MOVIMIENTO EN TUBERÍAS DE FLUIDOS EN GENERAL

Proyecto y cálculo de tuberías para gases y líquidos viscosos

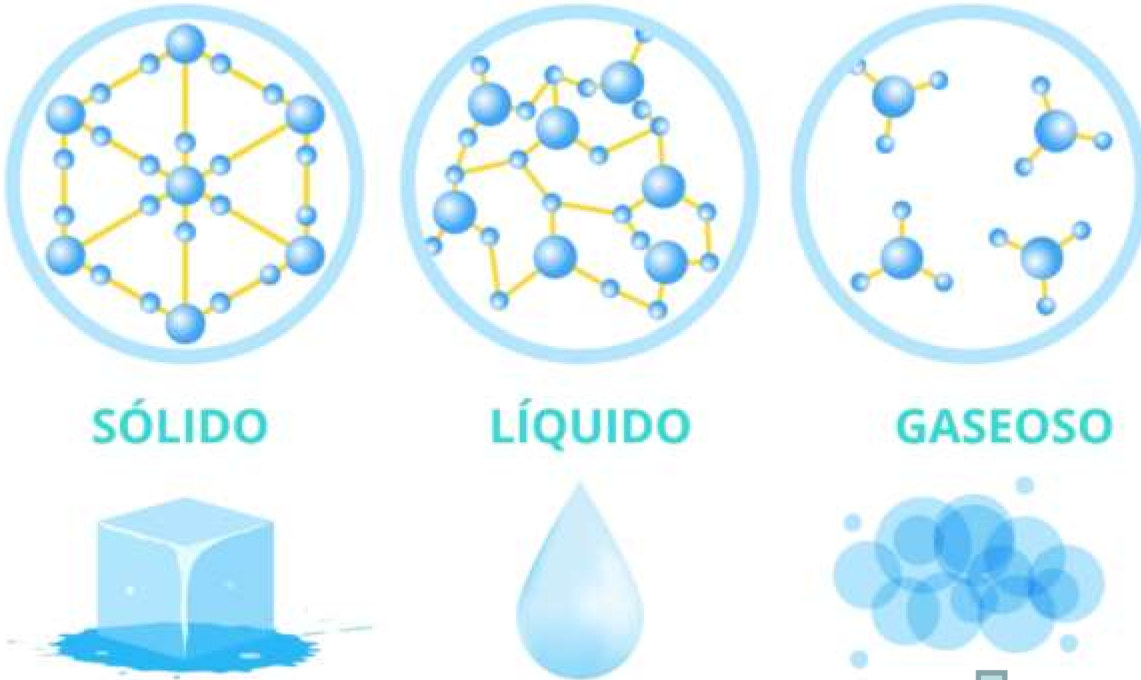
Diferencia entre Líquidos y Gases

Compresibilidad

Los líquidos son incompresibles, por ejemplo, para el agua por cada kg/cm^2 de presión, la reducción de volumen es del 0.005%, o sea que es prácticamente despreciable.

Los gases resultan muy compresibles, porque experimentan grandes variaciones de volumen en función de las presiones actuantes.

Diferencia entre Líquidos y Gases



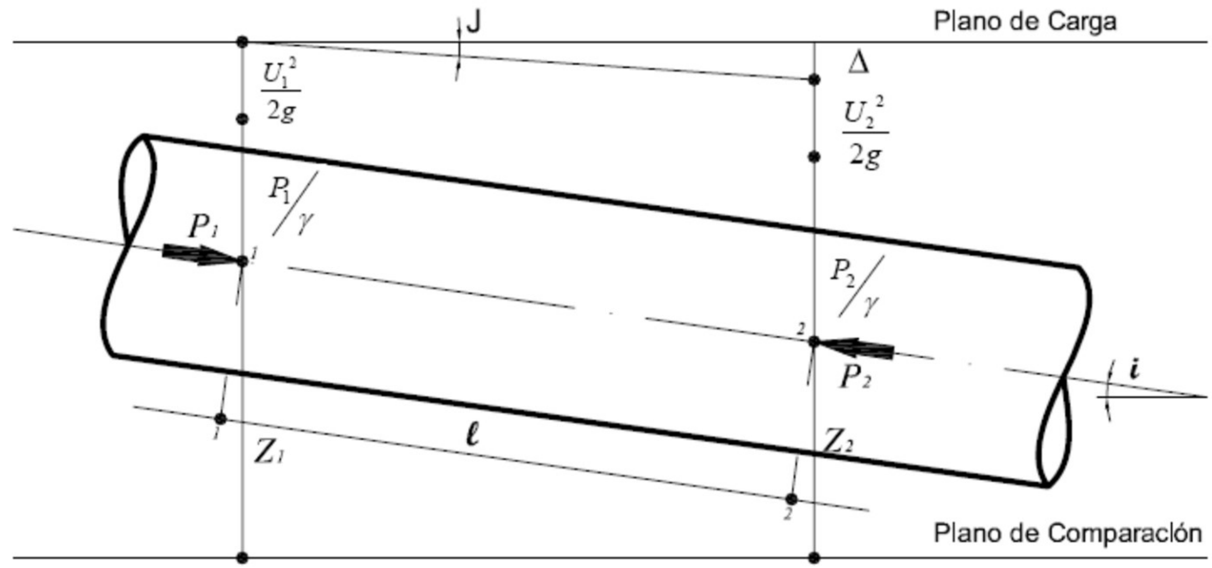
Volumen de líquido constante

Volumen de gas depende de la presión

$$p = \frac{R \times T \times M}{Vol}$$

LEY UNIVERSAL DE LOS GASES

FLUÍDOS INCOMPRESIBLES (agua)



