

# Determinación Experimental de la Rugosidad Absoluta $k_s$ y Coeficientes de Pérdidas menores $k_m$ en Tuberías de Agua Potable de PVC Biorientado Dúctil (Biaxial®) de 6"

**Amador, Fabio**

Ingeniero Civil

Investigador Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: fe.amador38@uniandes.edu.co.

**Rodríguez, Daniel**

Ingeniero Civil

Investigador Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: d.rodriguez49@egresados.uniandes.edu.co

XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología

Sociedad Colombiana de Ingenieros

Bogotá D.C. 22, 23, y 24 de mayo de 2008

**Resumen.** Esta investigación consistió en la construcción de un montaje físico para realizar pruebas que permitieran determinar la rugosidad absoluta ( $k_s$ ) del material PVC Biorientado Dúctil (Biaxial®) de 4 y 6 pulgadas de diámetro nominal además de las pérdidas de energía que se presentan en los diferentes accesorios utilizados en el montaje, tales como uniones y codos, con el fin de encontrar los coeficientes de pérdidas menores ( $k_m$ ) asociados con cada uno de éstos. Se determinó el  $k_m$  para uniones campana-espigo y codos de 90°. Los resultados arrojados por las uniones se compararon con la fuente teórica del  $k_m$  encontrándose que los promedios de los valores medidos siempre se mantuvieron por debajo de los teóricos. En el caso de los codos de 90° se obtuvo que los valores se asemejan mucho a los valores teóricos.

**Palabras claves:** Coeficientes pérdidas, PVC, Hidráulica de Tuberías.

## **1. Introducción**

Cuando se diseña un sistema de distribución de agua potable, se deben tener en cuenta varios detalles como materiales, rugosidades, diámetros, cabeza de energía disponible, caudal de abastecimiento, entre otros aspectos técnicos. Uno de los principales aspectos técnicos que se debe tener en cuenta es la escogencia de los materiales de conducción y dentro de este ítem, las pérdidas de energía que cada material genera. Estas pérdidas pueden ser de dos tipos: pérdidas por fricción entre el fluido y el material de la tubería, y pérdidas menores o localizadas que ocurren en cada uno de los accesorios de la red (codos, uniones, expansiones, contracciones entre otras).

El objetivo que se busca en el diseño de una red de distribución de agua potable es tratar de suplir, al menor costo posible, la población con las condiciones mínimas legales requeridas. Dentro de estas condiciones legales requeridas, se establecen unas pérdidas máximas en distintos puntos de la red ya sea en la aducción, en la planta de tratamiento y/o en la distribución a la población.

Para generar el mínimo nivel de pérdidas, los fabricantes desarrollan continuamente materiales tratando de mejorarlos en aspectos como durabilidad, resistencia a la fatiga, a la tensión, a la corrosión, al impacto y a la transmisión de fracturas; y para cumplir con requerimientos hidráulicos buscando proporcionar las paredes internas más lisas. Esto con el fin de aumentar su capacidad hidráulica y dificultar la formación de biopelícula.

Concentrándose en los materiales plásticos, la empresa PAVCO S.A. presentó el material PVC Biorientado Dúctil (Biaxial®), cuya diferencia con el PVC original es la orientación del polímero creando una estructura laminada en capas, incrementando su capacidad estructural. El desarrollo de estos nuevos materiales genera la necesidad de conocer de manera confiable el valor de los coeficientes  $k_m$  y  $k_s$ , por esta razón se realizaron pruebas hidráulicas a tuberías y accesorios del material en un diámetro de 6" para determinar sus características hidráulicas.

## **2. Descripción del Modelo**

Las pruebas para la determinación de la rugosidad absoluta del PVC Biorientado Dúctil Biaxial® y los coeficientes de pérdidas menores en los accesorios, se realizaron en un montaje construido en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes, como parte de la Cátedra PAVCO.

