

INTRODUCCIÓN

En cualquier industria es común el manejo de fluidos dentro de cada proceso: agua, vapor y aire suelen requerirse como corrientes de servicio para enfriamiento o calentamiento, y muchas veces las corrientes de proceso también son fluidos. Cada vez que se mueve y/o cambia la dirección de un fluido, se generan pérdidas de cabezal que deben ser subsanadas mediante la energía potencial propia del sistema o mediante la adición de energía con sistemas de bombeo o compresión.

Las pérdidas por fricción son responsables de buena parte de los costos operacionales de cualquier industria, y de hecho resulta cotidiana la necesidad de conocer las pérdidas presentes en un sistema, por lo cual resulta de suma importancia que el Ingeniero Químico conozca los distintos factores que afectan la magnitud de tales pérdidas.

En esta experiencia de laboratorio, se determinará las pérdidas producidas por el flujo de agua a través de tuberías rectas de distinto diámetro, por tubos en U de codos rectos y de codos normales, y por una expansión y una contracción gradual mediante las lecturas proporcionadas por el manómetro de pzo. Por último, se observará los distintos regímenes de flujo –laminar, de transición y turbulento – mediante el control del caudal y la adición continua de una pequeña cantidad de colorante al agua que circula por un tubo transparente.

El sistema de estudio consta de dos tramos de tuberías, una de borosilicato que es transparente y otra que es removible, la cual permite reemplazar los tramos de tuberías que se quieran estudiar. Cada uno de los tramos reemplazables, poseen al menos dos conexiones manométricas a las cuales se pueden conectar al manómetro de pozo por medio de unas válvulas tipo check y unas de paso rápido (V3, V4). Cada una de estas tomas está

identificada con una letra; **H** para la toma que se coloca en el punto de mayor presión y **B** para la que se coloca en el lado de menor presión.

La entrada de agua al sistema es controlada por medio de una perilla, que regula la potencia de la bomba, en el panel de control. Finalmente el paso de agua es desviado a cada tramo mediante las válvulas de paso rápido (V1, y V6 para el tramo intercambiable y el tramo de borosilicato, respectivamente).

El procedimiento que se realiza consiste en colocar las tomas manométricas al accesorio, abriendo la válvula V1, para la experiencia cuantitativa, seguidamente se pone en funcionamiento la bomba y se espera que se desaloje todo el aire del sistema. Se fija un caudal mediante el potenciómetro, y se lee la altura registrada por el manómetro de pozo. Se realiza este procedimiento para cuatro caudales de operación. Una vez terminado con el barrido de caudales se procede a desmontar el tramo de tubería y colocar otro para su estudio. Para la experiencia del Reynolds se abre la válvula V6 y se cierra la válvula V1; luego se pone en funcionamiento la bomba y se espera que se desaloje todas las burbujas de aire del sistema. Se abre un poco la válvula V7 para que salga la tinta que colorea el agua, y se fija caudales diferentes para observar los distintos régimen de flujo.

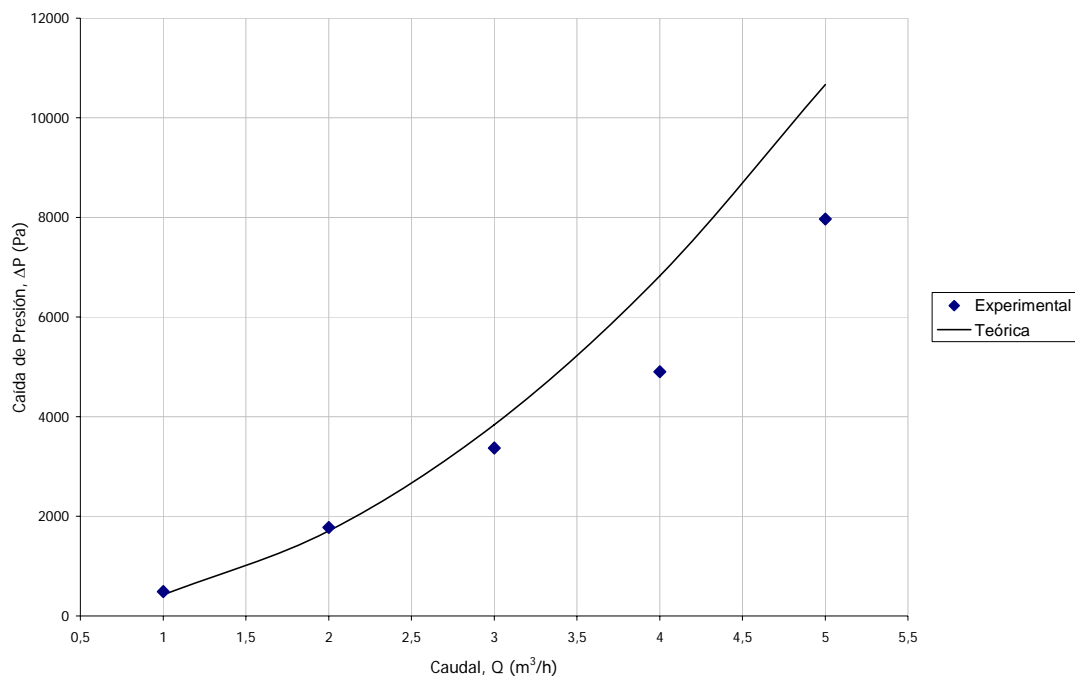
Posteriormente, se realiza las gráficas que representan la tendencia de la caída de presión como función del caudal, para cada uno de los accesorios y tuberías. Adicionalmente, se determina los coeficientes de resistencia teóricos y experimentales de la expansión y contracción.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, en esta sección, se presentarán en forma lógica, secuencial, concisa la interpretación, discusión, sustentación y comparación de los valores finales obtenidos a nivel experimental y teórica, para las condiciones de trabajo de 25° C y 691,6 mmHg.

Seguidamente, se hará un breve análisis acerca del comportamiento de la caída de presión de frente a la variación del flujo volumétrico para los distintos accesorios y tramos de tuberías empleadas durante la experiencia.

La gráfica N° 1 y tabla N°1, que se presentará, exponen el comportamiento o la tendencia que muestra la diferencia de presión generada, para distintos flujos volumétricos, cuando el agua fluye a través de una expansión gradual.



GRÁFICA N° 1. Variación de la diferencia de presión con respecto al flujo Volumétrico en una Expansión Gradual

Se puede apreciar, a través de la gráfica N° 1, que el comportamiento de la caída de presión entre un punto antes y después de la expansión gradual es directamente proporcional al caudal que fluye a través de la misma; la tendencia mostrada por éste tramo de tubería no es de forma lineal, evidenciándose a través de la curva de los valores teóricos, la cual es una función creciente en forma parabólica.

Seguidamente se expone la tabla N° 1, la cual se comparan los valores experimentales y teóricos obtenidos de la variación de la caída de presión; al mismo tiempo se presenta la desviación de los valores experimentales con respecto a los teóricos.

Tabla N° 1. Variación de la diferencia de presión estática en función del caudal que circula a través de la expansión gradual

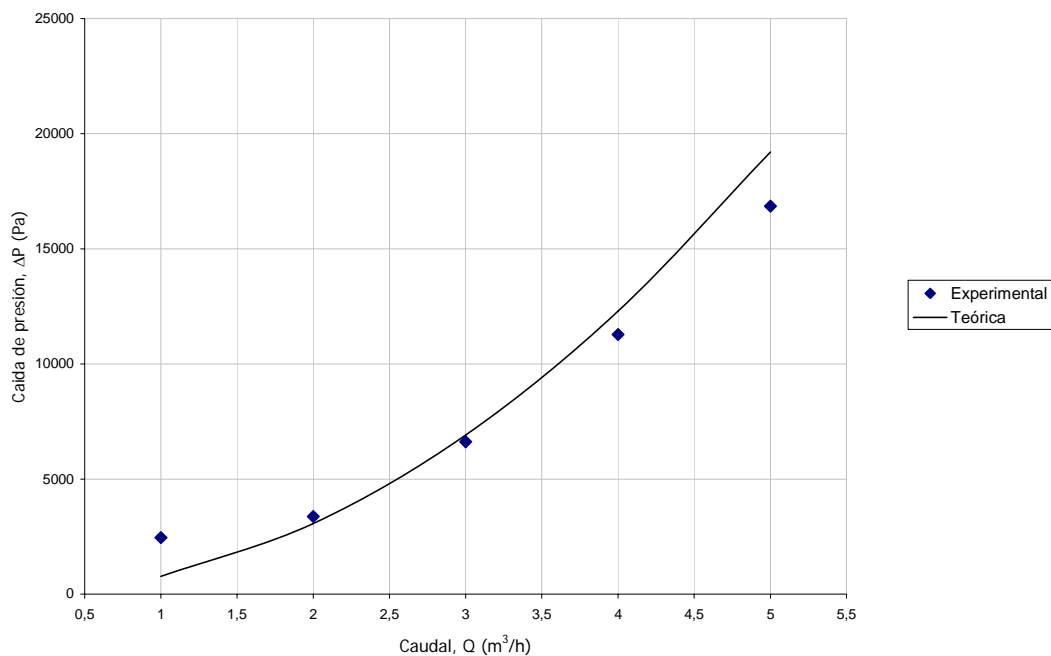
Flujo Volumétrico, Q (m ³ /h)	Caída de Presión Experimental, ΔP_{EXP} (Pa)	Caída de Presión Teórico, ΔP_{TEO} (Pa)	Desviación ΔP , (%)
5	7968,18	10666,55	25,30
4	4903,49	6826,59	28,17
3	3371,15	3839,96	12,21
2	1777,52	1706,65	4,15
1	490,35	426,66	14,93

Evidentemente se observa que los valores de las diferencias de presión, teóricas y experimentales, aumentan con el caudal que se hace circular por el tramo de tubería.

Se puede apreciar que los valores experimentales tienen una desviación neta sobre los valores teóricos, los cuales indican que los resultados obtenidos de manera experimental no presentan gran exactitud. Todas estas desviaciones o errores, se deben en gran parte al manejo, funcionamiento y acondicionamiento del sistema o equipo empleado para la realización de la

práctica. Se puede identificar algunos de las causas que originaron las desviaciones, estas son: presencia de aire en forma de burbujas las cuales afectan la distribución de líquido por parte de la bomba y la lectura de presión por parte del manómetro de pozo, influyendo de esta manera, en la altura manométrica reportada por el manómetro de pozo. Otra falla que originó desviaciones en las lecturas, es la fuga de agua a través de las conexiones, la cual es una indicación de que se pierde masa del sistema, afectando las lecturas manométricas y el flujo manométrico, causando desviaciones entre 4% y 29% .

Luego de haber expuesto el comportamiento de la caída de presión estática de una expansión gradual, es necesario apreciar y entender también la presentada, por un flujo de agua cuando pasa a través de una contracción gradual. Por tanto, en la gráfica N° 2, se muestra la tendencia que tiene los valores de diferencia de presión en función del caudal seleccionado.



GRÁFICA N° 2. Variación de la diferencia de presión con respecto al flujo Volumétrico en una Contracción Gradual

Como se puede apreciar, el comportamiento de la variable, presión, antes y después de la contracción gradual, es similar a la presentada por una expansión gradual. Este comportamiento curvilíneo presentado, es debido que a mayores caudales de operación, la velocidad media del fluido dentro de la tubería se incrementa, generando de esta forma un mayor contacto con las paredes causando mayores pérdidas de fricción, lo que se traduce en un aumento de la caída de presión.

Para observar la variación de la caída de presión, teórica y experimental, se muestra la tabla N° 2, la cual contiene también la magnitud de la desviación de los resultados prácticos con respecto a los teóricos.