$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} \right) = \Delta$$

$$CP_1 - CP_2 = H = \Delta$$

$$\Delta = \int_1^2 J.dx = J \times l$$

$$H = \Delta = J \times l$$

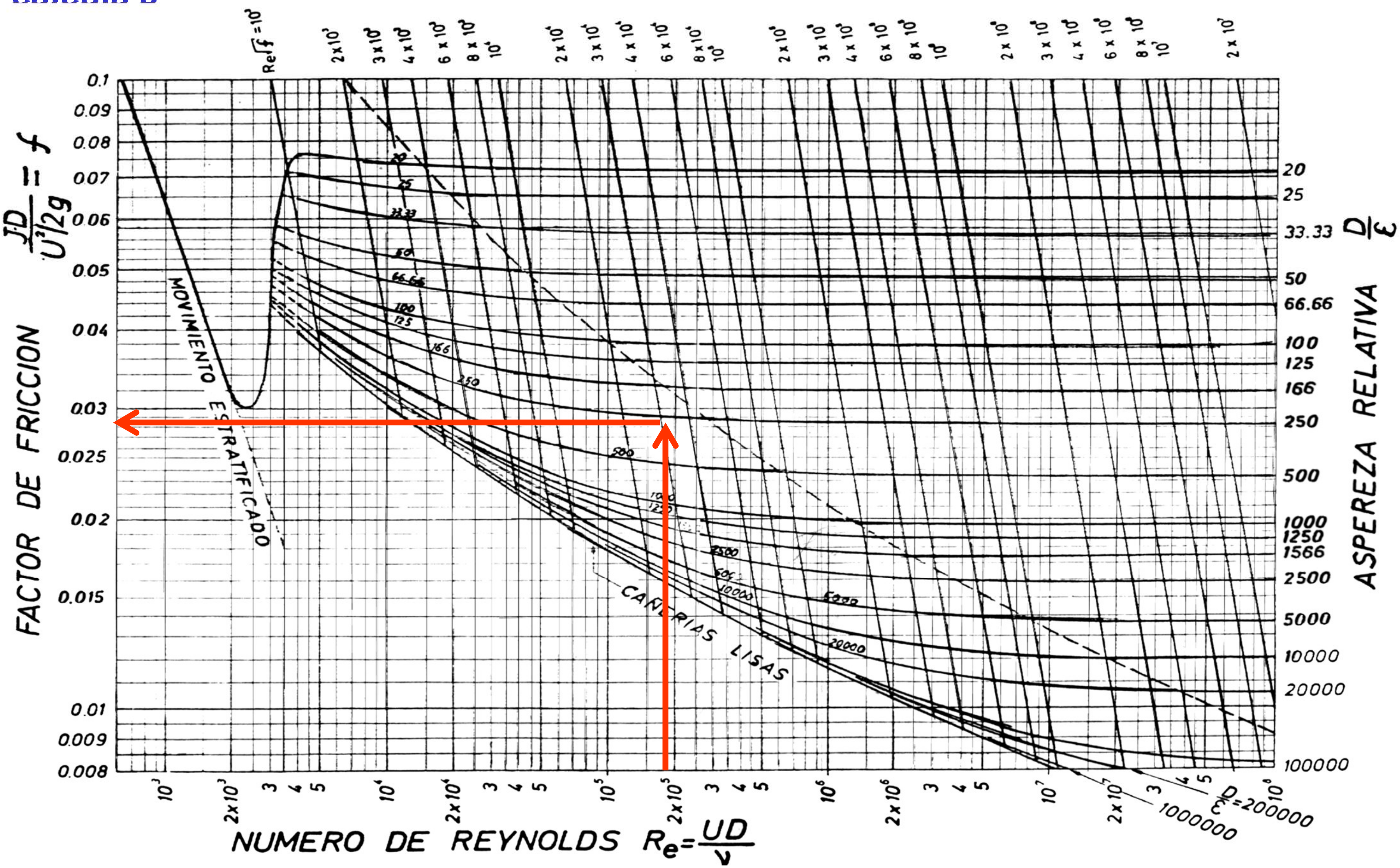
$$J = \frac{H}{l}$$

ECUACIÓN DE LA TUBERÍA

Cálculo de la pérdida de carga

Datos: Q, D, ε. Con Q y D se calcula U, luego Re. Con D/ε se lee λ, y luego se calcula J

$$J.D = \lambda.\frac{U^2}{2g} \therefore J_{cálculo} = \frac{\lambda}{D}.\frac{U^2}{2g}$$



FLUÍDOS INCOMPRESIBLES (agua)

$$J = \frac{\lambda \times U^2}{2 \times g \times D} \Rightarrow H = \Delta = J \times L = \frac{\lambda \times U^2}{2 \times g \times D} \times L$$

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} \right) = \Delta$$

$$p_1 - p_2 = \gamma \times H + \gamma (z_1 - z_2) \Rightarrow \frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{\lambda \times U^2}{2 \times g \times D} \times L + (z_1 - z_2)$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{\lambda \times L}{D} \times \frac{U^2}{2g} + (z_1 - z_2)$$

FLUIDOS COMPRESIBLES

ECUACIONES GENÉRICAS

$$J \times D = \frac{\lambda \times U^2}{2 \times g} \Rightarrow H = J \times L = \frac{\lambda \times U^2}{2 \times g \times D} \times L$$

$$H = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right) \Rightarrow H - (z_1 - z_2) = \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_1 - p_2}{\gamma}$$

$$\boxed{\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{\lambda \times L}{D} \times \frac{U^2}{2g} + (z_1 - z_2)}$$

$$p_1 - p_2 = \gamma \times H - \gamma (z_1 - z_2) \Rightarrow \frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{\lambda \times U^2}{2 \times g \times D} \times L + (z_1 - z_2)$$