El montaje fue construido en tuberías de PVC Biorientado Dúctil Biaxial® de 6 pulgadas RDE 21 (200 psi), siguiendo con la configuración que se muestra en la Figura 1. El circuito se encuentra alimentado por un tanque de cabeza constante de 3.5 m de altura, y es regulado por una válvula de compuerta metálica.

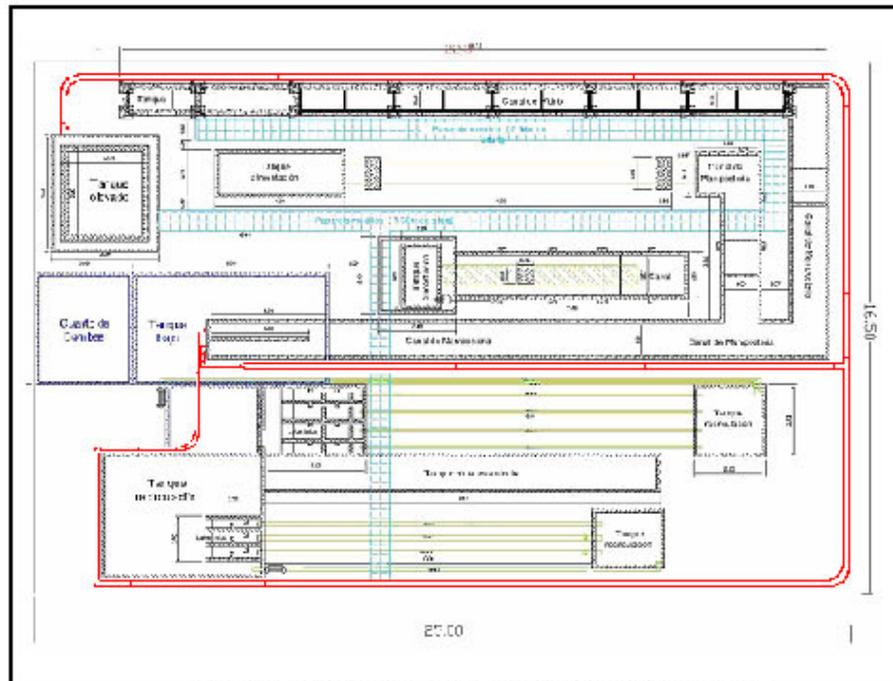


Figura 1. Esquema del Montaje (no está a escala).

El montaje está compuesto principalmente por tramos de tubería rectos de 5.4 metros en promedio y por dos tipos de accesorios que son uniones campana-espigo y codos de 90° de radio largo, correspondientes a un diámetro de 6 pulgadas (ver figura 2).



Figura 2. Esquema del Montaje (no está a escala).

En el centro del montaje se encuentra la bifurcación del caudal, a través de una tee de hierro dúctil. La porción de caudal que sigue en sentido recto y/o que continúa en sentido perpendicular se mide finalmente en los vertederos triangulares colocados al final del montaje. El caudal que entra al montaje es regulado por una válvula de compuerta a la salida del tanque elevado; en cada prueba se variaba la abertura de la válvula para obtener distintos caudales de entrada.

Cada punto de la red fue marcado como un tramo para su posterior identificación ya sea al determinar el coeficiente de rugosidad absoluta ( $k_s$ ) o el coeficiente de pérdidas menores ( $k_m$ ).

### **3. Descripción de las Pruebas**

Para evaluar la rugosidad absoluta de las tuberías de PVC Biorientado Dúctil Biaxial ® y determinar los coeficientes de pérdidas menores de los accesorios, se realizaron pruebas durante aproximadamente dos meses, en el período comprendido entre el 17 de Agosto y 6 de Octubre de 2006.

En cada una de las pruebas se analizaron en promedio 10 caudales diferentes que cubrieran el rango posible de caudales de manera uniforme. Los caudales que fue posible analizar, oscilaban entre 2 y 20 L/s, que corresponde a números de Reynolds para esta red entre  $Re = 20.000$  y  $Re = 170.000$ .

