



MECÁNICA DE FLUIDOS II

Prácticas de laboratorio

2022/2023

Jesús del Villar Prieto 20087
Jorge Delgado Amar 20089
Jorge Ruano Lahoz 20301
Marco Antonio Buitrago López 21389

14 de mayo de 2023

Índice

1. Medida de caudal	3
1.1. Objetivo	3
1.2. Rotámetro	3
1.3. Venturímetro y diafragma	4
1.4. Cuestiones	5
2. Medida de la velocidad	8
2.1. Descripción	8
2.2. Instrumentos de medida	8
2.3. Fundamento teórico	9
2.4. Cuestiones	10
3. Pérdidas de carga	14
3.1. Objetivo de la práctica	14
3.2. Pérdidas primarias	14
3.3. Pérdidas secundarias	15
3.4. Banco de ensayos	16
3.5. Cuestiones	16
4. Anexo	20
4.1. Medida de caudal	20
4.2. Medida de la velocidad	21
4.3. Pérdidas de carga	22
4.4. Diagrama de Moody	23

Índice de figuras

1.1. Esquema de fuerzas en el rotámetro.	3
1.2. Venturímetro y diafragma.	4
1.3. Esquema con medidas de la instalación.	5
1.4. C_v en función del Re para un venturímetro.	6
1.5. C en función del Re para un diafragma.	7
2.1. Banco de ensayo para la determinación de la distribución de velocidad en un chorro libre.	8
2.2. Disminución de la velocidad local en el centro del chorro, correspondiendo el punto que está a 0 mm del chorro a v_0	10
2.3. Perfiles de velocidad de cada sección, representando los puntos experimentales, la curva experimental y la teórica.	10
2.4. Evolución de las curvas experimentales y teóricas por sección, correspondiendo cada z_i de menor a mayor sección	11
2.5. Gasto másico por sección	12
2.6. Gasto másico del aire arrastrado	12
3.1. Instrumentos de medida.	14
3.2. Medida del coeficiente K en las pérdidas secundarias mediante un manómetro de agua con posibles secciones distintas antes y después de la discontinuidad.	15
3.3. Esquema de la instalación.	16
3.4. Representación gráfica del Reynolds frente al factor de fricción para tramos horizontales.	17

3.5. Puntos experimentales sobre la gráfica de Moody, correspondiendo los azules al circuito azul oscuro y los puntos rojos al circuito azul claro.	17
3.6. Representación de Re-K del circuito azul oscuro de cada tramo	18
3.7. Representación de Re-K del circuito azul claro de cada tramo	19
4.1. Datos de la práctica 1	20
4.2. Datos de la práctica 2	21
4.3. Datos de la práctica 3	22
4.4. Diagrama de Moody	23

1. Medida de caudal

1.1. Objetivo

El objetivo de la práctica uno es obtener datos de distintos caudalímetros, como son un rotámetro, un venturímetro y un diafragma, a la vez que se obtienen constantes características de estos, para contrastar sus medidas con otros métodos de medida de caudal como la medida directa.

El método más útil a la hora de medir un caudal siendo el flujo estacionario, sería una medida directa del caudal viendo cuántos litros de fluido pasan por el conducto en un tiempo determinado. Sin embargo, para que este método sea preciso necesita de mucho tiempo y grandes cantidades de fluido.

Para ello, contamos con otros sistemas de medida de caudal que son más inmediatos, económicos y versátiles; aunque también cuentan con desventajas como la no linealidad de la señal de salida, la imprecisión respecto a los primeros (medida directa) o la verificación de sus medidas por comparación con otros caudalímetros.

1.2. Rotámetro

El efecto principal del funcionamiento del rotámetro es la generación de fuerzas. Consiste en un tubo transparente de sección variable (que aumenta con la altura) por el que pasa el fluido, con un cuerpo en su interior. Este cuerpo se moverá dentro del tubo en función del caudal del fluido, ya que el pequeño espacio lateral que hay entre el cuerpo y el tubo da lugar a una variación de presión, que a su vez generará una fuerza ascendente.

Si esta fuerza supera la fuerza descendente ejercida por el peso del cuerpo menos el empuje, el cuerpo subirá (disminuyendo así la diferencia de presión con la altura, ya que la sección del tubo es cada vez más grande) hasta quedar en equilibrio ambas fuerzas.

Por lo explicado anteriormente, llegamos a la conclusión de que un rotámetro deberá tener proporcionalidad entre caudal y altura, siendo la constante de proporcionalidad k la constante del rotámetro.

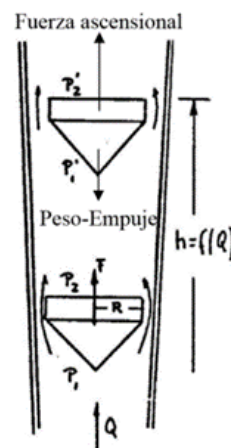


Figura 1.1: Esquema de fuerzas en el rotámetro.

1.3. Venturímetro y diafragma

El efecto principal del funcionamiento de ambos caudalímetros es la generación de una diferencia de presiones a partir de la cuál se mide directamente el caudal. Esta diferencia de presiones se consigue gracias a un estrechamiento de la sección de paso del tubo. La gran diferencia entre el venturímetro y el diafragma es que el estrechamiento del primero es gradual, mientras que el estrechamiento del segundo es directo (se pone una placa de sección de paso menor concéntrica). El venturímetro tiene como ventaja sobre el diafragma que genera unas pérdidas de carga muy pequeñas, mientras que el diafragma ocupa mucho menos espacio que el venturímetro.

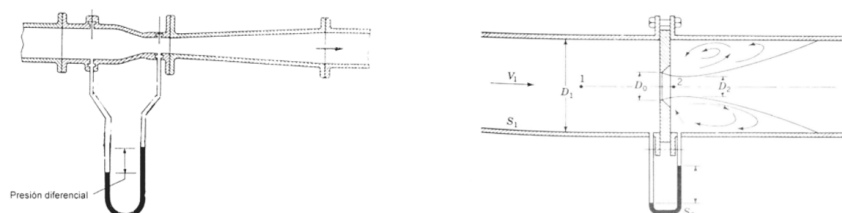


Figura 1.2: Venturímetro y diafragma.

La medida del caudal en venturímetro y diafragma se consigue con una fórmula que se obtiene a partir de la ecuación de Bernoulli y la ecuación de continuidad. Sin embargo, esta fórmula es solo válida para fluidos ideales por lo que hay que añadirle unos parámetros que marquen el comportamiento no ideal del fluido en la fórmula.

En caso del venturímetro, añadimos un parámetro que marca la no uniformidad de la distribución de velocidades y pérdidas de carga.

Ese parámetro es el coeficiente de velocidad C_v , el cual es característico de cada caudalímetro y depende de la geometría y del número de Reynolds. El C_v aumenta con el número de Reynolds hasta un valor límite que coincide con la unidad. A partir de ese valor, el C_v se mantiene constante aun aumentando el número de Reynolds. Esta es la zona en la que se suele trabajar, a números de Reynolds altos.