ECUACIONES PARA FLUIDOS COMPRESIBLES

$$p = \frac{R \times T \times M}{Vol}$$

FLUIDOS COMPRESIBLES ISOTÉRMICOS IDEALES

$$p = R \times T \times \underbrace{\frac{M}{Vol}}_{\delta} \Rightarrow p = R \times T \times \delta \qquad \delta = \frac{p}{R \times T} \Rightarrow T = cte. \Rightarrow \frac{p}{\delta} = cte \qquad \frac{p}{\delta} = cte$$

$$Q_m = Q_V \times \delta = U \times \omega \times \delta = CONSTANTE$$

$$Q_{m1} = U_1 \times \omega_1 \times \delta_1 = U_2 \times \omega_2 \times \delta_2 \rightarrow \omega_1 = \omega_2 \qquad \delta_1 \times U_1 = \delta_2 \times U_2$$

$$\boxed{\frac{\delta_2}{\delta_1} = \frac{U_1}{U_2} \Rightarrow \frac{\delta_2}{\delta_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{p_2}{p_1}}$$

FLUIDOS COMPRESIBLES ISOTÉRMICOS IDEALES

$$z+\frac{p}{\gamma}+\frac{U^2}{2g}+J\times L=B=cons\tan te$$

$$\frac{dp}{\gamma}+\frac{2U}{2g}dU+J\times dx=0$$

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

$$\frac{dp}{\gamma}+\frac{U}{g}dU+\frac{\lambda}{D}\times\frac{U^2}{2g}\times dx=0$$

$$-dp=\gamma\times\frac{U}{g}\times dU+\frac{\lambda}{D}\times\gamma\times\frac{U^2}{2g}\times dx\Rightarrow\gamma=\delta\times g$$

$$-\mathrm{dp}=\frac{\lambda}{\mathrm{D}}\times\delta\times\frac{\mathrm{U}^2}{2}\times\mathrm{dx}+\delta\times\mathrm{U}\times\mathrm{dU}$$

$$\boxed{\Rightarrow p_1^2-p_2^2=\frac{\lambda\times L}{D}\delta_1\times p_1\times U_1^2}$$

FLUIDOS COMPRESIBLES ISOTÉRMICOS NO IDEALES

$$\rho=\frac{\mathrm{p}}{\mathrm{R}\times\mathrm{T}}\Rightarrow\mathrm{T}=\mathrm{cte.}$$

$$p_1^2-p_2^2=\frac{\lambda\times L}{D}\times\delta_1\times p_1\times U_1^2\times K+g\times(z_1-z_2)\times(\delta_t-\delta_a)$$

Factor de compresión K. Determinar el valor K con:

$$p_m=\frac{2}{3}\times\frac{p_1^3-p_2^3}{p_1^2-p_2^2}$$

TRANSPORTE DE PETRÓLEO

Una tubería de acero (ε=0,3mm) de 15 cm de diámetro y 3000m de longitud impulsa 120 tn/h de petróleo viscoso. Calcular la pérdida de carga con una temperatura media de 35°C. Las características del petróleo son las siguientes.

T (°C)	DENSIDAD δ (kg/m^3)	VISCOSIDAD CINEMÁTICA νx 10^{-6} (m^2/s)
20	930	1000
35	920	550
50	910	100

$$\omega = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times 0{,}15^2\ m^2}{4} = 0{,}018\ m^2$$

$$Q_m = \delta \times U \times \omega \Rightarrow U = \frac{Q_m}{\delta \times \omega} = \frac{120\ tn}{h}\frac{m^3}{920\ kg}\frac{1}{0{,}018\ m^2} = 2{,}05\ m/s$$

$$\mathrm{Re} = \frac{U \times D}{\nu} = \frac{2{,}05\ m}{s}\frac{0{,}15\ m \times s}{0{,}0003\ m^2} = 1023 \Rightarrow M.LAMINAR$$

$$\mathrm{Re} \times \lambda = 64 \Rightarrow \lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}} = \frac{64}{1023} = 0{,}063$$

$$H = \lambda \frac{U^2}{2 \times g}\frac{L}{D} = 0{,}063\ \frac{(2{,}05\ m/s)^2}{2 \times 9{,}81\ m/s^2}\frac{3000\ m}{0{,}15\ m} = 267{,}39\ m$$

$$\Delta p = \gamma \times H = \delta \times g \times H = 920\frac{kg}{m^3} \times 9{,}81\frac{m}{s^2} \times 267{,}39m \times \frac{1kgf}{9{,}81N} \times \frac{1m^2}{10^4 cm^2} = 24{,}6\frac{kgf}{cm^2}$$

$$\Delta p = 24{,}6\frac{kgf}{cm^2} \times \frac{1atm}{1{,}033\frac{kgf}{cm^2}} = 23{,}81atm$$

TRANSPORTE DE PETRÓLEO LIGERO

Calcular la pérdida de presión en un oleoducto para transportar 70 m³/h de petróleo ligero en una distancia de 20km en una tubería de acero (ε=0,2mm) de 125 mm de diámetro.

La tubería está en superficie sin aislamiento. La temperatura está entre los 0°C y 20°C.