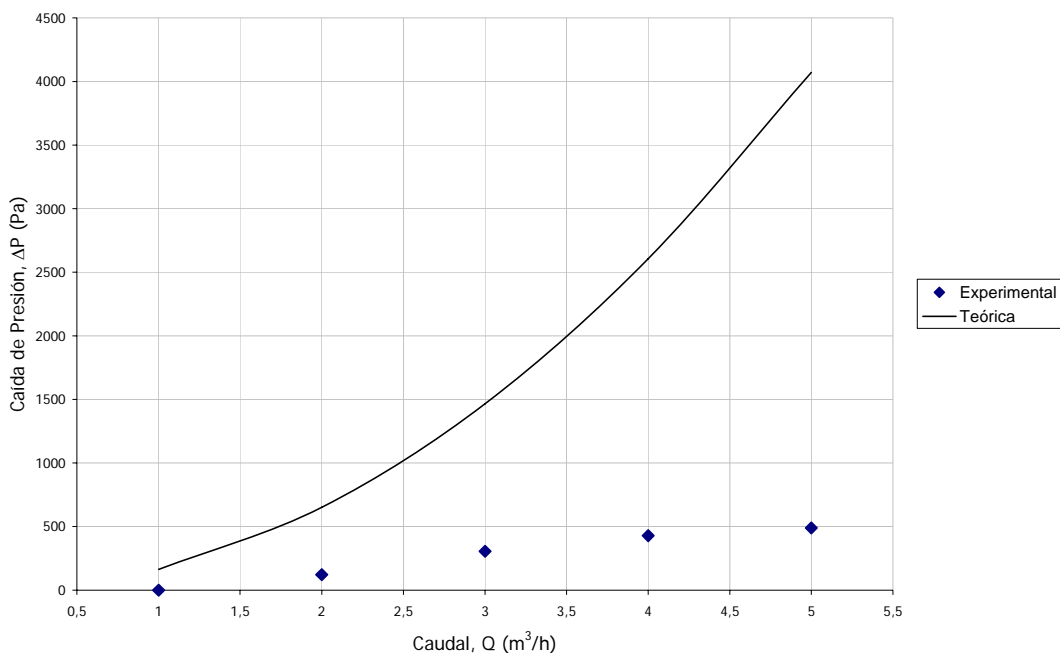
Tabla N° 2. Variación de la diferencia de presión estática en función del caudal a través de la contracción gradual

Flujo Volumétrico, Q (m ³ /h)	Caída de Presión Experimental, ΔP_{EXP} (Pa)	Caída de Presión Teórico, ΔP_{TEO} (Pa)	Desviación ΔP , (%)
5	16855,758	19201,274	12,215
4	11278,034	12288,816	8,225
3	6619,716	6912,459	4,235
2	3371,152	3072,204	9,731
1	2451,747	768,051	219,217

Se puede observar de la tabla N° 2, que existe la mayor desviación porcentual en el caudal de menor magnitud, es decir, cuando se operó con un caudal de 1 m³/h se presentó una desviación 219%, el cual indica que existe un error que interfirió con el resultado obtenido. Éste valor anómalo tiene origen en la errores mencionados anteriormente como presencia de burbuja y fugas de líquido del sistema, y adicionalmente a imprecisiones de lecturas, esto se puede entender porque que la variación de la altura manométrica no siguió la tendencia de disminución esperada, causando una mayor caída de presión que la verdadera o la esperada, ver tabla N° 17 de la sección apéndice-hoja de dato.

Al comparar la tendencia de la expansión gradual con la contracción gradual se nota que esta última es la que presenta mayores pérdidas de presión lo cual sustenta el fundamento teórico, debido a que la contracción gradual genera mayor turbulencia. Luego, dado que el coeficiente de resistencia teóricamente en la contracción es mayor que en la expansión, entonces a través de la ecuación (26) en la sección de apéndice-cálculos tipos se puede apreciar que para un mismo caudal y secciones de diámetro iguales, las pérdidas por fricción en la contracción son mayores y por consiguiente la caída de presión es mayor, esto concuerda con los resultados obtenidos como se puede apreciar en la tablas N° 2 y N° 1.

A continuación se presenta el gráfico que describe el comportamiento la variación y tendencia que muestra de la caída de presión como función del flujo volumétrico del agua, cuando circula a través de una tubería de 23,7 mm de diámetro de acero comercial.



GRÁFICA N° 3. Variación de la diferencia de presión con respecto al caudal en latubería de 27,3 mm de diámetro

Se puede observar, a través de la gráfica N° 3, que la variación de la caída de presión en un tramo de tubería es directamente proporcional al caudal que fluye a través de la misma; la tendencia mostrada por éste tramo de tubería no es de forma lineal.

Inmediatamente se expone la tabla N° 3, la cual se comparan los valores experimentales y teóricos obtenidos de la variación de la caída de presión para el tramo de tubería de 23,7 mm de diámetro; al mismo tiempo se presenta la desviación de los valores experimentales con respecto a los teóricos.

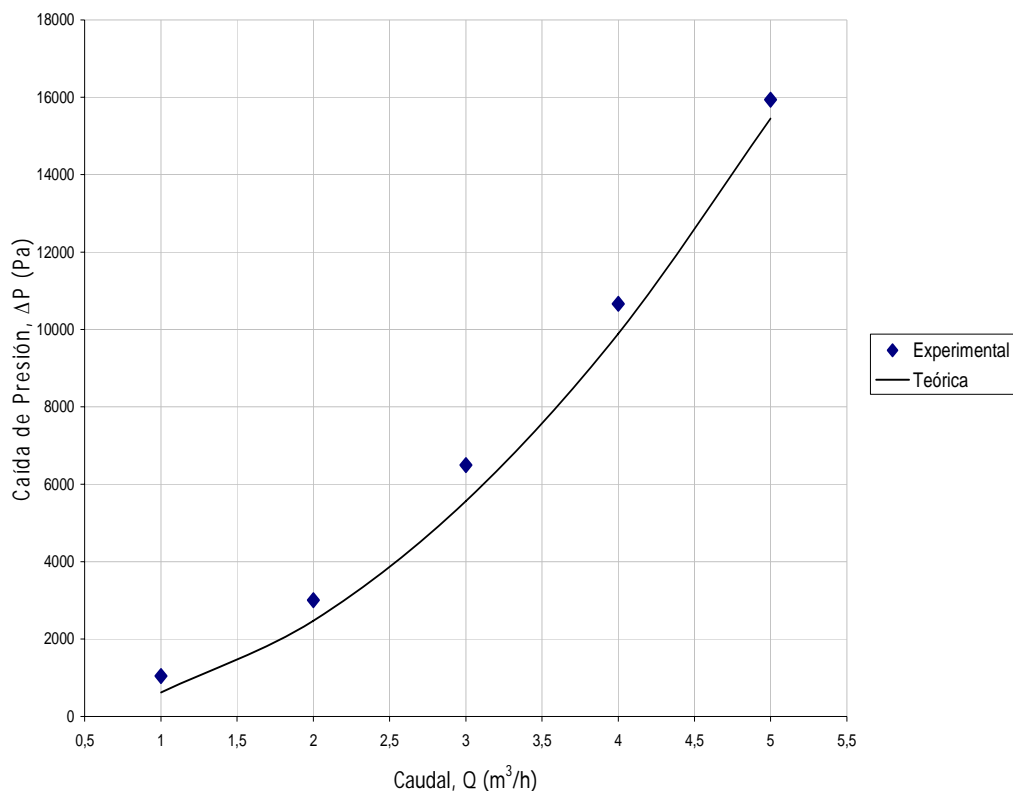
Tabla N° 3. Variación de la diferencia de presión estática en función del caudal que circula por el tramo de tubería de 23,7 mm

Flujo Volumétrico, Q (m ³ /h)	Caída de Presión Experimental, ΔP_{EXP} (Pa)	Caída de Presión Teórico, ΔP_{TEO} (Pa)	Desviación ΔP , (%)
5	490,349	4071,677	87,957
4	429,056	2605,828	83,535
3	306,468	1465,726	79,091
2	122,587	651,371	81,180
1	0,000	162,826	100,000

Se evidencia a partir de la tabla N° 3, que los valores de caídas de presión disminuyen a medida que el flujo volumétrico es menor. Por otra parte se puede observar que los valores de diferencias de presión teóricos son mayores que los experimentales, y el orden de diferencia se puede conocerse a partir de la magnitud de la desviación. Estos valores de desviación son muy altos, y se deben a que la velocidad media de flujo en la tubería de 23,7 mm es baja, lo cual ocasiona pérdidas de fricción pequeñas y al mismo tiempo origina caídas de presiones muy bajas que son apenas detectadas por el manómetro de pozo. Como las caídas de presión son tan bajas, no es posible registrar una buena medición de la altura manométrica debido a que la altura apenas sobre pasa el

nivel más bajo. Como consecuencia de esto, las incertidumbres de las mediciones son muy grandes, ocasionando desviaciones con magnitudes como la que se muestra en la tabla N° 3.

Después de haber expuesto el comportamiento de la caída de presión estática en la tubería de 23,7 mm de diámetro, es necesario apreciar y entender también la presentada, por un flujo de agua cuando circula a través de una tubería de menor diámetro. Entonces, en la gráfica N° 4, se muestra la tendencia que tiene los valores de diferencia de presión en función del caudal seleccionado de una tubería de 18,4 mm de diámetro.



GRÁFICA N° 4. Variación de la diferencia de presión con respecto al caudal en la tubería de 18,4 mm de diámetro

Como se puede apreciar, el comportamiento de la variable, presión, en la tubería de 18,4 mm, es similar a la presentada por la tubería de 23,7 mm.

Ambas presentan un comportamiento creciente con el aumento del flujo volumétrico, por lo tanto la caída de presión del fluido es directamente proporcional al caudal que se hace circular por el tramo de tubería.

Para observar la variación de la caída de presión, teórica y experimental, se muestra la tabla N° 4, la cual contiene también la magnitud de la desviación de los resultados prácticos con respecto a los teóricos.

Tabla N° 4. Variación de la diferencia de presión estática en función del caudal que circula por el tramo de tubería de 18,7 mm

Flujo Volumétrico, Q (m ³ /h)	Caída de Presión Experimental, ΔP_{EXP} (Pa)	Caída de Presión Teórico, ΔP_{TEO} (Pa)	Desviación ΔP , (%)
5	15936,353	15452,717	3,130
4	10665,098	9889,628	7,841
3	6497,128	5562,790	16,796
2	3003,390	2472,202	21,486
1	1041,992	617,862	68,645

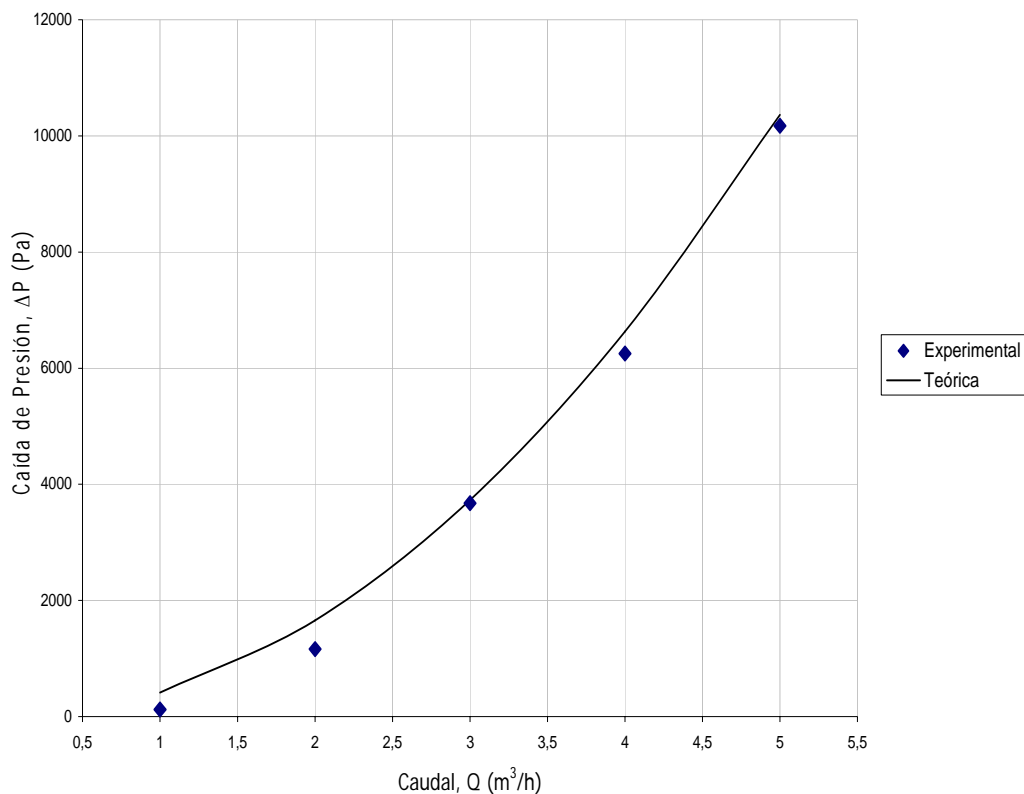
Se aprecia de la tabla N° 4, que las caídas de presión experimentales son similares entre sí en caudales altos, esto es, se presenta menos desviaciones para estos caudales debido a que el flujo volumétrico que circular por la tubería es mayor originándose de esta manera una mayor sensibilidad del manómetro de poza el momento de registrar la diferencia de presión estática. Por lo tanto la exactitud de las mediciones varía con magnitud del caudal, es decir, a mayor caudal menos desviación.