En caso del diafragma, a parte del C_v debemos tener en cuenta el efecto generado por los remolinos que se forman aguas debajo del estrechamiento debido a ser un estrechamiento directo y no progresivo como en el venturímetro. El parámetro que recoge este defecto es el coeficiente de contracción C_c . El producto entre ambos coeficientes C_v y C_c da lugar al coeficiente de descarga C_d , el cual aparece en la fórmula que define el coeficiente de diafragma C .

Este coeficiente incluye todos los efectos que se producen en el diafragma, y al igual que el C_v también es característico del caudalímetro y depende de la geometría y del número de Reynolds. El coeficiente de diafragma disminuye con el número de Reynolds hasta un valor límite (que no es la unidad) a partir del cual no varía al aumentar el número de Reynolds. También nos interesa trabajar en esa zona en la que C no varía.

La instalación usada en la práctica consiste en un circuito cerrado con un rotámetro a la entrada para marcar el caudal empleado en cada ensayo (se contrastará a partir de una medida directa del caudal realizada con un depósito aforado), seguido de dos estrechamientos de la sección de paso del tubo que corresponden al venturímetro (estrechamiento progresivo) y al diafragma (estrechamiento directo), conectados con manómetros en la entrada y la salida del estrechamiento y nos indican la pérdida de carga en cada ensayo.

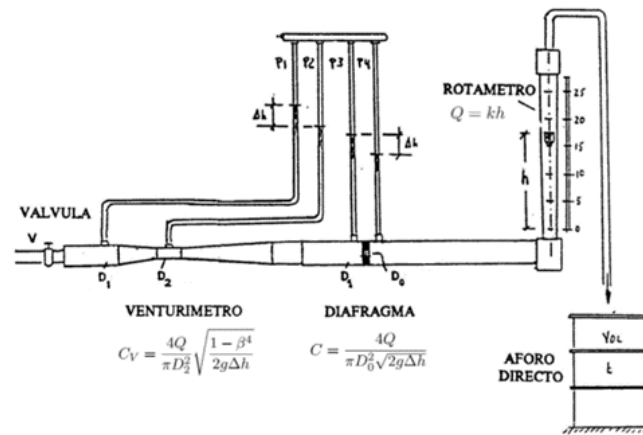


Figura 1.3: Esquema con medidas de la instalación.

1.4. Cuestiones

1. Comparar los resultados de caudal medidos mediante el rotámetro con los medidos mediante aforo directo. ¿A qué se pueden deber las diferencias? Cuantificar y analizar el error cometido.

Los caudales obtenidos mediante medida directa y los medidos mediante el rotámetro son claramente diferentes, aunque deberían salir iguales. El error que aparece por la diferencia entre ambas medidas se ha podido originar bien por la falta de precisión a la hora de tomar los datos, por el poco tiempo y la poca cantidad de fluido utilizado para medir el caudal de forma directa o bien por la imprecisión del propio rotámetro. Para cuantificar este error hacemos la media de los errores cometidos en los distintos ensayos, obteniendo un error medio del 9.32 %.

$Q_{\text{rotámetro}}(\text{L/h})$	$Q_{\text{aforo}}(\text{L/h})$	Error cometido
800	735	8.16 %
850	776	8.72 %
900	818	9.09 %
950	849	10.6 %
1000	900	10 %

2. Dibujar un gráfico análogo al que se ha mostrado en la Figura 1.5. En abcisas el número de Re en escala logarítmica entre 10 y 10^7 , y en ordenadas los valores del coeficiente de velocidad entre 0 y 1.

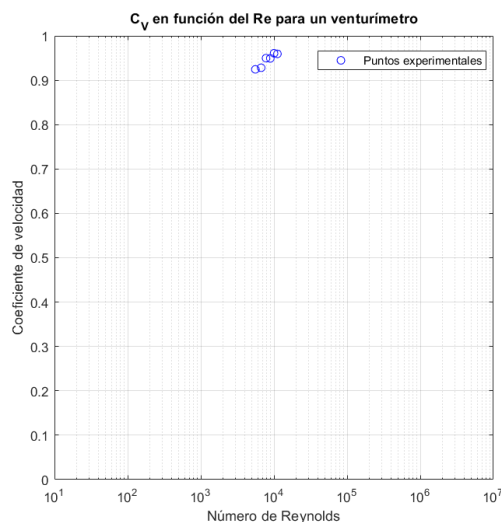


Figura 1.4: C_v en función del Re para un venturímetro.

3. Discutir el resultado. Observará que solo ha cubierto un rango muy pequeño del diagrama. Si se le pidiese completar el gráfico con mayor amplitud de número de Reynolds, ¿Cómo resolvería el problema?

Debido a que los datos obtenidos están todos en un intervalo muy pequeño en cuanto al número de Reynolds, no se puede observar bien la forma que debería adoptar la gráfica. Sin embargo, sabemos que los datos son coherentes porque a valores de Reynolds altos, el coeficiente de velocidad C_v debe acercarse al valor de la unidad. Además, tiene sentido que nos salgan todos los valores cercanos, ya que en este tipo de caudalímetros se trabaja a números de Reynolds altos con el objetivo de mantener el valor del coeficiente de velocidad C_v en un valor fijo de uno.

De todas formas, si quisiésemos tomar datos más espaciados, deberíamos cambiar algunos parámetros que influyan directamente en el número de Reynolds sin cambiar la geometría del venturímetro (de la que también depende el coeficiente de velocidad C_v). Entre estos parámetros podemos encontrar la velocidad a la que se mueve el fluido o su densidad y viscosidad, las cuales podemos cambiarlas sustituyendo el fluido inicial por otro distinto.

4. Dibujar un gráfico análogo al que se ha mostrado en la Figura 1.6. En abscisas el número de Re en escala logarítmica entre 10 y 10^7 , y en ordenadas los valores del coeficiente del diafragma entre 0 y 1 .

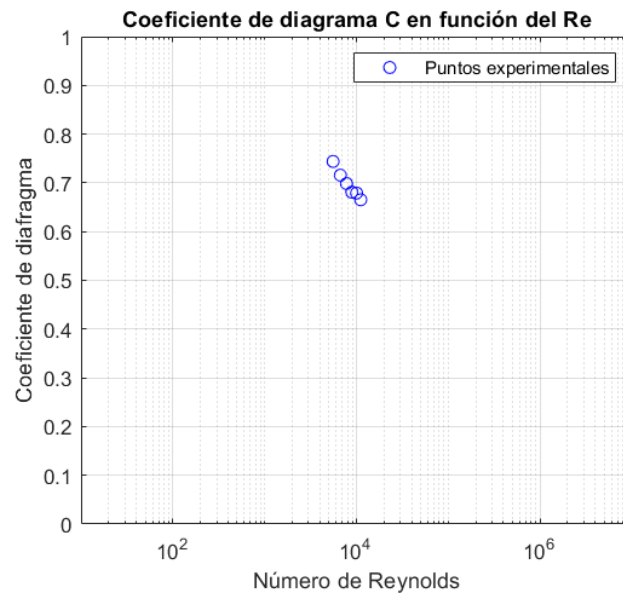


Figura 1.5: C en función del Re para un diafragma.