La medición de caudales se realizó con vertederos triangulares previamente calibrados, y las presiones se midieron mediante la instalación de piezómetros a la entrada y a la(s) salida(s) de todos los accesorios, con el fin de determinar las pérdidas de energía en dichos accesorios y en los tramos de tubería que se encuentran entre ellos.

Cada una de las pruebas de laboratorio se llevó a cabo mediante la siguiente metodología:

1. Inicialmente se pone en marcha el modelo con el caudal máximo, desplazando el aire que se encuentra atrapado tanto en la red, como en las mangueras de los piezómetros. Para esto, se desconectan las mangueras del tablero de medición y se dejan purgando durante algunos minutos hasta que la totalidad del aire haya salido. Luego se conectan nuevamente.
2. Teniendo ya la red presurizada (sin aire), se realiza la medición de caudales en los dos vertederos mediante la lectura de las agujas limnimétricas.
3. Luego se lee en los tableros, la altura de cada uno de los piezómetros con la mayor exactitud posible.
4. Antes de cambiar el caudal, se lee nuevamente el nivel de la aguja limnimétrica para comprobar que la red estuvo en estado estable durante la medición.
5. Se cierra una cierta cantidad de vueltas la válvula de ingreso al sistema de tal forma que el caudal que pasa por la red disminuya, y se repiten los pasos descritos.
6. Este procedimiento se repite como se dijo anteriormente, para 10 caudales diferentes, para cada día de ensayos.

### **4. Resultados experimentales**

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los accesorios probados en la red BIAXIAL de 6 pulgadas; estos presentan los resultados de 26 pruebas cada una de 10 caudales, es decir se presentan los resultados para 260 caudales ensayados:

#### 4.1. Uniones Campana – Espigo

En el montaje de biaxial de 6" sólo se utilizaron uniones tipo campana-espigo, las cuales unían los principales tramos rectos que componían la red. Los resultados que se presentan a continuación corresponden a los  $k_m$  medidos para las uniones de los tramo 2 y 4, presentados en diagramas de  $k_m$  contra número de Reynolds (Ver la Figura 3).

Estos accesorios son indispensables en los sistemas de acueducto, debido a su ágil sistema de unión entre dos tuberías consecutivas de PVC.

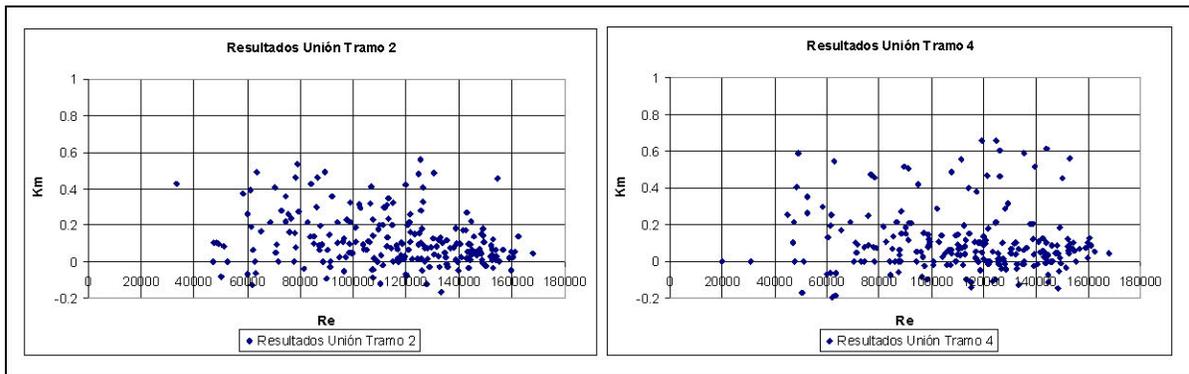


Figura 3. Coeficiente de pérdidas menores contra número de Reynolds - Unión Tramo 2.

