

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones en Acueductos y
Alcantarillados
CIACUA



PAVCO S.A.
Una empresa AMANCO

Universidad
de los Andes



CÁTEDRA PAVCO

**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 6''**

Informe Final

Bogotá, Marzo de 2007

Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.3	CONTENIDO DEL INFORME	2
1.4	EQUIPO DE TRABAJO	3
1.4.1	PAVCO S.A.	3
1.4.2	Universidad de los Andes	4
2	DESCRIPCIÓN DEL MODELO	5
3	DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.....	11
3.1	METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE CAUDALES	11
3.2	METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE PRESIONES	12
3.3	CALIBRACIÓN DE LOS VERTEDEROS.....	13
3.4	METODOLOGÍA GENERAL	14
4	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES	15
4.1	METODOLOGÍA DE CÁLCULO	15
4.2	VALORES TEÓRICOS DE K_M PARA LOS ACCESORIOS ANALIZADOS.....	17
4.3	RESULTADOS EXPERIMENTALES	18
4.3.1	Uniones Campana - Espigo.....	18
4.3.2	Codos Horizontales de 90° de Radio Largo	22
4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	23
5	DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD ABSOLUTA	25
5.1	METODOLOGÍA DE CÁLCULO	25
5.2	RESULTADOS EXPERIMENTALES	26
5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
5.3.1	Significado del Diagrama de Moody.....	33
5.3.2	Flujo Hidráulicamente Liso.....	35
5.3.3	Límites del Coeficiente de Rugosidad Absoluta.....	37
6	CONCLUSIONES	40
6.1	MONTAJE FÍSICO.....	40
6.2	DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS MENORES	40
6.3	DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR FRICCIÓN	41
7	RECOMENDACIONES.....	42
8	REFERENCIAS.....	43

Índice de Figuras

FIGURA 2-1 ESQUEMA DEL MONTAJE (NO ESTA A ESCALA).....	5
FIGURA 2-2 TANQUE DE ALIMENTACIÓN Y VÁLVULA REGULADORA DEL CAUDAL.....	6
FIGURA 2-3 FOTOS DE ALGUNAS TUBERÍAS Y ACCESORIOS ANALIZADOS.....	9
FIGURA 2-4 TABLEROS DE MEDICIÓN DE PRESIONES.....	10
FIGURA 2-5 VERTEDEROS PARA LA MEDICIÓN DE CAUDAL.....	10
FIGURA 3-1 ESQUEMA DE LA MEDICIÓN DE LA LÁMINA DE AGUA Y AGUJA LIMNIMÉTRICA UTILIZADA.....	12
FIGURA 3-2 TABLERO DE PIEZÓMETROS.....	13
FIGURA 4-1 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES CONTRA NÚMERO DE REYNOLDS - UNIÓN TRAMO 2.....	18
FIGURA 4-2 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES CONTRA NÚMERO DE REYNOLDS - UNIÓN TRAMO 4.....	19
FIGURA 4-3 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES CONTRA NÚMERO DE REYNOLDS - UNIÓN TRAMO 6.....	19
FIGURA 4-4 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES CONTRA NÚMERO DE REYNOLDS - UNIÓN TRAMO 10.....	19
FIGURA 4-5 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES CONTRA NÚMERO DE REYNOLDS - UNIÓN TRAMO 17.....	20
FIGURA 4-6 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES CONTRA NÚMERO DE REYNOLDS - UNIÓN TRAMO 19.....	20
FIGURA 4-7 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES CONTRA NÚMERO DE REYNOLDS - UNIÓN TRAMO 21.....	20
FIGURA 4-8 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES CONTRA NÚMERO DE REYNOLDS - UNIÓN TRAMO 24.....	21
FIGURA 4-9 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES CONTRA NÚMERO DE REYNOLDS - UNIÓN TRAMO 26.....	21
FIGURA 4-10 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES CONTRA NÚMERO DE REYNOLDS - UNIÓN TRAMO 28.....	21
FIGURA 4-11 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES CONTRA NÚMERO DE REYNOLDS - CODO TRAMO 8.....	22
FIGURA 4-12 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES CONTRA NÚMERO DE REYNOLDS - CODO TRAMO 15.....	22
FIGURA 5-1 DIAGRAMA DE MOODY.....	27
FIGURA 5-2 RESULTADOS EXPERIMENTALES, Ks/D TRAMO 1.....	27
FIGURA 5-3 RESULTADOS EXPERIMENTALES, Ks/D TRAMO 3.....	28
FIGURA 5-4 RESULTADOS EXPERIMENTALES, Ks/D TRAMO 5.....	28
FIGURA 5-5 RESULTADOS EXPERIMENTALES, Ks/D TRAMO 7.....	29
FIGURA 5-6 RESULTADOS EXPERIMENTALES, Ks/D TRAMO 9.....	29
FIGURA 5-7 RESULTADOS EXPERIMENTALES, Ks/D TRAMO 11.....	30
FIGURA 5-8 RESULTADOS EXPERIMENTALES, Ks/D TRAMO 14.....	31
FIGURA 5-9 RESULTADOS EXPERIMENTALES, Ks/D TRAMO 16.....	31
FIGURA 5-10 RESULTADOS EXPERIMENTALES, Ks/D TRAMO 18.....	31
FIGURA 5-11 RESULTADOS EXPERIMENTALES, Ks/D TRAMO 20.....	32
FIGURA 5-12 RESULTADOS EXPERIMENTALES, Ks/D TRAMO 22.....	32
FIGURA 5-13 RESULTADOS EXPERIMENTALES, Ks/D TRAMO 23.....	32
FIGURA 5-14 RESULTADOS EXPERIMENTALES, Ks/D TRAMO 25.....	33
FIGURA 5-15 RESULTADOS EXPERIMENTALES, Ks/D TRAMO 27.....	33
FIGURA 5-16 DIAGRAMA DE MOODY.....	34
FIGURA 5-17 RELACIÓN ENTRE LA RUGOSIDAD RELATIVA Y LA SUBCAPA LAMINAR VISCOSA.....	36
FIGURA 5-18 COMPORTAMIENTO DEL LÍMITE DE LOS FLUJOS EN LOS DATOS EXPERIMENTALES.....	38

Índice de Tablas

TABLA 4-1 ACCESORIOS Y TRAMOS DE TUBERÍAS ANALIZADOS EN EL MONTAJE.....	16
TABLA 4-2 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES DE CODO DE 90° Y TEE.....	17
TABLA 4-3 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES DE CODO DE 90° Y TEE.....	17
TABLA 4-4 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES DE CODO RADIO LARGO Y TEE.....	17
TABLA 4-5 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS MENORES DE CODO DE 90° Y TEE.....	17
TABLA 4-6 RESUMEN DE LOS RESULTADOS ENCONTRADOS PARA LOS K_M EN LOS DIFERENTES ACCESORIOS.	23
TABLA 5-1 RESUMEN DE LOS TRAMOS DE TUBERÍAS ANALIZADOS.....	25
TABLA 5-2 LÍMITES DEL FLUJO HIDRÁULICAMENTE LISO PARA LAS PRUEBAS DE TODOS LOS TRAMOS.....	37

1 Introducción

Cuando se diseña un sistema de distribución de agua potable, se deben tener en cuenta variados 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.

1.1 Antecedentes

Como parte de las investigaciones que se realizan en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA – de la Universidad de los Andes a través de la Cátedra PAVCO, se encuentran la determinación de pérdidas menores y la rugosidad absoluta de las tuberías tanto plásticas como de otros materiales.

En este tema se han desarrollado diferentes proyectos de grado a lo largo de los últimos 10 años que han tratado de establecer las pérdidas menores en accesorios como codos, uniones, expansiones y reducciones, tees, entre otros, así como la rugosidad absoluta de materiales como PVC, hierro, polietileno entre otras.

También se han desarrollado investigaciones similares, cuyo objetivo era determinar tanto la rugosidad absoluta (k_s) como el coeficiente de pérdidas menores (k_m) de tuberías plásticas de PVC biorientado dúctil (Biaxial®) de 4 pulgadas, y de 3 pulgadas en PVC y Polietileno.

El resultado principal de estas investigaciones en cuanto a la determinación de la rugosidad absoluta fue que las tuberías plásticas operan bajo condiciones de flujo turbulento hidráulicamente liso y por lo tanto su rugosidad no afecta a las pérdidas de energía. Estas investigaciones se limitaron a determinar un valor límite, por debajo del cual se encuentra el valor de la rugosidad, sin tener herramientas para cuantificarla.

En cuanto a los coeficientes de pérdidas menores encontrados, se puede afirmar que las pruebas de laboratorio y los resultados presentados fueron consistentes con los valores típicos reportados en la literatura, lo que asegura que los resultados son confiables y que los coeficientes encontrados pueden ser utilizados como parámetros de diseño de redes de tuberías en esos materiales y diámetro.

En la presente investigación se pretende corroborar los resultados presentados en las investigaciones realizadas previamente, y extender las afirmaciones y conclusiones para el caso de las tuberías de PVC Biorientado Dúctil (Biaxial®) de 6 pulgadas.

1.2 Objetivos

- Diseñar un montaje de laboratorio en las instalaciones de la Universidad de los Andes, con el objetivo de obtener la información requerida sobre el material y analizar el flujo de agua a presión.
- Determinar la rugosidad absoluta (k_s) del material PVC Biorientado Dúctil (Biaxial®) de 6 pulgadas de diámetro nominal, mediante el montaje diseñado.
- Determinar, 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.
- Analizar los valores encontrados tanto de rugosidad absoluta como de pérdidas menores en los accesorios para el material estudiado, y compararlos con valores teóricos o valores encontrados en la literatura.

1.3 Contenido del Informe

El presente informe contiene los resultados del proyecto “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 6 pulgadas”, realizado por la Universidad de los Andes y PAVCO S.A. En este numeral se describe el contenido particular de cada uno de los capítulos que conforman el informe final de la investigación.

Cada capítulo se dedica a explicar en forma detallada tanto la metodología como el manejo informático y tecnológico que cada uno de los pasos involucra.

- En el Capítulo 1 se realiza una descripción general del contenido del informe, los antecedentes, y los objetivos de la investigación, así como el personal involucrado durante la misma.

- En el Capítulo 2 se realiza una descripción completa del modelo físico construido en las instalaciones de la Universidad de los Andes. Se describe su funcionamiento y se presentan las fotografías que detallan todos aspectos importantes del mismo.
- En el Capítulo 3 se hace la descripción de las pruebas, donde se explica detalladamente el procedimiento seguido para la medición de caudales y presiones. Además, se muestran las ecuaciones de calibración de los vertederos triangulares de cresta delgada y la metodología general seguida para la obtención de datos en cada una de las pruebas realizadas.
- En el Capítulo 4 se muestra la metodología seguida para la determinación de las pérdidas menores generadas por los accesorios probados, donde se exponen las ecuaciones físicamente basadas que se utilizaron para calcular el valor del coeficiente en cada una de las pruebas, los valores teóricos son la literatura y los resultados experimentales con su correspondiente análisis.
- En el Capítulo 5 se muestra la metodología seguida para la determinación de la rugosidad absoluta de los tramos de tubería BIAXIAL de 6 pulgadas probados en el laboratorio, donde se exponen las ecuaciones físicamente basadas utilizadas para los cálculos, los resultados experimentales y su correspondiente análisis.
- En el Capítulo 6 se exponen las conclusiones encontradas durante el desarrollo del proyecto.
- En el Capítulo 7 se exponen las recomendaciones encontradas durante el desarrollo del proyecto.

1.4 Equipo de Trabajo

El equipo de trabajo del proyecto “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 6 pulgadas” estuvo conformado por personal de PAVCO S.A. y un equipo de trabajo de la Universidad de los Andes. Las personas vinculadas al proyecto se mencionan a continuación.

1.4.1 PAVCO S.A.

Director Región Andina Amanco

José María Escovar.

Director Comercial Tubosistemas Amanco

Ernesto Guerrero Molina

Directora Región Andina de Mercadeo Amanco

Diana Patricia Arango.

Gerente Técnico

Enrique Gonzáles.

Gerente de Producto

Inés Elvira Wills.

Asistente de Mercadeo

Zoraida Castro.

1.4.2 Universidad de los Andes

El equipo de trabajo conformado por parte de la Universidad de los Andes estuvo conformado por Ingenieros Civiles, Asistentes Graduados (Ingenieros Estudiantes de Maestría en Ingeniería Civil) y monitores de investigación (estudiantes de pregrado en Ingeniería Civil y en Ingeniería Ambiental).

Director del Proyecto

Ing. Juan G. Saldarriaga.

Investigadores

Ing. Mario Enrique Moreno.

Coordinadora de Operaciones

Mireya Perafán.

Asistentes Graduados

Ing. Daniel Rodríguez.

Ing. Julio Carlos de Oro.

Ing. Fabio Elías Amador.

Ing. Juan Fernando Morales.

Ing. Luís Fernando Castañeda.

Monitores de Investigación

Claudia Díaz.

Ricardo Castiblanco.

Julio Roberto Saavedra.

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 2-1. 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, como se observa en la Figura 2-2.

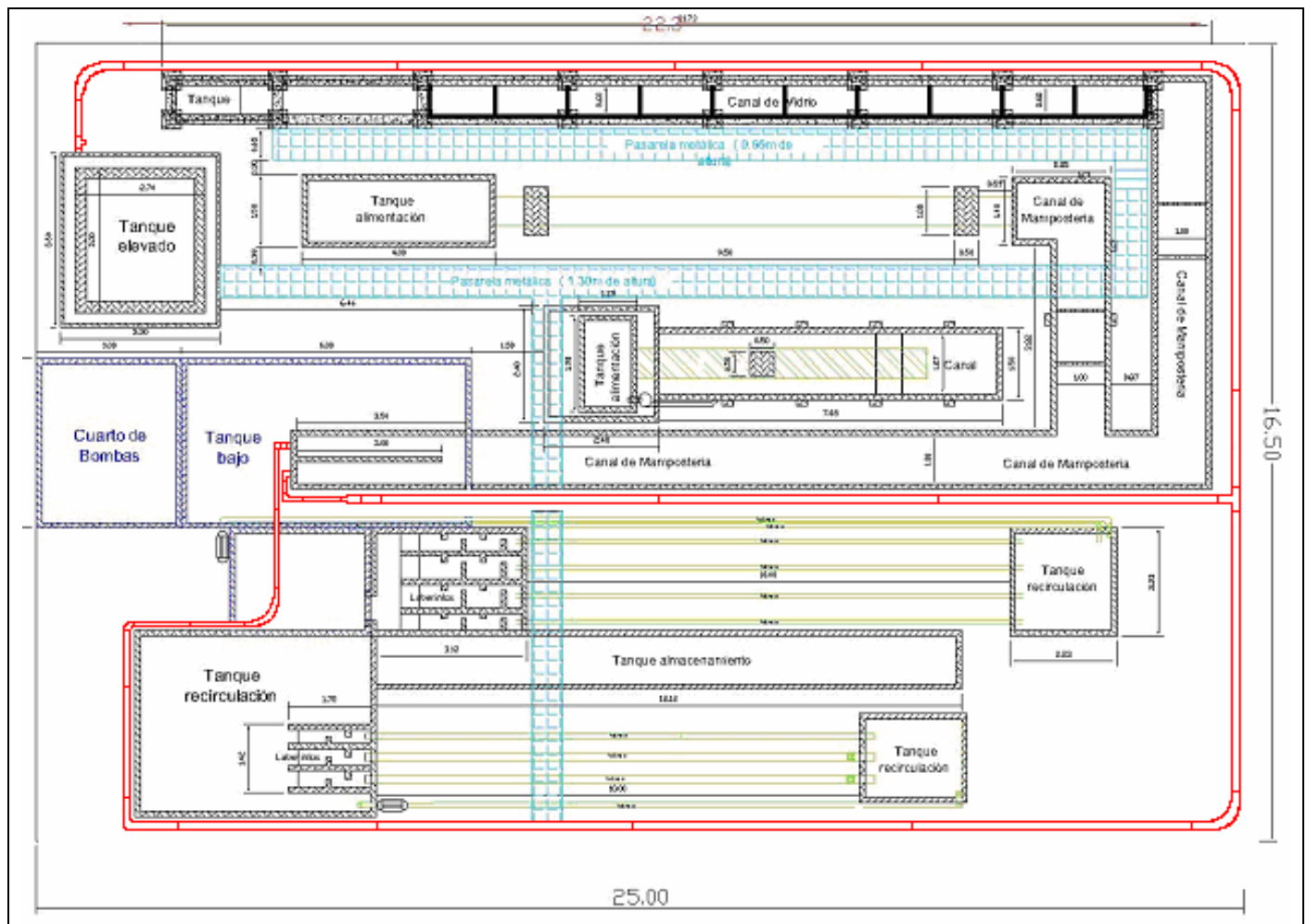


Figura 2-1 Esquema del Montaje (no esta a escala).

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. 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 (Ver Figura 2-2).



Figura 2-2 Tanque de alimentación y válvula reguladora del caudal.

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).

En la Figura 2-3 se muestran fotos de las partes relevantes del montaje, con su respectiva descripción:

a) Regulación de entrada de caudal al sistema.



b) Válvulas de entrada a vertederos finales.



c) Unión típica campana espigo dentro del montaje.



d) Tee hierro dúctil en bifurcación del caudal.



e) Codo 90° radio largo típico en montaje.



Figura 2-3 Fotos de algunas tuberías y accesorios analizados.

Como se puede ver en la parte (b) de la Figura 2-3, en la parte final del montaje hay dos válvulas que tienen por objetivo controlar el flujo que pasa a través de cada uno de los dos vertederos triangulares de cresta delgada que se utilizan para medir el caudal. La válvula del vertedero 1 es plástica, mientras que la válvula del vertedero 2 es metálica.

Para medir altura de presión en cada punto, se usaron líneas de piezómetros fabricados a partir manguera transparente de 5 mm de diámetro; colocados al principio y al final de cada tubería y por consiguiente al principio y al final de cada accesorio. Cada accesorio o tramo de tubería contaba con dos piezómetros de entrada y dos de salida; esto se hizo con el fin de incrementar la precisión de los resultados. Las lecturas eran finalmente registradas en tableros ubicados estratégicamente al lado del montaje como se puede ver en la Figura 2-4.



Figura 2-4 Tableros de medición de presiones.

El procedimiento rutinario para establecer el caudal, fue medir la altura de la lámina de agua sobre las crestas de los vertederos triangulares de cresta delgada con la ayuda de agujas limnimétricas de precisión de $\pm 1\text{mm}$ (Ver Figura 2-5). Estos vertederos fueron calibrados previamente mediante aforos volumétricos.

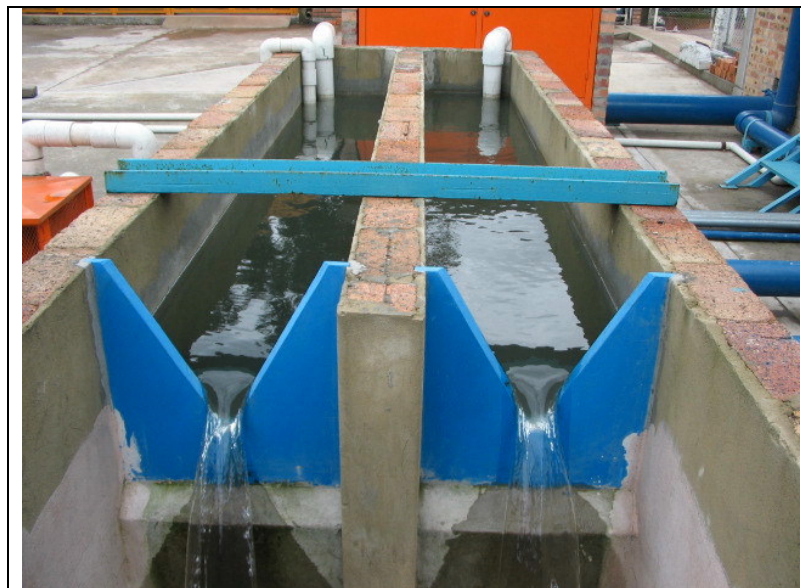


Figura 2-5 Vertederos para la medición de caudal.

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 $Re = 170.000$.

3.1 Metodología de Medición de Caudales

De acuerdo con Chow (1993), el punto de medición de caudal mediante el uso de una aguja limnométrica (ver la Figura 3-1) debe ser en una sección transversal tal, que se restrinja la transmisión de efectos que hacen que cambie la condición de flujo hacia aguas arriba, pues el flujo en los canales es subcrítico. Es decir, la sección de control, o la sección óptima para medir el caudal de agua, no se ve afectada por el perfil de flujo gradualmente variado que se forma a partir del vertedero, y en ella se mantiene una relación caudal – nivel definida. En esta sección, el caudal sólo es función del nivel y no de la rugosidad del canal o de otras variables no controladas.

Para determinar el caudal que pasa por cada uno de los vertederos se deben seguir los siguientes pasos:

- Con la aguja del limnómetro se lee el nivel del agua cuando no esta fluyendo agua por la red, es decir cuando el nivel del agua se encuentra en el vértice del vertedero; H_0 .
- Luego, con el montaje en funcionamiento se lee el nivel del agua; H .
- La diferencia entre H y H_0 corresponde a la altura de la lámina de agua, H_L , que pasa sobre el vertedero.
- Conociendo H_L se utiliza la ecuación de calibración y se determina el caudal en Litros por segundo.

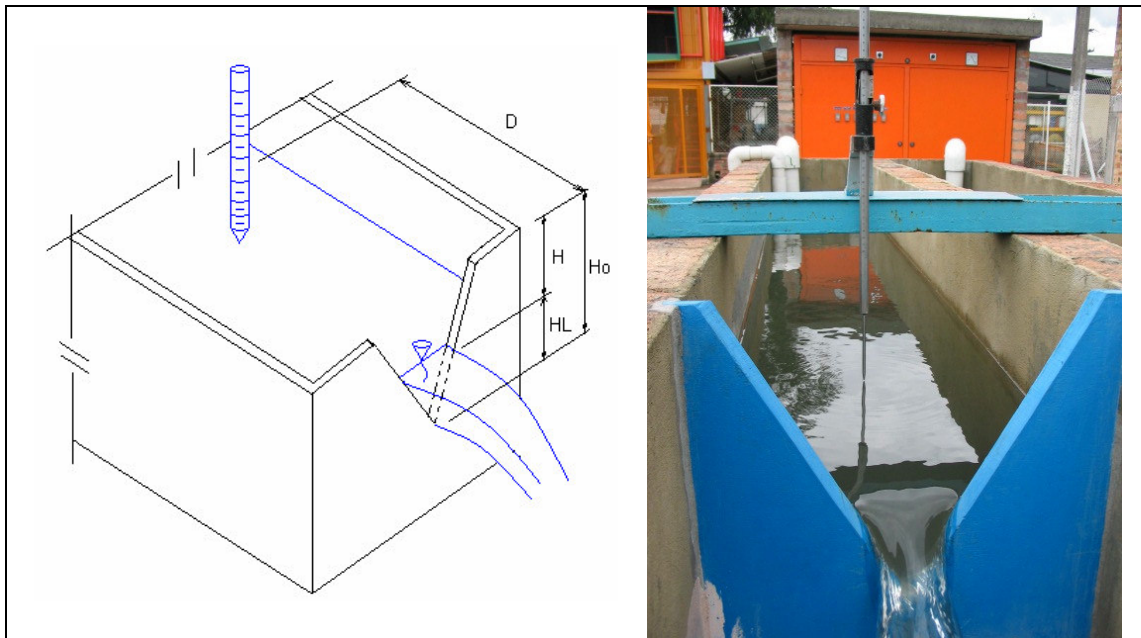


Figura 3-1 Esquema de la medición de la lámina de agua y aguja limnimétrica utilizada.

