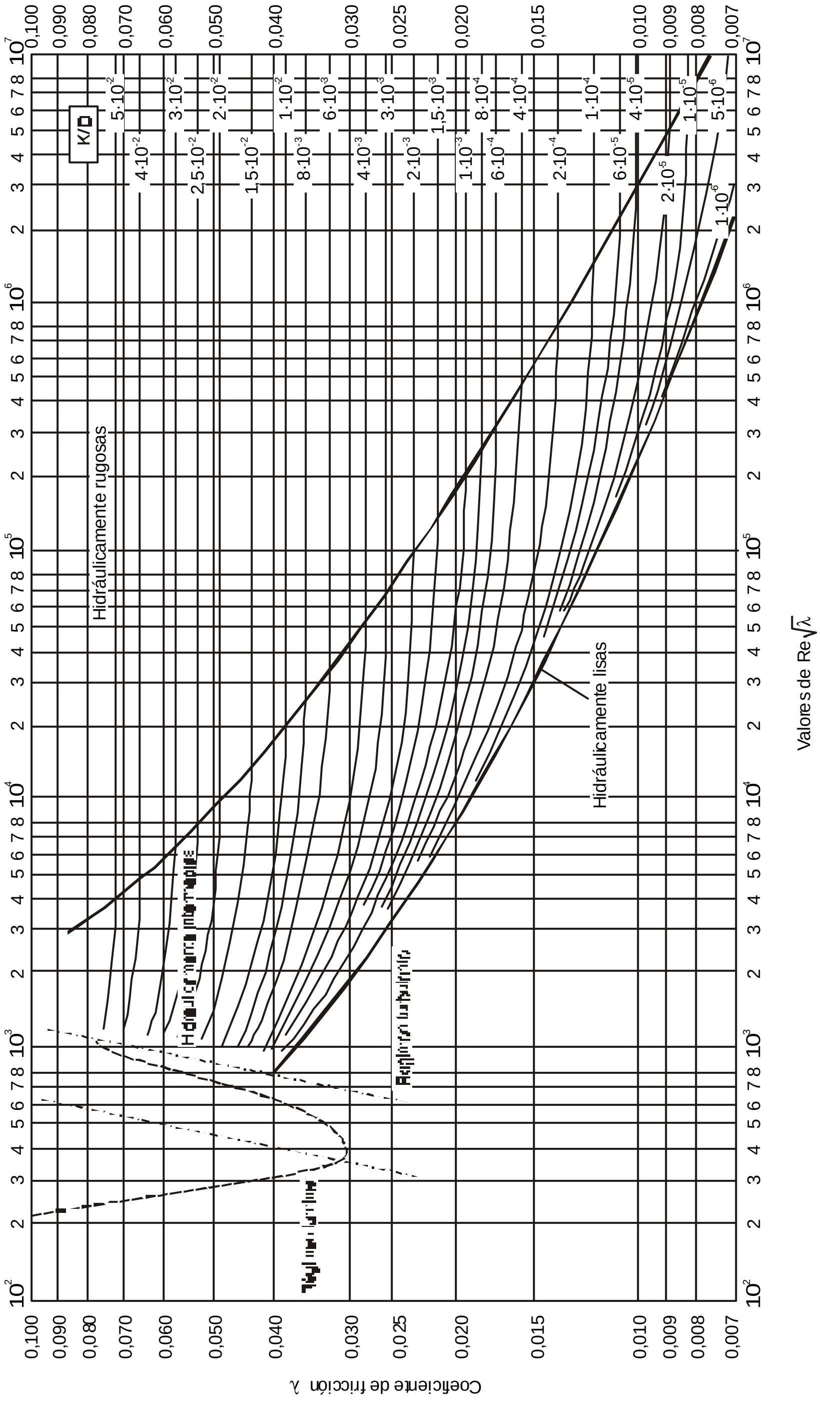

DIAGRAMA DE ROUSE

En el cálculo directo de la velocidad y el caudal, no es necesario la obtención de λ coeficiente de fricción, como se observa en las fórmulas expuestas anteriormente de Prandtl-Colebrook. Sin embargo a veces puede ser conveniente la utilización de éste diagrama cuando se conoce $\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}$ y el cociente k/D para obtener λ.

En este caso la ecuación que determina $\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}$, viene expresada por la ecuación:

$$\mathrm{Re}\sqrt{\lambda} = \frac{D}{\nu}\sqrt{\frac{2gDh_r}{L}}$$

El diagrama se recoge en la página anterior