#### 4.2. Codos Horizontales de 90° de Radio Largo

En el montaje se cuenta con dos codos horizontales de 90°, los cuales están ubicados prácticamente a cada extremo del montaje, uno antes de la bifurcación del caudal en el tramo 8 y otro luego de la bifurcación en el tramo 15. Los datos medidos para los codos de los tramos 8 y 15 se presentan en la Figura 4.

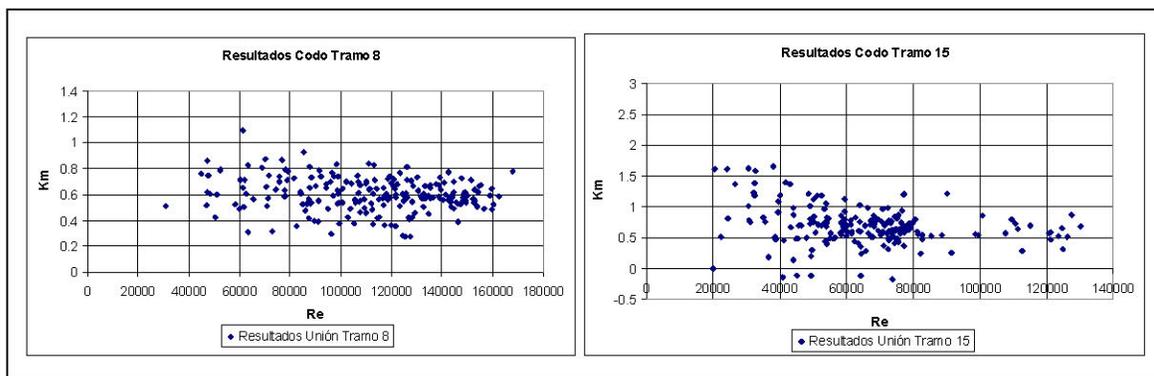


Figura 4. Coeficiente de pérdidas menores contra número de Reynolds – Codo Tramo 8.

### 5. Análisis de Resultados

Para determinar un valor o rango de valores dentro del cual se encuentre el coeficiente de pérdidas menores de los diferentes accesorios, se realizó un análisis estadístico mediante intervalos de confianza. En

la Tabla 1 se muestra el resumen de los resultados encontrados para los coeficientes de pérdidas menores en lo diferentes accesorios.

Tabla 1. Resumen de los resultados encontrados para los  $k_m$  en los diferentes accesorios.

Accesorio	Valor Mínimo	Valor Máximo	Promedio	Promedio Depurado	Promedio Ponderado
Unión Tramo 2	-0.167	0.560	0.129	0.132	0.178
Unión Tramo 4	-0.207	0.659	0.113	0.109	
Unión Tramo 6	-0.194	0.506	0.02	0.022	
Unión Tramo 10	-0.046	0.569	0.165	0.276	
Unión Tramo 17	-0.207	0.979	0.279	0.277	
Unión Tramo 19	-0.161	1.002	0.283	0.288	
Unión Tramo 21	-0.469	1.012	0.159	0.153	
Unión Tramo 24	-0.843	1.058	0.054	0.076	
Unión Tramo 26	-0.837	1.15	0.107	0.105	
Unión Tramo 28	-0.619	1.508	0.234	0.227	
Codo Tramo 8	0.273	1.095	0.607	0.521	0.550
Codo Tramo 15	-0.177	1.652	0.690	0.696	

La primera columna corresponde a la descripción de cada accesorio y su tramo correspondiente. La segunda columna corresponde al valor mínimo encontrado en la lista total de pruebas en los datos sin depurar, y la tercera columna corresponde al valor máximo. En la cuarta columna se tiene el promedio de los dos valores anteriores (Columnas 2 y 3). La quinta columna corresponde al promedio depurado para cada accesorio y la sexta al promedio ponderado depurado con las frecuencias de cada accesorio de la misma clase de cada una de las columnas anteriormente mencionadas.