3.2 Metodología de Medición de Presiones

Además de conocer el caudal que pasa por la tubería, es necesario conocer la presión en diferentes puntos del sistema con el fin de determinar las pérdidas de energía a lo largo de la red. Por esta razón, en cada una de las pruebas fue necesario leer la presión en los diferentes puntos. La medición de presiones se realizó 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. En la Figura 3-2 se observa uno de los dos tableros utilizados para las mediciones de presión de cada piezómetro.

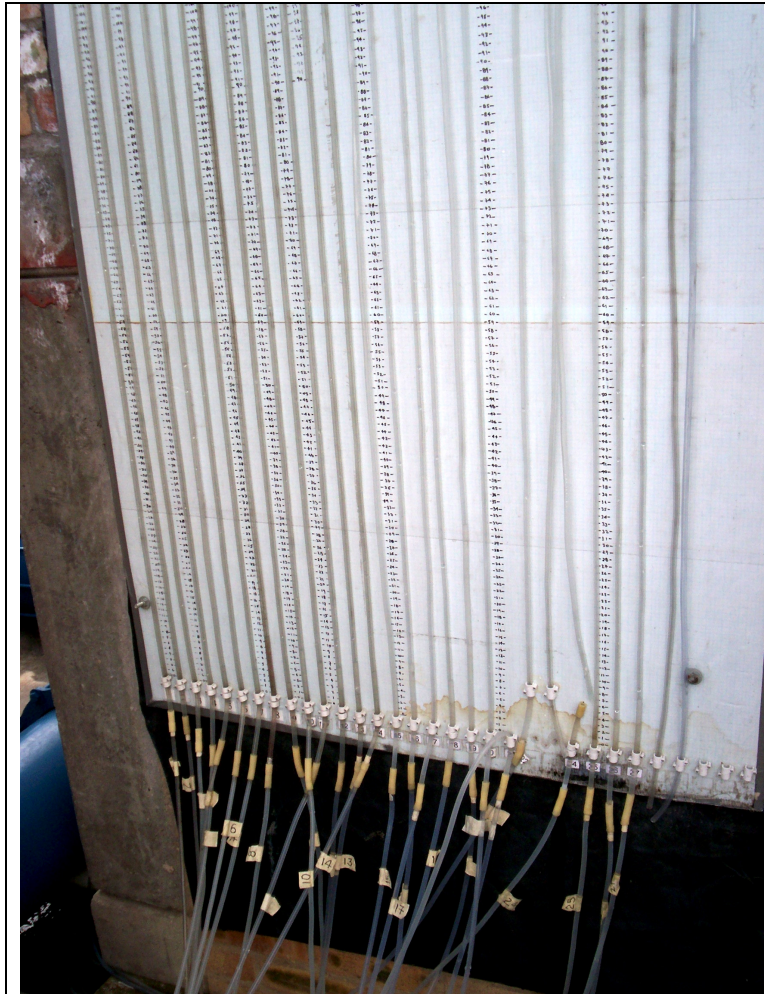


Figura 3-2 Tablero de piezómetros.

3.3 Calibración de los Vertederos

Cada uno de los dos vertederos fue calibrado antes de comenzar con el período de pruebas. Los resultados de la calibración son los siguientes:

$$Q = 0.8967(H - H_o)^{2.5516} \quad \text{Ecuación 3-1}$$

$$Q = 1.0141(H - H_o)^{2.5565} \quad \text{Ecuación 3-2}$$

La Ecuación 3-1 hace referencia al vertedero 1, que corresponde al vertedero que gobierna su flujo por la válvula plástica, mientras que la Ecuación 3-2 hace referencia al otro vertedero, donde se tiene válvula metálica (Ver la Figura 2-3). Los límites de aplicabilidad de la ecuación son para caudales mínimos de 1 L/s hasta máximos de 20 L/s para toda la red.

Debido a las condiciones de altura de cabeza del tanque y diámetro de las tuberías, el caudal máximo que puede circular por la red es 20 L/s, es por esto que la medición del caudal no es limitante para la cantidad de agua que puede circular por la red, bajo las condiciones en las que se encuentra el montaje.

3.4 Metodología General

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 Determinación del Coeficiente de Pérdidas Menores

En este capítulo se describe la metodología general para el cálculo del coeficiente de pérdidas menores de los accesorios instalados, se exponen los valores del k_m teóricos según la literatura y por varios autores, para que finalmente se muestren los resultados experimentales con su correspondiente análisis.

4.1 Metodología de Cálculo

Las pérdidas de energía en los accesorios son proporcionales a la cabeza de velocidad del flujo. La constante que relaciona estos dos términos es el coeficiente de pérdidas menores. Esto es:

$$h_m = k_m \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 4-1}$$

Utilizando esta ecuación se puede asociar un coeficiente de pérdidas menores k_m para cada accesorio, conociendo la velocidad del flujo y las pérdidas de energía asociadas con éste.

$$k_m = h_m \frac{2g}{v^2} \quad \text{Ecuación 4-2}$$

Las pérdidas de energía por su parte, son calculadas a partir de la ecuación de Bernoulli, según la cual:

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_m \quad \text{Ecuación 4-3}$$

Los dos primeros términos se pueden agrupar en uno sólo, dando lugar a la presión piezométrica que es la que se lee en los tableros de medición. De esta forma:

$$p_1^* + \frac{v_1^2}{2g} = p_2^* + \frac{v_2^2}{2g} + h_m \quad \text{Ecuación 4-4}$$

La velocidad media del flujo se calcula como el caudal leído en los vertederos (que en algunos casos es la suma de los dos caudales leídos), dividido entre el área interna de la tubería, que en este caso es 25593.6 mm^2 , medida en el laboratorio. (Ecuación 4-5)

$$v = \frac{Q}{\pi \cdot d^2 / 4} \quad \text{Ecuación 4-5}$$

Cuando se tiene un accesorio en donde no hay cambio de diámetro ni de caudal, como en los codos y las uniones, las velocidades antes y después del accesorio son iguales. Por lo tanto, los términos de cabeza de velocidad se cancelan y las pérdidas de energía se calculan como la diferencia entre las lecturas de los piezómetros antes y después del accesorio (Ecuación 4-6).

$$h_m = p_i^* - p_{i+1}^*$$

Ecuación 4-6

Para accesorios que se encontraban posteriores a la tee de hierro dúctil era necesario tener en cuenta que en esos puntos el caudal era menor debido a que se había dividido anteriormente en la bifurcación. En Tabla 4-1 se presenta un resumen de los tramos analizados para determinar los coeficientes de pérdidas menores en el material. La ubicación de cada uno de ellos dentro del montaje se puede visualizar en la Figura 2-1.

Tabla 4-1 Accesorios y tramos de tuberías analizados en el montaje.

Tramo	No		Accesorio	No	
1	1	2	Tubería	3	4
2	3	4	Unión	5	6
3	5	6	Tubería	7	8
4	7	8	Unión	9	10
5	9	10	Tubería	11	12
6	11	12	Unión	13	14
7	13	14	Tubería	15	16
8	15	16	Codo 90°	17	18
9	17	18	Tubería	19	19
10	19	19	Unión	20	21
11	20	23	Tubería	22	23
12	22	23	Tee Directo	38	39
13	22	23	Tee Perpendicular	36	37
14	38	39	Tubería	40	41
15	40	41	Codo 90°	42	43
16	42	43	Tubería	44	45
17	44	45	Unión	46	47
18	46	47	Tubería	48	49
19	48	49	Unión	50	51
20	50	51	Tubería	52	53
21	52	53	Unión	54	55
22	54	55	Tubería	56	57
23	36	39	Tubería	34	35
24	34	35	Unión	32	33
25	32	33	Tubería	30	31
26	30	31	Unión	28	29
27	28	29	Tubería	26	27
28	26	27	Unión	24	25

Luego de haber leído en el tablero de piezómetros (ver la Figura 3-2) las pérdidas de energía en un accesorio h_m , se procede a calcular el coeficiente de pérdidas menores asociado con éstas, mediante el uso de la Ecuación 4-6. Discretizando el cálculo del coeficiente para cada uno de los accesorios mencionados anteriormente, es posible asignar un coeficiente a cada accesorio o cada grupo de accesorios, realizando gráficas que relacionen el k_m con el Re para todas las pruebas realizadas.

Adicionalmente, es posible realizar un análisis estadístico para generar histogramas de frecuencia y de esta forma determinar el k_m o rango de k_m en donde se concentran la mayoría de las pruebas.

4.2 Valores Teóricos de k_m para los Accesorios Analizados

En la literatura existen diferentes rangos de k_m para cada uno de los accesorios analizados en esta investigación. A continuación se presentan algunas tablas de diferentes fuentes:

De acuerdo con Jara, Valenzuela y Crisóstomo (Ver Referencia [3]) el coeficiente de dos de los accesorios es:

Tabla 4-2 Coeficiente de pérdidas menores de codo de 90° y Tee.

Accesorio	Coeficiente k_m
Codo 90° de 6 pulgadas	0.90
Tee de 6 pulgadas	1.80

De acuerdo con Giles (Ver Referencia [4]) estos coeficientes son:

Tabla 4-3 Coeficiente de pérdidas menores de codo de 90° y Tee.

Accesorio	Coeficiente k_m
Codo 90° de 6 pulgadas	De 0.50 a 0.75
Tee de 6 pulgadas	De 1.5 a 2.0

De acuerdo con Street (Ver Referencia [2]) se tiene lo siguiente:

Tabla 4-4 Coeficiente de pérdidas menores de codo radio largo y Tee.

Accesorio	Coeficiente k_m
Codo de Radio Largo de 6 pulgadas	0.5
Tee en sentido recto de 6 pulgadas	0.9
Tee a través de la salida lateral de 6 pulgadas	2.0

Finalmente, de acuerdo con Saldarriaga (Ver Referencia [1]) los coeficientes de los accesorios utilizados en el montaje son:

Tabla 4-5 Coeficiente de pérdidas menores de codo de 90° y Tee.

Accesorio	Coeficiente k_m
Codo de Radio Largo (r/d 5 6 1.5)	0.6
Tee en sentido recto	0.3
Tee a través de la salida lateral	1.8
Unión	0.3

Como se puede ver, los coeficientes para los diferentes accesorios varían de acuerdo con la fuente que se utilice. Sin embargo, se mantiene la coherencia entre los diferentes autores así los valores no sean los mismos.

4.3 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:

4.3.1 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 todos los k_m medidos para este tipo de accesorio sin ningún tipo de depuración; presentados en diagramas de k_m contra número de Reynolds.

Estos accesorios son indispensables en los sistemas de acueducto, debido a su ágil sistema de unión entre dos tuberías consecutivas de PVC (Ver la Figura 4-1 a la Figura 4-10).

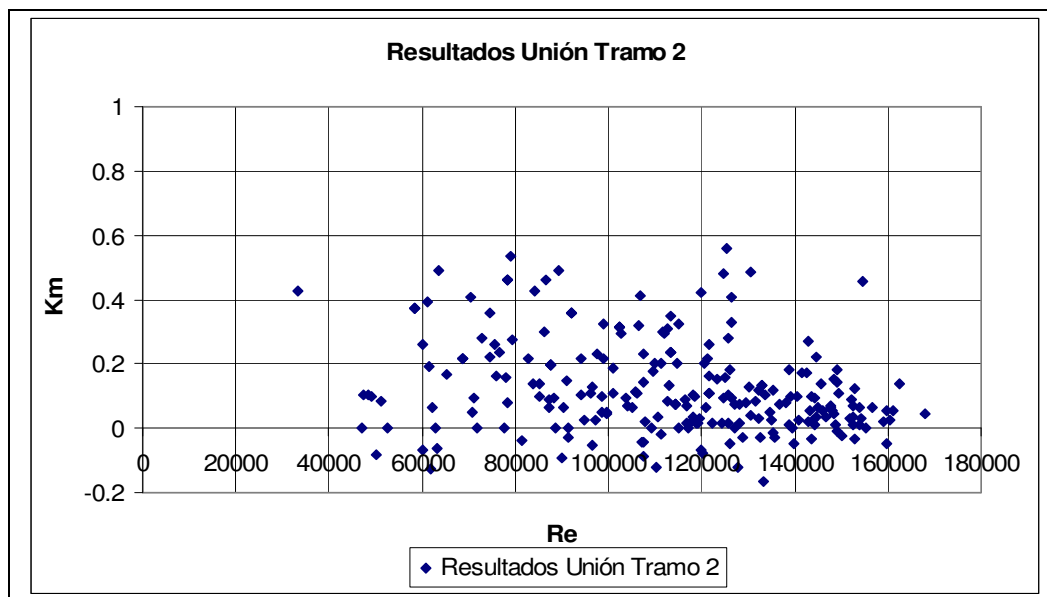


Figura 4-1 Coeficiente de pérdidas menores contra número de Reynolds - Unión Tramo 2.

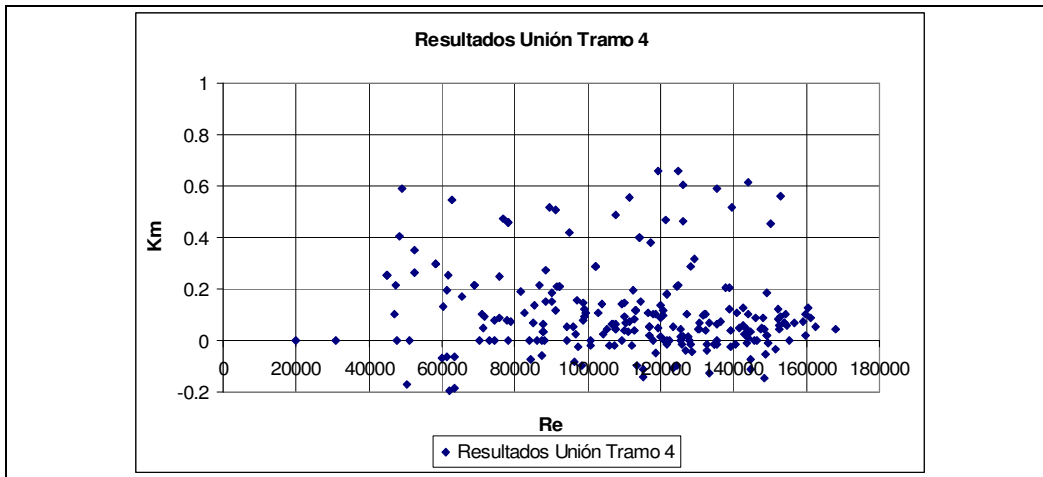


Figura 4-2 Coeficiente de pérdidas menores contra número de Reynolds - Unión Tramo 4.

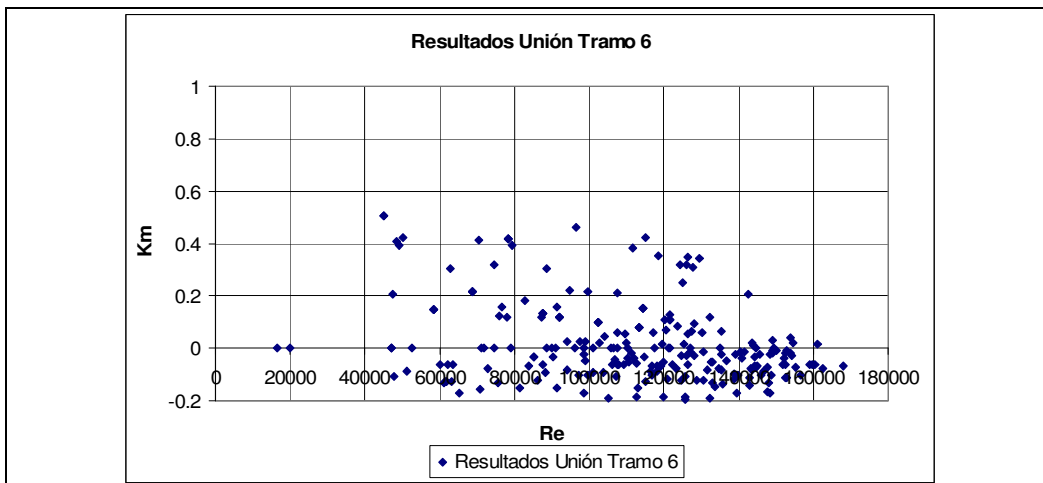


Figura 4-3 Coeficiente de pérdidas menores contra número de Reynolds - Unión Tramo 6.

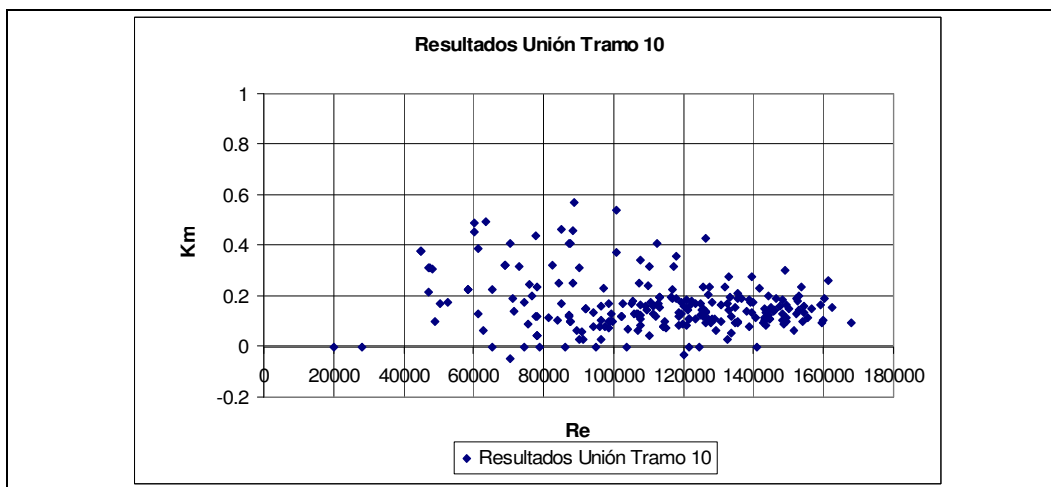


Figura 4-4 Coeficiente de pérdidas menores contra número de Reynolds - Unión Tramo 10.

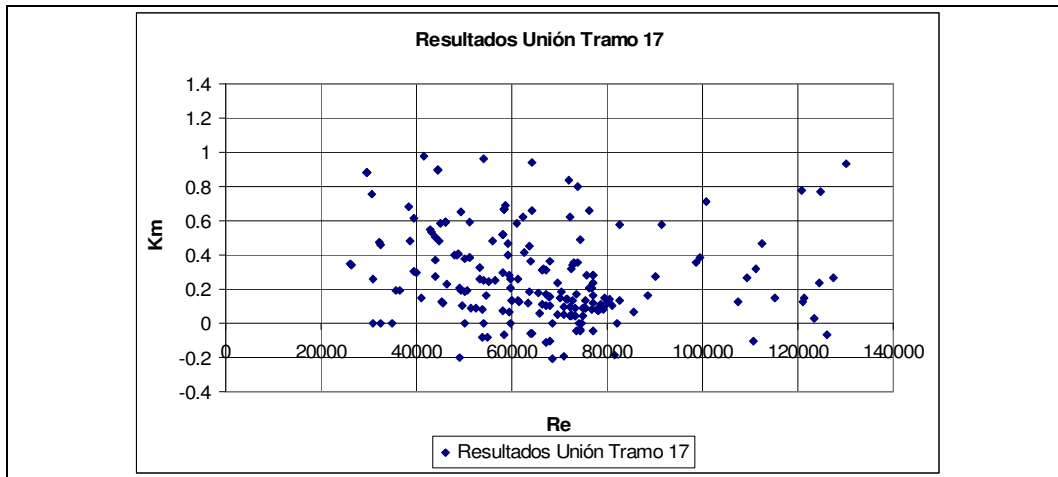


Figura 4-5 Coeficiente de pérdidas menores contra número de Reynolds - Unión Tramo 17.

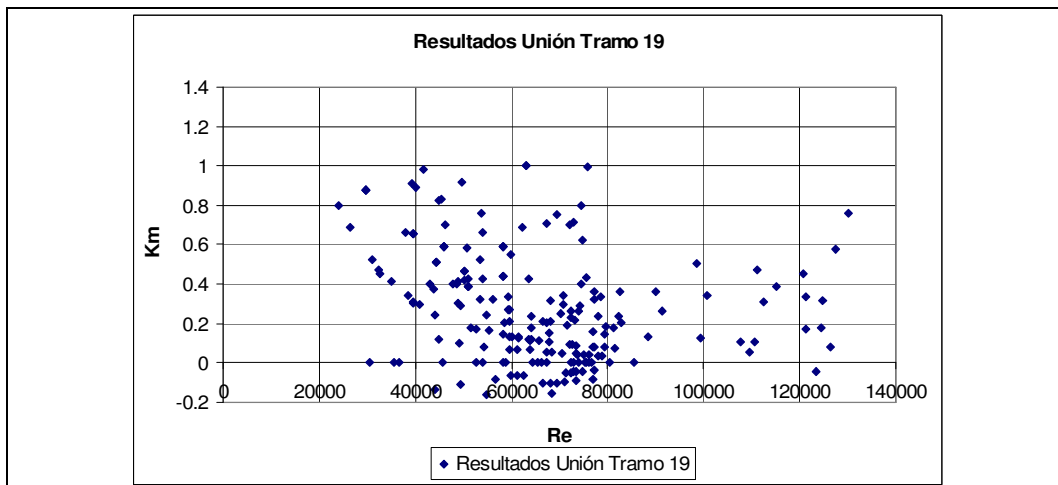


Figura 4-6 Coeficiente de pérdidas menores contra número de Reynolds - Unión Tramo 19.