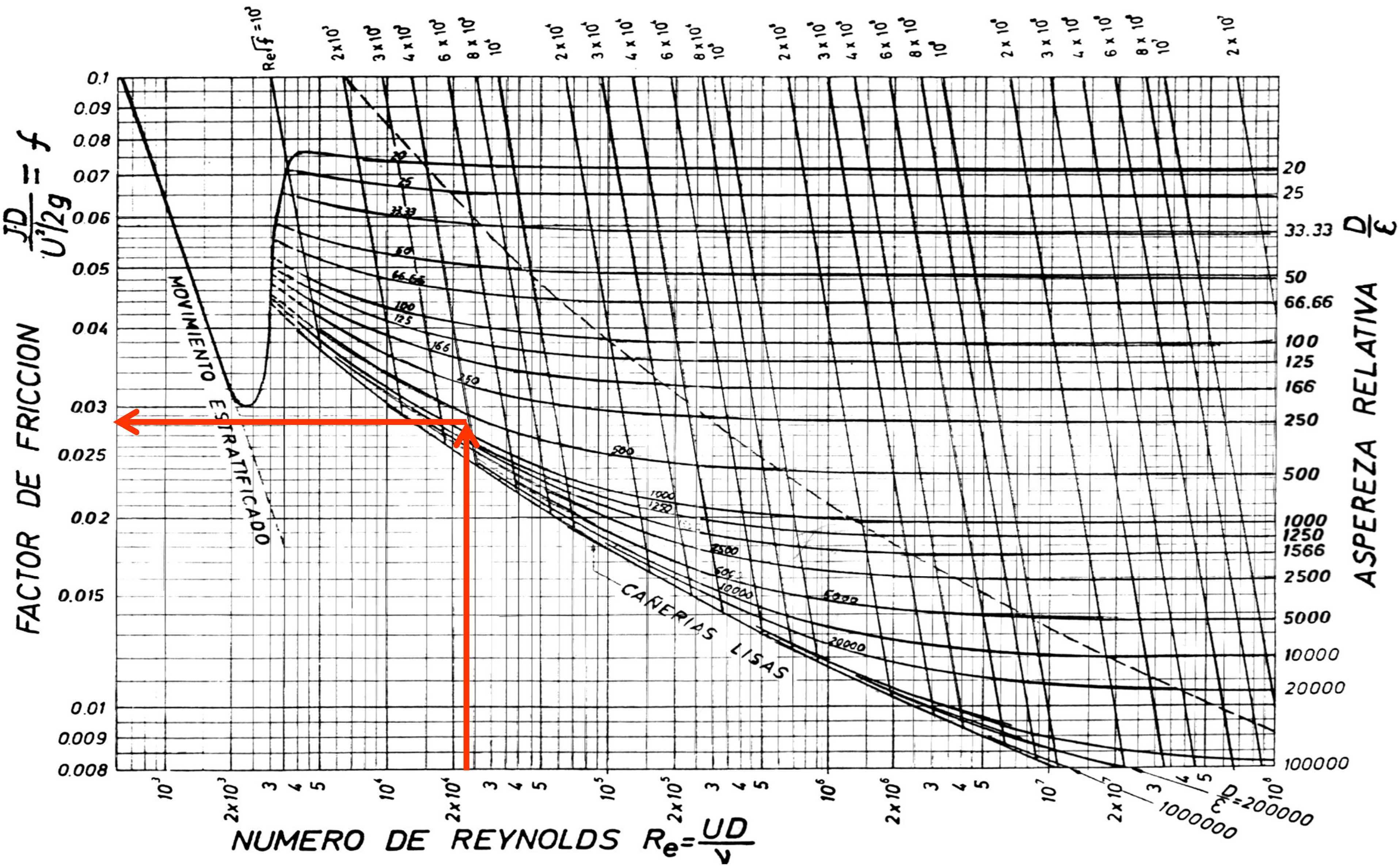
T (°C)	DENSIDAD δ (kg/m³)	VISCOSIDAD CINEMÁTICA ν x 10^{-6} (m²/s)
20	850	8,5
0	865	20

$$\omega = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times 0{,}125^2\, m^2}{4} = 0{,}0123\ m^2$$