Comparando las caídas de presiones de la tubería de mayor diámetro, 23,7 mm, con la de menor diámetro, 18,4 mm, se puede decir que las caídas de presión de presión son mayores para la tubería de menor diámetro; esto es debido que a menor diámetro, para un mismo caudal, la velocidad de flujo es

mayor, ocasionando mayor turbulencia lo que se convierte en mayores perdidas de presión dentro de la tubería.

Seguidamente, se mostrarán en las gráficas N° 5 y 6, los comportamientos correspondientes a las diferencias de presión ocasionados por codos de 90 ° normales y rectos, con el fin de comparar los valores experimentales y teóricos obtenidos de cada uno; así mismo se presenta las desviaciones de las caídas de presión experimentales respecto a las teóricas.

A continuación se presenta la gráfica N° 5, la cual muestra la tendencia que tiene los valores de diferencia de presión, experimental y teórica, en función del caudal, para codos de 90° rectos.



GRÁFICA N° 5. Variación de la diferencia de presión con respecto al caudal para codos de 90° rectos

Se puede observar, a través de la gráfica N° 5, que la variación de la caída de presión en un tramo de tubería con codos rectos es directamente proporcional al caudal que fluye a través de la misma; la tendencia que sigue es parabólica. Se puede observar que los valores experimentales y teóricos son muy similares debido a que están muy próximos los puntos experimentales a la curva teórica.

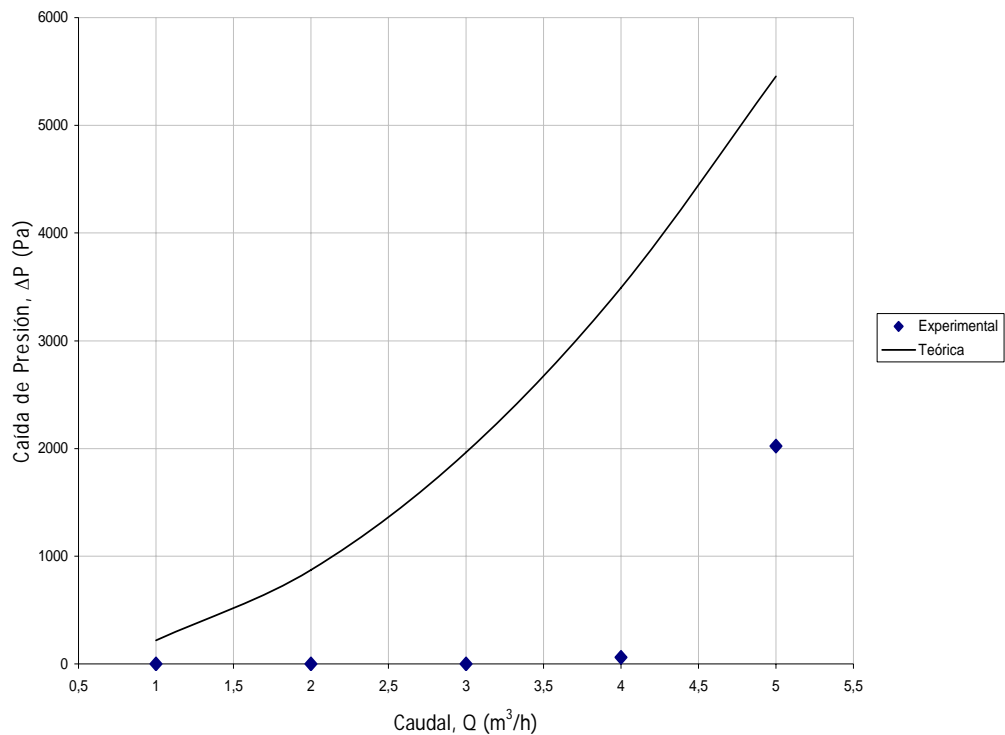
Para apreciar que tan exactos fueron los datos experimentales, se muestra la tabla N° 5, la cual contiene los valores de diferencias de presión experimentales y teóricos, y las desviaciones que presentan los primeros con respecto al último.

Tabla N° 5. Variación de la diferencia de presión estática en función del caudal para un tramo de tubería con codos de 90° rectos

Flujo Volumétrico, Q (m ³ /h)	Caída de Presión Experimental, ΔP_{EXP} (Pa)	Caída de Presión Teórico, ΔP_{TEO} (Pa)	Desviación ΔP , (%)
5	10174,748	10365,004	1,836
4	6251,954	6633,427	5,751
3	3677,620	3731,100	1,433
2	1164,580	1658,020	29,761
1	122,587	414,469	70,423

Se aprecia de la tabla N° 5, que las caídas de presión experimentales son similares entre sí en caudales altos, esto es, se presenta menos desviaciones para estos caudales debido a que el flujo volumétrico que circular por la tubería es mayor originándose de esta manera una mayor sensibilidad del manómetro de poza el momento de registrar la diferencia de presión estática. Por lo tanto la exactitud de las mediciones varía con magnitud del caudal, es decir, a mayor caudal menos desviación.

Por último se presentan la gráfica y tabla para analizar el comportamiento, de caídas de presión en función del flujo volumétrico, para el tramo de tubería con codos de 90° normales.



GRÁFICA N° 6. Variación de la diferencia de presión con respecto al caudal para codos de 90°

Se puede apreciar de la gráfica N° 6, que a medida que se aumenta el flujo volumétrico de agua la diferencia de presión se hace mayor, pero a caudales muy bajos entre 1 y 4 m³/h las caídas de presiones experimentales son casi despreciables debido a que el manómetro de pozo, para esos caudales reportaba una altura apreciable; por lo tanto debe existir una gran desviación para el rango de caudal antes mencionado.

Para verificar lo anteriormente dicho, se observa la tabla N° 6, la cual contiene valores de caída de presión experimentales y teóricas, así como las desviaciones entre ellas.

Tabla N° 6. Variación de la diferencia de presión estática en función del caudal para un tramo de tubería con codos de 90° normales

Flujo Volumétrico, Q (m ³ /h)	Caída de Presión Experimental, ΔP_{EXP} (Pa)	Caída de Presión Teórico, ΔP_{TEO} (Pa)	Desviación ΔP , (%)
5	2022,691	5455,254	62,922
4	61,294	3491,300	98,244
3	0,000	1963,797	100,000
2	0,000	872,746	100,000
1	0,000	218,147	100,000

Se puede verificar a través de la tabla N° 6 lo anteriormente dicho, porque las desviaciones para el rango de caudal entre 1 y 4 m³/h son del 100%.

Al comparar los accesorios, codos normales con codos rectos, se observa que la tubería formado por los codos rectos presenta mayores caídas de presión (ver tabla N° 5 y 6); esto se debe, a que el cambio de dirección del flujo del fluido es brusco, favoreciendo a la formación de vórtices, y ocasiona una resistencia a la circulación del fluido alta ^[7].

Una vez analizadas el comportamiento de las caídas de presión en función del caudal para cada uno de los accesorios, y tramos de tuberías, se puede decir que, de forma general al visualizar y comparar los distintos resultados se observa que a mayores caudales, mayores son las pérdidas tanto teóricas como experimentales y esto se debe a que por continuidad el caudal y la velocidad son directamente proporcionales y al incrementarse ésta; por balance de energía las pérdidas producidas son mayores. Comparando entre todos se puede observar que las mayores diferencias de presión las produce la contracción, tubería de 18,4 mm, expansión gradual, codos rectos, codos normales y por último la tubería de 23,7 mm.

A continuación se presenta el gráfico N° 7, el cual representa el comportamiento de los coeficientes de expansión y contracción gradual en función del flujo volumétrico.

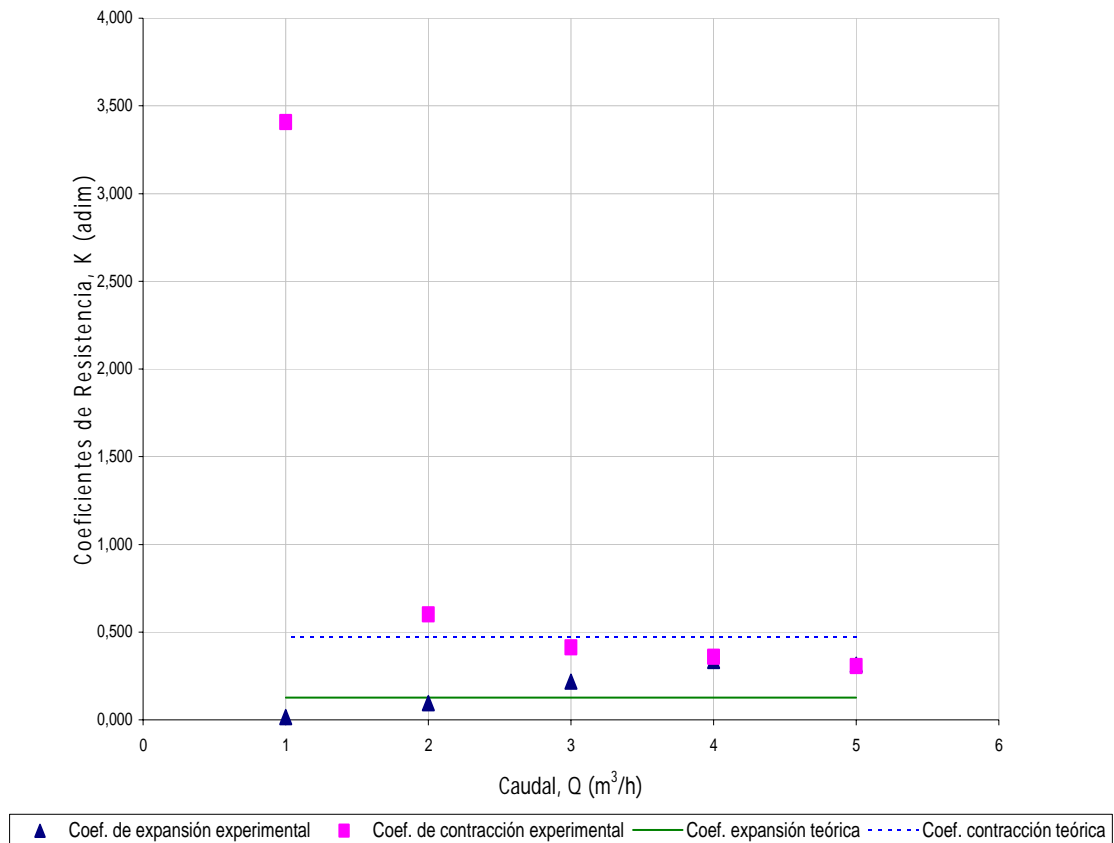


GRÁFICO N° 7. Comportamiento de los coeficientes de expansión y contracción gradual

Se puede observar de la gráfica N° 7, que los coeficientes de expansión y contracción gradual son constantes para cualquier caudal porque son función del ángulo de expansión o contracción y de la relación de diámetros, como se observa en la ecuación (11) y (23) de la sección de apéndices-cálculos tipos. Sin embargo, existe una diferencia notoria entre ambas, y esta es que el coeficiente de contracción siempre es mayor que el coeficiente de expansión gradual, debido a que la contracción gradual genera mayor turbulencia.