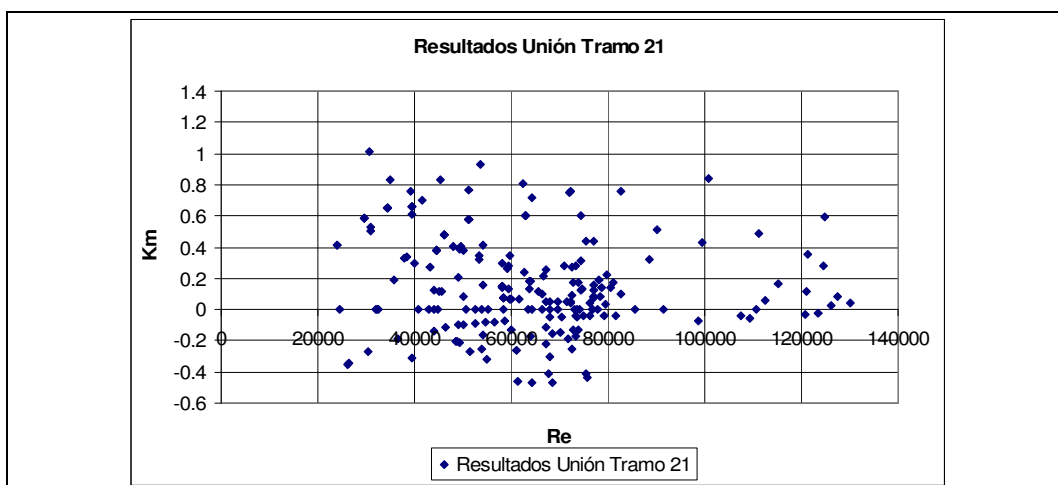


Figura 4-7 Coeficiente de pérdidas menores contra número de Reynolds - Unión Tramo 21.

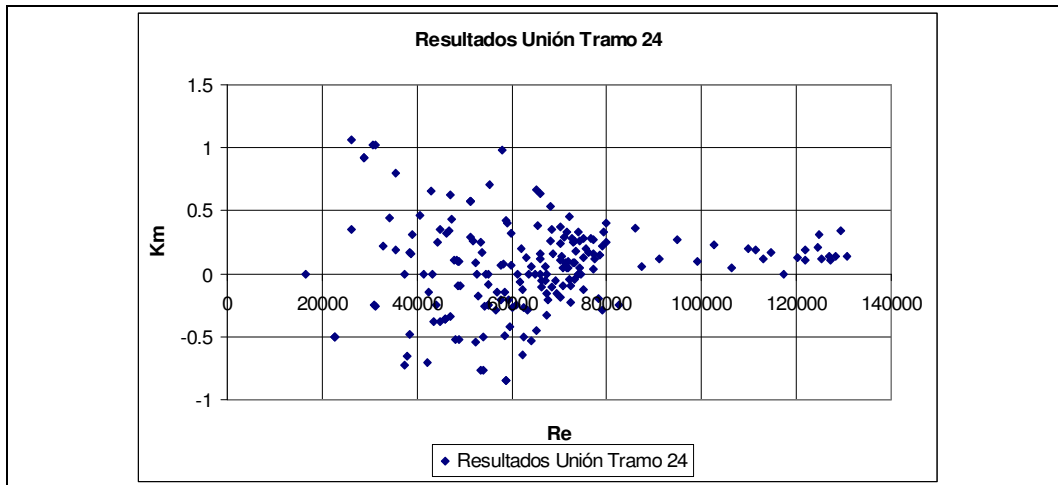


Figura 4-8 Coeficiente de pérdidas menores contra número de Reynolds - Unión Tramo 24.

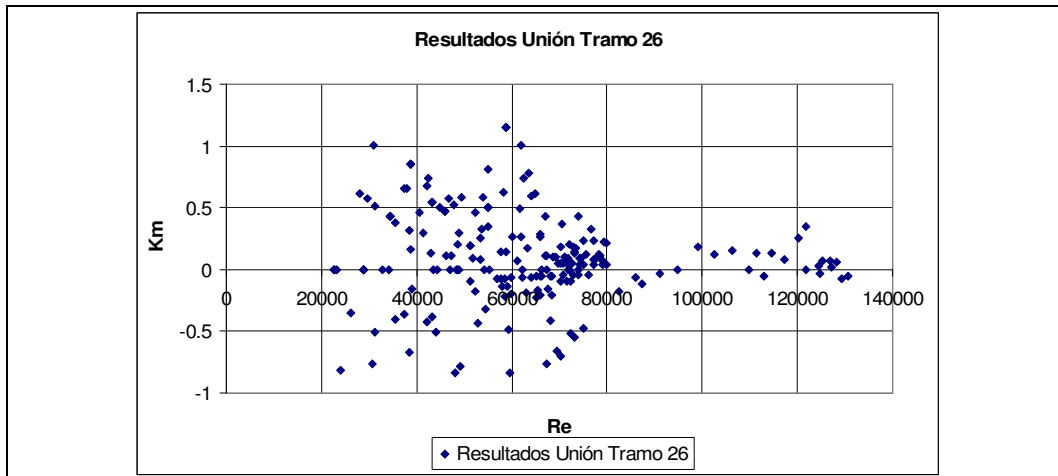


Figura 4-9 Coeficiente de pérdidas menores contra número de Reynolds - Unión Tramo 26.

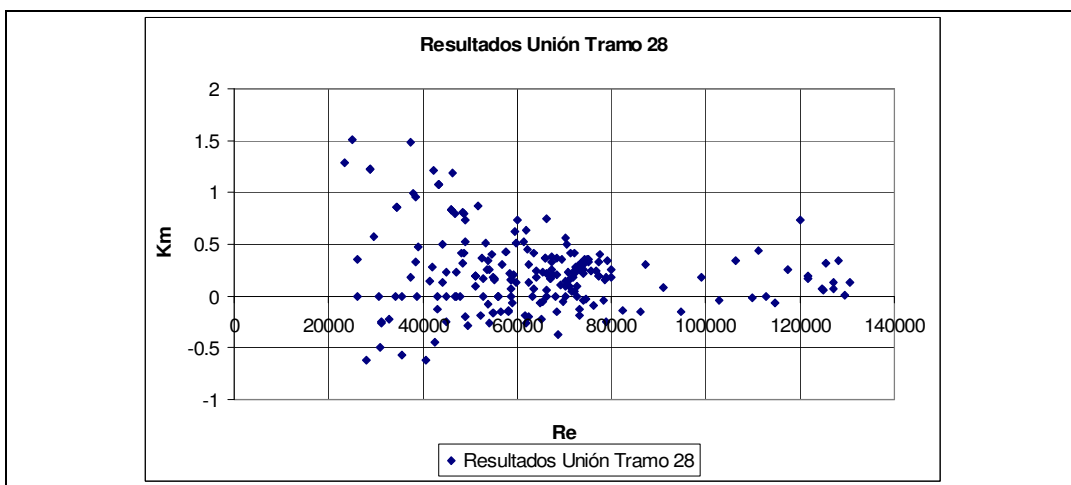


Figura 4-10 Coeficiente de pérdidas menores contra número de Reynolds - Unión Tramo 28.

4.3.2 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 se presentan en la Figura 4-11 y en la Figura 4-12 y no se encuentran depurados para los diagramas de k_m contra número de Reynolds.

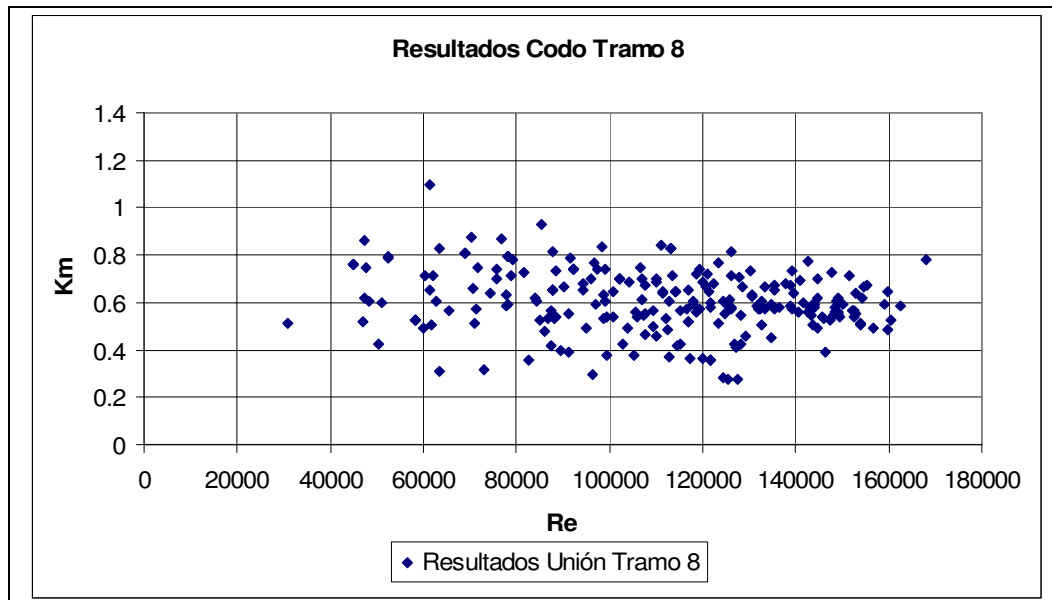


Figura 4-11 Coeficiente de pérdidas menores contra número de Reynolds – Codo Tramo 8.

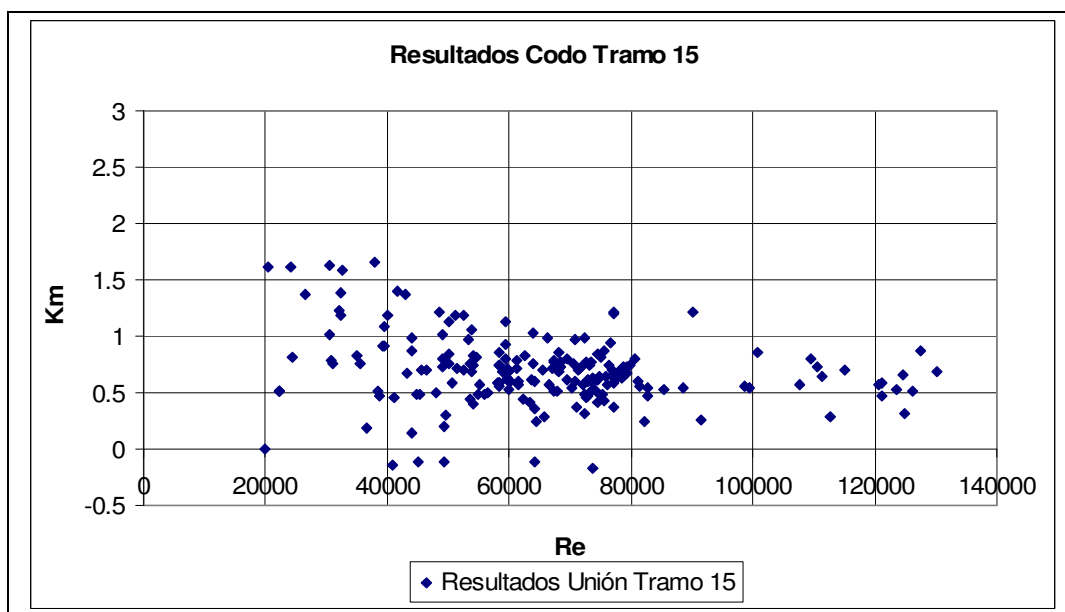


Figura 4-12 Coeficiente de pérdidas menores contra número de Reynolds - Codo Tramo 15.

4.4 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 4-6 se muestra el resumen de los resultados encontrados para los coeficientes de pérdidas menores en los diferentes accesorios.

Tabla 4-6 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 4-6, 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 Ecuación 4-7:

$$\bar{x} \pm 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad \text{Ecuación 4-7}$$

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

σ = 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 (ver el ANEXO 1). Anteriormente también se había determinado una media particular para cada accesorio independiente con los datos ya depurados (ver la Tabla 4-6):

De la Tabla 4-6 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 menos 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 equilibrio 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° , 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.

5 Determinación de la Rugosidad Absoluta

5.1 Metodología de Cálculo

Al igual que en el caso de las pérdidas menores, las pérdidas de energía por fricción son calculadas a partir de la ecuación de Bernoulli:

$$p_1^* + \frac{v_1^2}{2g} = p_2^* + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad \text{Ecuación 5-1}$$

En el caso particular de un tramo de tubería, los términos de la cabeza de velocidad de la Ecuación 5-1 son iguales y por lo tanto pueden ser cancelados, dando lugar a la Ecuación 5-2, en donde las pérdidas de energía se calculan simplemente a partir de la lectura de los piezómetros al inicio y al final de cada tramo de tubería.

$$h_f = p_i^* - p_{i+1}^* \quad \text{Ecuación 5-2}$$

En la Tabla 5.1 se presenta un resumen de los tramos de tuberías analizados para determinar la rugosidad absoluta de la tubería de PVC Biorientado Dúctil (Biaxial®), y los piezómetros inicial y final que lo describen. La ubicación de cada uno de los tramos asociados se pueden visualizar en la Figura 2-1.

Tabla 5-1 Resumen de los tramos de tuberías analizados.

Tramo	Piezómetros				Longitud (m)
	Inicial		Final		
	No.	No.	No.	No.	
1	1	2	3	4	5.37
3	5	6	7	8	5.43
5	9	10	11	12	4.77
7	13	14	15	16	5.43
9	17	18	19	19	5.425
11	20	23	22	23	1.575
14	38	39	40	41	5.32
16	42	43	44	45	5.37
18	46	47	48	49	5.33
20	50	51	52	53	5.45
22	54	55	56	57	3.28
23	36	39	34	35	5.51
25	32	33	30	31	5.49
27	28	29	26	27	5.45

Una vez conocidas las pérdidas de energía en cada tramo, calculadas a partir de la Ecuación 5-2, se puede calcular la rugosidad absoluta de las tuberías mediante el uso de la ecuación de Darcy – Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook – White. La ecuación de Darcy – Weisbach permite calcular el factor de fricción f a partir de datos geométricos de la tubería (longitud y diámetro), y de las condiciones del flujo representadas por la velocidad del agua y las pérdidas de energía en el tramo analizado. La forma de calcular el factor de fricción f se muestra en la Ecuación 5-3.

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g}$$

$$\Delta H = p_i^* - p_{i+1}^* = f \frac{l v^2}{d 2g}$$

Ecuación 5-3

$$f = \frac{p_i^* - p_{i+1}^*}{\frac{l v^2}{d 2g}}$$

Teniendo el factor de fricción y calculando el número de Reynolds, se puede realizar una gráfica que relacione el f con el Re para todas las pruebas realizadas. Al superponer esta gráfica en un diagrama de Moody, es posible asignar un valor del coeficiente de rugosidad absoluta k_s para cada diámetro de tubería utilizado. Mediante la ecuación de Colebrook – White se puede determinar dicho valor de la rugosidad absoluta para cada una de las pruebas realizadas.

5.2 Resultados Experimentales

Para cada uno de los datos medidos, 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 5-1), 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 5-1).

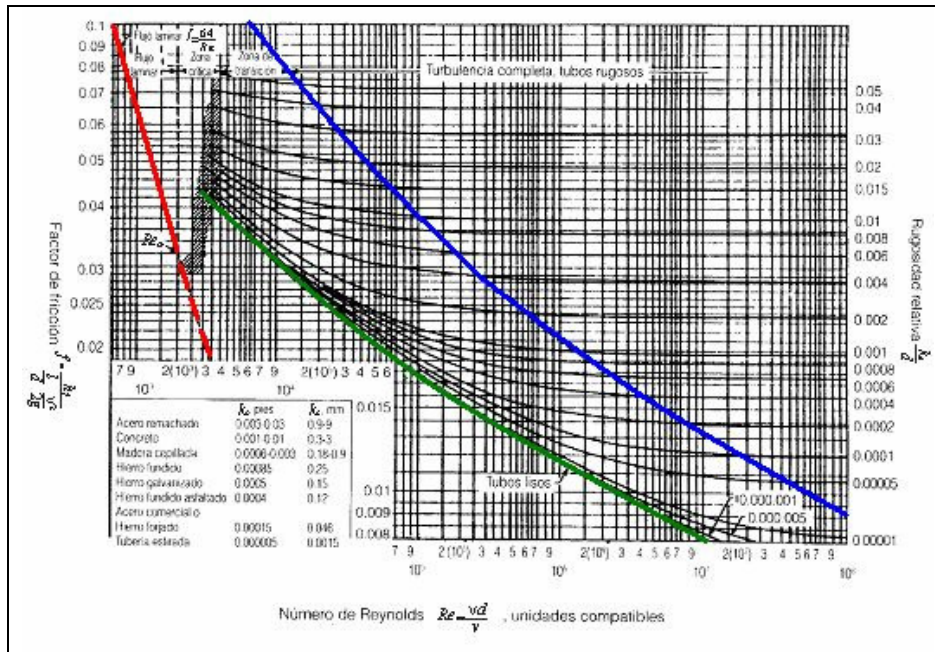


Figura 5-1 Diagrama de Moody.

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 5-2, 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_s/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.

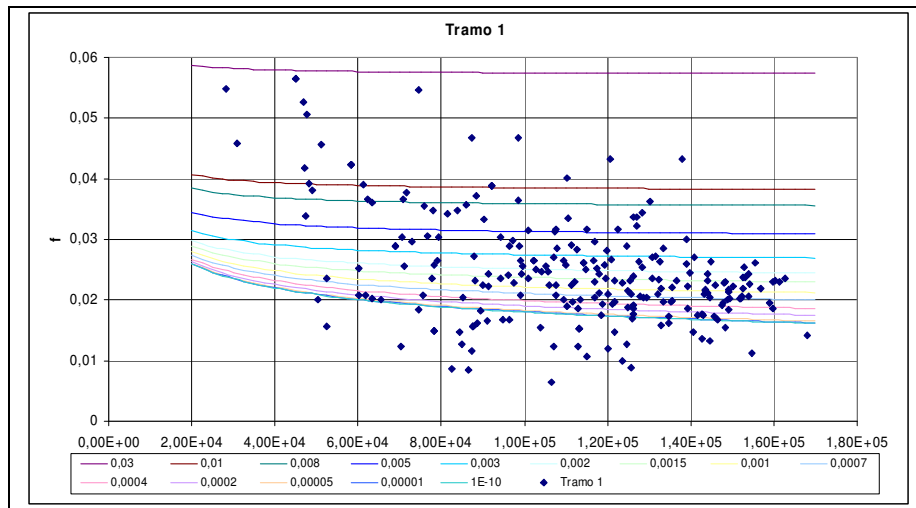


Figura 5-2 Resultados Experimentales, k_s/d Tramo 1.

En el tramo 3, representado en la Figura 5-3, se observan concentraciones en régimen turbulento de números de Reynolds alrededor de 40.000 y 160.000, dentro de los cuales el valor de k_s/d conserva una gran variabilidad. Se pueden determinar algunas concentraciones de las rugosidades relativas entre 0.003 y 0.000001 pero no sería representativo ya que existen muchos puntos por debajo de las mínimas líneas del diagrama de Moody para ese rango de número de Reynolds, al mismo tiempo el factor de fricción se mueve entre 0.0025 y 0.027, lo que tampoco lo convierte en un parámetro plenamente determinable.

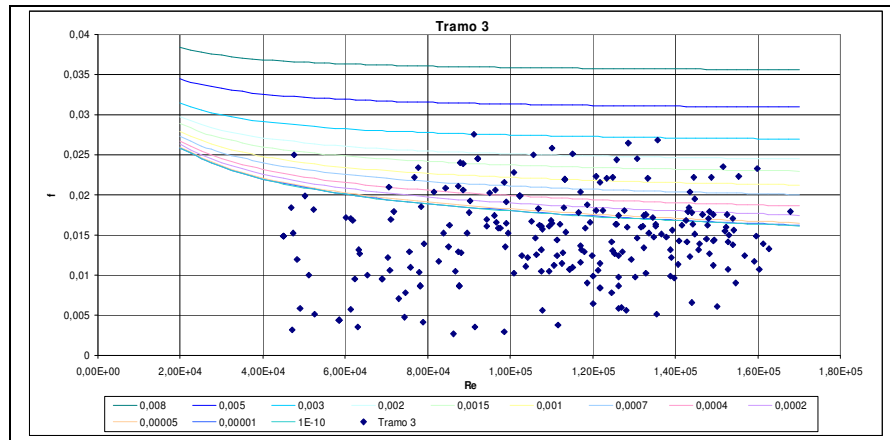


Figura 5-3 Resultados Experimentales, Ks/d Tramo 3.

En el tramo 5, representado por la Figura 5-4, se observan concentraciones en régimen turbulento de números de Reynolds alrededor de 50.000 y 160.000, dentro de los cuales el valor de k_s/d conserva variabilidad pero relativamente se conserva entre las líneas correspondientes del diagrama. Aún no se puede determinar un valor de rugosidad relativa específico, pero se pueden determinar algunas concentraciones de tales rugosidades relativas entre 0.005 y 0.003 para números de Reynolds entre 100.000 y 160.000, el factor de fricción podría considerarse como un promedio de 0.027 para Reynolds relativamente bajos y 0.024 para el promedio de los valores de Reynolds más altos.

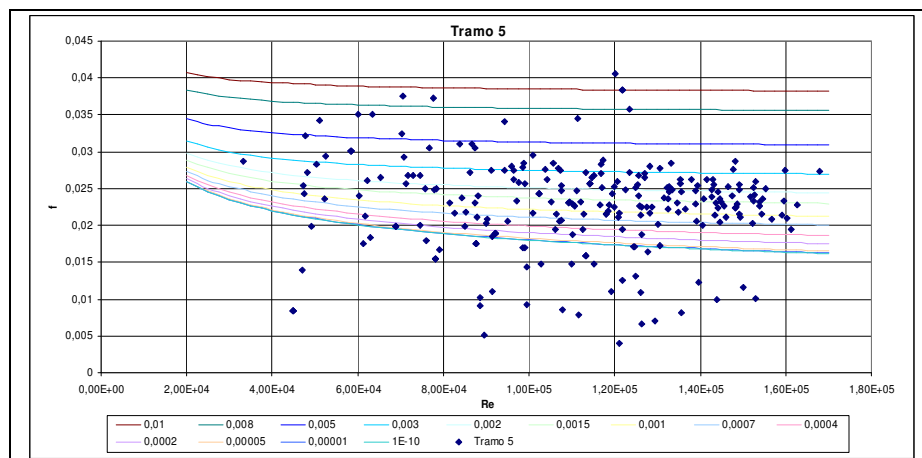


Figura 5-4 Resultados Experimentales, Ks/d Tramo 5.

En el tramo 7, representado por la Figura 5-5, se observan concentraciones en régimen turbulento de números de Reynolds alrededor de 40.000 y 170.000, dentro de los cuales el valor de k_s/d conserva variabilidad pero también se conserva entre varias líneas del diagrama de Moody dentro del anterior rango de Reynolds. Se podría determinar un valor de rugosidad relativa específico si se promediaran los datos, pero los valores de coeficiente de fricción no son plenamente identificables esta vez, ya que para una misma rugosidad relativa y número de Reynolds se presentan entre 0.0025 y 0.035.