5. Discutir el resultado. Observará que solo ha cubierto un rango muy pequeño del diagrama. Si se le pidiese completar el gráfico con mayor amplitud de número de Reynolds, ¿cómo resolvería el problema?

Debido a que los datos están muy poco espaciados, no podemos observar la forma que tomaría la curva, que corresponde con una curva que decrece hasta llegar a un valor límite (característico de cada diafragma) a partir del cual no varía, aun aumentando el número de Reynolds.

El coeficiente de diafragma C depende principalmente de la geometría del caudalímetro y del número de Reynolds. Al igual que en el caso del venturímetro, si queremos obtener valores más espaciados sin cambiar la geometría, podemos variar distintos parámetros que influyen directamente en el número de Reynolds como son la velocidad a la que se mueve el fluido o su densidad y su viscosidad. Para ello, podemos sustituir el fluido inicial por otro distinto.

2. Medida de la velocidad

2.1. Descripción

El objetivo de la práctica es representar el perfil de velocidades de un chorro de aire vertido al ambiente. Para ello se tomará medida de la velocidad tanto en la dirección longitudinal como en la transversal de la corriente, tomando para ello varias secciones de esta y realizando medidas de la velocidad del aire en varios puntos a lo largo de cada sección.

El objetivo didáctico de esta práctica es acercar a los alumnos a las técnicas existentes para determinar la distribución de velocidades de un fluido más concretamente al tubo de Pitot, que será el instrumento de medida que se utilizará para la medición en este experimento.

2.2. Instrumentos de medida

El equipo utilizado consiste en un ventilador, utilizado para crear el flujo de aire, y el sistema de medición, compuesto por el tubo de Pitot y por un manómetro diferencial. El ventilador dispone de una cámara (C) donde se genera la diferencia de presión que pondrá el aire en movimiento, y está cubierto por una tapa (T1) que tiene una apertura circular (diámetro $d_0 = 30\text{ mm}$) gracias a la cual se genera un flujo en forma de chorro.

El tubo de Pitot es un tubo lleno de aire, en cuya boca impacta el flujo de aire y a continuación del cual se encuentra el manómetro. Está anclado a un soporte que permite el movimiento tanto en la dirección longitudinal del chorro como en las perpendiculares al mismo, aunque en esta ocasión no se cambiará la cota vertical durante el experimento.

El manómetro diferencial dispone de catorce columnas que se comunican mediante un colector, aunque solo se usarán dos. Una está abierta al ambiente y a otra comunica con el tubo de Pitot. El fluido del interior del manómetro es queroseno (densidad $\rho_k = 800\text{ kg/m}^3$), y las columnas están inclinadas treinta grados para multiplicar por dos la resolución (la altura a tener en cuenta es la vertical, que mide la mitad de la longitud del tubo). Por tanto, la diferencia de cota para tener en cuenta será la mitad de la medida en el manómetro.

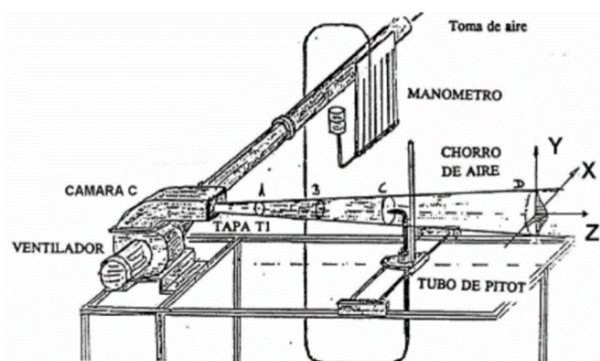


Figura 2.1: Banco de ensayo para la determinación de la distribución de velocidad en un chorro libre.

2.3. Fundamento teórico

El principio de funcionamiento del sistema tubo de Pitot y manómetro aplica la física aprendida en las clases teóricas. Mediante la definición de la presión total como suma de la presión estática y la presión dinámica y asumiendo que la presión total se mantiene constante (considerando el aire incompresible a bajas velocidades), se puede relacionar presión estática y velocidad en dos puntos, el punto 1 y el 2.

El punto 1 es el punto del chorro para el que se mide la velocidad, con velocidad v_1 y presión atmosférica (P_a), y el punto 2 es la embocadura del tubo, donde la velocidad es nula por ser punto de remanso y por tanto la presión estática coincide con la total (P_{tot}). Ambos puntos tienen las mismas coordenadas en las dos direcciones transversales del chorro.

Teniendo esta relación, se puede expresar la velocidad v_1 en función de (P_{tot}), P_a y la densidad del aire. (Nota: $p_2 = P_{tot}$, $p_1 = P_a$)

$$P_{tot} = p + \frac{1}{2}\rho|v|^2 \Rightarrow p_1 + \frac{1}{2}\rho|v_1|^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho|v_2|^2 \Rightarrow v_1 = \sqrt{2\frac{p_2 - p_1}{\rho}} \quad (2.1)$$

La diferencia de presiones entre 2 y 1 se calculará mediante el manómetro, aplicando la ecuación fundamental de la hidrostática ya que el queroseno en su interior se encuentra en reposo. De esta manera se relaciona la diferencia de presiones entre ambos tubos (uno de ellos está sometido a presión atmosférica y el otro a la del punto 2) con la diferencia de cota del queroseno en los dos tubos en función de la gravedad y la densidad del queroseno.

$$p_2 - p_{atm} = \rho_k g h \Rightarrow v_1 = \sqrt{2\frac{\rho_k g h}{\rho}} \quad (2.2)$$

Con la medida de la velocidad en diferentes puntos a lo largo de las tres dimensiones del chorro se construye la distribución de velocidades del flujo. Sin embargo, asumiendo que la distribución es axial simétrica, no será necesario medir varios puntos de la misma vertical. Se reduce así el experimento a dos dimensiones.

El gasto másico del chorro se obtiene integrando el perfil de velocidad en todo el volumen del chorro y multiplicando por la densidad del aire, quedando en función de v_c (velocidad en el eje del chorro) y R_c (radio del chorro, considerando que en la superficie del mismo la velocidad es nula), además de los datos mencionados anteriormente.

$$G = \rho \int_0^{R_c} 2\pi r v(r) dr = \rho \frac{\pi}{3} v_c R_c^2 \quad (2.3)$$

2.4. Cuestiones

1. Representar gráficamente cómo disminuye la velocidad local en el centro del chorro. Incluir para ello el valor de velocidad a la salida del orificio (velocidad media de descarga v_0), así como la velocidad en el centro del chorro de cada una de las secciones de medida.