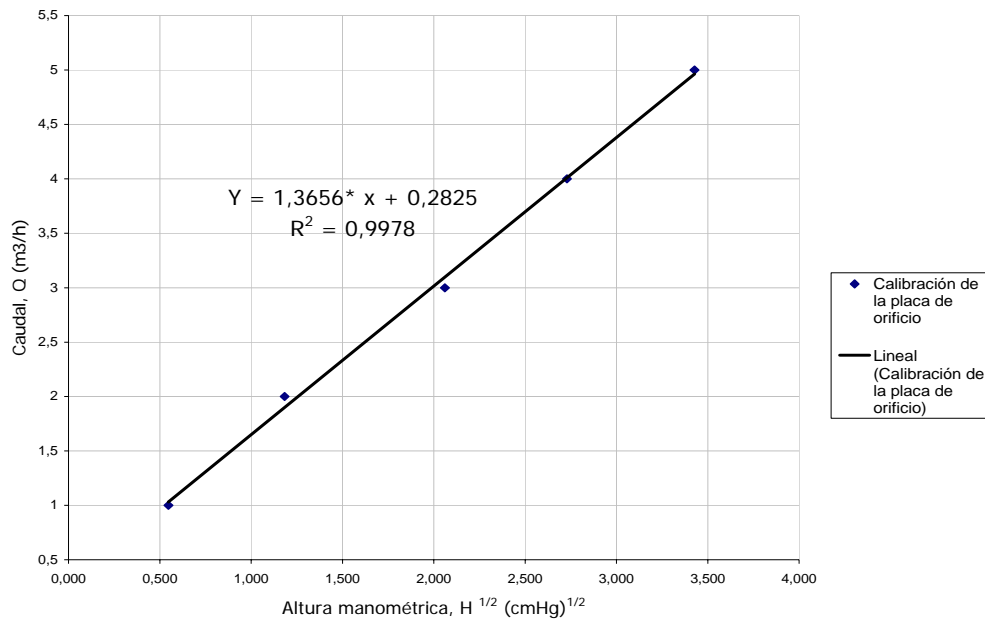
Tabla N° 7. Variación de los Coeficiente de Expansión y Contracción gradual, teórico y experimental, con el flujo volumétrico.

COEFICIENTES DE EXPANSIÓN GRADUAL			
Flujo Volumétrico, Q (m ₃ /h)	Coeficiente de Expansión Gradual Teórico, Ke (adim)	Coeficiente de Expansión Gradual Experimental, Kee (adim)	DesviaciónK _{EXP} , (%)
5	0,126	0,315	149,21
4	0,126	0,336	166,16
3	0,126	0,217	72,01
2	0,126	0,095	24,49
1	0,126	0,015	88,04
COEFICIENTES DE CONTRACCIÓN GRADUAL			
Flujo Volumétrico, Q (m ₃ /h)	Coeficiente de Contracción Gradual Teórico, Kc (adim)	Coeficiente de Contracción Gradual Experimental, Kec (adim)	DesviaciónK _{EXP} , (%)
5	0,470	0,306	34,87
4	0,470	0,359	23,48
3	0,470	0,413	12,09
2	0,470	0,600	27,78
1	0,470	3,408	625,79

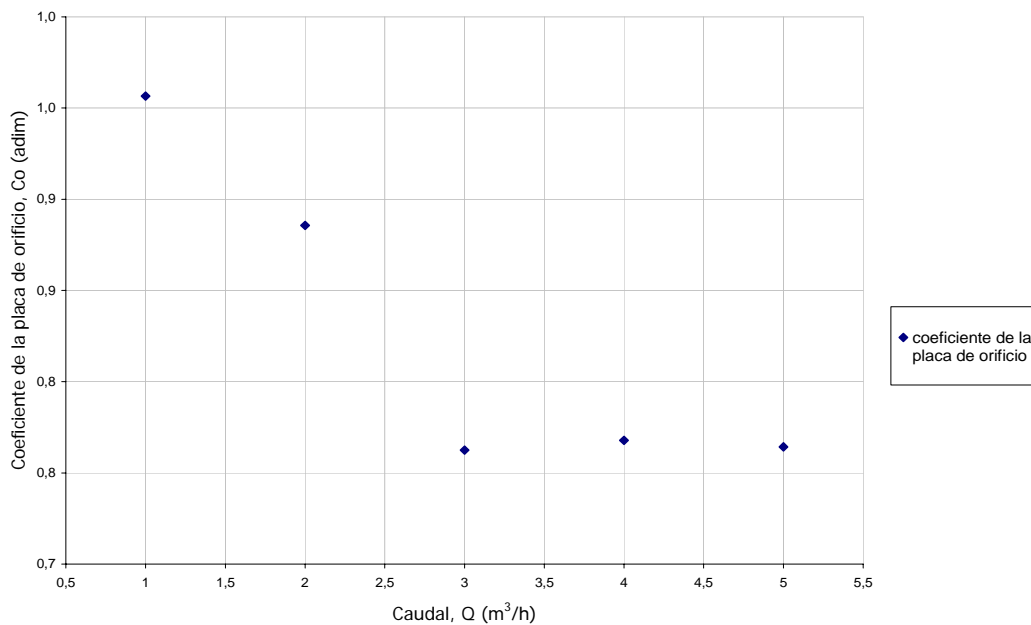
De la tabla N° 7 se puede confirmar que el coeficiente de expansión y contracción gradual teórico se mantienen constante para cualquier caudal; y las desviaciones se deben a fluctuaciones del equipo, presencia de burbujas dentro del sistema y pérdida de masa de agua.

Para el menor caudal estudiado, se aprecia que la desviación de la contracción gradual es de 626%, la cual representa un error de gran magnitud; pero este error o valor anómalo tiene origen en la errores mencionados anteriormente como presencia de burbuja y fugas de líquido del sistema, y adicionalmente a imprecisiones de lecturas, esto se puede entender porque que la variación de la altura manométrica no siguió la tendencia de disminución esperada, causando una mayor caída de presión que la verdadera o la esperada ver tabla N° 17 de la sección de apéndice-hoja de dato.

Para analizar la placa de orificio, se muestra la gráfica N° 8 y N° 9, los cuales presenta la curva de calibración y los coeficientes de descarga de la placa de orificio respectivamente.



GRÁFICA N° 8. Curva de Calibración de la Placa de Orificio



GRÁFICA N° 9. Variación del Coeficiente de descarga de la Placa de Orificio

Se puede observar del gráfico N° 8, que la curva de calibración de la placa de orificio presenta un comportamiento lineal, cumpliéndose y ajustándose lo esperado, obteniéndose un valor de $R^2 = 0.9978$, lo cual da una idea que los datos obtenidos experimentalmente están muy bien ajustado a una recta.

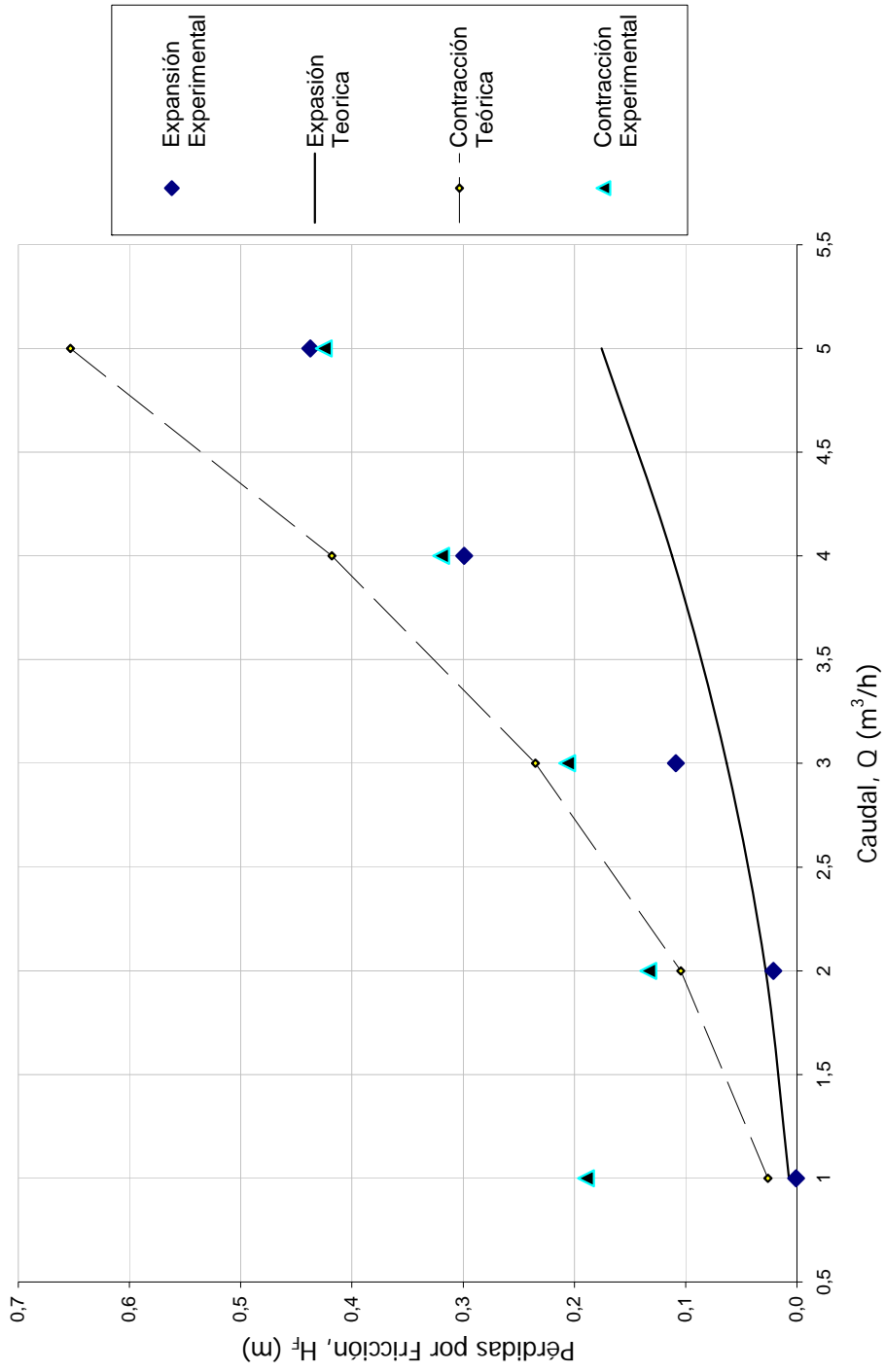
Se aprecia de la gráfica N° 9, que el comportamiento del coeficiente de descarga es inversamente proporcional al flujo volumétrico de operación, debido a que disminuye a medida que aumenta el caudal y llega hasta un punto donde el valor del coeficiente de descarga se mantiene constante, teniendo un comportamiento casi lineal.

A continuación se realizan los análisis de pérdidas por fricción para cada sección de tuberías y accesorios.

Seguidamente, mostrará el gráfico N° 10, el cual representa el comportamiento de la variación de las pérdidas por fricción con el caudal, de la expansión y contracción gradual.

Se puede apreciar de la gráfica N° 10 el comportamiento de la variación de las pérdidas por fricción de la expansión y contracción gradual; los cuales tienen comportamiento similar debido a que las pérdidas son mayores a medida que se aumenta el flujo volumétrico de agua. Se puede observar que ambas líneas de contracción gradual, teórica y experimental se encuentra ubicada por encima de las líneas de expansión gradual, esto indica que la contracción provoca mayor pérdidas por fricción debido a que genera mayor turbulencia, provocando más roce con las paredes de las tuberías.