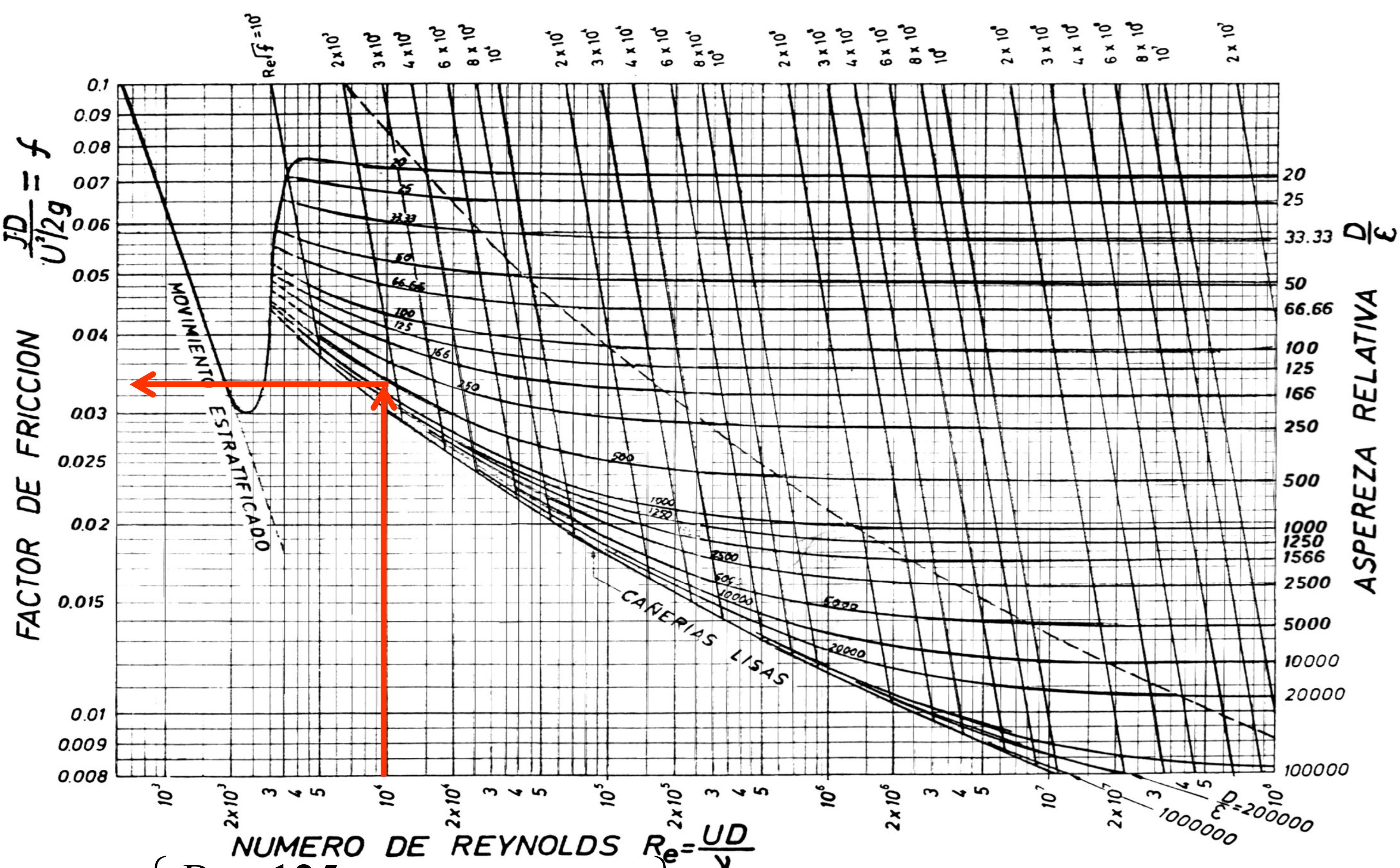
$$Q_V = U \times \omega \Rightarrow U = \frac{Q_V}{\omega} = \frac{70\ m^3}{h}\frac{1}{0{,}0123\ m^2}\frac{1h}{3600\ s} = 1{,}581\ m/s$$

$$\mathrm{Re}_{20\,^\circ C} = \frac{U \times D}{\nu} = \frac{1{,}581\ m}{S}\frac{0{,}125\ m \times s}{8{,}5 \times 10^{-6}\ m^2} = 23250 \quad \Rightarrow M.TURBULENTO$$

$$\mathrm{Re}_{0\,^\circ C} = \frac{U \times D}{\nu} = \frac{1{,}581\ m}{S}\frac{0{,}125\ m \times s}{2 \times 10^{-5}\ m^2} = 9881 \quad \Rightarrow M.TURBULENTO$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \dfrac{D}{\varepsilon} = \dfrac{125}{0{,}2} = 625 \\ \mathrm{Re}_{20^\circ C} = 23250 = 2{,}3 \times 10^4 \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda = 0{,}0285 \Rightarrow s\,/\,Moody$$



$$\left\{\begin{array}{l}\dfrac{D}{\varepsilon}=\dfrac{125}{0,2}=625\\[2ex] \mathrm{Re}_{0^\circ C}=9881=9,9\times 10^{3}\end{array}\right\}\Rightarrow \lambda = 0,033 \Rightarrow s\,/\,Moody$$

TRANSPORTE DE PETRÓLEO LIGERO

Cálculo de la pérdida de presión

$$H_{20°C} = \lambda \frac{U^2}{2 \times g} \frac{L}{D} = 0{,}0285 \frac{(1{,}58\, m/s)^2}{2 \times 9{,}81\, m/s^2} \frac{20000\ m}{0{,}125\, m} = 580{,}204\, m$$

$$H_{0°C} = \lambda \frac{U^2}{2 \times g} \frac{L}{D} = 0{,}033 \frac{(1{,}58\, m/s)^2}{2 \times 9{,}81\, m/s^2} \frac{20000\ m}{0{,}125\, m} = 671{,}81 m$$

$$\Delta p = \gamma \times H$$

$$\Delta p_{20°C} = \gamma \times H_{20°C} = \delta \times g \times H_{20°C} = \frac{850kg}{m^3} \times 9{,}81 \frac{m}{s^2} \times 580{,}20m \times \frac{1kgf}{9{,}81N} \times \frac{1m^2}{10^4\, cm^2}$$

$$\Delta p_{20°C} = 49{,}32 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\Delta p_{0°C} = \gamma \times H_{0°C} = \delta \times g \times H_{20°C} = \frac{865kg}{m^3} \times 9{,}81 \frac{m}{s^2} \times 671{,}81m \times \frac{1kgf}{9{,}81N} \times \frac{1m^2}{10^4\, cm^2}$$

$$\Delta p_{0°C} = 58{,}11 \frac{kgf}{cm^2}$$

VAPOR RECALENTADO. (GAS IDEAL EXPANSIVO ISOTERMICO, T=CTE)

Por una tubería de acero de 200 mm de diámetro y una longitud de 350 m se impulsan 28 ton/hora de vapor recalentado. El manómetro de salida del recalentador indica 22 atmósferas de presión y la temperatura es de 300ºC.

Calcular la presión de salida de la tubería indicada como p_2.

$T_1=T_2$

Como se trata de un gas cuyo comportamiento puede considerarse ideal, se usa la viscosidad dinámica μ, que en este caso sólo varía con la presión, no con la temperatura.