Como se observa en la Tabla 1, existen valores mínimos negativos los cuales se pueden explicar a partir de su relación con números de Reynolds más bajos; ya que para estos las pérdidas no eran fácilmente detectables por los medidores piezométricos colocados y, por consiguiente, las columnas de agua leídas posterior a los accesorios eran superiores a las alturas anteriores lo que generaba unas “pérdidas negativas” que no tienen ninguna lógica.

La depuración consistió en determinar para cada accesorio la media y la desviación típica de los valores medidos, para luego determinar el intervalo de 95% de confianza suponiendo una distribución normal. El intervalo de confianza de 5% de incertidumbre está definido por la siguiente ecuación:

$$\bar{x} \pm 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad [1]$$

Donde:  $\bar{x}$  = es la media de los datos medidos.

$\sigma$  = es la desviación de los datos.

$N$  = es el número de datos medidos.

Luego de determinado tal intervalo de confianza, se procedió a separar los resultados filtrados en intervalos de frecuencia iguales para los datos de todos los accesorios de la misma clase y determinar una

media general. Anteriormente también se había determinado una media particular para cada accesorio independiente con los datos ya depurados (ver la Tabla 1).

De la Tabla 1 se puede concluir lo siguiente:

La aparición de pérdidas negativas no corresponde a la realidad, esta situación puede corresponder a errores de apreciación en la medición de los datos, ya que al no tener un tanque con cabeza totalmente constante la variación de niveles y las diferencias tan bajas entre ellos pudieron conllevar a leer diferencias negativas. Además, la falta de sensibilidad en la lectura piezométrica para números de Reynolds relativamente bajos.

El valor teórico de las uniones con referencia a Saldarriaga (1) es de 0.3, aunque esta fuente no especifica el tipo de unión a que se refiere, se supone como un valor general. El caso actual, los valores promedio de  $k_m$  para las uniones varía de 0.02 a 0.283 mostrando un ancho de banda muy grande pero siempre por debajo del valor teórico. Lo anterior puede significar que las uniones campana-espigo son el tipo de uniones que ofrece menor resistencia al flujo representado en sus valores de coeficiente de pérdida y se denota físicamente por la adaptabilidad anatómica entre un tubo y otro.

Al depurar los datos y realizar el promedio individual de cada accesorio los promedios se mantienen muy parecidos al promedio sin depurar, lo que demuestra que la cantidad de datos medidos equilibró adecuadamente la incertidumbre arrojando medias que definitivamente representaban los coeficientes medidos para ese tipo de accesorios dentro del montaje.

El promedio de todos los accesorios hallado ponderadamente, a partir de intervalos de frecuencia de todos los datos depurados para las uniones campana espigo fue de 0.178 lo que permite seguir concluyendo que tales uniones oponen poca resistencia al flujo con respecto a otros tipos de uniones.

Con respecto a los codos radio largo de  $90^\circ$ , el promedio de los valores medidos se encuentra entre 0.6 y 0.7 y luego de la depuración se mantiene cercano a esos valores, el promedio general de 0.55 para este tipo de accesorios se asemeja mucho a los valores teóricos de referencia con Street (2) y Saldarriaga (1) entre 0.5 y 0.6.

## **6. Determinación de la Rugosidad Absoluta**

Para cada uno de los casos, se procede a graficar el factor de fricción de cada prueba con respecto al número de Reynolds, para los tramos de tubería que se utilizaron para el análisis.