Los valores de las pérdidas de fricción y las desviaciones para la expansión y contracción gradual se encuentran en la Tabla N° 8



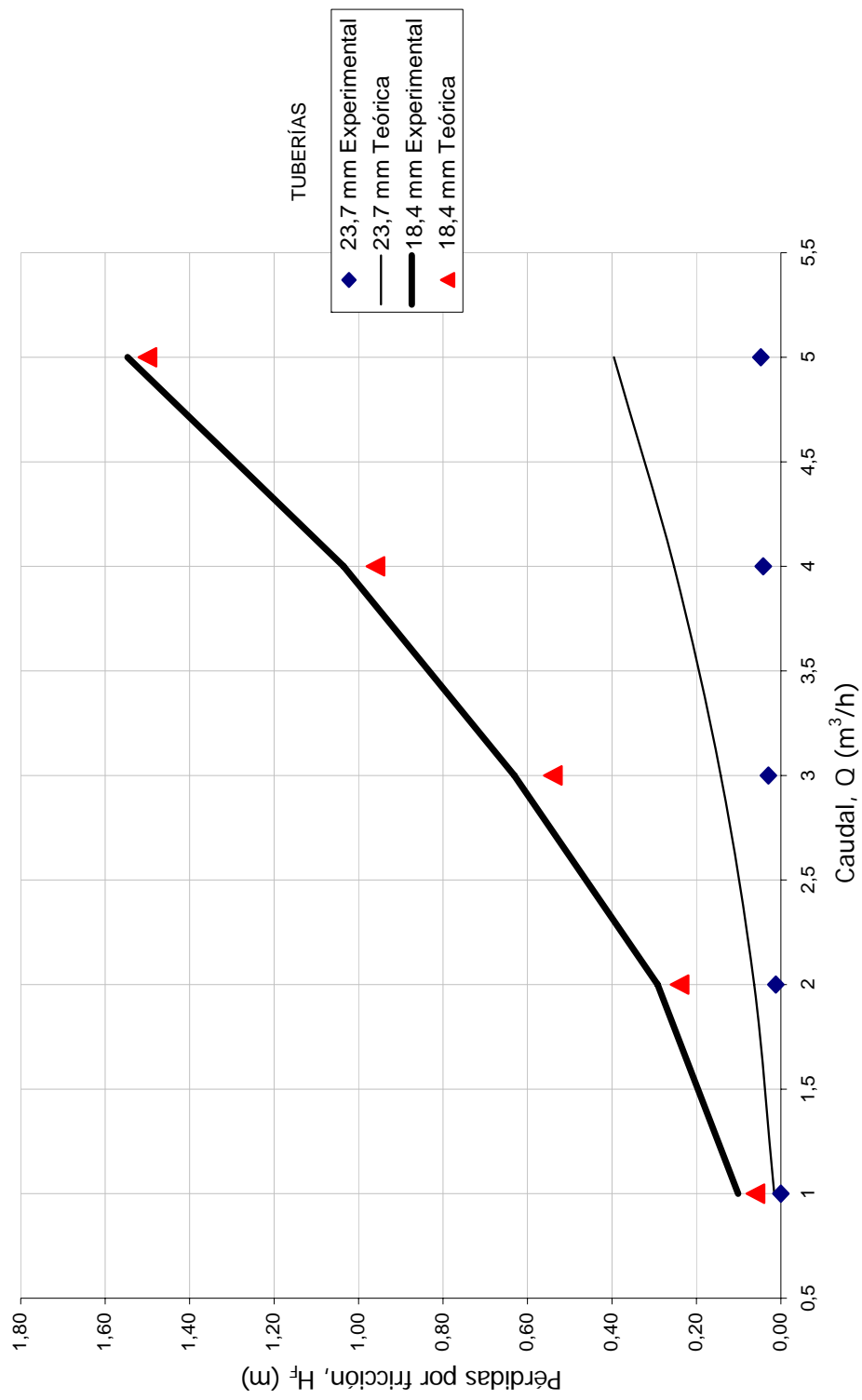
GRÁFICA N° 10. Variación de las pérdidas por fricción en una Expansión y Contracción Gradual

Tabla N° 8. Variación de las pérdidas por fricción en la expansión y contracción gradual

PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN LA EXPANSIÓN GRADUAL			
Flujo Volumétrico, Q (m ₃ /h)	Pérdidas por Fricción Teórico, H _{FTEO} (Pa)	Pérdidas por Fricción Experimental, H _{FEXP} (Pa)	Desviación H _F , (%)
5	0,176	0,438	149,21
4	0,112	0,299	166,16
3	0,063	0,109	72,01
2	0,028	0,021	24,49
1	0,007	0,001	88,04
PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN LA CONTRACCIÓN GRADUAL			
Flujo Volumétrico, Q (m ₃ /h)	Pérdidas por Fricción Teórico, H _{FTEO} (Pa)	Pérdidas por Fricción Experimental, H _{FEXP} (Pa)	Desviación H _F , (%)
5	0,653	0,425	34,87
4	0,418	0,320	23,48
3	0,235	0,207	12,09
2	0,104	0,1335	27,78
1	0,026	0,1896	625,79

De la tabla N° 8 se puede confirmar que las pérdidas por fricción son mayores a medida que se aumenta el caudal. Las desviaciones se deben a fluctuaciones del equipo, presencia de burbujas dentro del sistema y pérdida de masa de agua.

Para el menor caudal estudiado, se aprecia que la desviación de la contracción gradual es de 626%, la cual representa un error de gran magnitud; pero este error o valor anómalo tiene origen en los errores mencionados anteriormente como presencia de burbuja y fugas de líquido del sistema, y adicionalmente a imprecisiones de lecturas, esto se puede entender porque que la variación de la altura manométrica no siguió la tendencia de disminución esperada, causando una mayor caída de presión que la verdadera o la esperada ver tabla N° 17 en la sección de apéndice-hoja de dato.



GRÁFICA N° 11. Variación de las pérdidas por fricción en una tuberías de 18,4 mm y 23,7 mm

De la gráfica N° 11 se puede apreciar que se presenta el mismo comportamiento creciente de las pérdidas de fricción con respecto a los caudales de operación. Y se puede distinguir que ambas rectas de pérdidas por fricción de la tubería de 18,4 mm, experimental y teóricas, están por encima de las rectas de pérdidas por fricción de la tubería de mayor diámetro.

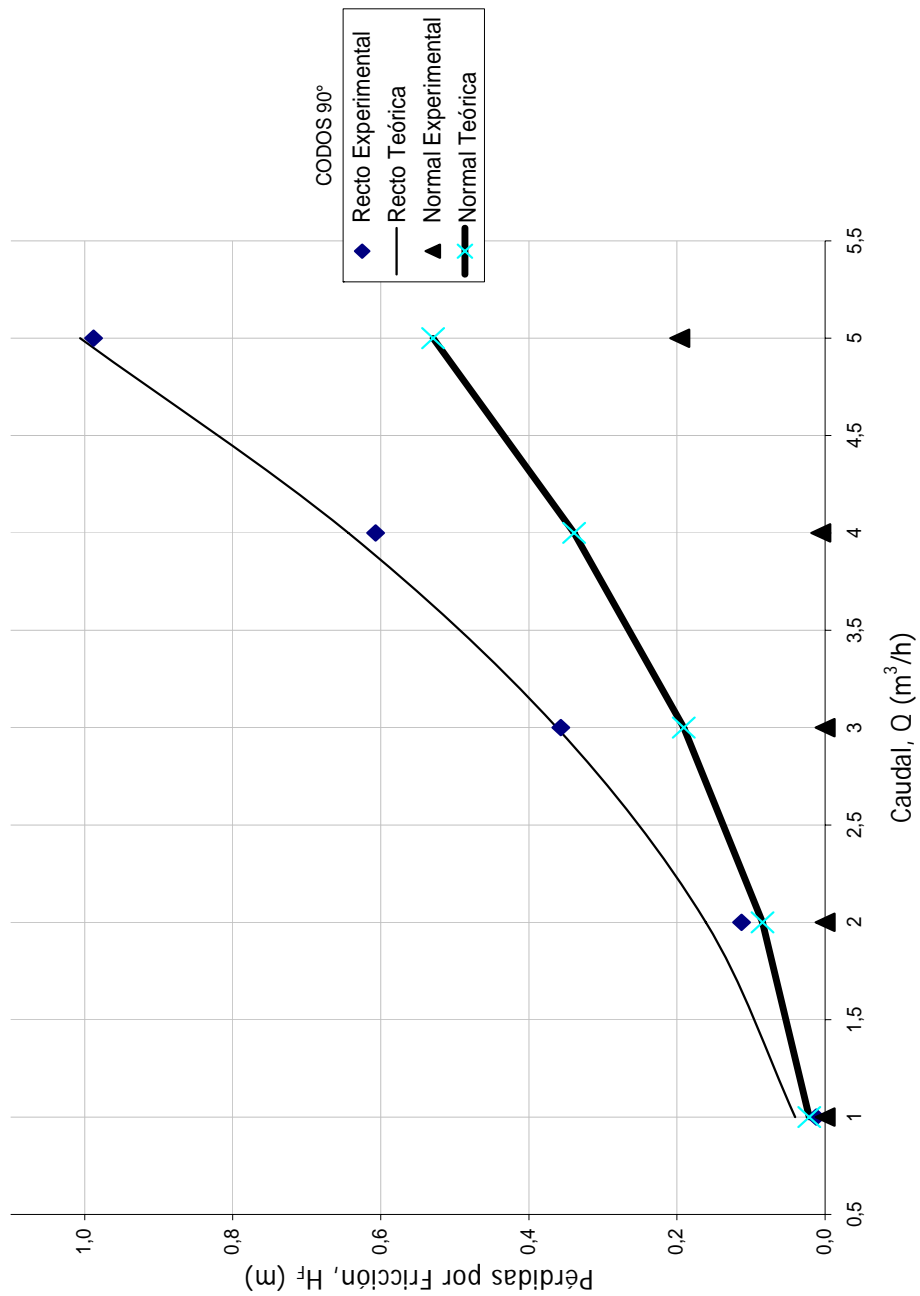
Los valores de las pérdidas de fricción y las desviaciones para la expansión y contracción gradual se encuentran en la Tabla N° 9.

Tabla N° 9. Variación de las pérdidas por fricción en tuberías de 18,4 mm y 23,7 mm de diámetro

PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN LA TUBERÍA DE 18,4 mm			
Flujo Volumétrico, Q (m ₃ /h)	Pérdidas por Fricción Teórico, H _{FTEO} (Pa)	Pérdidas por Fricción Experimental, H _{FEXP} (Pa)	Desviación H _F , (%)
5	1,500	1,547	3,130
4	0,960	1,035	7,841
3	0,540	0,631	16,796
2	0,240	0,292	21,486
1	0,060	0,101	68,645
PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN LA TUBERÍA DE 23,7 mm			
Flujo Volumétrico, Q (m ₃ /h)	Pérdidas por Fricción Teórico, H _{FTEO} (Pa)	Pérdidas por Fricción Experimental, H _{FEXP} (Pa)	Desviación H _F , (%)
5	0,395	0,048	87,957
4	0,253	0,042	83,535
3	0,142	0,030	79,091
2	0,063	0,012	81,180
1	0,016	0,000	100,000

Se aprecia de la tabla N° 9 que las de desviación de las pérdidas por fricción en la tubería de 23,7 mm son muy grandes debido a que los valores de altura manométricas tienen mucha imprecisión debido que para los caudales fijados de operación, la altura manométrica mostrada por el manómetro de pozo tenía un valor muy cercano a cero, lo que hizo que la lectura sea imprecisa.

A continuación se presenta el gráfico N° 12, el cual muestra los comportamientos de la caída de presión tanto teórica como experimental para codos de 90° rectos y normales.



GRÁFICA N° 12. Variación de las pérdidas por fricción en codos 90° normales y rectos

De la gráfica N° 12 se puede observar que los comportamientos de las curvas de pérdidas de fricción, de ambos accesorios, son mayores con el aumento del flujo volumétrico.

Se puede observar que las pérdidas presentadas por los codos de 90° rectos son mayores que las de los codos 90° normales, esto se debe, a que el cambio de dirección del flujo del fluido es brusco en los codos rectos, favoreciendo a la formación de vórtices, y ocasiona una resistencia a la circulación del fluido alta ^[7].

Tabla N° 10. Variación de las pérdidas por fricción codos de 90° normales y rectos

PÉRDIDAS POR FRICCIÓN CODOS 90° RECTOS			
Flujo Volumétrico, Q (m ₃ /h)	Pérdidas por Fricción Teórico, H _{FTEO} (Pa)	Pérdidas por Fricción Experimental, H _{FEXP} (Pa)	Desviación H _F , (%)
5	1,006	0,988	1,836
4	0,644	0,607	5,751
3	0,362	0,357	1,433
2	0,161	0,113	29,761
1	0,040	0,012	70,423
PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN CODOS 90° NORMALES			
Flujo Volumétrico, Q (m ₃ /h)	Pérdidas por Fricción Teórico, H _{FTEO} (Pa)	Pérdidas por Fricción Experimental, H _{FEXP} (Pa)	Desviación H _F , (%)
5	0,530	0,196	62,922
4	0,339	0,006	98,244
3	0,191	0,000	100,000
2	0,085	0,000	100,000
1	0,021	0,000	100,000

Se aprecia de la tabla N° 10 que las de desviación de las pérdidas por fricción en codos 90° normales mm son muy grandes porque los valores de altura manométricas leídas tienen mucha imprecisión debido que para los caudales fijados de operación, la altura manométrica mostrada por el manómetro de pozo tenía un valor muy cercano a cero, lo que hizo que la lectura sea imprecisa con errores.