Para T=300ºC, p_1 = 20 atm. δ = 7.81 kg/ m^3
Para T=300ºC, p_1 = 25 atm. δ = 9.90 kg/ m^3
Para T=300ºC, p_1 = 22 atm. δ = 8.65 kg/ m^3, en Sistema Internacional de medidas
Para T=300ºC, p_1 = 20 atm. μ = 20.30 10^{-6} kg/ m.s
Para T=300ºC, p_1 = 50 atm. μ = 20.70 10^{-6} kg/ m.s
Para T=300ºC, p_1 = 22 atm. μ = 20.33 10^{-6} kg/ m.s, en Sistema Internacional de medidas.

Se puede calcular el peso específico en función de la densidad de la siguiente manera

$$\gamma = \delta \times g = 8{,}65\frac{kg}{m^3} \times 9{,}81\frac{m}{s^2} = 84{,}86\frac{kg}{m^2 \times s^2}$$

Se puede calcular el Q, la U, el Re y la J.

$$\omega = \frac{\pi \times D^2}{4}; Q_m = \delta \times U \times \omega \Rightarrow Q_m = \delta \times Q; U = \frac{Q}{\omega \times \delta}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{U \times D}{\nu} = \frac{U \times D \times \delta}{\mu}; J = \lambda \frac{U^2}{2 \times g}\frac{L}{D}$$

$$H = J \times L; p = \gamma \times H; p_1^2 - p_2^2 = \lambda \times \frac{L_t}{D} \times U_1^2 \times \delta_1 \times p_1$$

Cálculo del Q, la U y el Re.

$$Q = \frac{Q_m}{\delta} = \frac{28t}{h} \times \frac{1h}{3600s} \times \frac{1000kg}{1tn} \times \frac{1}{8,65kg/m^3} = 0,899m^3/s \cong 0,90m^3/s$$

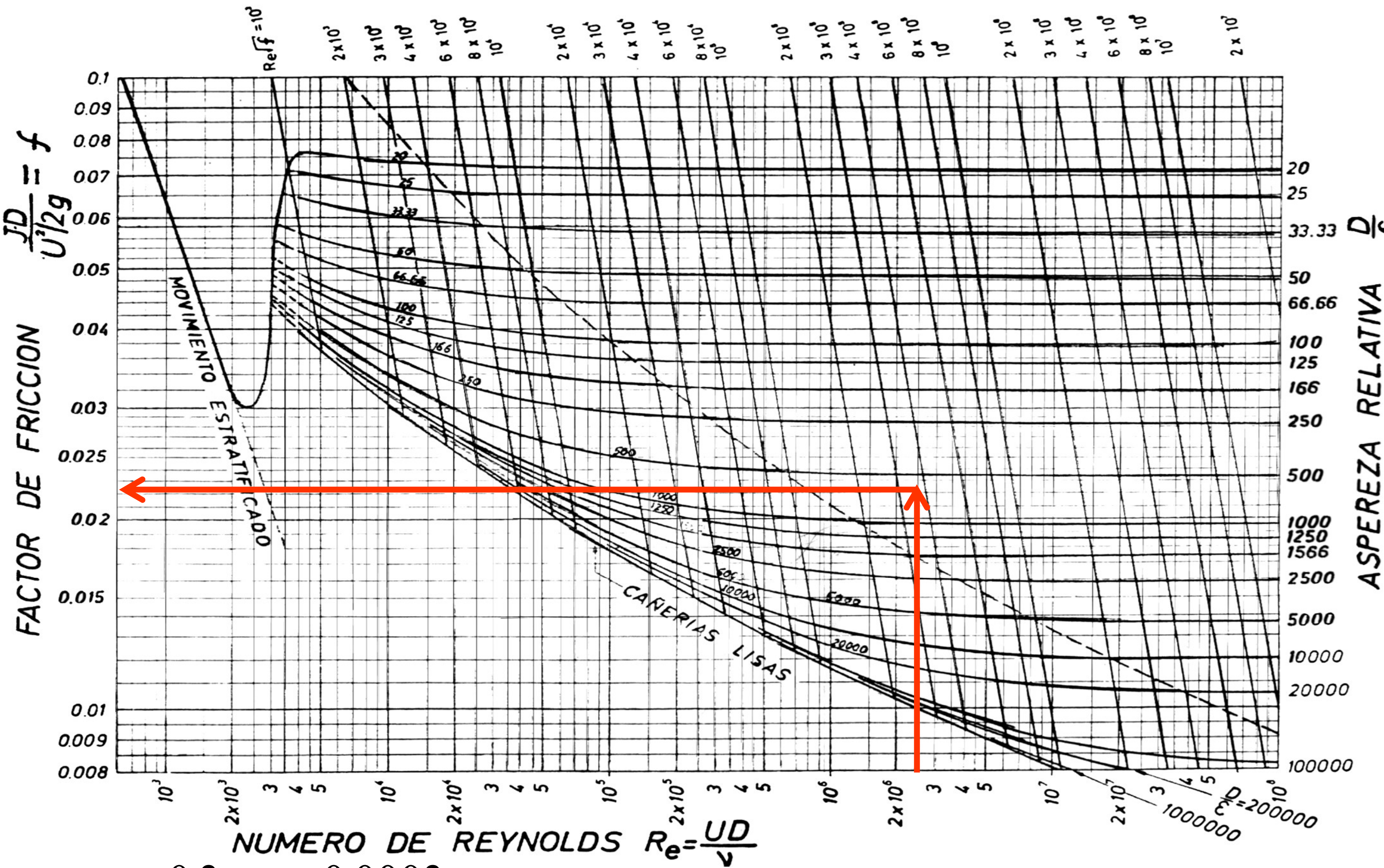
$$\omega = \frac{\pi \times 0,20^2 m^2}{4} = 0,0314m^2$$

$$U = \frac{Q}{\omega} = \frac{0,90m^3/s}{0,0314m^2} = 28,66m/s$$

$$\nu = \frac{\mu}{\delta} = \frac{20,33 \times 10^{-6} kg/m.s}{8,65kg/m^3} = 2,35 \times 10^{-6} m^2/s$$

$$\mathrm{Re} = \frac{28,66m/s \times 0,20m}{2,35 \times 10^{-6} m^2/s} = 2439149 \rangle 2000 \Rightarrow MOV.TURBULENTO$$