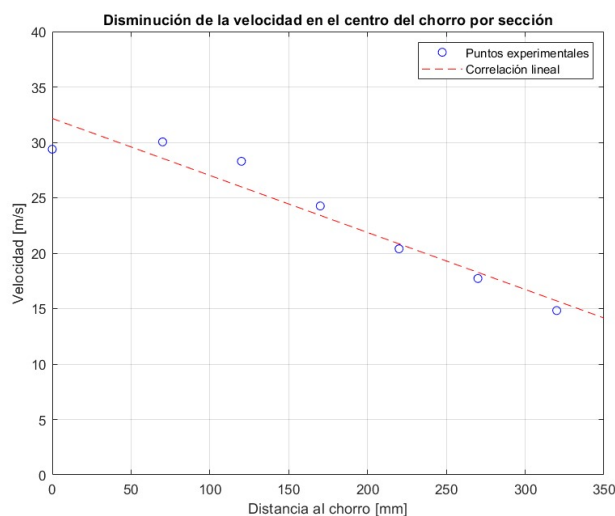


Figura 2.2: Disminución de la velocidad local en el centro del chorro, correspondiendo el punto que está a 0 mm del chorro a v_0

2. Representar gráficamente los perfiles de velocidad correspondientes a las distintas secciones de medida. Mostrar cómo evolucionan los mismos a medida que la sección es más lejana del orificio.

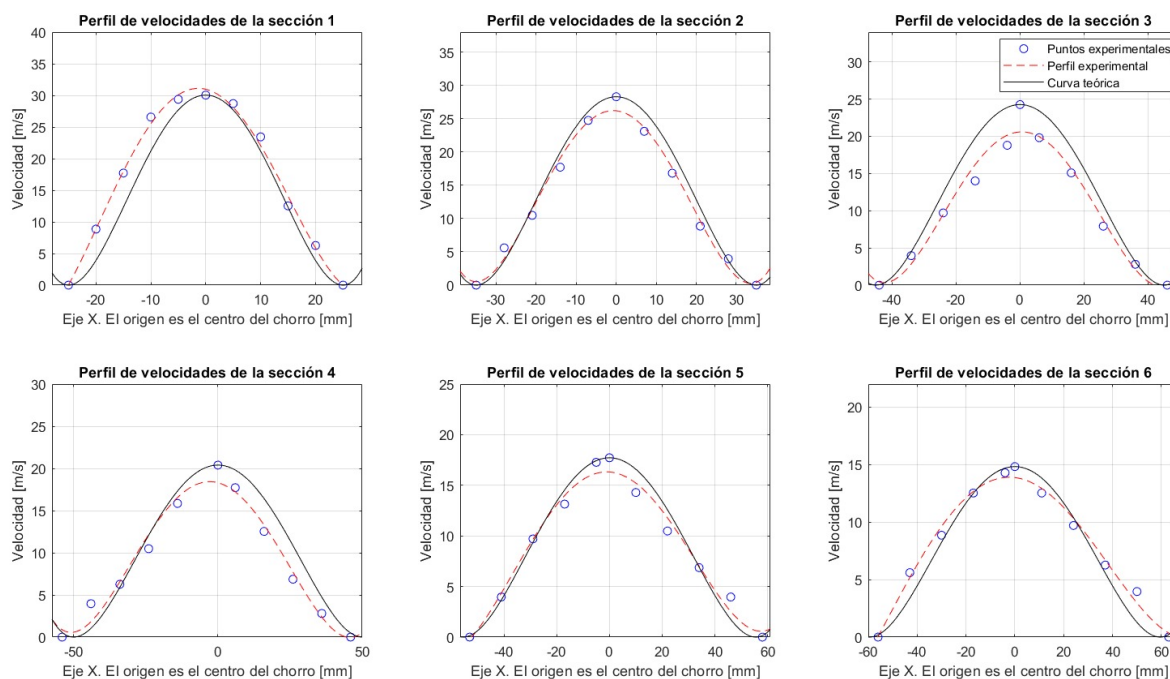


Figura 2.3: Perfiles de velocidad de cada sección, representando los puntos experimentales, la curva experimental y la teórica.

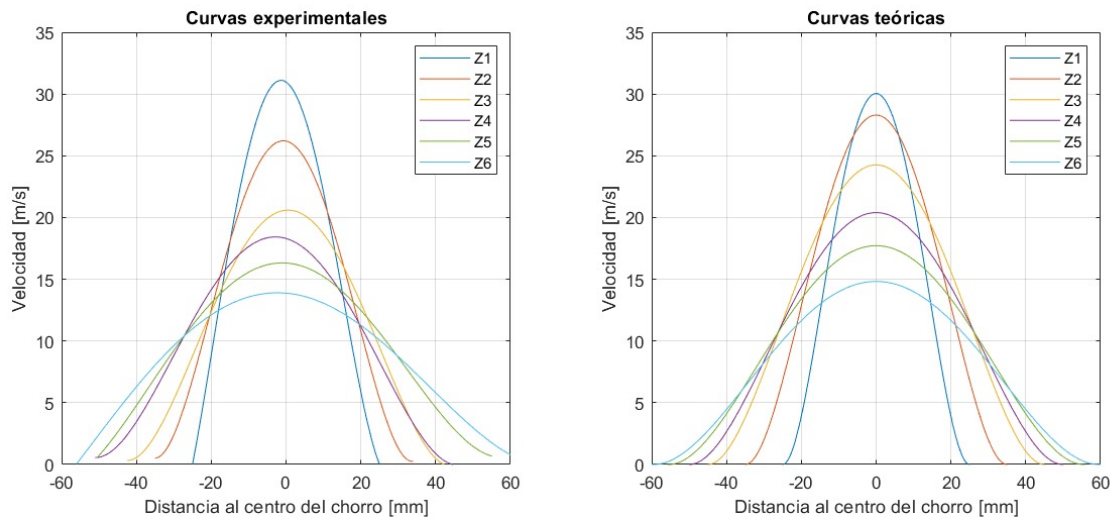


Figura 2.4: Evolución de las curvas experimentales y teóricas por sección, correspondiendo cada z_i de menor a mayor sección

3. Comparar los resultados experimentales con el perfil de velocidades teórico determinado por la ecuación

$$v(r, R_c) = v_c \left(1 - \left(\frac{r}{R_c} \right)^2 \right)^2 \quad (2.4)$$

donde R_c es el radio del chorro y v_c la velocidad del chorro en su centro. Realizar esto para cada sección de medida. Indicar las observaciones que se considere sobre cómo evoluciona este a lo largo de las distintas secciones.

Como se observa en la Figura 2.3 y 2.4 que salvo en la primera sección, el perfil de velocidad experimental se ajusta mejor al teórico en las secciones más alejadas que en las cercanas.

Esto podría deberse en parte a que en el cálculo teórico estamos asumiendo en todo momento un flujo laminar completamente desarrollado, cuando en las primeras secciones podría aparecer algo de turbulencia. Aun así, los posibles errores de medida y la incertidumbre son factores incluso más influyentes en la diferencia entre perfil teórico y experimental.

4. Mediante el Principio de Conservación de Masa, calcular el gasto másico \dot{m} de fluido exterior arrastrado por el chorro por unidad de tiempo entre cada una de las secciones de medida consideradas. Comparar la evolución espacial de dicho gasto másico arrastrado.