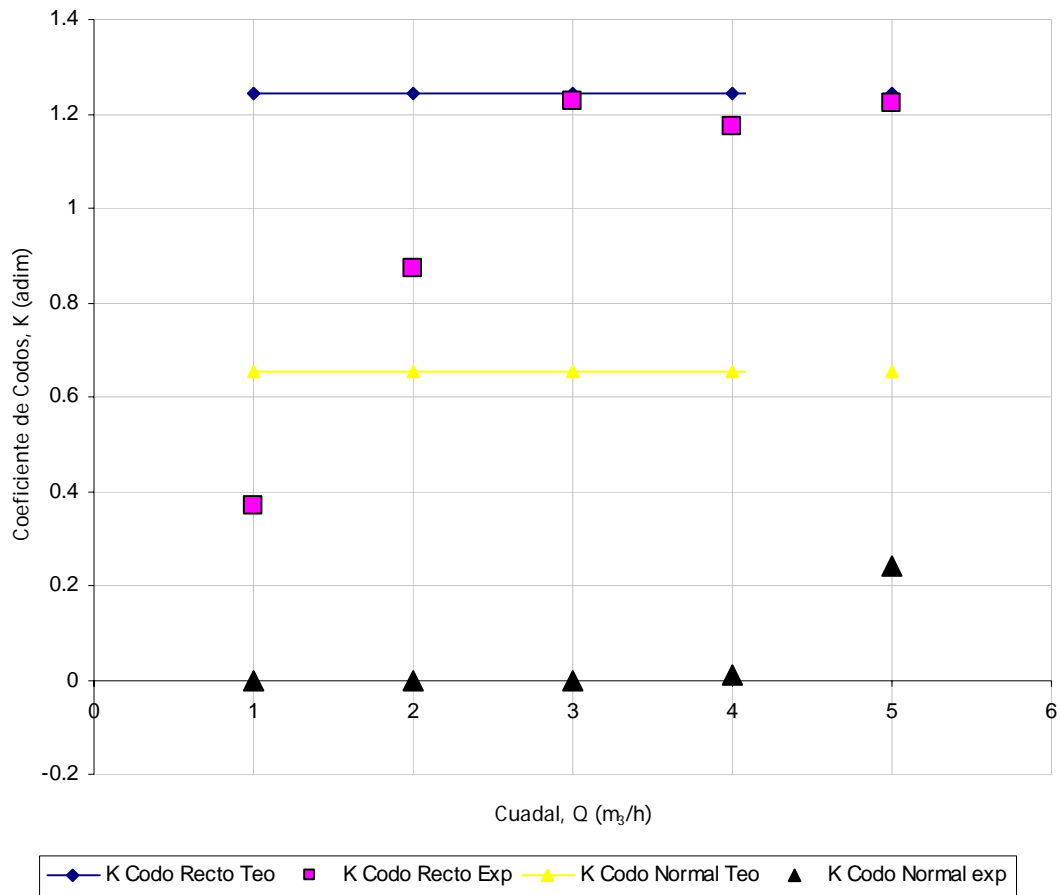


Gráfico N° 13. Coeficientes de resistencia de los codos.

Se puede apreciar que los coeficientes de resistencia para ambos codos tienen comportamiento creciente cuando se aumenta el valor del flujo volumétrico. También se puede apreciar que el coeficiente de resistencia de un codo recto es mayor que el de un codo normal. Esto es debido a que los codos rectos originan una mayor pérdida de fricción ya que el cambio de dirección del flujo es brusco.

CONCLUSIONES

Luego de un largo análisis y una discusión de los resultados obtenidos, se llegó, en base a fundamentos teóricos y mediante la revisión de las ecuaciones pertinentes, a las siguientes conclusiones:

1. Las caídas de presión dependen de la geometría del sistema.
2. Las diferencias de presiones de una contracción gradual son mayores que las de una expansión gradual.
3. Las caídas de presión son mayores en el tramo de tubería de menor diámetro (18,4 mm)
4. Las diferencias de presiones de generada por un codo de 90° recto son mayores que las de un codo 90° normal.
5. En general, las diferencias de presiones de todos los tramos de tuberías y accesorios son mayores al aumentas el flujo volumétrico.
6. Los codos generan bajas caídas de presiones, comparadas con expansión, contracción y tuberías de diámetro pequeño.
7. El coeficiente de contracción gradual es mayor que el coeficiente de expansión gradual.
8. La curva de calibración se ajusta muy bien a una línea recta.
9. Las pérdidas por fricción ocasionadas por la contracción son mayores que las generadas por la expansión.

10. Las pérdidas por fricción ocasionadas por la tubería menor, con diámetro de 18,4 mm, son mayores de las ocasionadas por la tubería de mayor diámetro.
11. Las pérdidas por fricción ocasionadas por un codo 90° recto son mayores que las de un codo normal 90°.
12. De manera general, todos los tramos de tuberías y accesorios presentan mayor mayores pérdidas por fricción al aumentar el caudal, es decir, las pérdidas por fricción es proporcional al caudal.
13. Cuando se trabaja a caudales, entre 1 y 2 m³/h bajos se genera mucha desviación de los resultados.
14. Flujo en régimen laminar es difícil de apreciar en tuberías.

RECOMENDACIONES

1. Asegurar, que cada uno de los accesorios que se someten a estudio estén bien conectados, a fin de evitar perdidas del fluido, y evitar la entrada de aire.
2. Se recomienda utilizar un líquido manométrico menos denso que el mercurio como por ejemplo el tetracloruro de carbono, ya que a bajos caudales en la mayoría de los accesorios la diferencia de presión leída es muy pequeña lo que no nos permite tener una buena apreciación en las mediciones y por ende en los resultados.
3. Evitar la acumulación de burbujas de aire en las tomas manométricas.
4. Las lecturas del manómetro deben hacerse cuando el sistema no presente burbujas para evitar errores de mediciones.
5. Se recomienda realizar una limpieza periódica a los accesorios y tuberías del equipo para evitar que el cambio de la aspereza relativa del material influya sobre los análisis realizados en la experiencia.

BIBLIOGRAFÍA

1. Urbina, Juan "DETERMINACIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS", Manual de Prácticas de Laboratorio, UCV, Ing. Química, 2004.
2. Edna, Figueira "DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE PRESIÓN POR FRICCIÓN EN CONEXIONES Y TRAMOS DE TUBERÍAS", Manual de Prácticas de Laboratorio, UCV, Ing. Química, 2004.
3. Wilinski, Silvia "LECHOS FLUIDIZADOS ESTUDIO DE SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS", Manual de Prácticas de Laboratorio, UCV, Ing. Química, 2004.
4. Rocavila "INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE FLUIDOS", Editorial Limusa, 4^{ta} Edición. 1995. México
5. Moody L., "TRANSF. ASME" 1944
6. Mott, Robert. "MECÁNICA DE FLUIDOS APLICADA", Editorial Prentice Hall. 4^{ta}. Edición. 1996. México
7. Mc Cabe y SMITH. "OPERACIONES BÁSICAS DE INGENIERÍA QUÍMICA", Editorial Mc Graw Hill. 1991. Madrid

APÉNDICES CÁLCULOS TIPOS

En esta sección se presentan, de forma ordenada, cada una de las fórmulas empleadas, con el fin de determinar los resultados necesarios de la experiencia para la realización del análisis y por ende cumplir con los objetivos propuestos.

1. Densidad del Agua. [1]

$$\rho = \left(\frac{m_2 - m_1}{V_{pic}} \right) \times 1000 \quad (1)$$

Donde:

ρ : Densidad del agua (Kg/m³)

m_2 : Masa del picnómetro con muestra de agua (g)

m_1 : Masa del picnómetro vacío (g)

V_{pic} : Volumen del picnómetro (ml)

$$\rho = \left(\frac{18,5g - 8g}{10mL} \right) \times 1000 = 1050 \frac{Kg}{m^3}$$

2. Constante del Viscosímetro. [1]

$$C = \left(\frac{C_2 - C_1}{T_2 - T_1} \right) \times (T - T_1) + C_1 \quad (2)$$

Donde:

C: Constante del viscosímetro para la temperatura de observación (cst/s)

C₁: Constante del viscosímetro para la temperatura de referencia T₁ (cst/s)

C₂: Constante del viscosímetro para la temperatura de referencia T₂ (cst/s)

T: Temperatura del laboratorio (°C)

T₁: Temperatura de referencia 1 (°C)

T₂: Temperatura de referencia 2 (°C)

$$C = \left(\frac{0,004106 \frac{cst}{s} - 0,004126 \frac{cst}{s}}{100^{\circ}C - 40^{\circ}C} \right) \times (25^{\circ}C - 40^{\circ}C) + 0,004126 \frac{cst}{s} = 0,0041 \frac{cst}{s}$$

3. Tiempo de Escurrimiento. ^[1]

$$t = \frac{(t1 + t2 + t3)}{3} \quad (3)$$

Donde:

t: Tiempo promedio de escurrimiento (s)

t1: Primera medición del tiempo de escurrimiento (s)

t2: Segunda medición del tiempo de escurrimiento (s)

t3: Tercera medición del tiempo de escurrimiento (s)

$$t = \frac{(204,6s + 205,8s + 207,6s)}{3} = 206,0s$$

4. Viscosidad Cinemática del Agua. ^[1]

$$\nu = C \times t \quad (4)$$

Donde:

ν : Viscosidad cinemática del agua (cst)

$$\nu = 0,0041 \frac{\text{cst}}{\text{s}} \times 206,0s = 0,8510\text{cst}$$

5. Viscosidad Dinámica del Agua. ^[1]

$$\mu = 1 \times 10^{-6} \times \nu \times \rho \quad (5)$$

Donde:

μ : Viscosidad dinámica del agua a la temperatura del laboratorio (Pa.s)

$$\mu = 1 \times 10^{-6} \times \nu \times \rho = 1 \times 10^{-6} \times 0,8510\text{cst} \times 1050 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 8,9354 \times 10^{-4} \text{Pa.s}$$

Los cálculos que se muestran a continuación corresponden al mayor caudal, de la Tabla N° 17 de la sección del apéndice-hoja de dato, que se fijó durante la realización de la práctica, es decir, los cálculos están referidos al flujo volumétrico de 5 m³/h.

PLACA DE ORIFICIO:

6. Velocidad de Flujo. [2]

$$U_p = \left(\frac{4 \times 10^6 \times Q_p}{3600 \times \pi \times (d')^2} \right) \quad (6)$$

Donde:

U_p : Velocidad media en la placa de orificio (m/s)

Q_p : Caudal circulando por la placa de orificio (m³/h)

d' : Diámetro del orificio de la placa (mm)

$$U_p = \left(\frac{4 \times 10^6 \times 5 \frac{m^3}{h}}{3600 \times \pi \times (20mm)^2} \right) = 4,421 \frac{m}{s}$$

7. Razón de Diámetros. [2]

$$\beta = \frac{d'}{D} \quad (7)$$

Donde:

β' : Razón del diámetro del orificio de la placa al diámetro de la tubería (adim)

$$\beta = \frac{20mm}{30,7mm} = 0,651$$

8. Diferencia de Presión Estática experimental para la placa de orificio. [2]

$$\Delta P_p = (\rho_m - \rho) \times g \times H_p \times 0,01 \quad (8)$$

Donde:

ΔP_p : Diferencia de presión estática para la placa de orificio (Pa)

H_p : Altura del líquido manométrico para la placa de orificio (cm)

ρ_m : Densidad del fluido manométrico.

$$\Delta P_p = (13531,16 \frac{Kg}{m^3} - 1050 \frac{Kg}{m^3}) \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 11,75cmHg \times 0,01 = 14386,72Pa$$

9. Coeficiente para la Placa de Orificio. [2]

$$C_o = U_p \times \left(\frac{\sqrt{1 - \beta^4}}{\sqrt{\frac{2 * \Delta P_p}{\rho}}} \right) \quad (9)$$

Donde:

C_o : Coeficiente de la placa de orificio.

$$C_o = 4,421 \frac{m}{s} \times \left(\frac{\sqrt{1 - 0,651^4}}{\sqrt{\frac{2 * 14386,72 Pa}{1050 \frac{Kg}{m^3}}}} \right) = 0,765$$