En un diagrama de Moody (Figura 5), cada una de las líneas que relacionan el factor de fricción  $f$  con el número de Reynolds corresponde a un  $k_s/d$  particular. De esta forma, si los datos experimentales se ubican cerca a una de las líneas mencionadas, la rugosidad absoluta del material será el  $k_s$  correspondiente. A medida que el  $k_s$  se va haciendo más pequeño, las líneas del diagrama de Moody se van acercando hasta llegar a un punto en el cual, independientemente del valor de rugosidad tomado, la línea pasará exactamente sobre el mismo sitio. Moody determinó que este valor asintótico del diagrama corresponde a las tuberías lisas (Línea verde Figura 5).

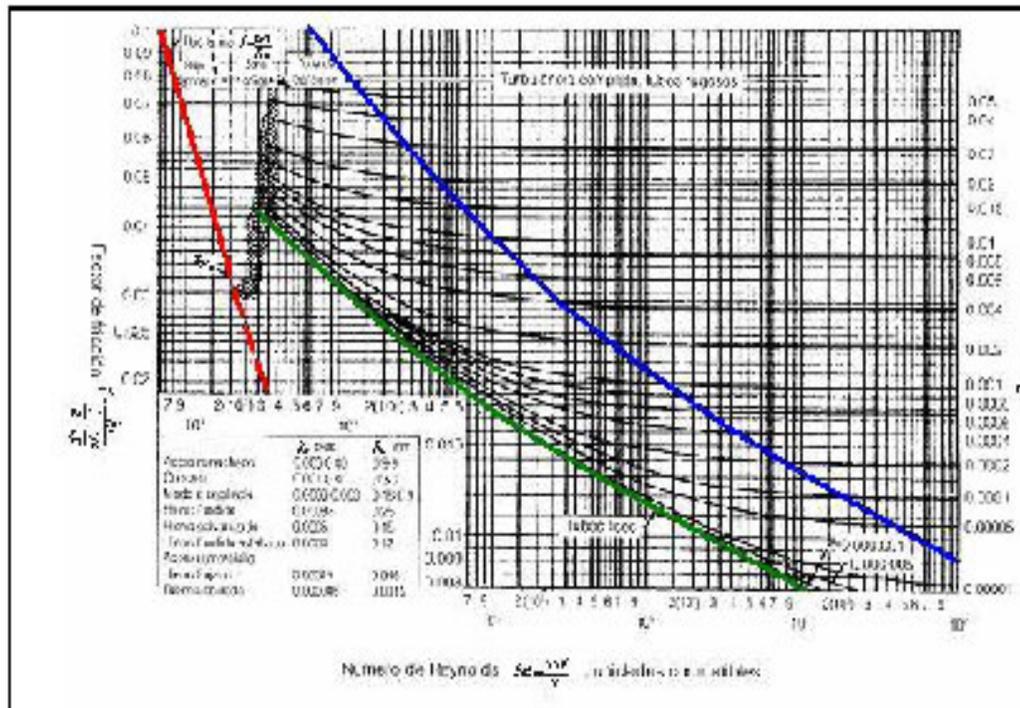


Figura 5. Diagrama de Moody.

A continuación se presentan las gráficas experimentales junto con el diagrama de Moody para los tramos escogidos:

En el tramo 1, representado por la Figura 6, se observan mediciones en régimen turbulento con números de Reynolds alrededor de 20.000 y 170.000, dentro de los cuales el valor de  $k/d$  no es plenamente identificable, se pueden determinar algunas concentraciones de las rugosidades relativas entre 0.005 y 0.0002 pero no es una condición totalmente clasificable; al mismo tiempo el factor de fricción se mueve entre 0.005 y 0.06 lo que tampoco lo convierte en un parámetro plenamente determinable.