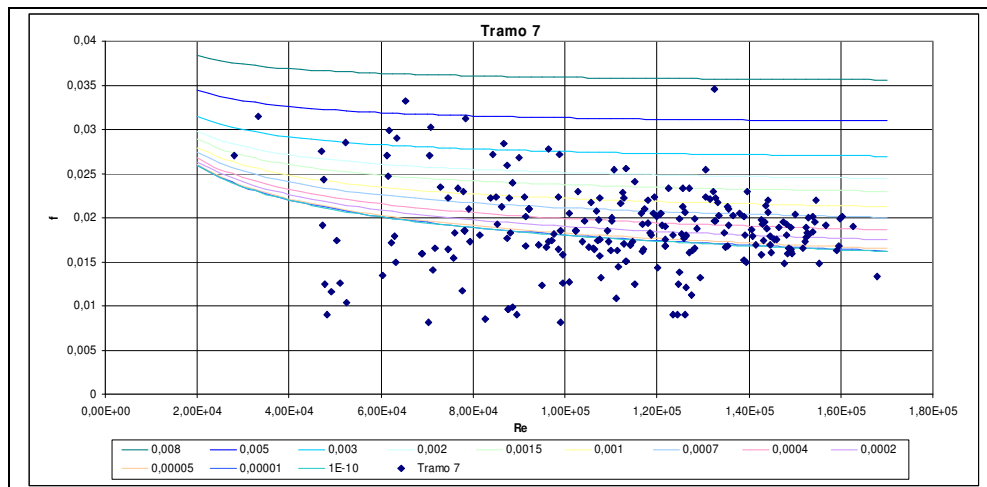


Figura 5-5 Resultados Experimentales, K_s/d Tramo 7.

En el tramo 9, representado por la Figura 5-6, se observan concentraciones en régimen turbulento de números de Reynolds alrededor de 20.000 y 170.000, dentro de los cuales el valor de k_s/d se conserva en la mayoría de los casos por debajo de la línea de 1×10^{-10} de la rugosidad relativa del diagrama de Moody y con respecto al factor de fricción todavía se conserva gran variabilidad de los registros con valores desde 0.0025 hasta 0.037 aproximadamente.

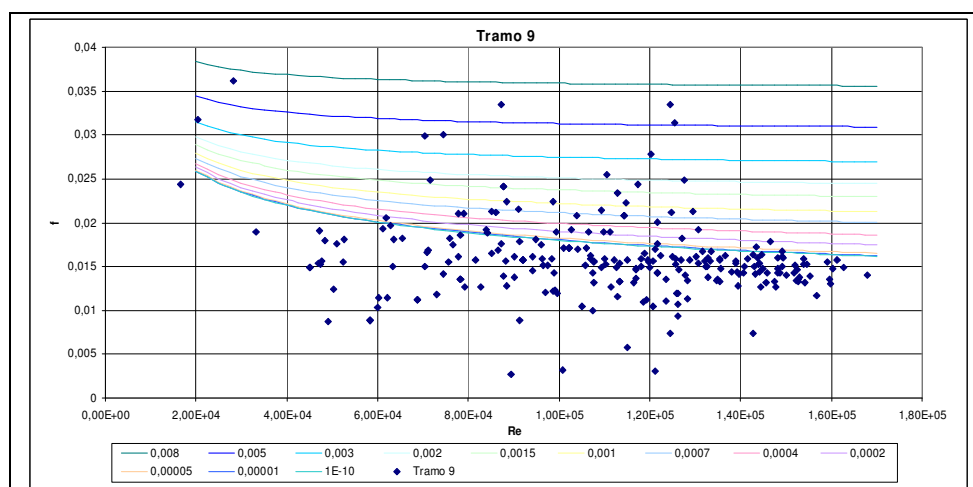


Figura 5-6 Resultados Experimentales, K_s/d Tramo 9.

En el tramo 11, se empiezan a presentar nuevamente algunas concentraciones del factor de fricción para números de Reynolds entre 80.000 y 150.000; aproximadamente del 40 al 50% de los datos se encuentra entre las rugosidades relativas de 1×10^{-10} y 0.01 con factores de fricción entre 0.04 y 0.02. Se debe aclarar que nuevamente es repetida la variabilidad de los datos, desde negativos hasta valores relativamente altos para todos los componentes del diagrama (Ver la Figura 5-7).

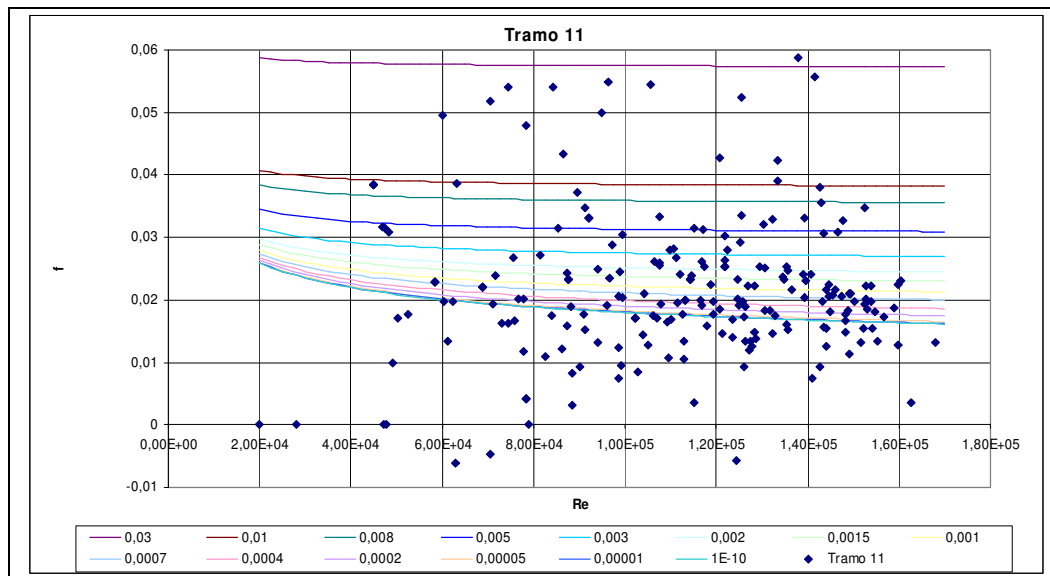


Figura 5-7 Resultados Experimentales, Ks/d Tramo 11.

Para los tramos 14 a 27 las cosas no cambian significativamente. En estas figuras los valores del número de Reynolds se concentran principalmente entre 20.000 y 800.000, pero para esas condiciones de flujo las rugosidades relativas y los factores de fricción varían ostensiblemente desde registros negativos hasta rugosidades relativas de 0.01 y factores de fricción 0.05.

Específicamente, para el tramo 23 casi el 50% de los datos medidos se encuentran en registros negativos lo cual se denota como “prácticamente imposible” y se podría explicar por errores de lecturas debidas a variaciones muy pequeñas de los niveles piezométricos que confunden al observador. Una razón secundaria para que exista una concentración elevada de números negativos se puede deber a errores constructivos en la colocación de los medidores piezométricos para ese tramo en específico. (Ver de la Figura 5-8 a la Figura 5-15)

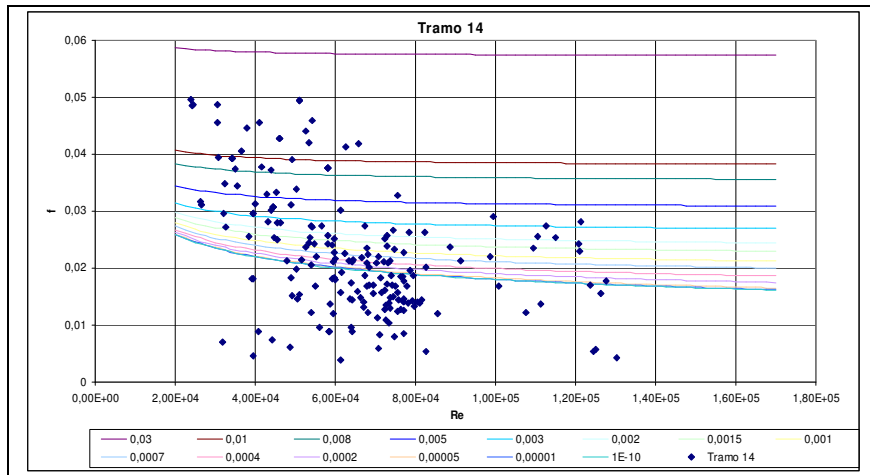


Figura 5-8 Resultados Experimentales, Ks/d Tramo 14.

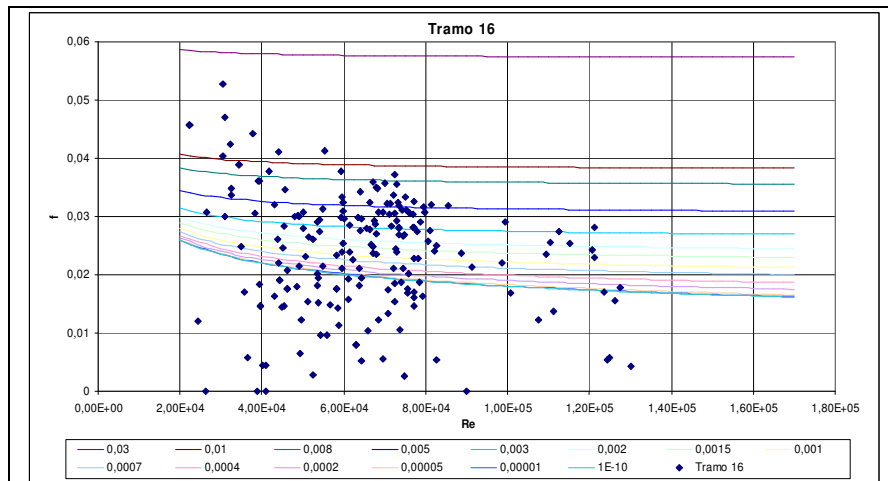


Figura 5-9 Resultados Experimentales, Ks/d Tramo 16.

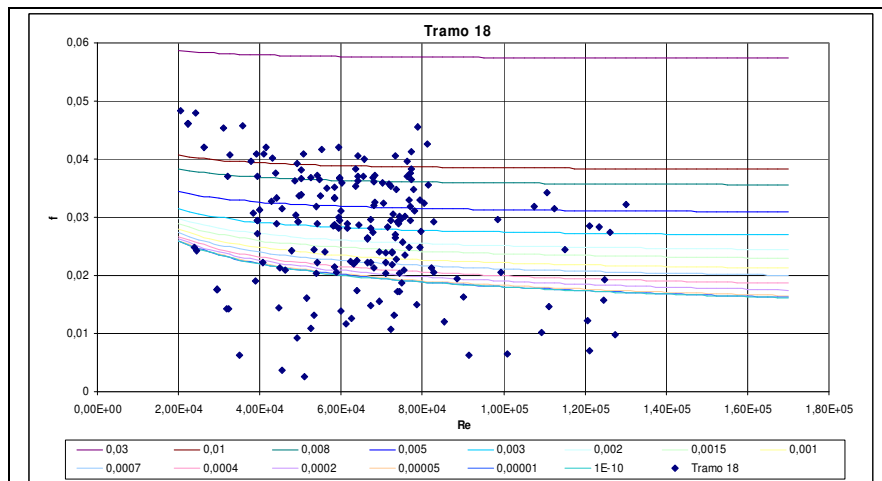


Figura 5-10 Resultados Experimentales, Ks/d Tramo 18.

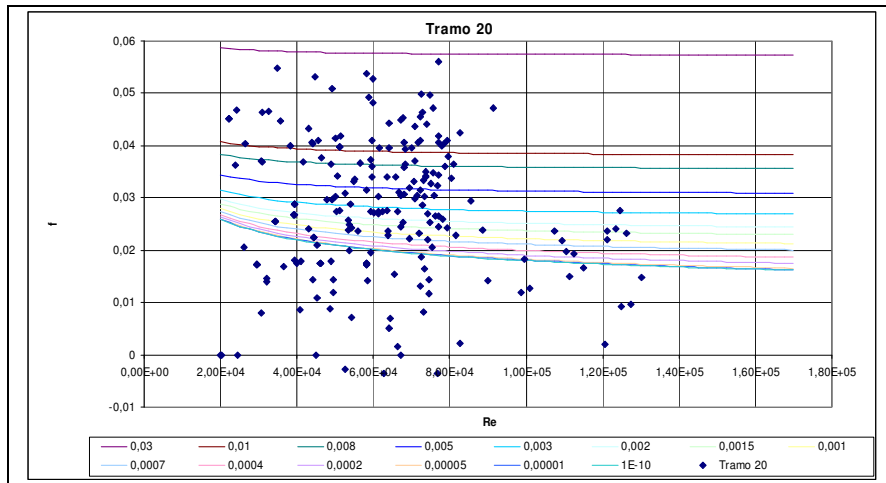


Figura 5-11 Resultados Experimentales, K_s/d Tramo 20.

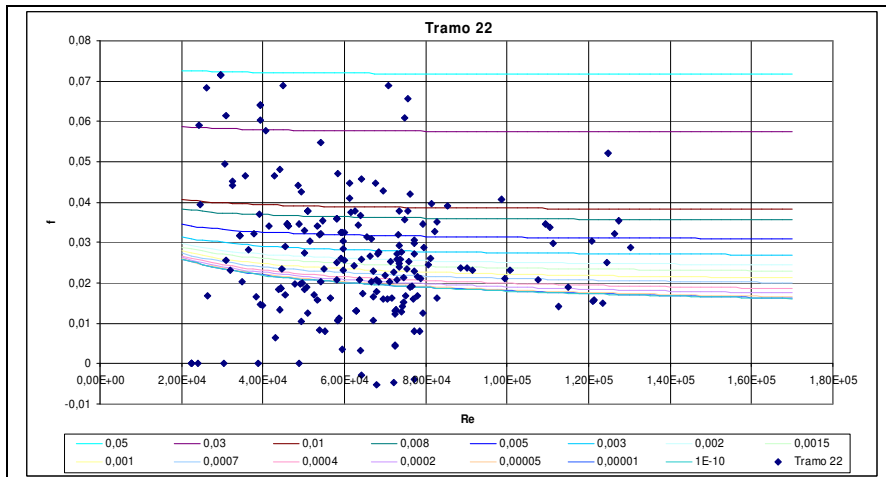


Figura 5-12 Resultados Experimentales, K_s/d Tramo 22.

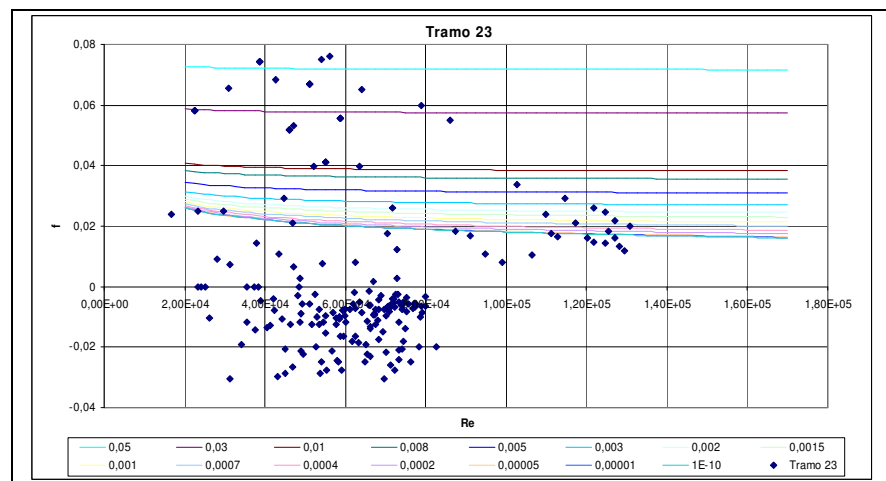


Figura 5-13 Resultados Experimentales, K_s/d Tramo 23.

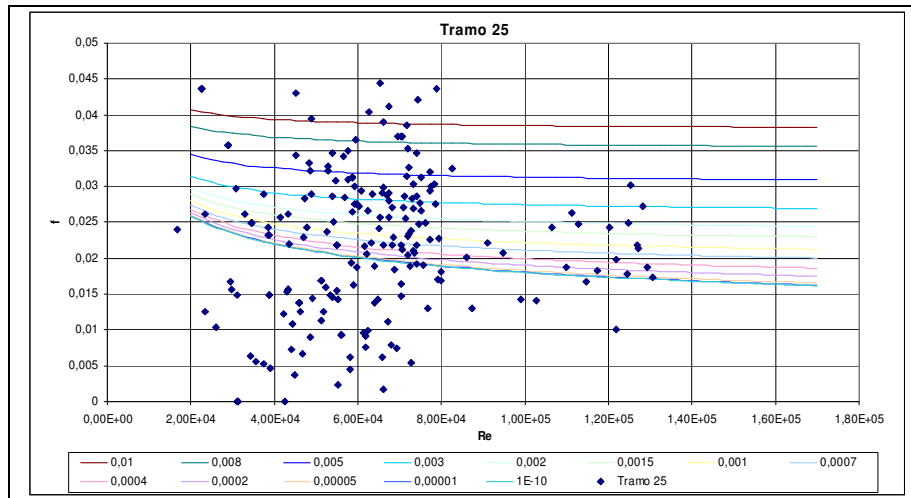


Figura 5-14 Resultados Experimentales, K_s/d Tramo 25.

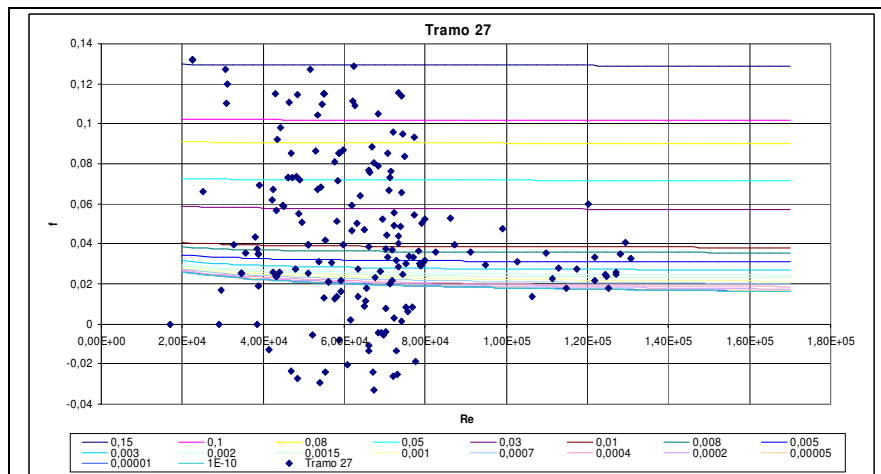


Figura 5-15 Resultados Experimentales, K_s/d Tramo 27.

5.3 Análisis de Resultados

Debido a que los datos experimentales conservan tanta variación, tanto dentro como por debajo del diagrama de Moody, no es posible determinar un valor del coeficiente de rugosidad absoluta k_s que describa el comportamiento de las pérdidas por fricción. De esta forma, el análisis que es necesario realizar depende del estado de flujo en el que se encuentre la red, y de otras consideraciones que se explican a continuación.

5.3.1 Significado del Diagrama de Moody

La ecuación de Colebrook – White (Ecuación 5-4) permite determinar el factor de fricción f en términos de la rugosidad relativa de la tubería k_s/d y el número de Reynolds, y es válida para casi todo tipo de flujo turbulento en tuberías (para números de Reynolds menores de 4000 no aplica esta ecuación). Sin embargo, tiene el problema de que no es una ecuación explícita para el factor de fricción f , lo cual hace necesario la utilización de algún método numérico para su solución.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Ecuación 5-4

Este problema matemático ocasionó la aparición de ecuaciones empíricas más sencillas de utilizar, o diagramas que facilitarían su uso, como el diagrama de Moody. En la Figura 5-16 se muestra un esquema de este diagrama.

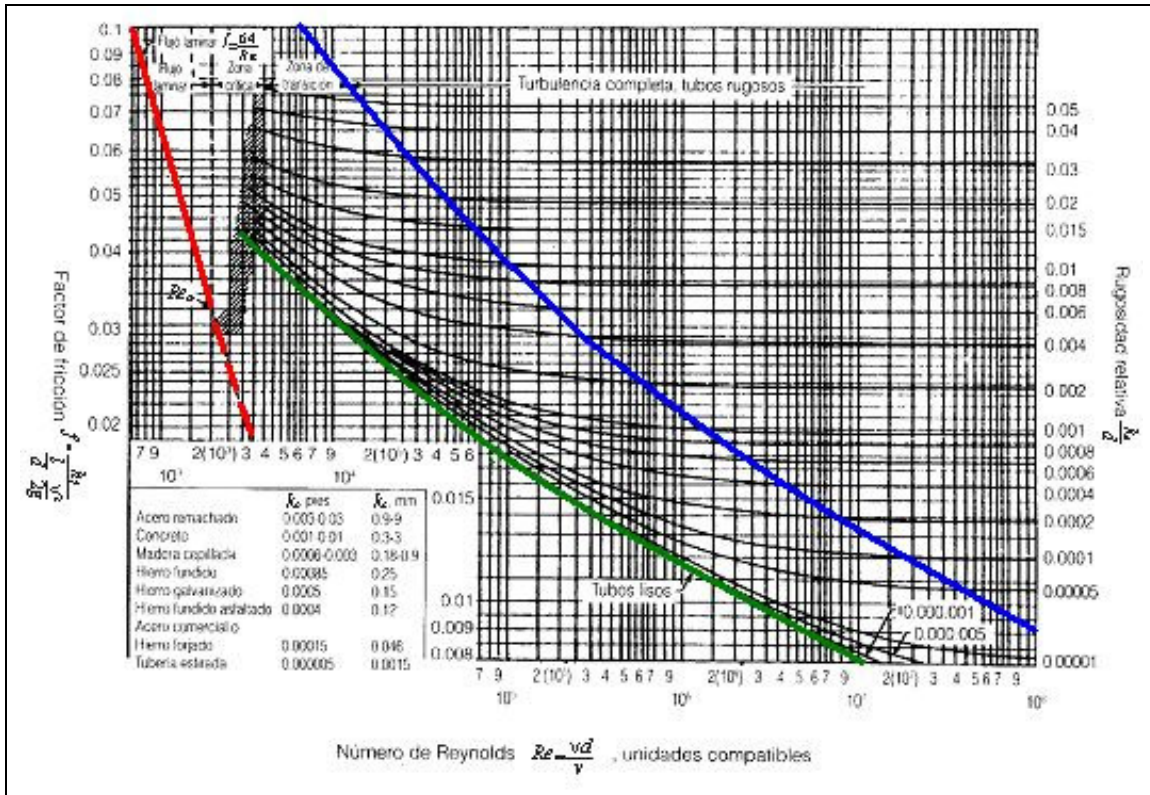


Figura 5-16 Diagrama de Moody.

En el diagrama se pueden diferenciar cuatro zonas: Una primera zona que describe el flujo laminar para números de Reynolds menores a $Re = 2.000$. Esta zona se encuentra delimitada por la línea diagonal de color rojo que se encuentra en la parte izquierda de la figura. La red analizada maneja números de Reynolds entre 20.000 y 200.000 por lo que esta primera zona no se tiene en consideración.

Las otras tres zonas describen el flujo turbulento en las tuberías: Flujo turbulento hidráulicamente liso, flujo turbulento hidráulicamente rugoso, y flujo transicional.

- La zona del diagrama que se encuentra a la derecha de la línea de color azul, corresponde a flujos altamente turbulentos en donde el factor de fricción f depende únicamente de la rugosidad relativa. Dentro de esta zona se encuentran las tuberías de materiales rugosos y con números de Reynolds muy altos.