Utilizando la ecuación (2.3) para calcular el gasto másico del chorro por sección obtenemos los siguientes resultados:

Sección (mm)	Gasto másico (g/s)
0	6.92
70	19.7
120	36.3
170	51.5
220	53.4
270	57.1
320	54.0

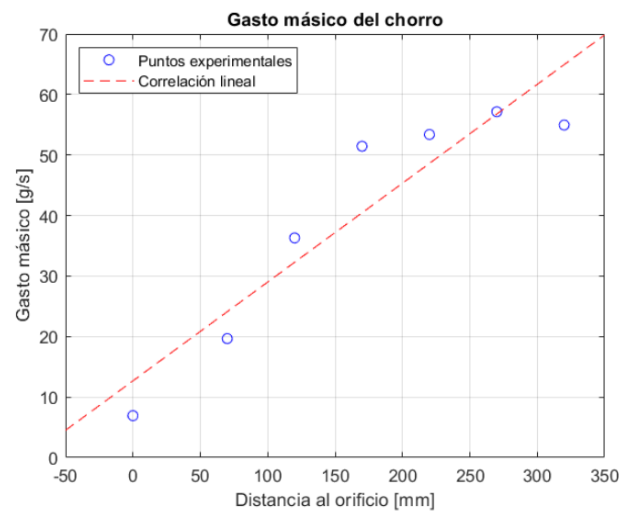


Figura 2.5: Gasto másico por sección

Ahora teniendo en cuenta que la diferencia de gastos es el resultado del gasto del aire arrastrado, se obtienen los siguientes cálculos:

Sección (mm)	Gasto másico del aire arrastrado (g/s)
70	12.7
120	16.6
170	15.2
220	1.95
270	3.76
320	-2.19

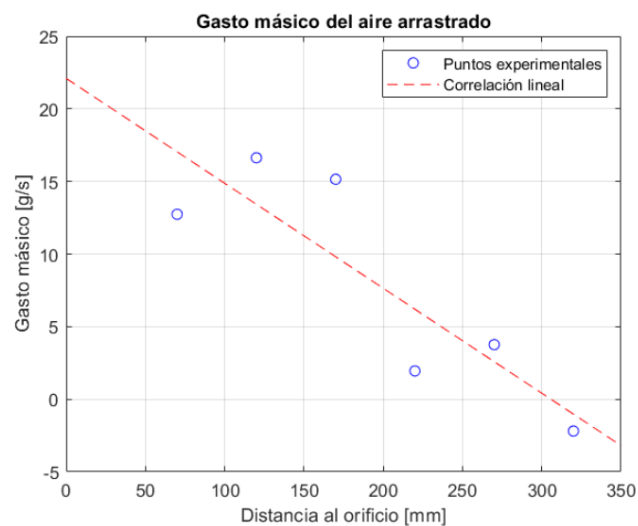


Figura 2.6: Gasto másico del aire arrastrado

Debido a que en cada sección el radio va aumentando y la velocidad va disminuyendo, al depender el gasto másico de cada sección directamente de la velocidad y del cuadrado del radio sucede que el producto $R_c^2 \cdot v_c$ (la densidad siempre es la misma) crece de las secciones 1 a 5 pero en la sección 6 vale menos que la 5.

Como consecuencia, el gasto másico del chorro en la sección 6 es menor que en la 5, por lo que esta diferencia será negativa la cual ante una interpretación a nivel físico, esto se podría interpretar como consecuencia de que el chorro se vaya disipando (va perdiendo velocidad), hasta llegar a una sección lo suficientemente alejada del origen como para que el gasto sea prácticamente nulo.

3. Pérdidas de carga

3.1. Objetivo de la práctica

El objetivo de esta práctica es la medición de una serie de medidas relacionadas con las pérdidas de carga en un sistema de tuberías comerciales. Para ello, nos apoyaremos en el procedimiento experimental para calcular los factores de fricción y coeficientes de pérdidas secundarias en función del número de Reynolds.

Las pérdidas de carga de una instalación se pueden clasificar en pérdidas por fricción, siendo estas debidas al efecto viscoso, y en pérdidas secundarias, debidas a torbellinos, corrientes secundarias y entre otros fenómenos.

3.2. Pérdidas primarias

Continuando con los fundamentos teóricos del experimento, emplearemos la ecuación de la conservación de la energía (3.1) para hallar las pérdidas de carga primarias en los distintos tipos de tubería.

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h_p \quad (3.1)$$

Con respecto a los instrumentos de medida, son los siguientes

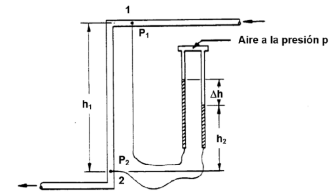
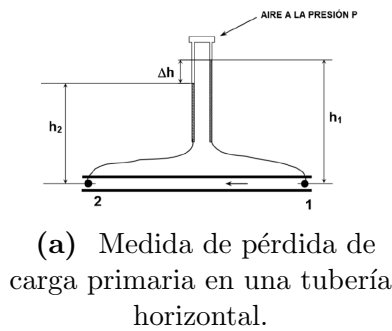


Figura 3.1: Instrumentos de medida.

Empleando esta ecuación (3.1) y considerando las condiciones geométricas de las tuberías mostradas, llegamos a la conclusión de que las pérdidas de carga primarias (Δh_P), no dependen del trazado de la tubería y que estas son iguales a la diferencia de presiones que a su vez es igual a una diferencia de alturas

$$\Delta h_P = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + h_1 = \Delta h. \quad (3.2)$$

Por tanto, conociendo la diferencia de alturas Δh podremos hallar el factor de fricción de una tubería aplicando la expresión de Darcy-Weisbach:

$$\Delta h = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (3.3)$$

$$f = \Delta h_P \frac{D}{L} \frac{2g}{v^2} = \Delta h_P \frac{g \pi^2 D^5}{8 L Q^2} \quad (3.4)$$

Obteniendo así el valor del factor de fricción de una tubería.

3.3. Pérdidas secundarias

En cuanto a las pérdidas de carga secundarias, buscamos hallar el valor del coeficiente K , empleando para ello un manómetro de agua con varias secciones distintas antes y después de la discontinuidad.

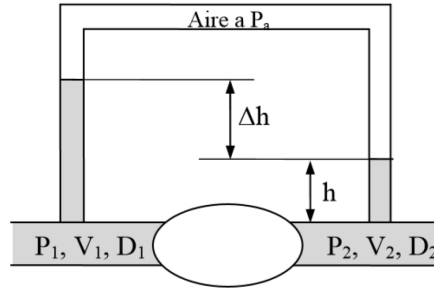


Figura 3.2: Medida del coeficiente K en las pérdidas secundarias mediante un manómetro de agua con posibles secciones distintas antes y después de la discontinuidad.