Cálculo de la pérdida de carga unitaria J (Moody).



$$\varepsilon = 0{,}3mm = 0{,}0003m$$

$$D/\varepsilon = 667$$

$$\mathrm{Re} = 2439149 = 2{,}45 \times 10^6$$

Del Gráfico de Moody λ=0,0225

Cálculo de la presión a la salida de tubería p_2

$$p_1^2 - p_2^2 = \lambda \times \frac{L_t}{D} \times U_1^2 \times \delta_1 \times p_1$$

$$p_1 = 22atm. \times \frac{1{,}033kgf}{atm \times cm^2}^{2} = 22{,}73kgf/cm^2$$

$$p_1^2 - p_2^2 = 0{,}0225 \times \frac{478m}{0{,}2m} \times 28{,}66^2 \frac{m^2}{s^2} \times 8{,}65\frac{kg}{m^3} \times 22{,}73\frac{kgf}{cm^2} \times \frac{1kgf}{9{,}81\frac{kg.m}{s^2}} \times \frac{1m^2}{10^4 cm^2} = 88{,}53\left(\frac{kgf}{cm^2}\right)^2$$

$$p_2 = \sqrt{p_1^2 - 88{,}53\left(\frac{kgf}{cm^2}\right)^2} = 20{,}69kgf/cm^2$$

$$p_2 = 20{,}69\frac{kgf}{cm^2} \times \frac{9{,}81N}{1kgf} \times \frac{10^4 cm^2}{1m^2} = 2027620N/m^2$$

$$p_2 = 2027{,}6kN/m^2 = 2027{,}6kPa$$

GAS EXPANSIVO NO ISOTÉRMICO

Una tubería de acero de diámetro 100 mm, conduce aire a presión y tiene una longitud de 1200m. La presión en la tubería es de 8 atm, y la temperatura es de 20ºC. El caudal en condiciones normales de presión y temperatura (273ºK y 1 atm) es de 850 m^3/h. Calcular la capacidad a temperatura y presión de trabajo y la pérdida de carga o presión.

CÁLCULO DEL CAUDAL TRANSPORTADO A 20ºC Y 8 atm

p_n=1atm; p_1=8atm; Tn=273°K; T_1= 20°C

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1} \times \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow V_1 = V_n \times \frac{p_n \times T_1}{p_1 \times T_n} = 850 \frac{m^3}{h} \times \frac{1h}{3600s} \times \frac{1atm \times 293^{\circ} K}{8atm \times 273^{\circ} K} = 0{,}032 m^3/s$$

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD

$$U = \frac{Q}{\omega} = \frac{0{,}032 m^3/s}{\pi \times D^2/4} = \frac{0{,}032 m^3/s}{\pi \times (0{,}1m)^2/4} = 4{,}04 m/s$$

Este valor de velocidad es bajo, y producirá una pérdida de carga baja, entonces el cálculo puede realizarse como fluido incompresible. Se calculan los parámetros para ingresar al Gráfico de Moody