- La zona comprendida entre la línea verde y la línea azul, corresponde a flujo transicional, en donde el factor de fricción f depende tanto de la rugosidad relativa como del número de Reynolds. Idealmente, las pruebas de laboratorio deberían encontrarse en esta zona, con el fin de determinar un valor de rugosidad para un rango determinado de caudales, o números de Reynolds.
- El área que se encuentra por debajo de la línea verde corresponde a la zona de flujo hidráulicamente liso, en donde las pérdidas de energía por fricción dependen exclusivamente del número de Reynolds, ya que la tubería es tan lisa, que su rugosidad no afecta el régimen de flujo.

Hay que mencionar también una pequeña zona para números de Reynolds con valores entre 2.000 y 4.000, conocida como zona crítica entre flujo laminar y turbulento en la cual no es posible predecir el tipo de flujo.

Al comparar los datos experimentales con el diagrama de Moody, se puede observar que estos varían mucho dentro de cada una de las zonas descritas para el flujo turbulento y por lo tanto, no es posible encontrar un valor de rugosidad absoluta k_s que se ajuste a los datos experimentales mediante el uso de las ecuaciones que describen el flujo presurizado en tuberías.

Dentro de las condiciones de flujo turbulento es importante verificar en que fase de régimen turbulento se encuentran las condiciones de flujo ya sea régimen de flujo turbulento hidráulicamente liso, transicional o turbulento hidráulicamente rugoso. Este tipo de análisis se desarrollará a continuación.

5.3.2 Flujo Hidráulicamente Liso

Cuando el flujo interactúa con la pared de la tubería, se genera una zona en donde el flujo es laminar y priman las fuerzas viscosas del fluido sobre las fuerzas inerciales. Esta zona se conoce con el nombre de subcapa laminar viscosa (δ'). La relación existente entre δ' y el tamaño medio de la rugosidad de las paredes de la tubería establece la diferencia entre los flujos hidráulicamente lisos y los hidráulicamente rugosos como se muestra en la Figura 5-17. Cuando el espesor de la subcapa laminar viscosa es mayor que el tamaño medio de la rugosidad, el flujo se comporta como si la rugosidad de la tubería no existiera, es decir, como flujo hidráulicamente liso.

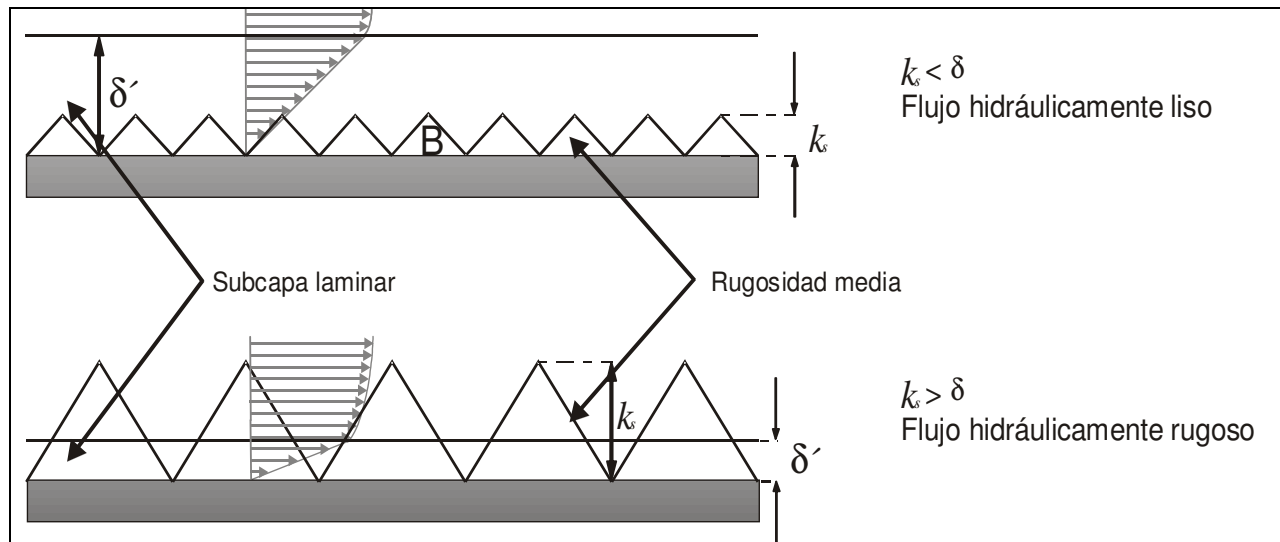


Figura 5-17 Relación entre la rugosidad relativa y la subcapa laminar viscosa.

Entre las dos condiciones extremas mostradas en la Figura 5-17, existe una zona de transición donde el flujo deja de ser laminar para convertirse en turbulento. Bajo esta condición, tanto la rugosidad de la pared como la velocidad del flujo aportan a las pérdidas de energía que se generan, como se expresa en la ecuación de Colebrook – White: $f(k_s/d, Re)$.

Los límites que definen qué tipo de flujo se presenta en un caso particular, se encuentran definidos por los trabajos realizados por Colebrook – White. De acuerdo con sus experimentos, el flujo en transición ocurre cuando:

$$0.305\delta' < k_s \leq 6.10\delta' \quad \text{Ecuación 5-5}$$

Esto es, cuando la rugosidad absoluta de la tubería se encuentra localizada entre el 30.5 % del espesor de la subcapa laminar viscosa y el 610% de la misma. Es de esperarse que cuando la rugosidad sea menor que el 30.5% de la subcapa laminar, el flujo sea hidráulicamente liso como se muestra en la parte superior de la Figura 5-17. Cuando la rugosidad es muy grande, el flujo es hidráulicamente rugoso si supera el límite de 6.1 veces el espesor de la subcapa laminar viscosa, definida mediante la Ecuación 5-6:

$$\delta' = \frac{11.6\nu}{v_*} \quad \text{Ecuación 5-6}$$

Donde v_* es la velocidad de corte del flujo, calculada mediante la Ecuación 5-7:

$$v_* = v \sqrt{\frac{f}{8}} \quad \text{Ecuación 5-7}$$

Con el fundamento teórico descrito anteriormente, se calcula si realmente los datos experimentales se encuentran clasificados como flujo hidráulicamente liso. En el ANEXO 2 se muestran los cálculos

realizados para determinar el límite que separa este tipo de flujo del flujo en transición. Los resultados de estos cálculos para todos los tramos se muestran resumidos en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2 Límites del flujo hidráulicamente liso para las pruebas de todos los tramos.

Tramo	0.305δ' Max	0.305δ' Prom	0.305δ' Min
1	2.87E-04	1.23E-04	6.56E-05
3	7.07E-04	1.70E-04	7.73E-05
5	4.55E-04	1.30E-04	6.78E-05
7	4.12E-04	1.40E-04	7.65E-05
9	7.25E-04	1.60E-04	8.27E-05
11	3.84E-04	1.32E-04	5.63E-05
14	7.00E-04	2.31E-04	9.25E-05
16	7.07E-04	2.30E-04	9.25E-05
18	7.29E-04	2.11E-04	8.05E-05
20	7.26E-04	2.18E-04	9.10E-05
22	5.48E-04	2.12E-04	6.61E-05
23	7.30E-04	2.34E-04	9.34E-05
25	7.29E-04	2.53E-04	8.66E-05
27	7.15E-04	1.70E-04	6.40E-05

Para los datos experimentales mostrados en la Tabla 5-2, se presentan condiciones de flujo hidráulicamente liso cuando las rugosidades que se encuentran son menores a valores experimentales cercanos a 5.63×10^{-5} m, por lo tanto suponiendo que la rugosidad relativa del PVC biorientado es igual a la del PVC común la cual es de aproximadamente de 1.5×10^{-6} se puede concluir que las condiciones de flujo son turbulentas hidráulicamente lisas en todo momento y que el factor de fricción no depende de la rugosidad relativa.

5.3.3 Límites del Coeficiente de Rugosidad Absoluta

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 5-18.

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.

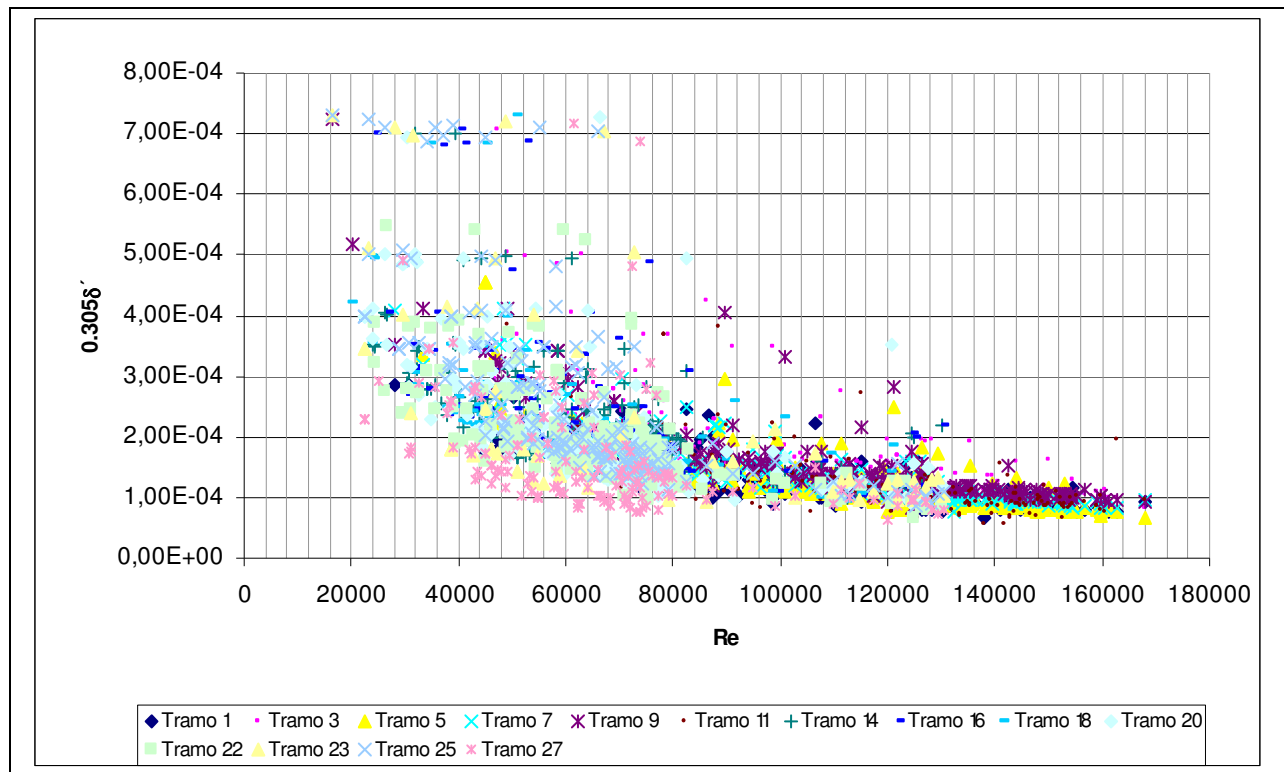


Figura 5-18 Comportamiento del límite de los flujos en los datos experimentales.

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.

En el ANEXO 3 se presentan los cálculos realizados para determinar el caudal necesario para que la rugosidad teórica de la tubería de BIAXIAL empiece a afectar las pérdidas por fricción que se generan, es decir, el caudal necesario para que la subcapa laminar viscosa disminuya hasta que la rugosidad teórica supere el límite de $0.305\delta'$.

Como se observa en los anexos, y suponiendo que la rugosidad de las tuberías de BIAXIAL es igual a las de PVC ($k_s = 1.5 \times 10^{-6}$ m), se requiere un caudal de 1453 L/s para que ésta sea equivalente a $0.305\delta'$, lo que en una tubería de 6 pulgadas equivale a una velocidad de 72.28 m/s. Esto en la realidad no es factible, por lo que se puede asegurar que las tuberías de 6" de BIAXIAL siempre van a estar trabajando bajo flujo hidráulicamente liso y por lo tanto, la rugosidad del material no va a afectar las pérdidas de energía que se generen.

La conclusión a la que se llega en el párrafo anterior, permite asegurar que las pérdidas de energía que se van a producir en una tubería de 6" BIAXIAL, son muy pequeñas en comparación con otros materiales y que además su rugosidad absoluta k_s no va a afectar el régimen de flujo.

Adicionalmente, no se puede corroborar el valor teórico de las rugosidades pero si se puede acotar superiormente su valor, y se puede asegurar que con base en los resultados experimentales y en los

números de Reynolds que se manejaron en el montaje, la rugosidad de las tuberías de BIAXIAL de 6" debe ser menor que $k_s = 5.63 \times 10^{-5}$ m.

Para cuando el flujo llegue a considerarse como transicional el factor de fricción conserva un valor del orden de 0.008 como lo demuestra el ANEXO 3.

Realizando un análisis estadístico a los valores del factor de fricción f determinados directamente por las caídas de presión despejados en la Ecuación 5-3 por medio de intervalos de confianza, como los realizados para hallar los coeficientes de pérdidas menores de los accesorios utilizados. Se obtuvo un valor promedio del f de 0.022 ± 0.0007 con un 95% de nivel de confianza. Lo anterior se enuncia para ilustrar un número representativo de los datos observados pero es importante aclarar que el factor de fricción es variable y que depende de las distintas condiciones en que se puede encontrar el flujo.

6 Conclusiones

6.1 Montaje Físico

La infraestructura existente dentro del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes permitió realizar el montaje de pruebas para la determinación de rugosidad absoluta, coeficiente de pérdidas menores y factor de fricción para tuberías de Agua Potable de PVC Biorientado Dúctil (Biaxial®) de 6 pulgadas.

Con respecto al comportamiento del montaje durante las pruebas es posible concluir que:

- Las longitudes de tramos rectos, de 5.4 metros en promedio, con las cuales cuenta el montaje de tubería biaxial, inicialmente proveían suficiente longitud para desarrollar una pérdida apreciable de cabeza piezométrica. Con la realización de las pruebas se notó que las diferencias piezométricas para los caudales más bajos que se midieron no eran apreciables, lo que generó confusiones en la lectura y, por lo tanto, una considerable cantidad de resultados confusos.
- Dadas las condiciones del montaje sólo se probaron dos codos de 90° de radio largo, mientras que se ensayaron diez uniones campana – espigo. Esto hace que se pueda tener una mayor confianza a los resultados de las uniones, aunque los resultados de los dos codos fueron bastante parecidos lo cual indica que son muy confiables.
- Dentro del montaje fue necesario utilizar accesorios de hierro dúctil, entre ellos una tee de 6” y dos reducciones de 6”x 4”, los cuales no fueron analizados; estos simplemente fueron utilizados debido a que no existía disponibilidad en el momento de las piezas en PVC.
- Muchos resultados negativos registrados en las pruebas de laboratorio suponen errores constructivos en el montaje, ya sea por desniveles en la colocación de las tuberías, por exceso de soldadura en las uniones, por taponamientos en la entrada de los piezómetros o por demasiada inserción de los mismos dentro de la tubería.
- Un segundo gran factor que se relaciona con los resultados negativos, es la variabilidad en cabeza de suministro del tanque elevado hacia el sistema de tuberías el cual, siendo afectado por factores climáticos como el viento, presentaba oscilaciones en su nivel trasladando esas afecciones al montaje y afectando la lectura de los piezómetros.

6.2 Determinación de las Pérdidas Menores

El ítem de pérdidas menores del presente informe corresponde a los análisis de las caídas de energía ocasionadas por diez uniones campana-espigo y dos codos de 90° radio largo colocados en el montaje, para los cuales se puede concluir:

- 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 los cuales se analizaron las pérdidas menores fueron los codos de 90° 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.
- Durante el tiempo de pruebas se registraron una gran cantidad de valores negativos los cuales confundieron de una manera considerable el análisis de los datos. Tales resultados se relacionan con los problemas explicados anteriormente para el montaje.

6.3 Determinación de las Pérdidas por Fricción

Con respecto a las pérdidas por fricción determinadas para 14 tramos de tubería recta, es posible concluir que:

- 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 de ningún sector 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 obtenido 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 5.63×10^{-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 +/- 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.

7 Recomendaciones

La experiencia obtenida al realizar experimentos para determinar el factor de fricción, la rugosidad relativa y el coeficiente de pérdidas menores para tuberías de acueducto Biaxial de 6 pulgadas permite recomendar que:

- Para un mejor análisis, tanto de las pérdidas menores como de las pérdidas por fricción, es necesario contar con un rango amplio de números de Reynolds, lo cual se puede lograr a partir de una mayor altura en el tanque de almacenamiento y colocando una válvula de entrada al sistema más sensible a los cambios de caudal. Por lo tanto, se recomienda extender esta investigación con mejoras en el montaje actual.
- Aunque existe una investigación anterior para la tubería biaxial de 4 pulgadas y en el presente caso se presentan resultados para tubería de 6 pulgadas; se recomienda continuar la investigación para otros diámetros y obtener una conclusión definitiva sobre el material de PVC biorientado dúctil (BIAXIAL).
- Para los casos en que se requiera evaluar caudales bajos, se recomienda la utilización de piezómetros diferenciales que utilicen fluidos diferentes al agua (con densidad menor) con los cuales se obtengan diferencias mas apreciables de nivel entre los piezómetros.

8 Referencias

- [1] Saldarriaga, Juan G. Hidráulica de Tuberías. Mc Graw Hill. 2000

- [2] Street R, Watters G, Vennard J. Elementary Fluid Mechanics. John Wiley & Sons. Séptima Edición. 1996. Página 366

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

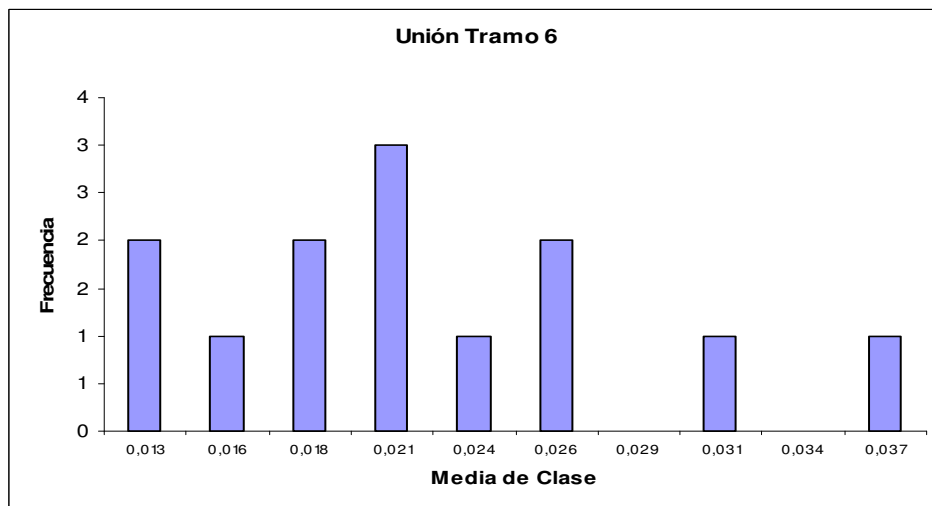
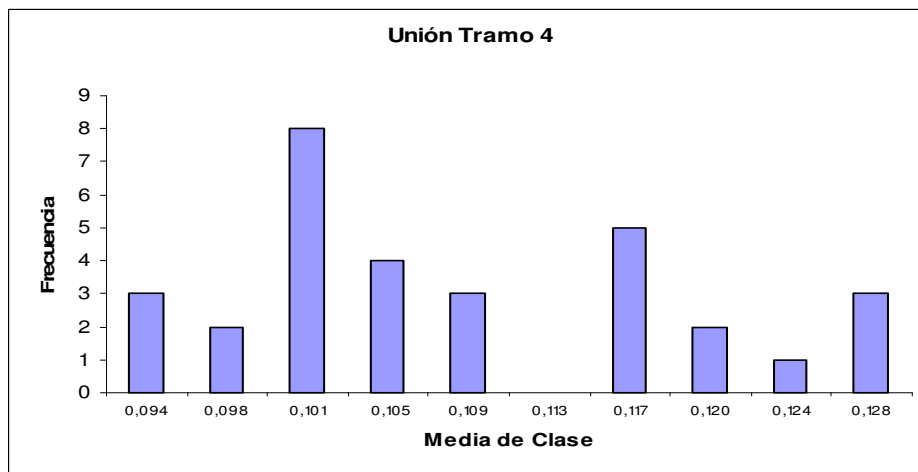
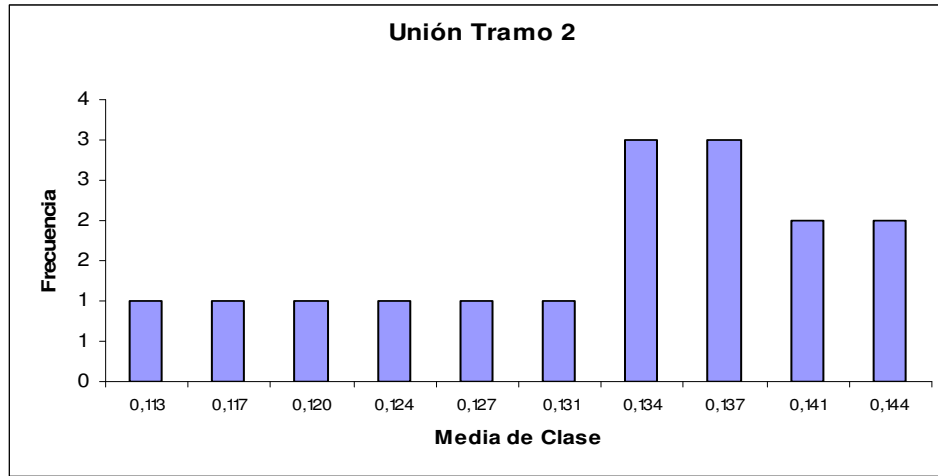
- [4] Giles, Ronald. Mecánica de los fluidos e hidráulica. Mc Graw Hill.