EXPANSIÓN GRADUAL:

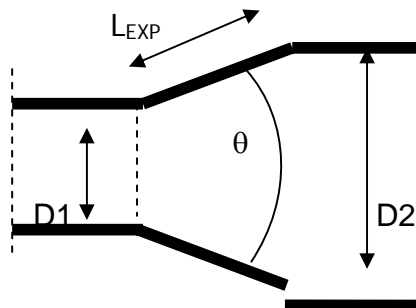


Figura N° 1. Angulo de Cono en una expansión

10. Ángulo de Expansión. [2]

$$\theta = 2 \times \arcsen \left(\frac{\left(\frac{|D_2 - D_1|}{2} \right)}{L_i} \right) \quad (10)$$

(Ver Figura N° 1)

Donde:

θ : Ángulo de la expansión (grados)

D_2 : Diámetro aguas debajo de la expansión (mm)

D_1 : Diámetro aguas arriba de la expansión (mm)

L_{EXP} : Longitud de la expansión (mm)

$$\theta = 2 \times \operatorname{arcsen} \left(\frac{\left(\frac{|30,7\text{mm} - 18\text{mm}|}{2} \right)}{52\text{mm}} \right) = 13,58^\circ$$

11. Coeficiente de Expansión Teórico. [2]

Si $\theta \leq 45^\circ$

$$K_e = \frac{2,6 \times \operatorname{sen} \left(\frac{\theta}{2} \right) \times \left(1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right)}{\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4} \quad (11)$$

Si $45^\circ < \theta \leq 180^\circ$

$$K_e = \frac{\left(1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right)^2}{\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4} \quad (12)$$

Donde:

K_e : Coeficiente de expansión gradual teórico referido al área mayor (adim)

Como el ángulo de expansión es menor de 45° , entonces:

$$K_e = \frac{2,6 \times \operatorname{sen} \left(\frac{13,58^\circ}{2} \right) \times \left(1 - \left(\frac{30,7\text{mm}}{18\text{mm}} \right)^2 \right)}{\left(\frac{30,7\text{mm}}{18\text{mm}} \right)^4} = 0,126$$

12. Velocidad de Flujo. [2]

$$U_{EXPi} = \frac{4 \times 10^6 \times Q}{3600 \times \pi \times D_i^2} \quad (13)$$

Donde:

U_{EXP} : Velocidad del flujo en el punto i (m/s)

Q: Caudal para la expansión gradual (m^3/h)

$$U_{EXP1} = \frac{4 \times 10^6 \times 5 \frac{m^3}{h}}{3600 \times \pi \times 18mm^2} = 5,223 \frac{m}{s} \quad U_{EXP2} = \frac{4 \times 10^6 \times 5 \frac{m^3}{h}}{3600 \times \pi \times 30,7mm^2} = 1,876 \frac{m}{s}$$

13. Pérdidas de Fricción Teórica en la Expansión Gradual. [2]

$$H_{fTEXP} = K_e \times \left(\frac{U_1^2}{2 * g} \right) \quad (14)$$

Donde:

H_{fTEXP} : Pérdidas por fricción teóricas en la expansión gradual (m)

$$H_{fTEXP} = 0,126 \times \left(\frac{\left(5,223 \frac{m}{s} \right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) = 0,176m$$

14. Diferencia de Presión Estática Teórica en la Expansión Gradual. [2]

$$\Delta P_{TEXP} = \left(\frac{U_1^2 - U_2^2}{2 \times g} - H_{fTEXP} \right) \times \rho \times g \quad (15)$$

Donde:

ΔP_{TEXP} : Diferencia de presión estática teórica para la expansión gradual (Pa)

H_{fTEXP} : Pérdida por fricción teórica en la expansión gradual (m)

$$\Delta P_{TEXP} = \left(\frac{\left(5,223 \frac{m}{s} \right)^2 - \left(1,876 \frac{m}{s} \right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} - 0,176m \right) \times 1050 \frac{Kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2} = 10666,54Pa$$

15. Diferencia de Presión Estática Experimental para la Expansión Gradual. [2]

$$\Delta P_{EEXP} = (\rho_m - \rho) \times g \times H_{eg} \times 0,01 \quad (16)$$

Donde:

ΔP_{EEXP} : Diferencia de presión estática experimental para la expansión gradual (Pa)

H_{eg} : Altura manométrica para la expansión gradual (m)

$$\Delta P_{EEXP} = (13531,16 \frac{Kg}{m^3} - 1050 \frac{Kg}{m^3}) \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 6,5cmHg \times 0,01 = 7958,61Pa$$

16. Pérdidas de Fricción experimental para la Expansión Gradual. [2]

$$H_{FEEXP} = -\frac{\Delta P_{EEXP}}{\rho \times g} + \frac{U_1^2}{2 \times g} - \frac{U_2^2}{2 \times g} \quad (17)$$

Donde:

H_{FEEXP} : Pérdidas por fricción experimentales en la expansión gradual (m)

$$H_{FEEXP} = -\frac{7958,61Pa}{1050 \frac{Kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2}} + \frac{\left(5,223 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} - \frac{\left(1,876 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,438m$$

17. Coeficiente de Expansión Gradual Experimental. [2]

$$K_{ee} = \frac{2 \times g \times H_{FEEXP}}{U_1^2} \quad (18)$$

Donde:

K_{ee} : Coeficiente de expansión gradual experimental (adim)

$$K_{ee} = \frac{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 0,438m}{\left(5,223 \frac{m}{s}\right)^2} = 0,315$$

18. Porcentaje de Desviación de la diferencia de presión teórica y experimental de la expansión gradual. [3]

$$\%Desv.\Delta P = \frac{(\Delta P_{TEXP} - \Delta P_{EEXP}) \times 100}{\Delta P_{TEXP}} \quad (19)$$

Donde:

$\%Desv.\Delta P$: Porcentaje de desviación de la diferencia de presión (%)

ΔP_{TEXP} : Diferencia de presión estática teórica (Pa)

ΔP_{EEXP} : Diferencia de presión estática experimental (Pa)

$$\%Desv. = \frac{(10666,54Pa - 7958,61Pa) \times 100}{10666,54Pa} = 25,30\%$$

19. Porcentaje de Desviación entre pérdidas por fricción teórica y experimental de la expansión gradual. [3]

$$\%Desv.H_f = \frac{(|H_{FTEXP} - H_{FEEXP}|) \times 100}{H_{FTEXP}} \quad (20)$$

Donde:

$\%Desv.H_f$: Porcentaje de desviación de las pérdidas por fricción (%)

H_{FTEXP} : Pérdidas por fricción teórica (m)

H_{FEEXP} : Pérdidas por fricción experimental (m)

$$\%Desv.H_f = \frac{(|0,176m - 0,438m|) \times 100}{0,176m} = 149,21\%$$

20. Porcentaje de Desviación entre el coeficiente de expansión gradual teórica y experimental. [3]

$$\%Desv.K = \frac{(|K_e - K_{ee}|) \times 100}{K_e} \quad (21)$$

Donde:

$\%Desv.K$: Porcentaje de desviación de las pérdidas por fricción (%)

K_e : Coeficiente de expansión teórica (adim)

K_{ee} : Coeficiente de expansión experimental (adim)

$$\%Desv.K = \frac{(|0,126 - 0,315|) \times 100}{0,126} = 149,21\%$$

CONTRACCIÓN GRADUAL:

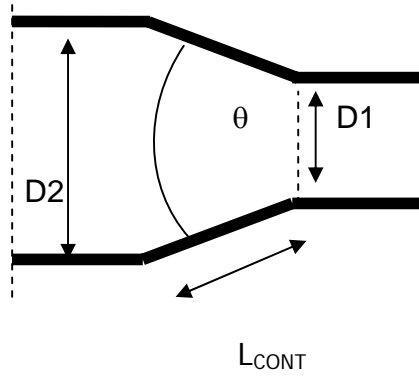


Figura N° 2. Angulo de Cono en una contracción

21. Ángulo de Contracción. [2]

$$\theta = 2 \times \operatorname{acsen} \left(\frac{\left(\frac{|D_2 - D_1|}{2} \right)}{L_i} \right) \quad (22)$$

(Ver Figura N° 2)

Donde:

θ : Ángulo de la contracción (grados)

D_2 : Diámetro aguas arriba de la contracción (mm)

D_1 : Diámetro aguas debajo de la contracción (mm)

L_{EXP} : Longitud de la expansión (mm)

$$\theta = 2 \times \operatorname{acsen} \left(\frac{\left(\frac{|30,7\text{mm} - 18\text{mm}|}{2} \right)}{52\text{mm}} \right) = 13,58^\circ$$

22. Coeficiente de Contracción Gradual Teórico. [2]

Si $\theta \leq 45^\circ$

$$K_c = \frac{2,6 \times \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \times \left(1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right)}{\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4} \quad (23)$$

Si $45^\circ < \theta \leq 180^\circ$

$$K_c = \frac{\left(1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right)^2}{\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4} \quad (24)$$

Donde:

K_c : Coeficiente de contracción gradual teórico referido al área mayor
(adim)

Como el ángulo de contracción es menor de 45° , entonces:

$$K_c = \frac{2,6 \times \operatorname{sen}\left(\frac{13,58^\circ}{2}\right) \times \left(1 - \left(\frac{18\text{mm}}{30,7\text{mm}}\right)^2\right)}{\left(\frac{18\text{mm}}{30,7\text{mm}}\right)^4} = 0,470$$

23. Velocidad de Flujo. [2]

$$U_{CONT} = \frac{4 \times 10^6 \times Q}{3600 \times \pi \times D_i^2} \quad (25)$$

Donde:

U_{EXP} : Velocidad del flujo en el punto i (m/s)

Q: Caudal para la contracción gradual (m^3/h)

$$U_{CONT1} = \frac{4 \times 10^6 \times 5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{3600 \times \pi \times 18\text{mm}^2} = 5,223 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad U_{CONT2} = \frac{4 \times 10^6 \times 5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{3600 \times \pi \times 30,7\text{mm}^2} = 1,876 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

24. Pérdidas de Fricción Teórica en la Contracción Gradual. [2]

$$H_{FTCONT} = K_c \times \left(\frac{U_1^2}{2 * g} \right) \quad (26)$$

Donde:

H_{FTEXP} : Pérdidas por fricción teóricas en la contracción gradual (m)

$$H_{FTCONT} = 0,470 \times \left(\frac{\left(5,223 \frac{m}{s} \right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) = 0,653m$$

25. Diferencia de Presión Estática Teórica de Contracción Gradual. [2]

$$\Delta P_{TCONT} = \left(\frac{U_1^2 - U_2^2}{2 * g} + H_{FTCONT} \right) \times \rho \times g \quad (27)$$

Donde:

ΔP_{TCONT} : Diferencia de presión estática teórica para contracción gradual (Pa)

H_{FTEXP} : Pérdida por fricción teórica en la contracción gradual (m)

$$\Delta P_{TCONT} = \left(\frac{\left(5,223 \frac{m}{s} \right)^2 - \left(1,876 \frac{m}{s} \right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} + 0,653m \right) \times 1050 \frac{Kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2} = 19201,27Pa$$

26. Diferencia de Presión Estática Experimental para la Contracción Gradual. [2]

$$\Delta P_{ECONT} = (\rho_m - \rho) \times g \times H_{cg} \times 0,01 \quad (28)$$

Donde:

ΔP_{ECONT} : Diferencia de presión estática experimental para la contracción gradual (Pa)

H_{cg} : Altura manométrica para la contracción gradual (m)

$$\Delta P_{ECONT} = \left(13531,16 \frac{Kg}{m^3} - 1050 \frac{Kg}{m^3} \right) \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 13,5cmHg \times 0,01 = 16855,75Pa$$

27. Pérdidas de Fricción experimental para la Contracción Gradual. [2]

$$H_{FECONT} = \frac{\Delta P_{FECONT}}{\rho \times g} - \frac{U_1^2}{2 \times g} + \frac{U_2^2}{2 \times g} \quad (29)$$

Donde:

H_{FECONT} : Pérdidas por fricción experimentales en la contracción gradual (m)

$$H_{FECONT} = \frac{16855,75 Pa}{1050 \frac{Kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2}} - \frac{\left(5,223 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} + \frac{\left(1,876 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,425 m$$