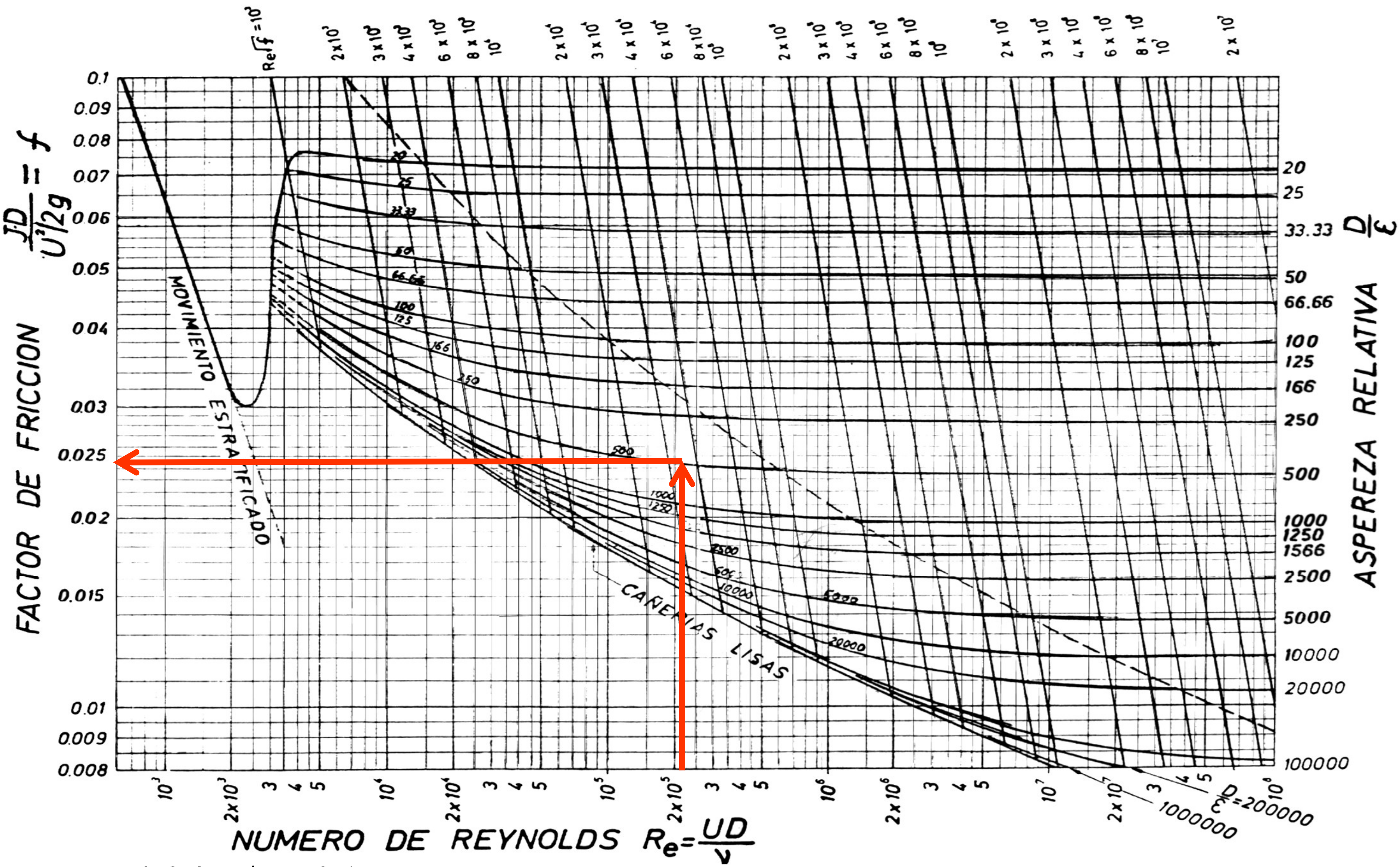
CÁLCULO DE Re

$$\mathrm{Re} = \frac{U \times D}{\nu}$$

TEMPERATURA (ºC)	VISCOSIDAD DINAMICA (kg.s/m^2)	DENSIDAD (kgf.s^2/m^4)	
15,6	1,83 10^{-6}	0,125	
26,7	1,88 10^{-6}	0,120	
20	1,85 10^{-6}	0,123	

$$\delta = \delta_n \times \frac{p}{p_n} = 0{,}123\frac{kg.s^2}{m^4} \times \frac{8atm}{1atm} = 0{,}98\frac{kg.s^2}{m^4}$$

$$\nu = \frac{1{,}85 \times 10^{-6}\,kg.s}{m^2} \times \frac{m^4}{0{,}98kg.s^2} = 1{,}88 \times 10^{-6}\,m^2 / s$$



$$\mathrm{Re} = \frac{4{,}04\, m/s \times 0{,}1\, m}{1{,}88 \times 10^{-6}\, m^2/s} = 214894 = 2{,}15 \times 10^5$$

Del Gráfico de Moody λ=0,0245

$$\varepsilon = 0{,}2m \Rightarrow D/\varepsilon = 0{,}1m / 0{,}0002m = 500$$

CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE CARGA

COMO FLUIDO INCOMPRESIBLE

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \lambda \times \frac{L}{D} \times \frac{U^2}{2} \times \delta = 0{,}0245 \times \frac{1200m}{0{,}1m} \times \frac{4{,}04^2\, m^2/s}{2} \times 0{,}98 \frac{kg.s^2}{m^4} = 2361 kg/m^2$$

$$p_1 - p_2 = 0{,}24 kgf/cm^2$$

COMO FLUIDO EXPANSIVO

$$p_1^2 - p_2^2 = \lambda \times \frac{L_t}{D} \times U_1^2 \times \delta_1 \times p_1 = 0{,}0245 \times \frac{1200m}{0{,}1m} \times 4{,}04^2 \times 0{,}98 \frac{kgf.s^2}{m^4} \times \frac{8atm}{1atm} \times 10330 kgf/m^2$$

$$p_1^2 - p_2^2 = 390207369{,}8 (kgf/m^2)^2 = 3{,}90 (kgf/cm^2)^2$$

$$p_2^2 = p_1^2 - 3{,}90 (kgf/cm^2)^2 = 64{,}39 (kgf/cm^2)^2$$

$$p_2 = 8{,}02 kgf/cm^2$$

$$p_1 - p_2 = 0{,}24 kgf/cm^2$$

$$H = \frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{0{,}24 kgf/cm^2}{\delta \times g} = \frac{0{,}24 kgf/cm^2}{0{,}98 \frac{kgf.s^2}{m^4} \times 9{,}81 \frac{m}{s^2}} \times \frac{10^4 cm^2}{1m^2} = 252{,}8m$$

Calcular la presión final en una tubería nueva de fundición (ε=0,009cm) de 10cm de diámetro y 540m de longitud, cuya presión inicial es de 3,50kgf/cm^2, cuando circula un caudal de 0,34kg/s de aire en condiciones isotérmicas y a 32ºC de temperatura. μ=1,9 10^{-6} kgf s/m^2, densidad 1,16kg/m^3.

Rta. 3,2 kgf/cm^2

Calcular el caudal de aire a 20ºC que puede transportar una tubería de acero nueva (ε=0,0075cm) y horizontal de 5cm de diámetro a una presión de 3 atmósferas y con una pérdida de presión de 3,50 10^{-2} kgf/cm^2 en 100m de tubería. Densidad del aire 1,20kg/m^3 y ν=1,49 10^{-5} m^2/s para una presión de una atmósfera.

Rta. 12,1 l/s