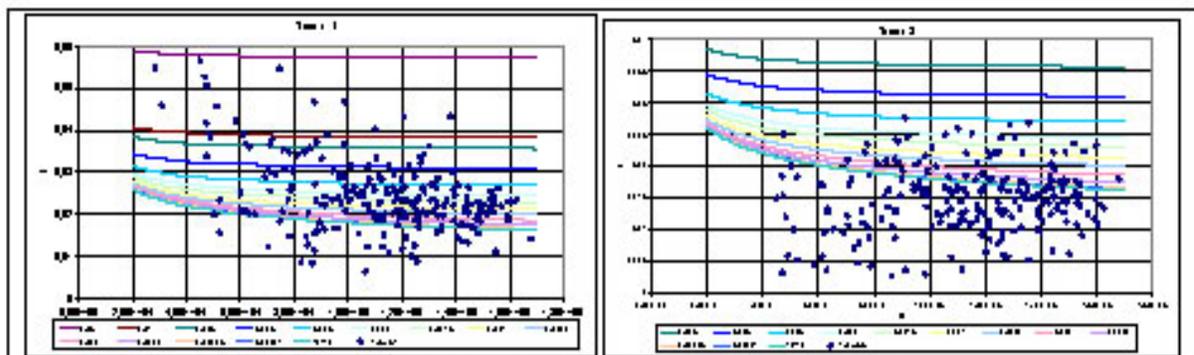


Figura 6. Resultados Experimentales,  $k/d$  Tramo 1.

## 7. Análisis de resultados

Graficando número de Reynolds contra el espesor de la subcapa laminar viscosa ( $0.305\delta'$ ), se observa como a medida que el número Reynolds aumenta, el espesor de la subcapa laminar viscosa disminuye, tal como se puede ver en la Figura 6.

Si se adopta la teoría del flujo transicional, en la cual para valores superiores a  $0.305\delta'$  el factor de fricción comienza a depender de la rugosidad relativa adicionalmente del número de Reynolds, entonces es posible definir un límite superior de la rugosidad relativa que al mismo tiempo relacione factor de fricción para el rango de Reynolds medidos.

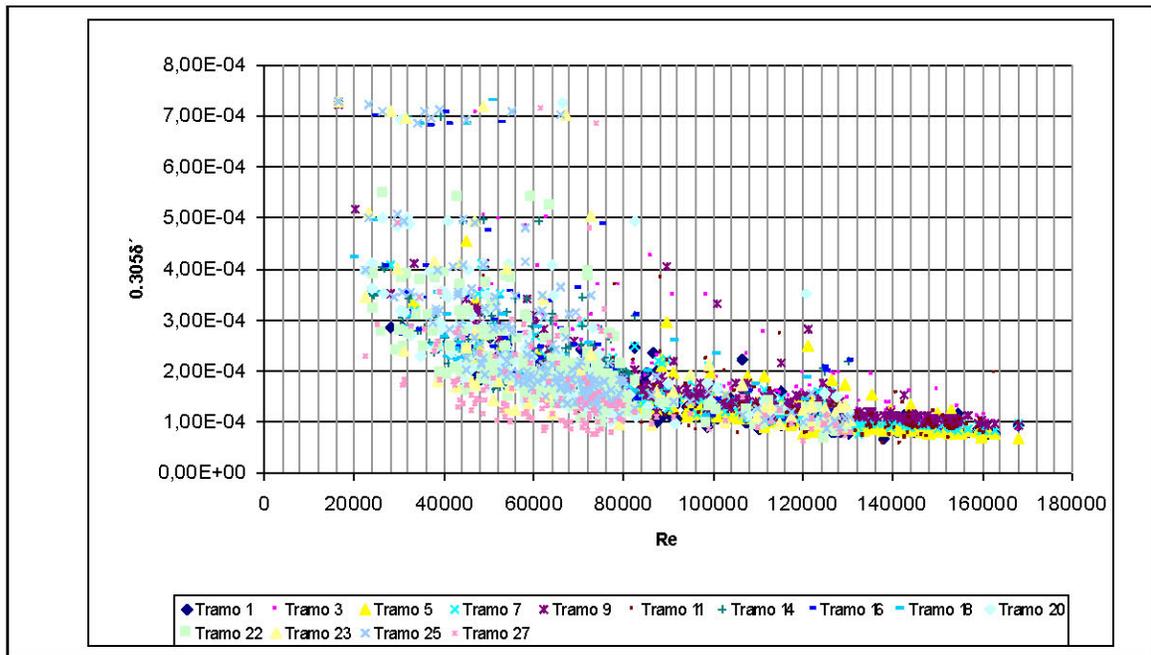


Figura 6. Comportamiento del límite de los flujos en los datos experimentales.