28. Coeficiente de Contracción Gradual Experimental. [2]

$$K_{ec} = \frac{2 \times g \times H_{FECONT}}{U_1^2} \quad (30)$$

Donde:

K_{ec} : Coeficiente de contracción gradual experimental (adim)

$$K_{ec} = \frac{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 0,425 m}{\left(5,223 \frac{m}{s}\right)^2} = 0,306$$

29. Porcentaje de Desviación de la diferencia de presión teórica y experimental para la contracción gradual. [3]

$$\%Desv.\Delta P = \frac{(\Delta P_{TCONT} - \Delta P_{FECONT}) \times 100}{\Delta P_{TCONT}} \quad (31)$$

Donde:

$\%Desv.\Delta P$: Porcentaje de desviación de la diferencia de presión (%)

ΔP_{TCONT} : Diferencia de presión estática teórica (Pa)

ΔP_{FECONT} : Diferencia de presión estática experimental (Pa)

$$\%Desv. = \frac{(19201,27 Pa - 16855,75 Pa) \times 100}{19201,27 Pa} = 12,22\%$$

30. Porcentaje de Desviación entre pérdidas por fricción teórica y experimental para la contracción gradual. [3]

$$\%Desv.H_f = \frac{(|H_{FTCONT} - H_{FECONT}|) \times 100}{H_{FTCONT}} \quad (32)$$

Donde:

$\%Desv.H_f$: Porcentaje de desviación de las pérdidas por fricción (%)

H_{FTCONT} : Pérdidas por fricción teórica (m)

H_{FECONT} : Pérdidas por fricción experimental (m)

$$\%Desv.H_f = \frac{(|0,653\text{m} - 0,425\text{m}|) \times 100}{0,653\text{m}} = 34,87\%$$

31. Porcentaje de Desviación entre el coeficiente de contracción gradual teórica y experimental. [3]

$$\%Desv.K = \frac{(|K_c - K_{ec}|) \times 100}{K_c} \quad (33)$$

Donde:

$\%Desv.K$: Porcentaje de desviación de las pérdidas por fricción (%)

K_c : Coeficiente de contracción teórica (adim)

K_{ec} : Coeficiente de contracción experimental (adim)

$$\%Desv.K = \frac{(|0,470 - 0,306|) \times 100}{0,470} = 34,87\%$$

PARA EL RESTO DE LOS ACCESORIOS Y TRAMOS DE TUBERÍA:

Se mostrarán los cálculos tipos para el tramo de tubería que posee un diámetro de 18,4 mm, debido a que los resultados que se obtienen para los accesorios y el otro tramo de tubería se determinan de la forma similar, como se muestra a continuación: (siguiendo la convención inicial de que el flujo volumétrico a emplear es de 5 m³/h)

32. Velocidad Media del fluido. [2]

$$U = \frac{4 \times 10^6 \times Q}{3600 \times \pi \times D^2} \quad (34)$$

Donde:

U : Velocidad media del fluido (m/s)

Q : Caudal de operación (m³/h)

D : Diámetro de la tubería.

$$U = \frac{4 \times 10^6 \times 5 \frac{m^3}{h}}{3600 \times \pi \times 18,4 mm^2} = 5,23 \frac{m}{s}$$

33. Número de Reynolds. [2]

$$Re = \frac{U \times \rho \times D \times 0,01}{\mu} \quad (35)$$

Donde:

U : Velocidad media del fluido (m/s)

Re : Número de Reynolds (adim)

D : Diámetro de la tubería (cm)

μ : Viscosidad del agua (Pa.s)

$$Re = \frac{5,23 \frac{m}{s} \times 1050 \frac{Kg}{m^3} \times 1,84 cm \times 0,01}{8,9354 \times 10^{-4} Pa.s} = 112937,03$$

34. Factor de Fricción de Darcy. [2]

$$\frac{1}{\sqrt{fd}} = -2 \log_x \frac{\varepsilon / D}{3,71} + \frac{2,51}{Re_x \sqrt{fd}} \quad (36)$$

Donde:

fd : Factor de fricción de Darcy (adim)

ε : Aspereza relativa [5] (mm)

$$\frac{1}{\sqrt{fd}} = -2 \log_x \left(\frac{0,04572 \text{ mm}}{18,4 \text{ mm}} \right) + \frac{2,51}{112937,03 \times \sqrt{fd}}$$

De la ecuación anterior la única incógnita es el factor de fricción de Darcy, por lo tanto se puede resolver mediante la ayuda del Solver de la calculadora o de una hoja de cálculo. Empleando Microsoft Excel se obtuvo:

$$fd = 0,0248$$

35. Diferencia de Presión Estática Experimental. [2]

$$\Delta P = (\rho_m - \rho) \times g \times H \times 0,01 \quad (37)$$

Donde:

ΔP : Diferencia de presión estática experimental (Pa)

H : Altura manométrica (m)

$$\Delta P = (13531,16 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} - 1050 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}) \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 13 \text{ cmHg} \times 0,01 = 15936,35 \text{ Pa}$$

36. Pérdidas por Fricción experimental. [2]

$$H_f = \frac{\Delta P}{\rho \times g} \quad (38)$$

Donde:

H_f : Pérdidas por fricción experimentales (m)

$$H_f = \frac{15936,35 \text{ Pa}}{1050 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 1,547 \text{ m}$$

37. Pérdidas por Fricción Teórica. [2]

$$H_{FT} = \left(\frac{L}{D} \right) \times fd \times \left(\frac{U^2}{2 \times g} \right) \quad (39)$$

Nota: Para determinar las pérdidas en los casos con accesorios, se emplea $(L/D)_{EQUI}$ de cada accesorio.

Donde:

H_{FT} : Pérdidas de Fricción Teóricas.

L: Longitud de la tubería (m)

(L/D): Longitud equivalente en diámetros de tubería (adim)

$$H_{FT} = \left(\frac{800mm}{18,4mm} \right)_{equivalente} \times 0,0248 \times \left(\frac{\left(5,23 \frac{m}{s} \right)^2}{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) = 1,500m$$

38. Diferencia de Presión Estática Teórica. [2]

$$\Delta P_T = H_{FT} \times \rho \times g \quad (40)$$

Donde:

ΔP_T : Diferencia de presión estática

$$\Delta P_T = 1,500m \times 1050 \frac{Kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2} = 15452,71 Pa$$

39. Porcentaje de Desviación de la diferencia de presión teórica y experimental para la contracción gradual. [3]

$$\%Desv.\Delta P = \frac{(\Delta P_T - \Delta P) \times 100}{\Delta P_T} \quad (41)$$

Donde:

$\%Desv.\Delta P$: Porcentaje de desviación de la diferencia de presión (%)

$$\%Desv. = \frac{(|15452,71 Pa - 15936,35 Pa|) \times 100}{15452,71 Pa} = 3,13\%$$

40. Porcentaje de Desviación entre pérdidas por fricción teórica y experimental para la contracción gradual. [3]

$$\%Desv.H_F = \frac{(|H_{FT} - H_F|) \times 100}{H_{FT}} \quad (42)$$

Donde:

$\%Desv.H_F$: Porcentaje de desviación de las pérdidas por fricción (%)

$$\%Desv.H_F = \frac{(|1,500m - 1,547m|) \times 100}{1,500m} = 3,13\%$$

41. Coeficientes de pérdidas para codos de 90° rectos. ^[3]

$$K_{Codos} = \frac{(H_f \times 2 \times g)}{U^2} \quad (43)$$

Donde:

K_{Codos} : Coeficiente de pérdida para codos de 90° rectos.

$$K_{Codos} = \frac{\left(0.988 \text{ m} \times 2 \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)}{\left(1.991 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \times 4} = 1,2218$$

EXPERIENCIA DE RÉGIMEN DE FLUIDO

42. Tiempo promedio para el llenado. ^[2]

$$t = \frac{t1 + t2 + t3}{3} \quad (44)$$

Donde:

t: Tiempo promedio para llenar el cilindro (s)

ti: Tiempo de llenado i (s)

$$t = \frac{27 + 28 + 28}{3} = 27,66 \text{ s}$$

43. Caudal. ^[2]

$$Q = \frac{V}{t} \quad (45)$$

Donde:

Q: Caudal (m^3/s)

$$Q = \frac{500 \text{ mL}}{27,66 \text{ s} \times 1000 \times 1000} = 1,81 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

44. Número de Reynolds. [2]

$$Re = \frac{4 \times \rho \times Q}{\mu \times \pi \times D} \quad (46)$$

Donde:

Re: Número de Reynolds (adim)

D: Diámetro interno de la tubería de borosilicato (m)

$$Re = \frac{4 \times 1050 \frac{Kg}{m^3} \times 1,81 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}}{8,9354 \times 10^{-4} Pa \cdot s \times \pi \times (32 / 1000) m} = 845$$

Se puede apreciar que el número de Reynolds obtenido está entre el rango que se considera flujo laminar en [6], pero de acuerdo a lo observado en la experiencia de forma visual, el agua presentaba un comportamiento aleatorio con turbulencia, por lo que no concuerda lo que indica el número de Reynolds calculado con lo observado en el laboratorio.

Esto también sucedió para un caudal mayor como se puede observar en la tabla N° 20 de la sección apéndice-resultados intermedios.

Estas discrepancias, se debe a posibles fluctuaciones del sistema, la cual afectó el régimen de flujo observado y calculado. Además, se conoce de la bibliografía que el régimen laminar se simula bien en tubos capilares.

APÉNDICE
RESULTADOS INTERMEDIOS

Tabla N° 10. Resultados intermedios para la expansión y contracción gradual

Flujo Volumétrico, Q (m ₃ /h)	Ángulo de Expansión, θ (°)	Velocidad en el pto. 1, U ₁ (m/s)	Velocidad en el pto. 2, U ₂ (m/s)
5	13,58	5,223	1,876
4		4,179	1,501
3		3,134	1,126
2		2,089	0,751
1		1,045	0,375

Tabla N° 11. Resultados intermedios obtenidos para tubería de 23,7 mm diámetro

Flujo Volumétrico, Q (m ₃ /h)	Velocidad de flujo, U (m/s)	Reynolds, Re (adim)	Factor de Fricción de Darcy, fd (adim)
5	3,148	87681,071	0,023
4	2,519	70144,857	0,023
3	1,889	52608,643	0,023
2	1,259	35072,428	0,023
1	0,630	17536,214	0,023

Tabla N° 12. Resultados intermedios obtenidos para tubería de 18,4 mm diámetro

Flujo Volumétrico, Q (m ₃ /h)	Velocidad de flujo, U (m/s)	Reynolds, Re (adim)	Factor de Fricción de Darcy, fd (adim)
5	5,223	112937,031	0,025
4	4,179	90349,625	0,025
3	3,134	67762,219	0,025
2	2,089	45174,813	0,025
1	1,045	22587,406	0,025

Tabla N° 13. Resultados intermedios obtenidos codos 90° Rectos

Flujo Volumétrico, Q (m ₃ /h)	Velocidad de flujo, U (m/s)	Reynolds, Re (adim)	Factor de Fricción de Darcy, fd (adim)
5	1,991	69732,932	0,0218
4	1,593	55786,346	0,0218
3	1,195	41839,759	0,0218
2	0,797	27893,173	0,0218
1	0,398	13946,586	0,0218

Tabla N° 14. Resultados intermedios obtenidos codos 90° Normales

Flujo Volumétrico, Q (m ₃ /h)	Velocidad de flujo, U (m/s)	Reynolds, Re (adim)	Factor de Fricción de Darcy, fd (adim)
5	1,991	69732,932	0,022
4	1,593	55786,346	0,022
3	1,195	41839,759	0,022
2	0,797	27893,173	0,022
1	0,398	13946,586	0,022

Tabla N° 19. Resultados de la experiencia de Régimen de Flujo 1° experiencia.

Volumen de Cilindro, V (mL)	Tiempo de llenado, t (s)	Caudal, Q (m ³ /s)	Re (adim)
500	27	1,80723.10 ⁻⁵	844,98
	28		
	28		

Tabla N° 20. Resultados de la experiencia de Régimen de Flujo 2° experiencia.

Volumen de Cilindro, V (mL)	Tiempo de llenado, t (s)	Caudal, Q (m ³ /s)	Re (adim)
500	18	2,77778.10 ⁻⁵	1298,77
	18		
	18		