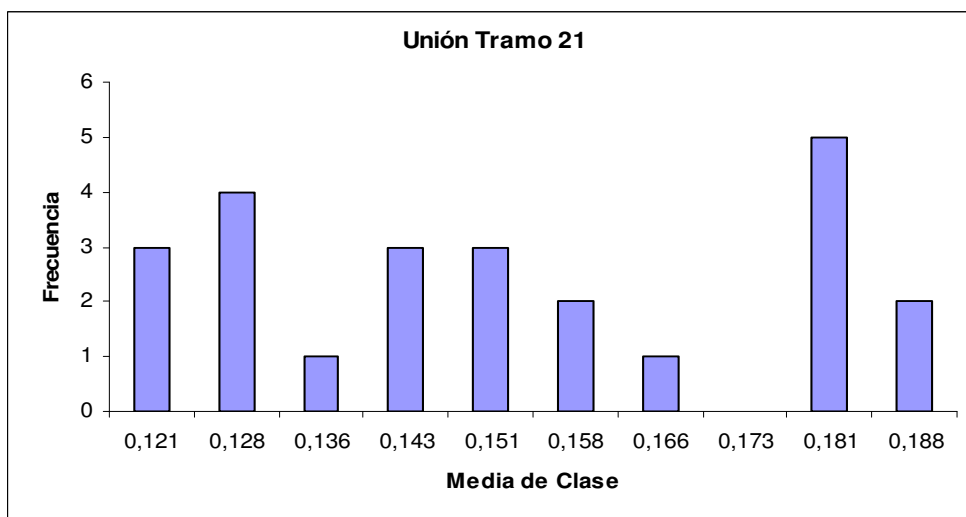
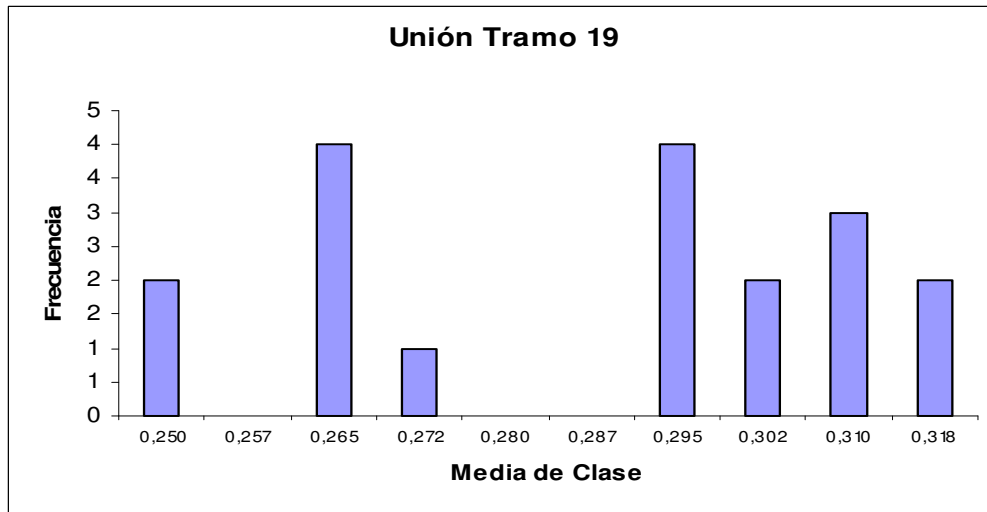
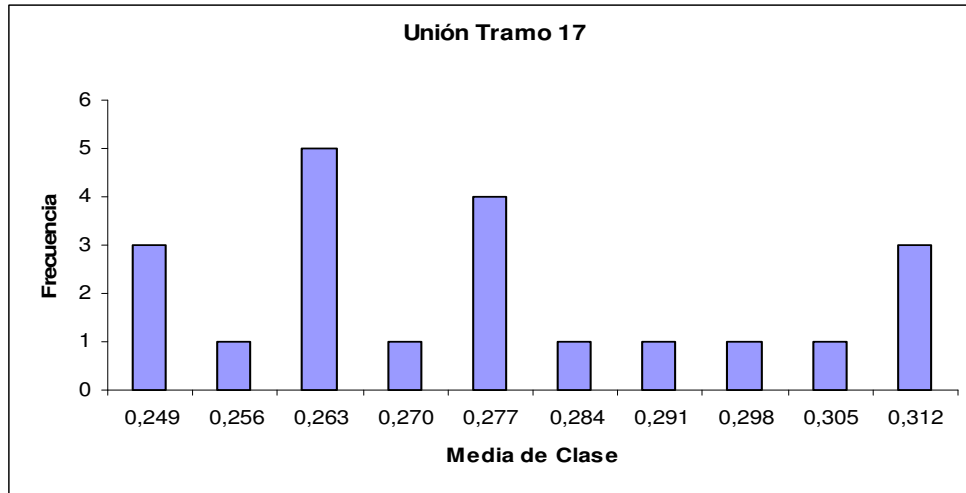
- [5] Informe Cátedra PAVCO. Determinación Experimental de la Rugosidad Absoluta k_s y el Coeficiente de Pérdidas menores k_m en Tuberías de Agua Potable de PVC Biorientado Dúctil (Biaxial) de 4" (2006).

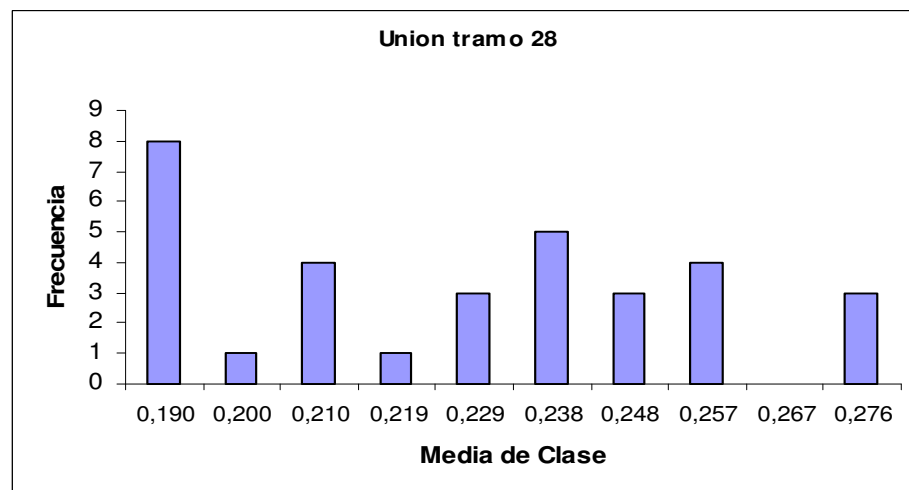
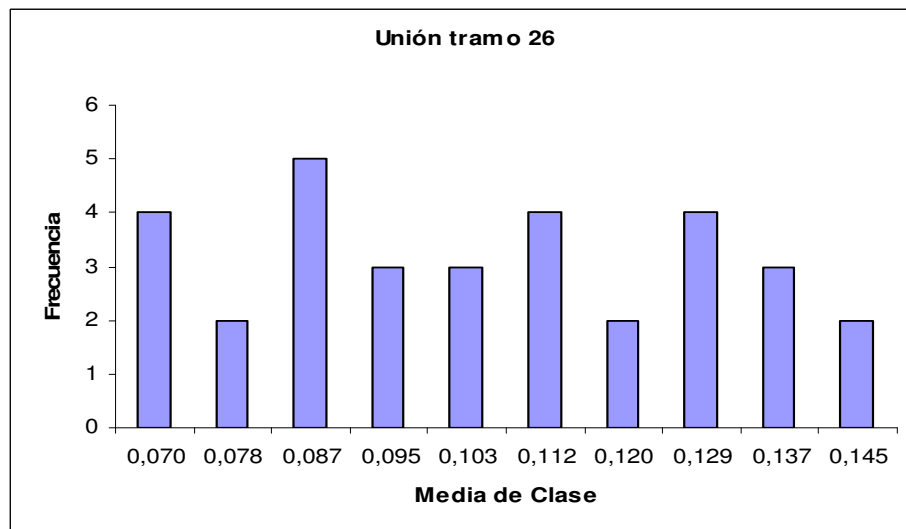
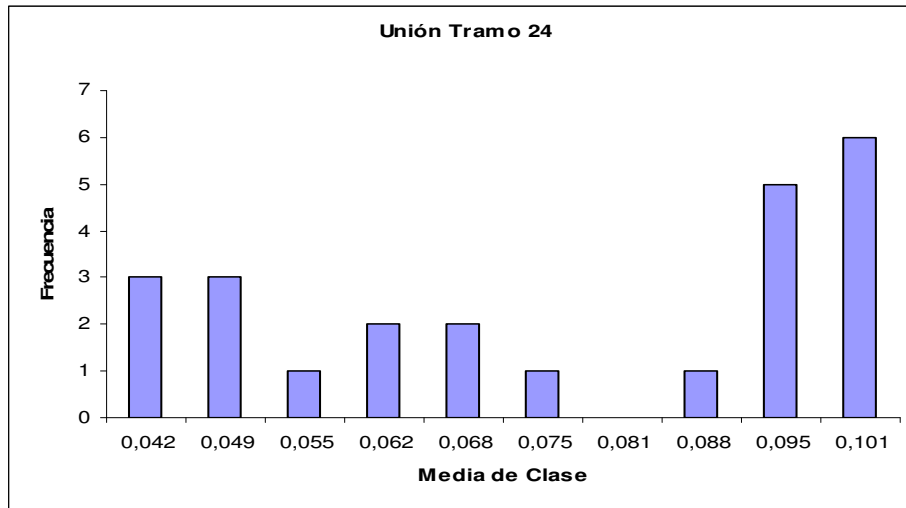
ANEXO 1

Histogramas de frecuencia del coeficiente de pérdidas menores k_m en los diferentes accesorios de la red para datos depurados

- **Uniones Campana- Espigo**



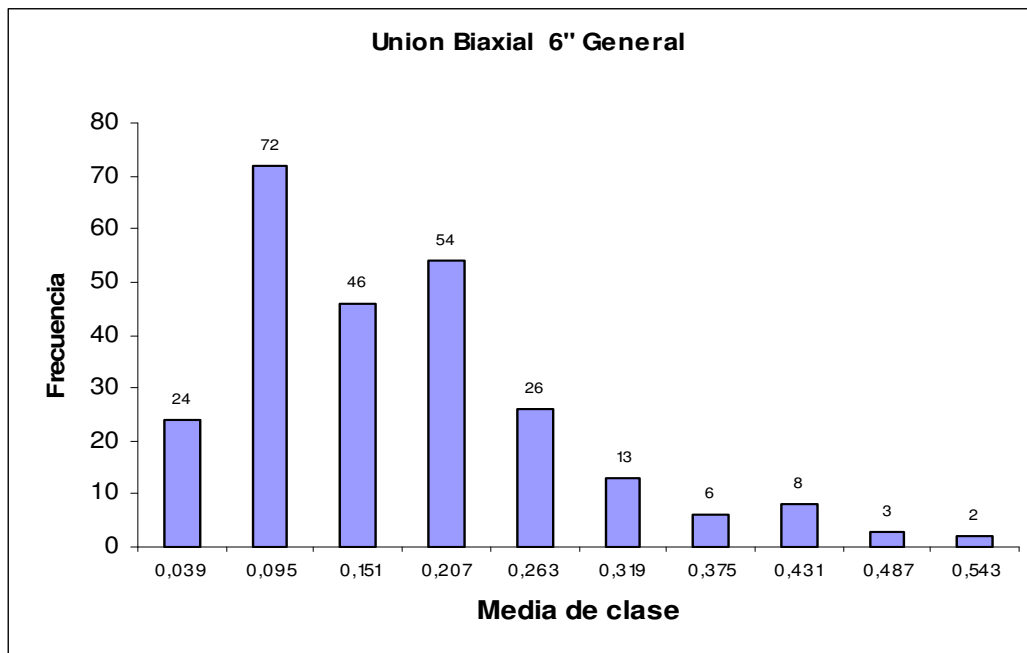




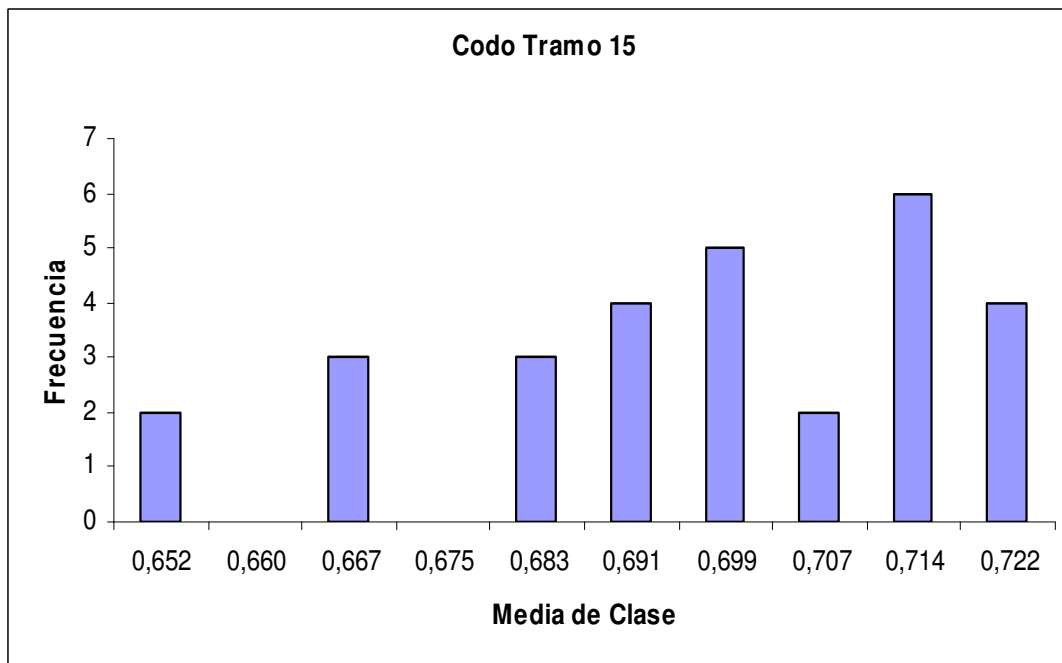
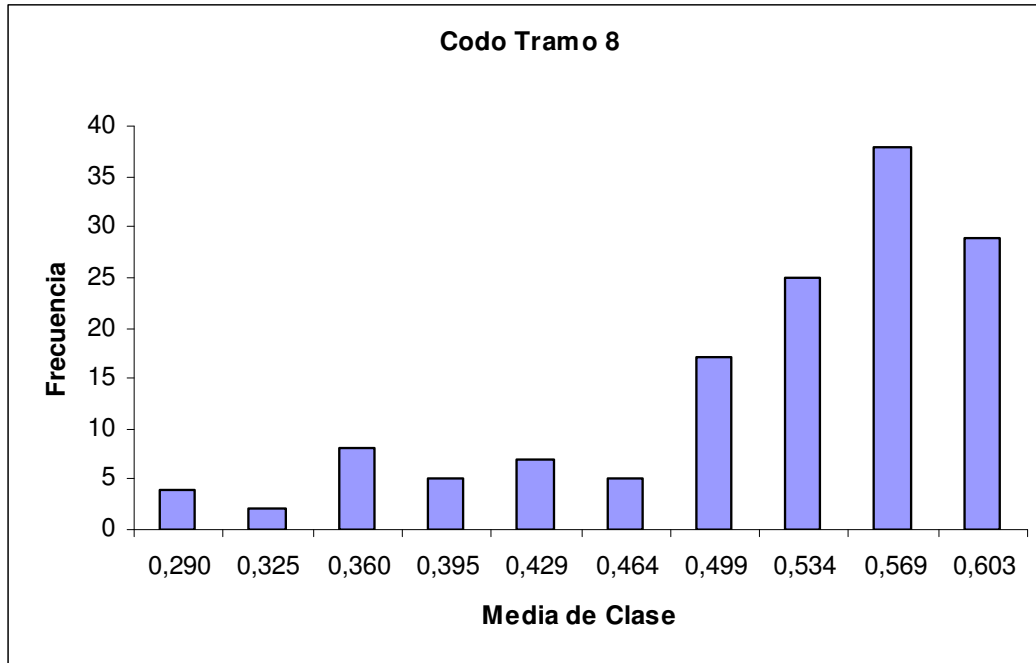
- **Análisis estadístico general para uniones campana- espigo con todos los datos depurados**

Intervalo	Clase Inferior	Clase Superior	Frecuencia f(i)	Media de Clase x(i)	f(i)*x(i)	x(i)-Media	(x(i)-Media) ²	((x(i)-Media) ²)* f(i)
1	0,011	0,067	24	0,039	0,936	-0,139	0,019	0,462
2	0,067	0,123	72	0,095	6,84	-0,083	0,007	0,492
3	0,123	0,179	46	0,151	6,946	-0,027	0,001	0,033
4	0,179	0,235	54	0,207	11,178	0,029	0,001	0,046
5	0,235	0,291	26	0,263	6,838	0,085	0,007	0,189
6	0,291	0,347	13	0,319	4,147	0,141	0,020	0,260
7	0,347	0,403	6	0,375	2,25	0,197	0,039	0,234
8	0,403	0,459	8	0,431	3,448	0,253	0,064	0,513
9	0,459	0,515	3	0,487	1,461	0,309	0,096	0,287
10	0,515	0,571	2	0,543	1,086	0,365	0,133	0,267
$\Sigma =$			254	$\Sigma =$	45		$\Sigma =$	3

Media =	0,178	Desviación =	0,105	Intervalo 95% =	0,013
Valor esperado al 95% de Confianza= Media \pm Intervalo 95%					



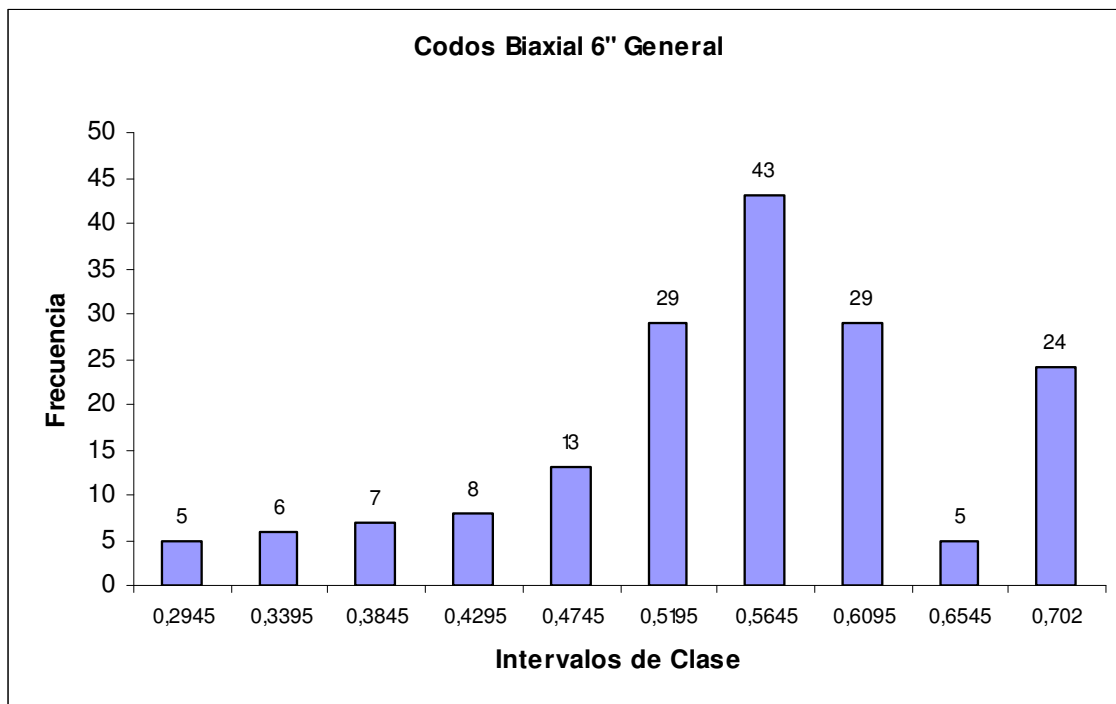
- **Codo 90° Radio Largo**



- **Análisis estadístico general para codos 90° radio largo con todos los datos depurados:**

Intervalo	Clase Inferior	Clase Superior	Frecuencia f(i)	Media de Clase x(i)	f(i)*x(i)	x(i)-Media	(x(i)-Media) ²	((x(i)-Media) ²) ^r f(i)
1	0,272	0,317	5	0,2945	1,473	-0,255	0,065	0,326
2	0,317	0,362	6	0,3395	2,037	-0,210	0,044	0,266
3	0,362	0,407	7	0,3845	2,692	-0,165	0,027	0,192
4	0,407	0,452	8	0,4295	3,436	-0,120	0,015	0,116
5	0,452	0,497	13	0,4745	6,169	-0,075	0,006	0,074
6	0,497	0,542	29	0,5195	15,066	-0,030	0,001	0,027
7	0,542	0,587	43	0,5645	24,274	0,015	0,000	0,009
8	0,587	0,632	29	0,6095	17,676	0,060	0,004	0,103
9	0,632	0,677	5	0,6545	3,273	0,105	0,011	0,055
10	0,677	0,727	24	0,702	16,848	0,152	0,023	0,555
			$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$	$\Sigma =$
			169	92,94			1,722	

Media =	0,550	Desviación =	0,101	Intervalo 95% =	0,015
Valor esperado al 95% de Confianza= Media \pm Intervalo 95%					



ANEXO 2

Cálculo de la subcapa laminar viscosa y el límite de transición del flujo para cada uno de los tramos analizados

Tramo 1

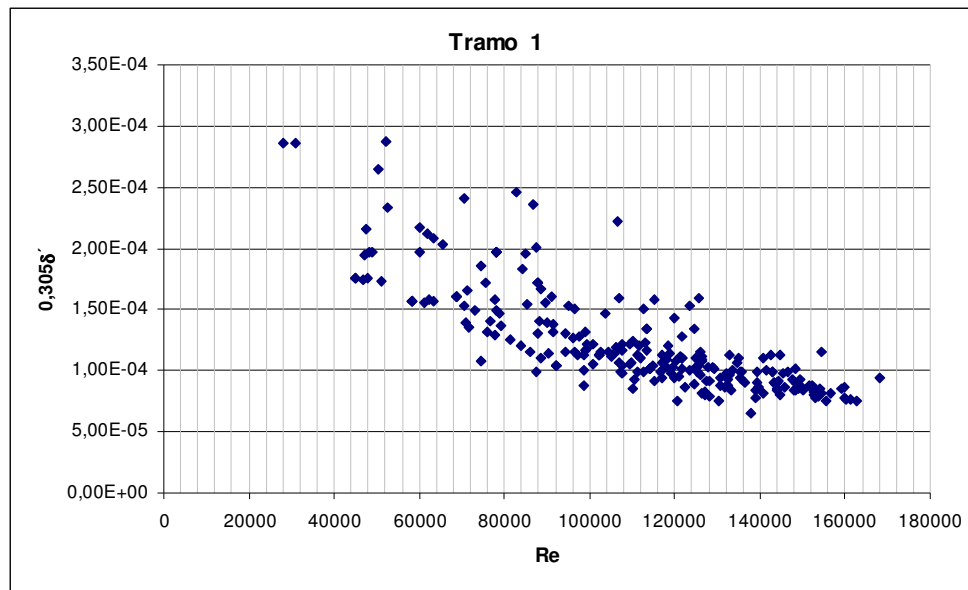
Cálculos Típicos: Primeros días de pruebas

	f	Re	Ks	V	V*	δ'	0,305 δ'
17/08/2006 (1)	0,0230	161262,847	2,37E-04	1,028	0,055	2,53E-04	7,71E-05
	0,0218	149104,212	1,75E-04	0,951	0,050	2,81E-04	8,56E-05
	0,0158	132852,742	-2,71E-05	0,847	0,038	3,70E-04	1,13E-04
	0,0212	118021,866	1,32E-04	0,752	0,039	3,59E-04	1,10E-04
	0,0235	100924,971	2,27E-04	0,643	0,035	3,99E-04	1,22E-04
	0,0128	85059,1403	-1,32E-04	0,542	0,022	6,43E-04	1,96E-04
	0,0157	52341,7775	-1,66E-04	0,334	0,015	9,41E-04	2,87E-04
	0,0208	61780,4595	3,45E-05	0,394	0,020	6,93E-04	2,11E-04
	0,0272	87757,6956	4,44E-04	0,560	0,033	4,27E-04	1,30E-04
	0,0190	110207,85	4,18E-05	0,703	0,034	4,07E-04	1,24E-04