Evaluando así el valor de K en distintas singularidades partiendo de la ecuación (3.1) y obteniendo las siguientes expresiones

$$\Delta h_s = \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_1 - P_2}{\rho_{agua}g} = \frac{8Q^2}{\pi^2g} \left(\frac{1}{D_1^4} - \frac{1}{D_2^4} \right) + \Delta h = K \frac{v_j^2}{2g} \quad (3.5)$$

$$K = \frac{D_j^4}{D_1^4} - \frac{D_j^4}{D_2^4} + \frac{g\pi^2\Delta h D_j^4}{8Q^2}, \quad (3.6)$$

que particularizando para cada caso del circuito:

1. Ensanchamiento, $j = 1$, $v_1 > v_2$ y $P_1 < P_2$, Δh negativo:

$$K = 1 - \frac{D_1^4}{D_2^4} + \frac{g\pi^2 D_1^4}{8Q^2} \Delta h \quad (3.7)$$

2. Contracción, $j = 2$:

$$K = \frac{D_2^4}{D_1^4} - 1 + \frac{g\pi^2 D_2^4}{8Q^2} \Delta h \quad (3.8)$$

3. Sin cambio de sección de paso $j = 1 = 2$:

$$K = \frac{g\pi^2 D_2^4}{8Q^2} \Delta h \quad (3.9)$$

3.4. Banco de ensayos

El banco de ensayos para el estudio de esta práctica consiste en un panel vertical en el que se sitúa una instalación con dos circuitos de distinto color situados entre ellos en paralelo, constando cada uno de diversos componentes.

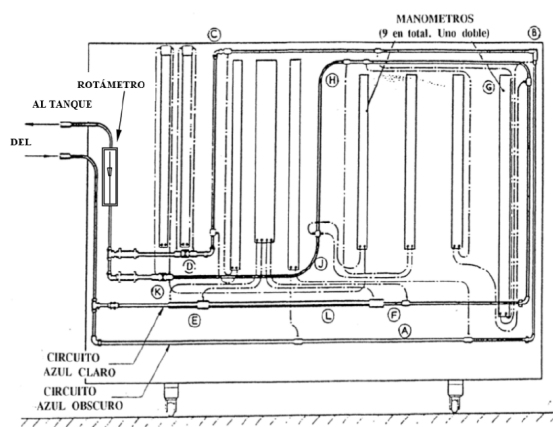


Figura 3.3: Esquema de la instalación.

3.5. Cuestiones

1. Calcular los números de Reynolds correspondientes a los diferentes caudales.

Para el cálculo del número de Reynolds se usa la siguiente expresión

$$Re = \frac{4\rho Q}{\pi\mu D}, \quad (3.10)$$

cuyos valores se agrupan en el [anexo](#) de datos para cada caudal y diámetro de la tubería.

2. Calcular los factores de fricción para los tramos horizontales de cada uno de los circuitos y para cada caudal de medición.

Empleando la fórmula desarrollada de Darcy-Weisbach (3.4) y los datos obtenidos experimentalmente y del diseño de la tubería obtenemos las siguientes factores de fricción:

a) Circuito azul oscuro (tramo de tubería recta A)

$Q(\text{L/min})$	16.5	14	12	10	8	6	4	2.5
$f(A)$	0.024	0.025	0.025	0.027	0.028	0.031	0.035	0.036

b) Circuito azul claro (tramo de tubería recta L)

$Q(\text{L/min})$	13	10.5	8	5.5	3
$f(L)$	0.052	0.053	0.055	0.058	0.065

3. Representar en dos gráficos, uno para cada circuito, el factor de fricción frente al número de Reynolds. Usar una escala logarítmica similar a la de la Figura 4.4, entre $5 \cdot 10^2$ y 10^8 para Reynolds y entre 0.008 y 0.1 para el factor de fricción. ¿Existe dependencia del factor de fricción con Reynolds? ¿Por qué?

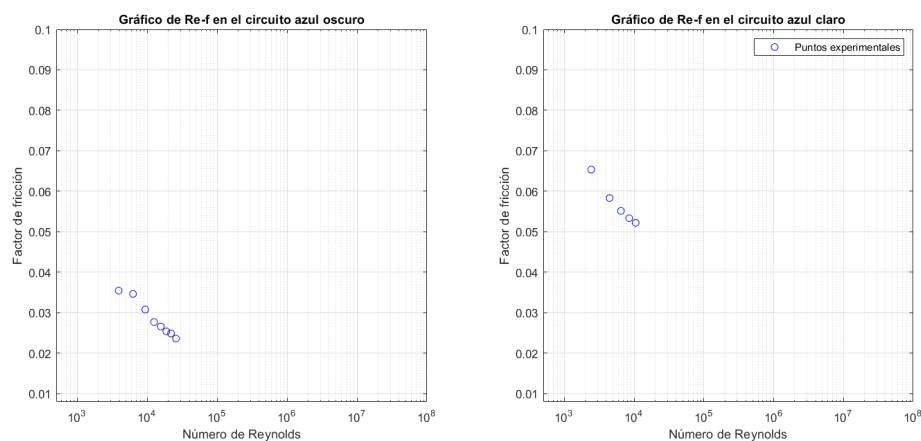


Figura 3.4: Representación gráfica del Reynolds frente al factor de fricción para tramos horizontales.

Comprobamos que existe una relación inversa entre el número de Reynolds y el factor de fricción, de forma que al aumentar el Reynolds disminuye el factor de fricción. Esto se debe a que el factor de fricción depende únicamente de las características de la tubería y a las del fluido, así pues algunas de estas características son variables del número de Reynolds. Además de que sendas curvas se asemeja a un intervalo de la curva teórica de la gráfica de Moody.

- Comparando la Figura 4.4 del diagrama de Moody con los dos gráficos del factor de fricción con el número de Reynolds estimar cuál sería la rugosidad de las tuberías.

A partir del diagrama de Moody podemos obtener valores aproximados de la rugosidad relativa, donde observando la Figura 4.4 podremos aproximar que la tubería del circuito azul oscuro le correspondería una rugosidad prácticamente 0, queriéndonos decir que es una tubería lisa. Y con respecto a la tubería del circuito azul claro, se puede obtener una rugosidad relativa de 0.02 que multiplicado por el diámetro de la tubería se obtendría la rugosidad de $5,24 \cdot 10^{-4}$.

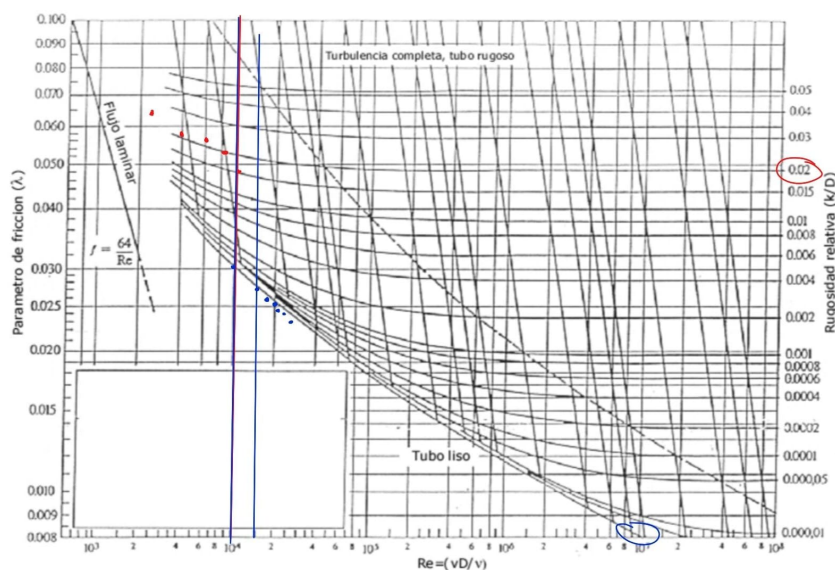


Figura 3.5: Puntos experimentales sobre la gráfica de Moody, correspondiendo los azules al circuito azul oscuro y los puntos rojos al circuito azul claro.