De acuerdo con la tendencia de los datos, es de esperarse que se necesite un número de Reynolds muy alto para que la subcapa laminar viscosa sea pequeña y así poder evaluar el coeficiente de rugosidad absoluta de las tuberías, ya que la pendiente de las curvas se hace muy pequeña a medida que el número de Reynolds aumenta.

## 8. Conclusiones

Los resultados arrojados por las uniones se compararon con la fuente teórica del  $k_m$  para este tipo de accesorio la cual es Saldarriaga (1) con un valor de 0.3. Los promedios de los valores medidos siempre se mantuvieron por debajo de los teóricos, siendo consolidados en el promedio general calculado para este tipo de accesorio igual a 0.178.

El segundo tipo de accesorios para el cual se analizaron las pérdidas menores fué los codos de  $90^\circ$  radio-largo; tales accesorios se compararon con registros teóricos de la literatura relacionados a Saldarriaga (1) y Street (2) iguales a 0.6 y 0.5 respectivamente. Los resultados obtenidos se asemejan mucho a los valores

teóricos. La media general para este tipo de accesorio resultado de una depuración y análisis de frecuencia arrojó un valor de 0.55.

Al dibujar para cada uno de los tramos analizados las respectivas parejas de número de Reynolds contra factor de fricción, no se encontró una correlación apreciable entre los dos parámetros anteriores y la rugosidad relativa dentro del rango analizado.

Se demostró más adelante que la poca correlación encontrada se debió a que siempre las condiciones de flujo durante las pruebas correspondían a flujo turbulento hidráulicamente liso y en estos casos el factor de fricción depende únicamente del número de Reynolds.

El nivel de caudal para que las condiciones de flujo abandonen el límite de hidráulicamente liso corresponde a un valor de 1453 L/s, lo cual es virtualmente imposible.

Relacionando los valores obtenidos de subcapa laminar viscosa con número de Reynolds en una gráfica se observa que existe una relación inversamente proporcional, y que se necesitaría un número de Reynolds realmente grande con velocidades de un orden de 72.3 m/s.

El límite superior de la rugosidad del PVC Biaxial biorientado estimado a través de el menor valor obtenido de  $0.305 \delta'$  corresponde a un valor de  $5.63 \times 10^{-5}$  m.

Los valores promedio del factor de fricción para todos los datos medidos con un intervalo de confianza de 95% corresponde a un valor de  $0.022 \pm 0.0007$ . El anterior valor sólo ilustra un análisis de datos, pero no se debe considerar como absoluto ya que tal valor depende las condiciones de flujo en la tubería.

## 9. Bibliografía

Saldarriaga, Juan G. (2000) "Hidráulica de Tuberías". Mc Graw Hill.

Street R, Watters G, Vennard J. (1996) "Elementary Fluid Mechanics". John Wiley & Sons. Séptima Edición. Página 366.

Jara J, Valenzuela A, Crisóstomo C. "Hidráulica de Tuberías" <http://www.chileriego.cl/docs/015-08.doc>

Giles, Ronald (1990). "Mecánica de los fluidos e hidráulica". Mc Graw Hill.

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (2006). "Determinación Experimental de la Rugosidad Absoluta  $k_s$  y el Coeficiente de Pérdidas menores  $k_m$  en Tuberías de Agua Potable de PVC Biorientado Dúctil (Biaxial) de 4 pulgadas", Universidad de los Andes.