Resultados del límite del flujo 0,305 δ' para todas las pruebas del tramo

0.305 δ' Max	2,87E-04
0.305 δ' Prom	1,23E-04
0.305 δ' Min	6,56E-05

Gráfica del límite del flujo vs. Número de Reynolds



Tramo 3

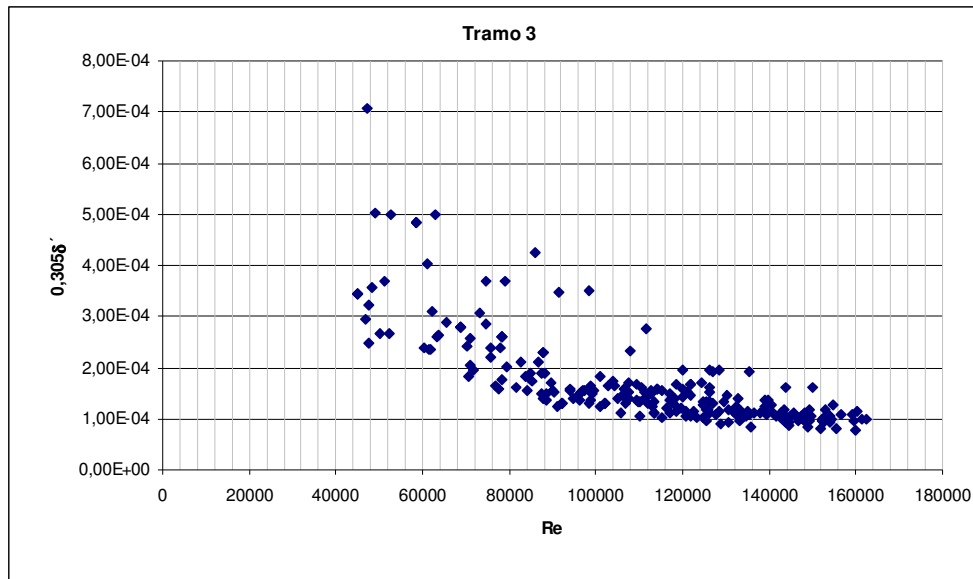
Cálculos Típicos: Primeros días de pruebas

	f	Re	Ks	V	V*	δ'	0,305 δ'
17/08/2006 (1)	0,0139	161262,847	-4,35E-05	1,0282	0,0429	3,24E-04	9,89E-05
	0,0143	149104,212	-4,49E-05	0,9507	0,0401	3,47E-04	1,06E-04
	0,0176	132852,742	1,53E-05	0,8470	0,0397	3,51E-04	1,07E-04
	0,0130	118021,866	-8,63E-05	0,7525	0,0303	4,59E-04	1,40E-04
	0,0102	100924,971	-1,39E-04	0,6435	0,0230	6,05E-04	1,84E-04
	0,0136	85059,1403	-1,19E-04	0,5423	0,0224	6,23E-04	1,90E-04
	0,0181	52341,7775	-9,63E-05	0,3337	0,0159	8,76E-04	2,67E-04
	0,0168	61780,4595	-1,03E-04	0,3939	0,0181	7,71E-04	2,35E-04
	0,0241	87757,6956	2,46E-04	0,5595	0,0307	4,53E-04	1,38E-04
	0,0258	110207,85	3,75E-04	0,7027	0,0399	3,49E-04	1,06E-04

Resultados del límite del flujo 0,305 δ' para todas las pruebas del tramo

0.305 δ' Max	7,07E-04
0.305 δ' Prom	1,70E-04
0.305 δ' Min	7,73E-05

Gráfica del límite del flujo vs. Número de Reynolds



Tramo 5

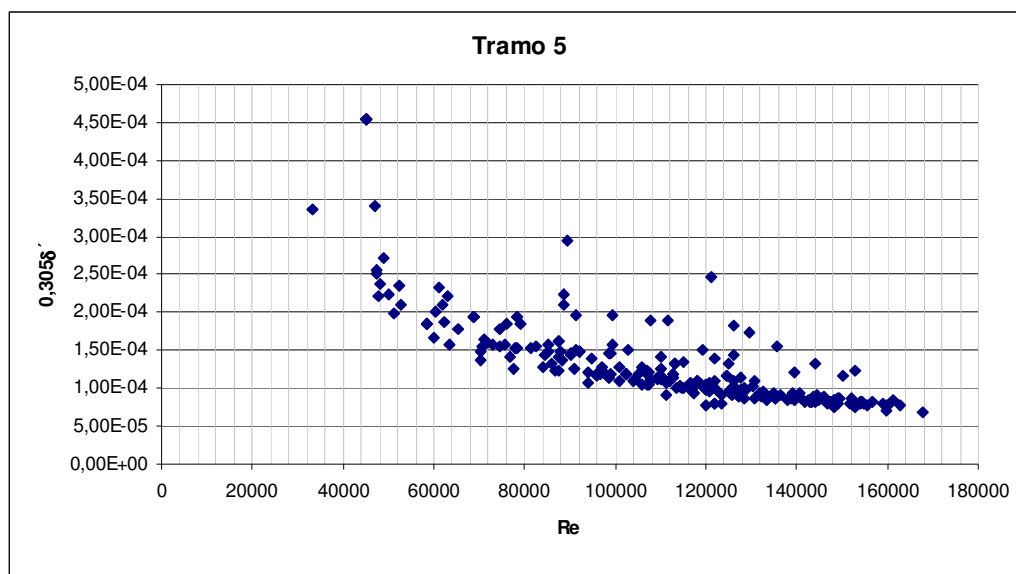
Cálculos Típicos: Primeros días de pruebas

	f	Re	Ks	V	V*	δ'	$0,305\delta'$
17/08/2006 (1)	0,0194	161262,847	8,61E-05	1,03	0,05	2,75E-04	8,39E-05
	0,0256	149104,212	3,80E-04	0,95	0,05	2,59E-04	7,90E-05
	0,0253	132852,742	3,56E-04	0,85	0,05	2,92E-04	8,91E-05
	0,0216	118021,866	1,49E-04	0,75	0,04	3,56E-04	1,09E-04
	0,0295	100924,971	6,44E-04	0,64	0,04	3,56E-04	1,09E-04
	0,0199	85059,1403	4,50E-05	0,54	0,03	5,15E-04	1,57E-04
	0,0236	52341,7775	1,44E-04	0,33	0,02	7,68E-04	2,34E-04
	0,0213	61780,4595	5,59E-05	0,39	0,02	6,85E-04	2,09E-04
	0,0211	87757,6956	9,66E-05	0,56	0,03	4,85E-04	1,48E-04
	0,0187	110207,85	3,25E-05	0,70	0,03	4,10E-04	1,25E-04

Resultados del límite del flujo $0,305\delta'$ para todas las pruebas del tramo

$0,305\delta'$ Max	4,55E-04
$0,305\delta'$ Prom	1,30E-04
$0,305\delta'$ Min	6,78E-05

Gráfica del límite del flujo vs. Número de Reynolds



Tramo 7

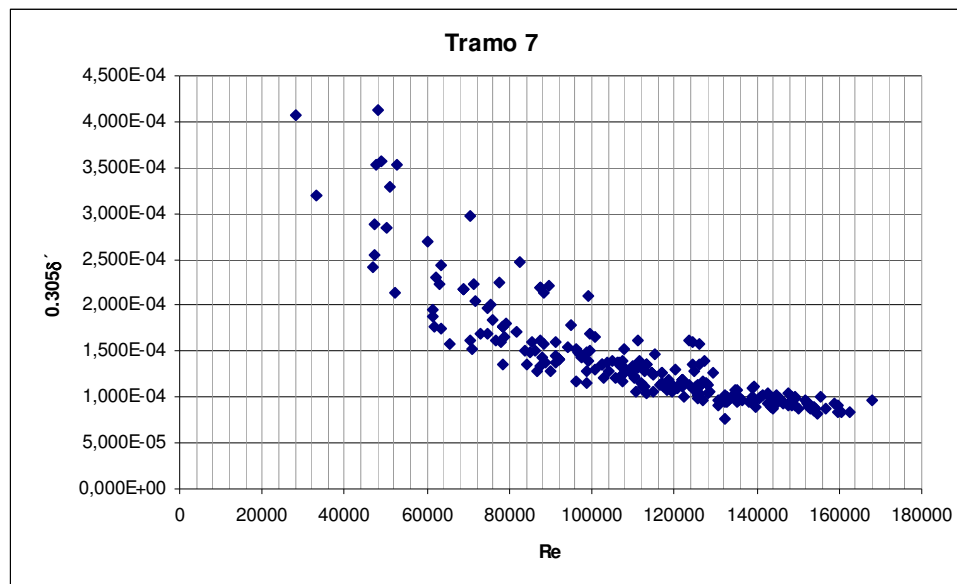
Cálculos Típicos: Primeros días de pruebas

	f	Re	Ks	V	V*	δ'	$0,305\delta'$
17/08/2006 (1)	0,0164	149104,212	-4,21E-06	0,95	0,04	3,23E-04	9,87E-05
	0,0222	132852,742	1,88E-04	0,85	0,04	3,12E-04	9,51E-05
	0,0220	118021,866	1,66E-04	0,75	0,04	3,53E-04	1,08E-04
	0,0205	100924,971	8,72E-05	0,64	0,03	4,27E-04	1,30E-04
	0,0223	85059,1403	1,50E-04	0,54	0,03	4,86E-04	1,48E-04
	0,0285	52341,7775	4,78E-04	0,33	0,02	6,99E-04	2,13E-04
	0,0299	61780,4595	6,20E-04	0,39	0,02	5,78E-04	1,76E-04
	0,0222	87757,6956	1,48E-04	0,56	0,03	4,72E-04	1,44E-04
	0,0200	110207,85	7,58E-05	0,70	0,04	3,97E-04	1,21E-04

Resultados del límite del flujo $0,305\delta'$ para todas las pruebas del tramo

$0.305\delta'$ Max	4,12E-04
$0.305\delta'$ Prom	1,40E-04
$0.305\delta'$ Min	7,65E-05

Gráfica del límite del flujo vs. Número de Reynolds



Tramo 9

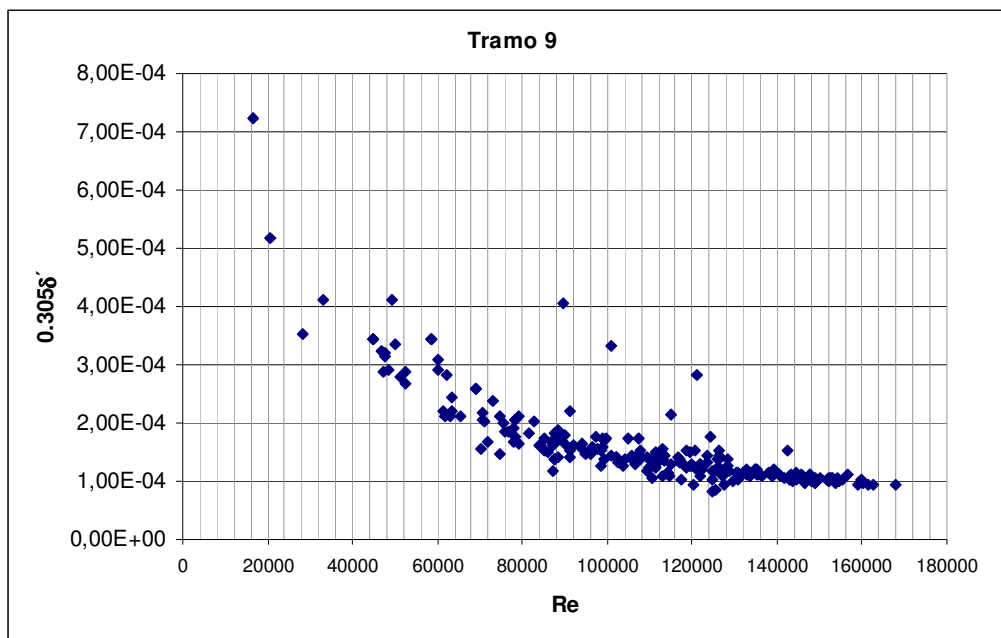
Cálculos Típicos: Primeros días de pruebas

	f	Re	Ks	V	V*	δ'	0,305 δ'
17/08/2006 (1)	0,0158	161262,847	-1,17E-05	1,03	0,05	3,05E-04	9,30E-05
	0,0167	149104,212	3,16E-06	0,95	0,04	3,20E-04	9,77E-05
	0,0160	132852,742	-2,22E-05	0,85	0,04	3,67E-04	1,12E-04
	0,0150	118021,866	-5,40E-05	0,75	0,03	4,27E-04	1,30E-04
	0,0171	100924,971	-2,41E-05	0,64	0,03	4,68E-04	1,43E-04
	0,0165	85059,1403	-5,96E-05	0,54	0,02	5,65E-04	1,72E-04
	0,0156	52341,7775	-1,70E-04	0,33	0,01	9,46E-04	2,89E-04
	0,0206	61780,4595	2,56E-05	0,39	0,02	6,97E-04	2,13E-04
	0,0139	87757,6956	-1,10E-04	0,56	0,02	5,97E-04	1,82E-04
	0,0153	110207,85	-5,57E-05	0,70	0,03	4,53E-04	1,38E-04

Resultados del límite del flujo 0,305 δ' para todas las pruebas del tramo

0.305 δ' Max	7,25E-04
0.305 δ' Prom	1,60E-04
0.305 δ' Min	8,27E-05

Gráfica del límite del flujo vs. Número de Reynolds



Tramo 11

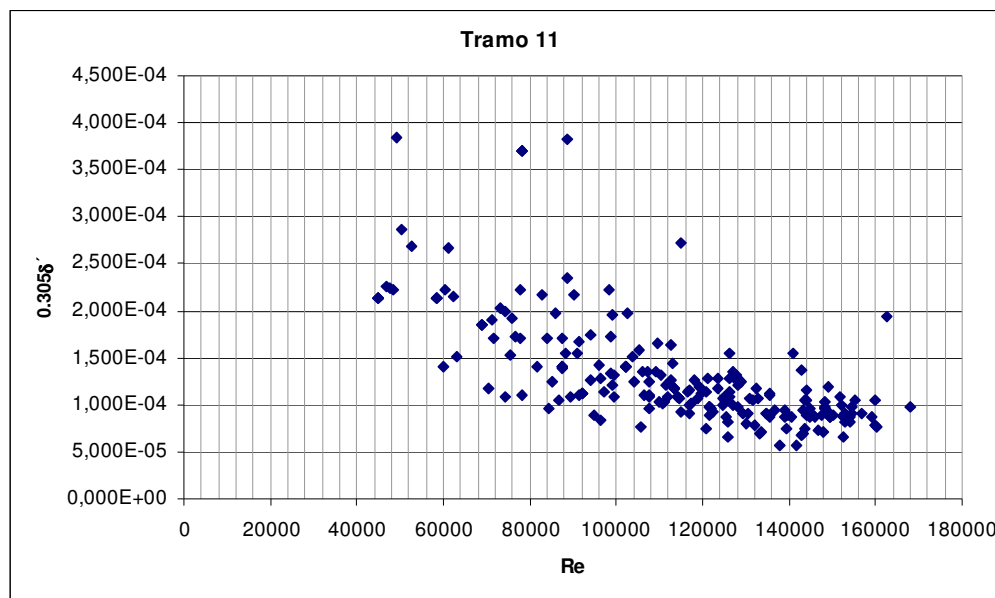
Cálculos Típicos: Primeros días de pruebas

	f	Re	Ks	v	v*	δ'	0,305 δ'
17/08/2006(1)	0.0356	143062.306	1.27E-03	0.91	0.06	2.29E-04	6.98E-05
	0.0330	139353.011	9.89E-04	0.89	0.06	2.44E-04	7.44E-05
	0.0390	133521.319	1.68E-03	0.85	0.06	2.34E-04	7.14E-05
	0.0334	125625.806	1.03E-03	0.80	0.05	2.69E-04	8.20E-05
	0.0333	107679.032	9.97E-04	0.69	0.04	3.14E-04	9.59E-05
	0.0234	96522.0905	2.18E-04	0.62	0.03	4.18E-04	1.28E-04
	0.0160	87329.0836	-6.95E-05	0.56	0.02	5.60E-04	1.71E-04
	0.0479	78289.9472	2.99E-03	0.50	0.04	3.60E-04	1.10E-04

Resultados del límite del flujo 0,305 δ' para todas las pruebas del tramo

0.305 δ' Max	3,84E-04
0.305 δ' Prom	1,32E-04
0.305 δ' Min	5,63E-05

Gráfica del límite del flujo vs. Número de Reynolds



Tramo 14

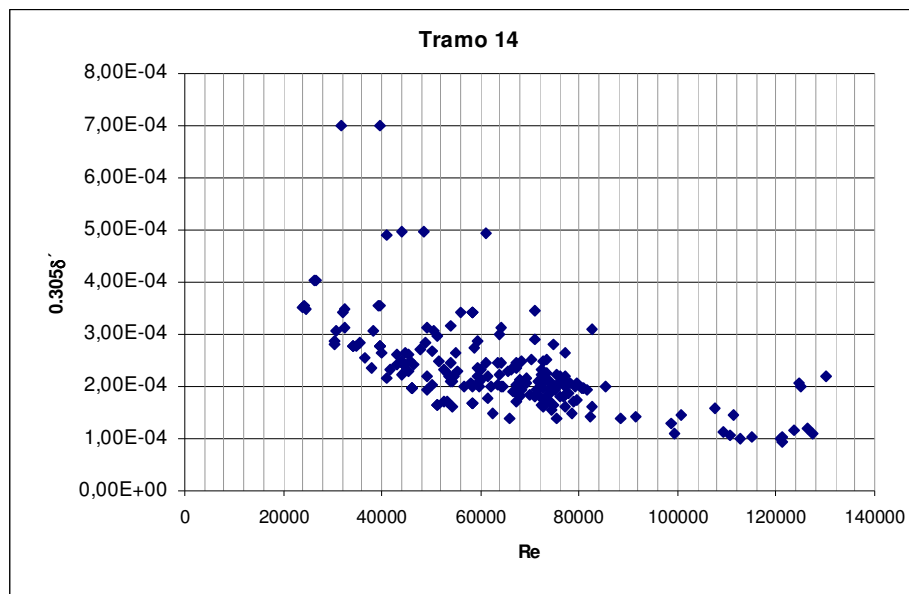
Cálculos Típicos: Primeros días de pruebas

	f	Re	Ks	V	V*	δ'	0,305 δ'
17/08/2006 (1)	0.0263	82255.9923	3.80E-04	0.524	0.030	4.63E-04	1.41E-04
	0.0144	75808.1484	-1.23E-04	0.483	0.020	6.79E-04	2.07E-04
	0.0168	67786.8444	-8.63E-05	0.432	0.020	7.02E-04	2.14E-04
	0.0217	59942.2268	7.21E-05	0.382	0.020	6.99E-04	2.13E-04
	0.0214	51483.1231	3.01E-05	0.328	0.017	8.19E-04	2.50E-04
	0.0313	40044.0275	6.74E-04	0.255	0.016	8.72E-04	2.66E-04
	0.0316	26209.1249	5.95E-04	0.167	0.011	1.32E-03	4.04E-04
	0.0254	44757.9895	2.26E-04	0.285	0.016	8.65E-04	2.64E-04
	0.0169	54899.6481	-1.24E-04	0.350	0.016	8.65E-04	2.64E-04

Resultados del límite del flujo 0,305 δ' para todas las pruebas del tramo

0.305 δ' Max	7,00E-04
0.305 δ' Prom	2,31E-04
0.305 δ' Min	9,25E-05

Gráfica del límite del flujo vs. Número de Reynolds



Tramo 16

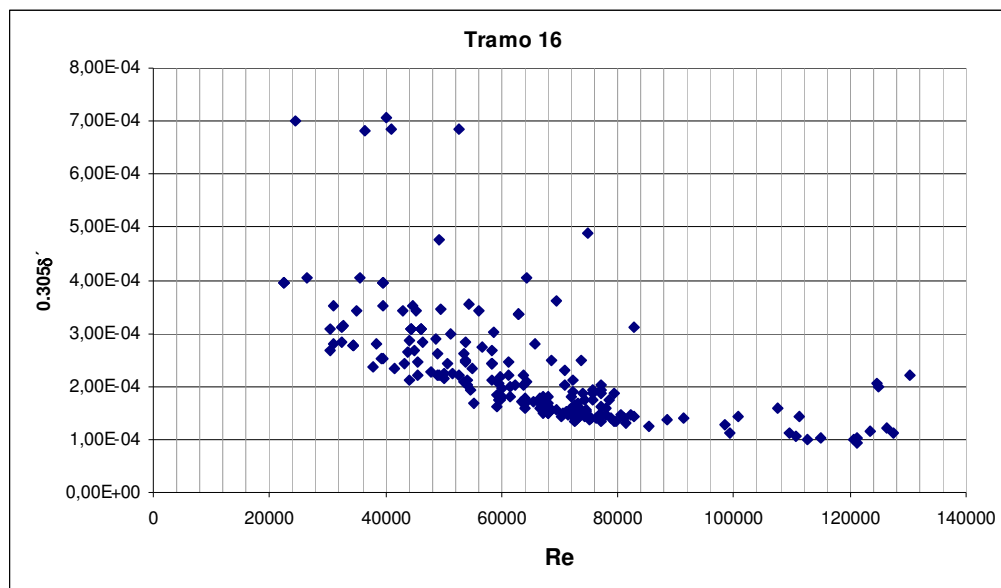
Cálculos Típicos: Primeros días de pruebas

	f	Re	Ks	V	V*	δ'	0,305 δ'
17/08/2006 (1)	0.0241	82255.9923	2.39E-04	0.524	0.029	4.84E-04	1.48E-04
	0.0202	75808.1484	4.12E-05	0.483	0.024	5.73E-04	1.75E-04
	0.0288	67786.8444	5.40E-04	0.432	0.026	5.37E-04	1.64E-04
	0.0254	59942.2268	2.79E-04	0.382	0.022	6.46E-04	1.97E-04
	0.0265	51483.1231	3.27E-04	0.328	0.019	7.36E-04	2.25E-04
	0.0044	40044.0275	-5.57E-04	0.255	0.006	2.32E-03	7.07E-04
	0.0300	31000.3817	4.93E-04	0.198	0.012	1.15E-03	3.51E-04
	0.0144	44757.9895	-2.36E-04	0.285	0.012	1.15E-03	3.51E-04
	0.02153	54899.6481	4.73E-05	0.3500	0.0182	7.67E-04	2.34E-04