5. Calcular los coeficientes K de las pérdidas secundarias de cada singularidad para cada caudal y por tanto para cada Reynolds. Se recuerda que, tal como se aprecia en la Figura 3.3, las tomas de todas las pérdidas secundarias, excepto las válvulas, el ensanchamiento y la contracción, llevan asociada una pérdida de rozamiento igual a la del tubo recto estrecho. Por tanto, a todas ellas se debe restar la pérdida asociada a la diferencia de valor de las tomas 3 y 4 para el mismo caudal de cálculo.

Utilizando la expresión (3.6) para calcular el coeficiente de pérdidas secundarias y aplicado correctamente para cada singularidad y teniendo en cuenta la pérdida mencionada de rozamiento se obtienen los siguientes resultados

a) Coeficientes K del circuito azul oscuro

Q (L/min)	16.5	14	12	10	8	6	4	2.5
K_A (tramo de tubería recta)	1.59	1.67	1.71	1.79	1.86	2.07	2.33	2.38
K_B (Inglete)	1.73	1.67	1.76	1.57	1.51	1.66	1.40	1.19
K_C (Codo regular 90°)	0.931	0.913	0.983	0.969	1.05	1.04	1.12	1.19

b) Coeficientes K del circuito azul claro

Q (L/min)	13	10.5	8	5.5	3
K_E (ensanchamiento de la sección)	1.24	1.20	1.21	1.17	1.09
K_F (contracción de sección)	0.925	0.898	0.819	0.797	0.729
K_G (curva de radio corto)	369	369	381	403	452
K_H (curva de radio medio) $\times 10^3$	5.15	4.74	5.44	5.76	8.23
K_J (curva de radio largo) $\times 10^4$	3.07	3.10	3.45	4.01	4.90
K_L (tramo recto de tubería)	1.82	1.86	1.92	2.04	2.28

6. Representar los 9 coeficientes K de pérdidas secundarias calculados frente al número de Reynolds. ¿Existe dependencia de K con Reynolds? ¿Por qué?

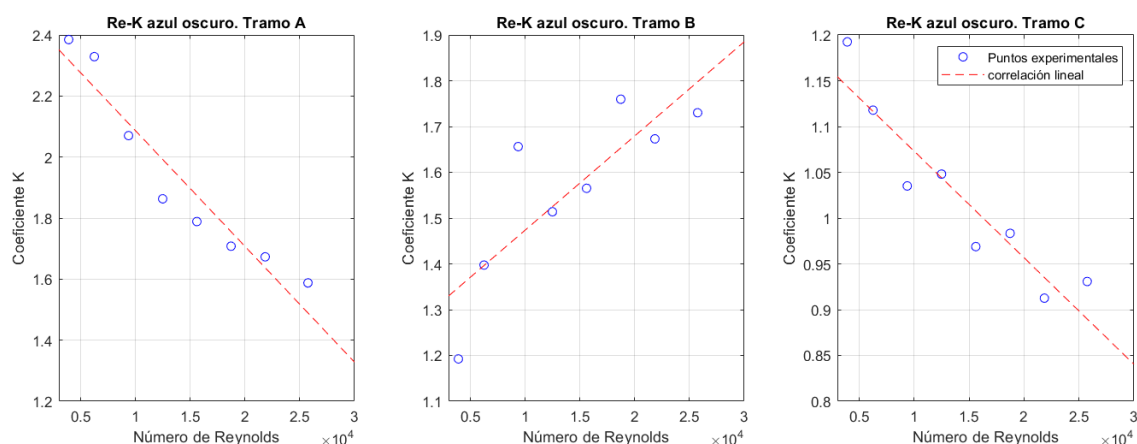


Figura 3.6: Representación de Re - K del circuito azul oscuro de cada tramo

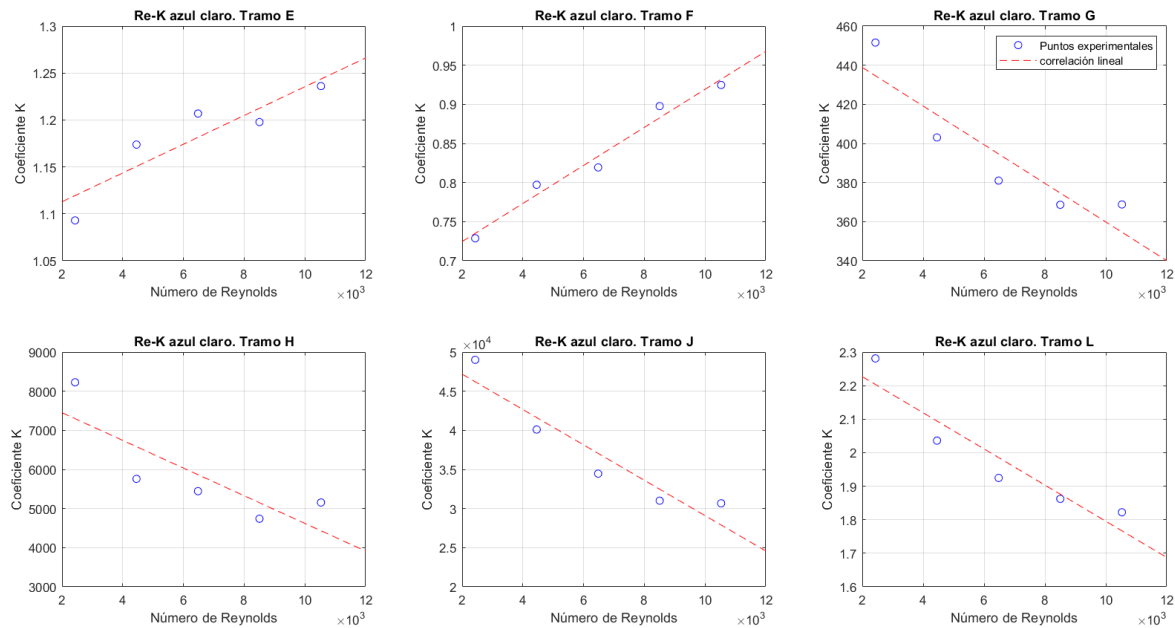


Figura 3.7: Representación de Re-K del circuito azul claro de cada tramo

Comprobamos en las gráficas que existe dependencia de K con el número de Reynolds, aunque dependiendo del tramo en el que nos encontremos esta relación será de proporcionalidad inversa o directa.

De esta forma el número de Reynolds y la K serán directamente proporcionales en los tramos F y E del circuito claro y en el B del circuito oscuro, siendo las singularidades de estos tramos una contracción (F), un ensanchamiento (E) y un inglete (B).