Resultados del límite del flujo **0,305 δ'** para todas las pruebas del tramo

0.305 δ' Max	7,07E-04
0.305 δ' Prom	2,30E-04
0.305 δ' Min	9,25E-05

Gráfica del límite del flujo vs. Número de Reynolds



Tramo 18

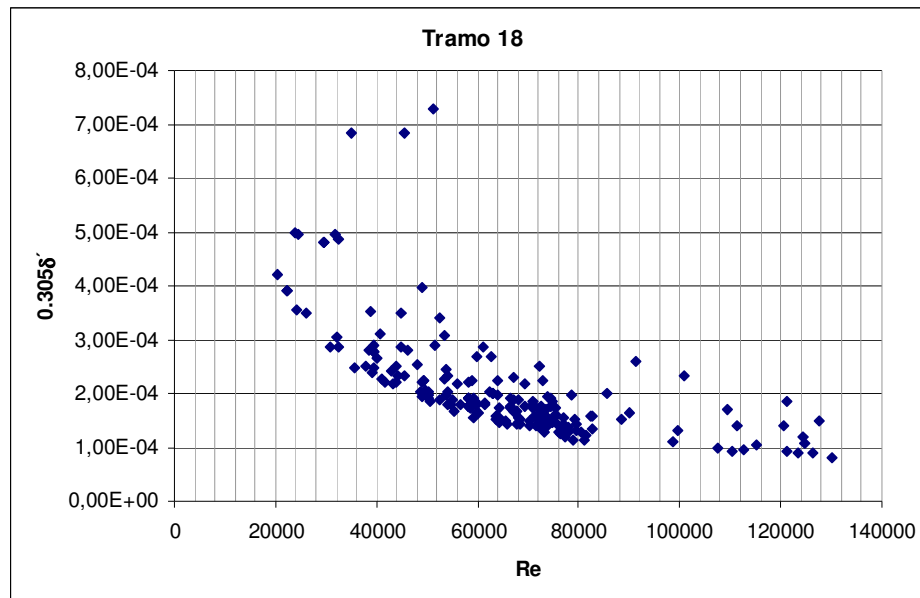
Cálculos Típicos: Primeros días de pruebas

	f	Re	Ks	V	V*	δ'	0,305 δ'
17/08/2006 (1)	0.0212	82255.9923	9.52E-05	0.524	0.027	5.15E-04	1.57E-04
	0.0275	67786.8444	4.38E-04	0.432	0.025	5.50E-04	1.68E-04
	0.0138	59942.2268	-1.78E-04	0.382	0.016	8.77E-04	2.67E-04
	0.0160	51483.1231	-1.61E-04	0.328	0.015	9.47E-04	2.89E-04
	0.0312	40044.0275	6.68E-04	0.255	0.016	8.72E-04	2.66E-04
	0.0421	26209.1249	1.89E-03	0.167	0.012	1.15E-03	3.50E-04
	0.0454	31000.3817	2.43E-03	0.198	0.015	9.35E-04	2.85E-04
	0.01451	44757.9895	-2.34E-04	0.2854	0.0122	1.15E-03	3.49E-04
	0.0337	54899.6481	9.76E-04	0.3500	0.0227	6.12E-04	1.87E-04

Resultados del límite del flujo 0,305 δ' para todas las pruebas del tramo

0.305 δ' Max	7,29E-04
0.305 δ' Prom	2,11E-04
0.305 δ' Min	8,05E-05

Gráfica del límite del flujo vs. Número de Reynolds



Tramo 20

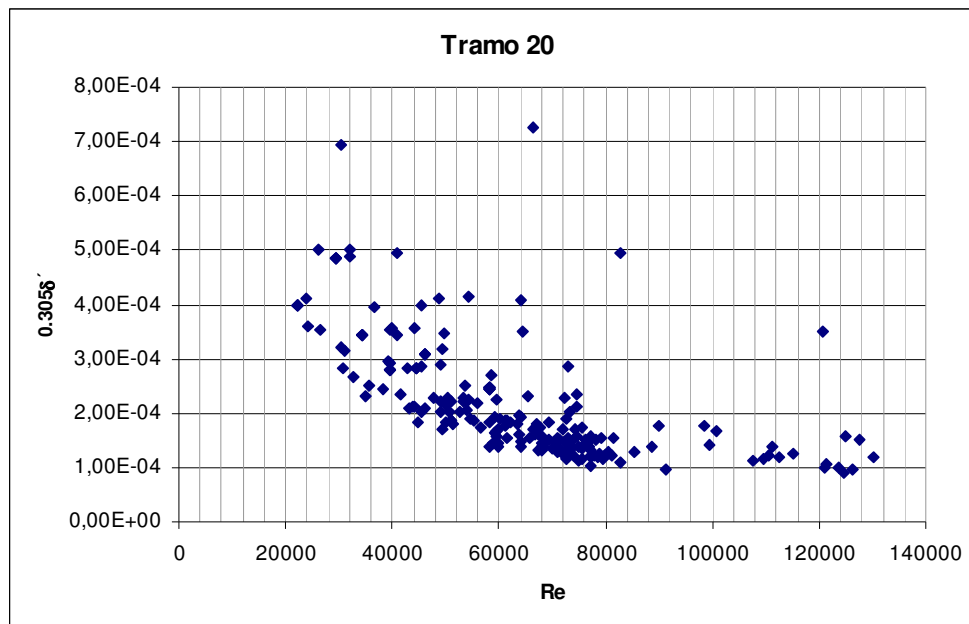
Cálculos Típicos: Primeros días de pruebas

	f	Re	Ks	V	V*	δ'	0,305 δ'
17/08/2006 (1)	0.0304	75808.1484	6.92E-04	0.483	0.030	4.67E-04	1.42E-04
	0.0254	67786.8444	2.93E-04	0.432	0.024	5.72E-04	1.74E-04
	0.0482	59942.2268	3.01E-03	0.382	0.030	4.69E-04	1.43E-04
	0.0418	51483.1231	1.99E-03	0.328	0.024	5.86E-04	1.79E-04
	0.0175	40044.0275	-1.83E-04	0.255	0.012	1.17E-03	3.56E-04
	0.0206	26209.1249	-2.01E-04	0.167	0.008	1.64E-03	5.01E-04
	0.03697	31000.3817	1.24E-03	0.1977	0.0134	1.04E-03	3.16E-04
	0.0532	44757.9895	3.88E-03	0.2854	0.0233	5.98E-04	1.82E-04

Resultados del límite del flujo **0,305 δ'** para todas las pruebas del tramo

0.305 δ' Max	7,26E-04
0.305 δ' Prom	2,18E-04
0.305 δ' Min	9,10E-05

Gráfica del límite del flujo vs. Número de Reynolds



Tramo 22

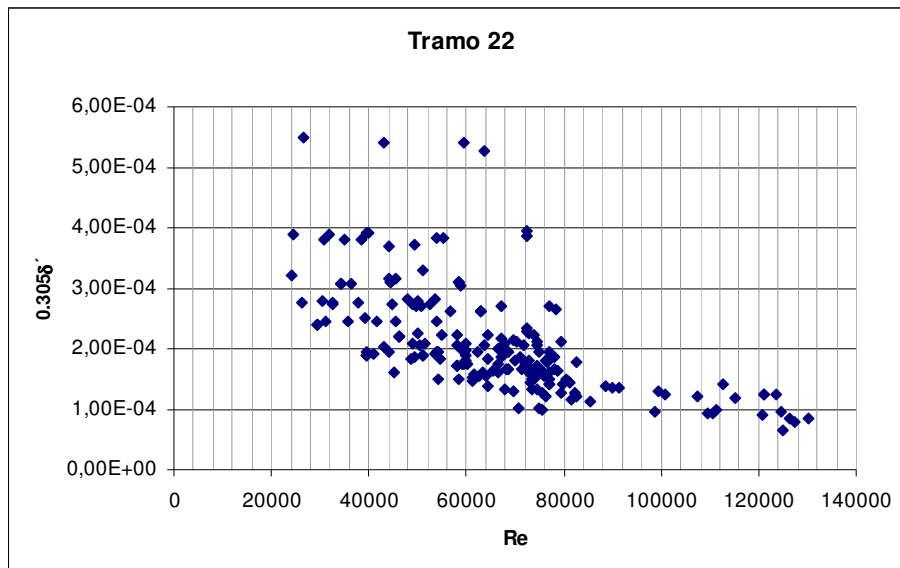
Cálculos Típicos: Primeros días de pruebas

	f	Re	Ks	V	V*	δ'	0,305 δ'
17/08/2006 (1)	0.0329	82255.9923	9.33E-04	0.524	0.034	4.14E-04	1.26E-04
	0.0253	75808.1484	3.00E-04	0.483	0.027	5.12E-04	1.56E-04
	0.0447	67786.8444	2.44E-03	0.432	0.032	4.31E-04	1.31E-04
	0.0256	59942.2268	2.91E-04	0.382	0.022	6.43E-04	1.96E-04
	0.0304	51483.1231	6.38E-04	0.328	0.020	6.88E-04	2.10E-04
	0.0145	40044.0275	-2.66E-04	0.255	0.011	1.28E-03	3.91E-04
	0.0684	26209.1249	7.04E-03	0.167	0.015	9.01E-04	2.75E-04
	0.06143	31000.3817	5.49E-03	0.1977	0.0173	8.04E-04	2.45E-04
	0.0236	44757.9895	1.12E-04	0.2854	0.0155	8.99E-04	2.74E-04
	0.0235	54899.6481	1.48E-04	0.3500	0.0190	7.34E-04	2.24E-04

Resultados del límite del flujo **0,305 δ'** para todas las pruebas del tramo

0.305 δ' Max	5,48E-04
0.305 δ' Prom	2,12E-04
0.305 δ' Min	6,61E-05

Gráfica del límite del flujo vs. Número de Reynolds



Tramo 23

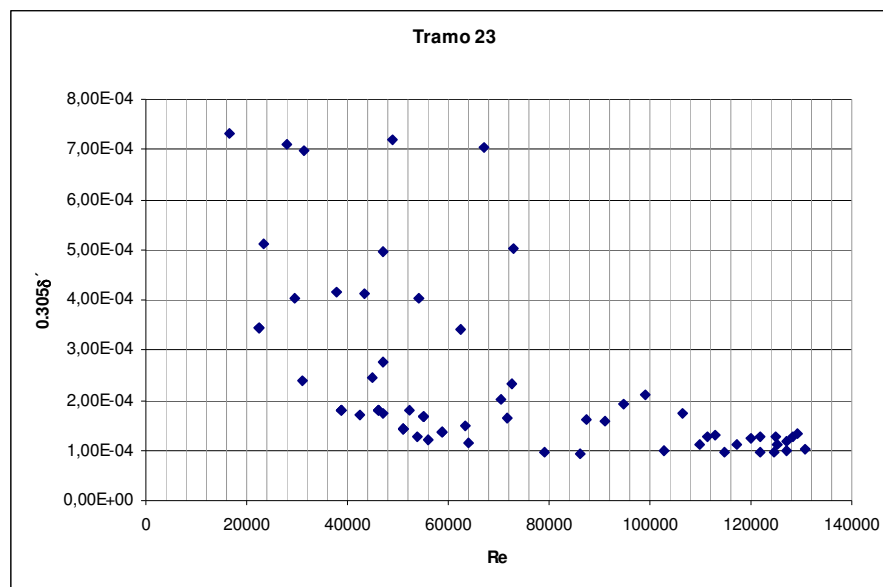
Cálculos Típicos: Primeros días de pruebas

	f	Re	Ks	V	V*	δ'	0,305 δ'
17/08/2006 (1)	0.0026	72814.8632	-3.97E-04	0.4643	0.0084	1.65E-03	5.04E-04
	0.0651	64047.0696	6.41E-03	0.408	0.037	3.78E-04	1.15E-04
	0.0751	53981.557	8.78E-03	0.344	0.033	4.17E-04	1.27E-04
	0.0110	43518.9415	-3.16E-04	0.277	0.010	1.35E-03	4.13E-04
	0.0656	30977.9472	6.42E-03	0.198	0.018	7.78E-04	2.37E-04
	0.0079	62426.8412	-2.67E-04	0.398	0.012	1.12E-03	3.40E-04
	0.0398	63507.7927	1.73E-03	0.405	0.029	4.87E-04	1.49E-04
	0.0685	42576.0349	7.14E-03	0.271	0.025	5.54E-04	1.69E-04
	0.0398	52241.1324	1.70E-03	0.333	0.023	5.92E-04	1.81E-04
	0.0251	29577.6466	9.52E-05	0.189	0.011	1.32E-03	4.02E-04

Resultados del límite del flujo **0,305 δ'** para todas las pruebas del tramo

0.305 δ' Max	7,30E-04
0.305 δ' Prom	2,34E-04
0.305 δ' Min	9,34E-05

Gráfica del límite del flujo vs. Número de Reynolds



Tramo 25

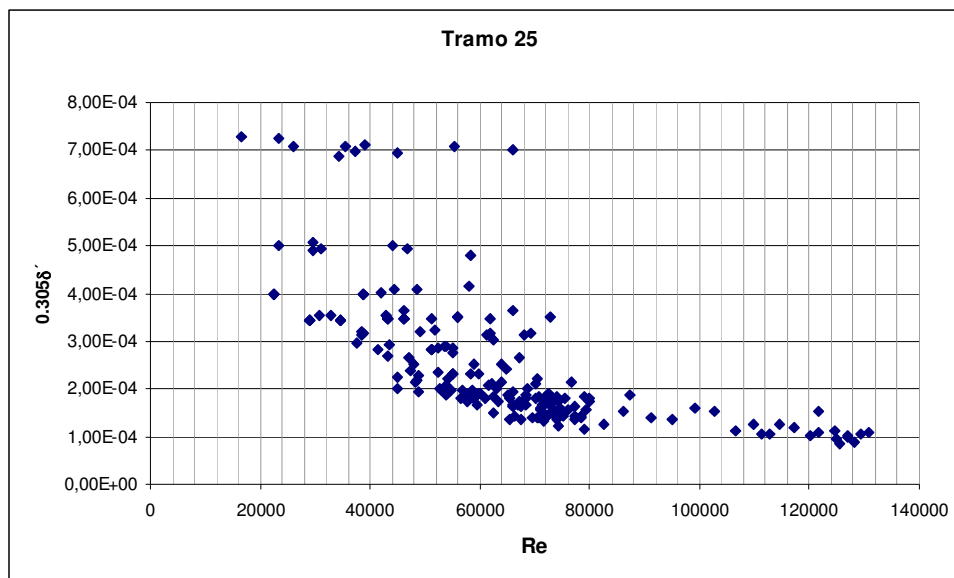
Cálculos Típicos: Primeros días de pruebas

	f	Re	Ks	v	v*	δ'	0,305 δ'
17/08/2006 (1)	0.0170	79006.8543	-5.70E-05	0.5037	0.0232	5.99E-04	1.83E-04
	0.0211	73296.0632	7.53E-05	0.467	0.024	5.80E-04	1.77E-04
	0.0241	65065.8975	2.11E-04	0.415	0.023	6.11E-04	1.86E-04
	0.0061	58079.6388	-3.27E-04	0.370	0.010	1.36E-03	4.15E-04
	0.0343	45015.1128	1.00E-03	0.287	0.019	7.41E-04	2.26E-04
	0.0298	30780.0778	4.70E-04	0.196	0.012	1.16E-03	3.55E-04
	0.0153	42999.7061	-2.27E-04	0.274	0.012	1.16E-03	3.55E-04
	0.0023	55308.2014	-5.59E-04	0.353	0.006	2.33E-03	7.09E-04

Resultados del límite del flujo 0,305 δ' para todas las pruebas del tramo

0.305 δ' Max	7,29E-04
0.305 δ' Prom	2,53E-04
0.305 δ' Min	8,66E-05

Gráfica del límite del flujo vs. Número de Reynolds



Tramo 27

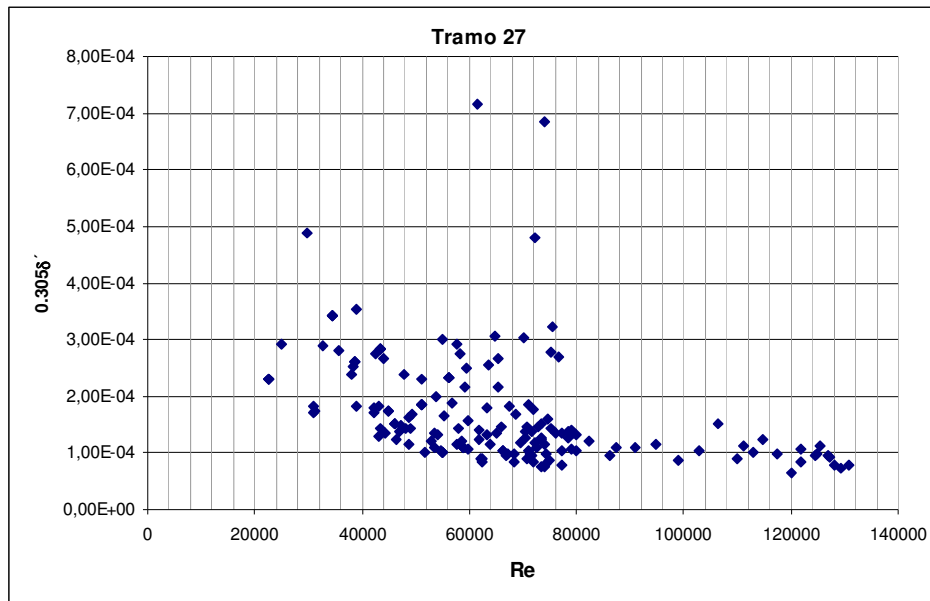
Cálculos Típicos: Primeros días de pruebas

	f	Re	Ks	v	v*	δ'	$0,305\delta'$
17/08/2006 (1)	0.0504	79006.8543	3.42E-03	0.5037	0.0400	3.48E-04	1.06E-04
	0.0438	73296.0632	2.32E-03	0.467	0.035	4.03E-04	1.23E-04
	0.0470	65065.8975	2.82E-03	0.415	0.032	4.38E-04	1.34E-04
	0.0514	58079.6388	3.57E-03	0.370	0.030	4.69E-04	1.43E-04
	0.0510	49441.8484	3.49E-03	0.315	0.025	5.53E-04	1.69E-04
	0.0587	45015.1128	4.98E-03	0.287	0.025	5.66E-04	1.73E-04
	0.1275	30780.0778	2.34E-02	0.196	0.025	5.62E-04	1.71E-04
	0.1153	42999.7061	1.98E-02	0.274	0.033	4.23E-04	1.29E-04
	0.0418	55308.2014	1.99E-03	0.353	0.025	5.46E-04	1.67E-04

Resultados del límite del flujo $0,305\delta'$ para todas las pruebas del tramo

$0,305\delta'$ Max	7,15E-04
$0,305\delta'$ Prom	1,70E-04
$0,305\delta'$ Min	6,40E-05

Gráfica del límite del flujo vs. Número de Reynolds



ANEXO 3

Análisis del caudal necesario para que el flujo en las tuberías de BIAXIAL® de 6” empiece a ser transicional

PVC BIAxIAL

Viscosidad cinemática	1,02E-06
Diámetro (m)	0,15998
Ks teórico (m)	1,50E-06

Q (l/s)	v (m/s)	Re	f calculado como FHL	f calculado como FHR	f calculado como	V*	δ' (m)	LIMITES		TIPO DE FLUJO
								FHL (ks)	FHR (ks)	
1	0,05	7,80E+03	0,033012	0,007978	0,033025	0,00	3,70E-03	1,13E-03	2,26E-02	FHL
2	0,10	1,56E+04	0,027529	0,007978	0,027548	0,01	2,03E-03	6,18E-04	1,24E-02	FHL
3	0,15	2,34E+04	0,024911	0,007978	0,024934	0,01	1,42E-03	4,33E-04	8,66E-03	FHL
4	0,20	3,12E+04	0,023266	0,007978	0,023292	0,01	1,10E-03	3,36E-04	6,72E-03	FHL
5	0,25	3,90E+04	0,022096	0,007978	0,022125	0,01	9,05E-04	2,76E-04	5,52E-03	FHL
6	0,30	4,68E+04	0,021201	0,007978	0,021234	0,02	7,69E-04	2,35E-04	4,69E-03	FHL
7	0,35	5,46E+04	0,020485	0,007978	0,020521	0,02	6,71E-04	2,05E-04	4,09E-03	FHL
8	0,40	6,24E+04	0,019893	0,007978	0,019932	0,02	5,96E-04	1,82E-04	3,63E-03	FHL
9	0,45	7,02E+04	0,019391	0,007978	0,019432	0,02	5,36E-04	1,64E-04	3,27E-03	FHL
10	0,50	7,80E+04	0,018957	0,007978	0,019001	0,02	4,88E-04	1,49E-04	2,98E-03	FHL
12	0,60	9,36E+04	0,018239	0,007978	0,018288	0,03	4,15E-04	1,26E-04	2,53E-03	FHL
15	0,75	1,17E+05	0,017413	0,007978	0,017468	0,03	3,39E-04	1,03E-04	2,07E-03	FHL
20	0,99	1,56E+05	0,016425	0,007978	0,016491	0,05	2,62E-04	7,99E-05	1,60E-03	FHL
30	1,49	2,34E+05	0,015166	0,007978	0,015250	0,07	1,82E-04	5,54E-05	1,11E-03	FHL
50	2,49	3,90E+05	0,013769	0,007978	0,013886	0,10	1,14E-04	3,48E-05	6,96E-04	FHL
100	4,97	7,80E+05	0,012156	0,007978	0,012336	0,20	6,06E-05	1,85E-05	3,69E-04	FHL
1453	72,28	1,13E+07	0,007957	0,007978	0,008863	2,41	4,92E-06	1,50E-06	3,00E-05	Ftrans

ANEXO 4

Resumen de análisis de frecuencia y confianza de datos depurados de factor de fricción obtenidos para todas las tuberías rectas

Intervalo	Clase Inferior	Clase Superior	Frecuencia f(i)	Media de Clase x(i)	f(i)*x(i)	(x(i)-Media) ²	((x(i)-Media) ²)* f(i)	
1	0,00159	0,00637	3	0,00398	0,0119	0,0003389	0,0010166	
2	0,00637	0,01116	2	0,00876	0,0175	0,0001857	0,0003714	
3	0,01116	0,01594	63	0,01355	0,8534	0,0000782	0,0049294	
4	0,01594	0,02072	53	0,01833	0,9713	0,0000165	0,0008754	
5	0,02072	0,02550	148	0,02311	3,4201	0,0000005	0,0000761	
6	0,02550	0,03028	73	0,02789	2,0360	0,0000302	0,0022071	
7	0,03028	0,03506	0	0,03267	0,0000	0,0001057	0,0000000	
8	0,03506	0,03984	7	0,03745	0,2622	0,0002268	0,0015879	
9	0,03984	0,04462	6	0,04223	0,2534	0,0003937	0,0023624	
10	0,04462	0,04941	5	0,04702	0,2351	0,0006064	0,0030318	
			$\Sigma =$	360	$\Sigma =$	8,0609	$\Sigma =$	0,01646

Media =	0,0224	Desviación =	0,0068	Intervalo 95% =	0,0007
Valor esperado al 95% de Confianza=			Media \pm Intervalo 95%		