7. Discutir los resultados.

A partir de los resultados obtenidos experimentalmente hemos podido comprobar, como ya se ha comentado previamente, la relación del número de Reynolds con el factor de fricción, la K y la rugosidad de las tuberías. Llegamos así a la conclusión de que el factor de fricción depende de forma inversamente al número de Reynolds, y que la K puede depender directa o inversamente proporcional al número de Reynolds según el tramo en el que nos encontremos.

4. Anexo

4.1. Medida de caudal

Tabla 1.1: Calibración del rotámetro.

N	$Q_{\text{rotámetro}}$ (L/h)	$V_{\text{depósito}}$ (L)	t_{llenado} (s)	Q_{aforo} (L/h)
1	800	5	24'5	735
2	850	5	23'2	770
3	900	5	22	818
4	950	5	21'2	849
5	1000	5	20	900

Tabla 1.2: Medida de caudales.

N	$Q_{\text{rotámetro}}$ (L/h)	Re $\times 10^4$	h_{venturi} (mm)	C_V (-)	h_{diaf} (mm)	C_{diaf} (-)
1	500	0'557	35	0'925	18	0'744
2	600	0'668	50	0'928	28	0'716
3	700	0'780	65	0'950	40	0'699
4	800	0'891	85	0'949	55	0'681
5	900	1'00	105	0'961	70	0'679
6	1000	1'11	130	0'959	90	0'665

Figura 4.1: Datos de la práctica 1

4.2. Medida de la velocidad

Identificación del centro del orificio:

$$x_{cent} = 319 \text{ mm}$$

Diferencia de alturas medida en el manómetro a la salida del orificio (h_0), para posterior cálculo de la velocidad media de descarga (v_0):

$$h_0 = 210 \text{ mm}$$

Tabla 2.1: Toma de medidas.

	Sección 1 z = 70 mm		Sección 2 z = 120 mm		Sección 3 z = 170 mm		Sección 4 z = 220 mm		Sección 5 z = 270 mm		Sección 6 z = 320 mm	
N	x_1 (mm)	h_1 (mm)	x_2 (mm)	h_2 (mm)	x_3 (mm)	h_3 (mm)	x_4 (mm)	h_4 (mm)	x_5 (mm)	h_5 (mm)	x_6 (mm)	h_6 (mm)
1	294	0	284	0	275	0	265	0	266	0	263	0
2	299	10	291	4	285	2	275	2	278	2	276	4
3	304	40	298	14	295	12	285	5	290	12	289	10
4	309	90	305	40	305	25	295	14	302	22	302	20
5	314	110	312	78	315	45	305	32	314	38	315	26
6	x_{cent}	115	x_{cent}	102	x_{cent}	75	x_{cent}	53	x_{cent}	40	x_{cent}	28
7	324	103	326	68	325	50	325	40	329	26	330	20
8	329	70	333	36	335	29	335	20	341	14	343	12
9	334	20	340	10	345	8	345	6	353	6	356	5
10	339	5	347	2	355	1	355	1	365	2	369	2
11	344	0	354	0	365	0	365	0	377	0	382	0

Figura 4.2: Datos de la práctica 2

4.3. Pérdidas de carga

Tabla 3.1: Circuito azul oscuro.

N	Q (L/min)	Re $\times 10^4$	h_A (mm)	h_B (mm)	h_C (mm)	P_D (bar)
1	16'5	2'57	290	606	460	0'2
2	14	2'18	220	440	340	0'2
3	12	1'87	165	335	260	0'2
4	10	1'56	120	225	185	0'5
5	8	1'25	80	145	125	0'53
6	6	0'936	50	90	75	0'68
7	4	0'624	25	40	37	0'69
8	2'5	0'390	10	15	15	0'7

Tabla 3.2: Circuito azul claro.

N	Q (L/min)	Re $\times 10^4$	h_E (mm)	h_F (mm)	h_G (mm)	h_H (mm)	h_J (mm)	h_L (mm)	P_K (bar)
1	3	0'243	1	10	15	17	20	1	0'7
2	5'5	0'446	5	35	45	40	55	3	0'6
3	8	0'648	12	75	90	80	100	6	0'5
4	10'5	0'850	20	135	150	120	155	10	0'4
5	13	1'05	35	210	230	200	235	15	0'25

Figura 4.3: Datos de la práctica 3

4.4. Diagrama de Moody

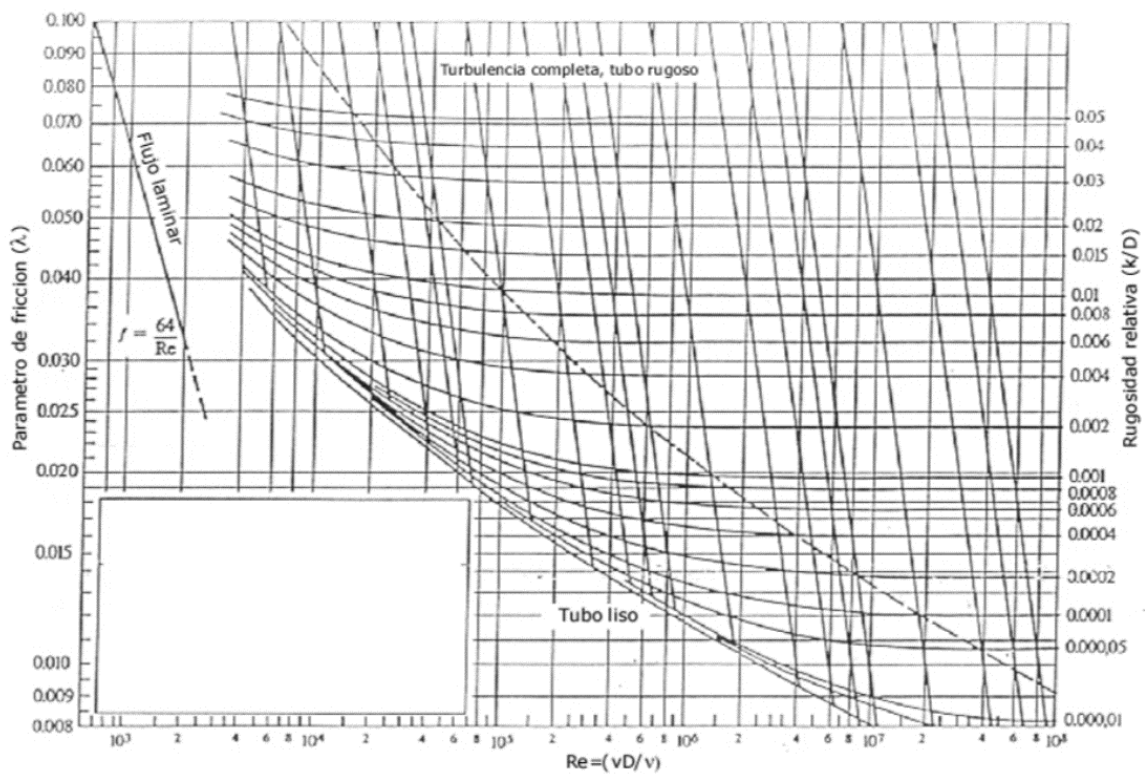


Figura 4.4: Diagrama de Moody