

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

**Determinación de los coeficientes de rugosidad absoluta (k_s) y
los coeficientes de pérdidas menores (k_m) en tuberías de PVC y
Polietileno – Recopilación tesis Uniandes**

Bogotá D.C., Diciembre de 2.004

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	4
CAPÍTULO 2 OBJETIVOS	5
CAPÍTULO 3 PERSONAL QUE PARTICIPÓ EN LA INVESTIGACIÓN	6
3.1 PAVCO S.A.	6
3.2 GRUPO CIACUA	6
CAPÍTULO 4 ESTUDIO DE LOS COEFICIENTES DE PÉRDIDAS MENORES DE ACCESORIOS DE TUBERÍAS DE PVC. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE LA LONGITUD EQUIVALENTE.	7
4.1 MONTAJE.....	7
4.2 MEDICIÓN DE PÉRDIDAS MENORES EN LOS ACCESORIOS	7
4.3 RESULTADOS	7
4.4 ANÁLISIS	9
4.5 CONCLUSIONES	11
CAPÍTULO 5 DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD ABSOLUTA Y PÉRDIDAS MENORES DE TUBERÍA DE POLIETILENO DE MEDIA DENSIDAD	12
5.1 MONTAJE.....	12
5.2 RESULTADOS	12
5.3 ANÁLISIS	14
5.4 CONCLUSIONES	14
CAPÍTULO 6 RUGOSIDAD ABSOLUTA, COEFICIENTES DE PÉRDIDAS MENORES Y METODOLOGÍA DE LA LONGITUD EQUIVALENTE EN TUBERÍAS DE PVC.	15
6.1 MONTAJE.....	15
6.2 MEDICIÓN DE PÉRDIDAS MENORES EN LOS ACCESORIOS	17
6.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	17
6.4 CONCLUSIONES	22
CAPÍTULO 7 DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD ABSOLUTA (K_s) DE TUBERÍAS DE PEQUEÑOS DIÁMETROS UTILIZADAS EN RIEGO LOCALIZADO DE ALTA FRECUENCIA. .	23
7.1 MONTAJE.....	23
7.2 RESULTADOS	24
7.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	26
7.4 CONCLUSIONES	27
CAPÍTULO 8 INFLUENCIA DEL CRECIMIENTO DE BIOPELÍCULAS SOBRE LA RUGOSIDAD ABSOLUTA EN TUBERÍAS PRESURIZADAS	28
8.1 MONTAJE.....	28
8.2 MEDICIÓN DE PÉRDIDAS MENORES	29
8.3 RESULTADOS	29
8.4 CONCLUSIONES	29
CAPÍTULO 9 DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD ABSOLUTA DEL PVC	30
9.1 MONTAJE.....	30
9.2 RESULTADOS	30
9.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	31
9.4 CONCLUSIONES	33

CAPÍTULO 10 DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD ABSOLUTA (KS) DE TUBERÍAS DE PEQUEÑOS DIÁMETROS EN POLIETILENO UTILIZADAS EN RIEGO LOCALIZADO DE ALTA FRECUENCIA.....	34
10.1 MONTAJE.....	34
10.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	34
10.3 CONCLUSIONES.....	37
CAPÍTULO 11 RUGOSIDAD ABSOLUTA, COEFICIENTES DE PÉRDIDAS MENORES Y METODOLOGÍA DE LA LONGITUD EQUIVALENTE EN TUBERÍAS DE PVC.	38
11.1 MONTAJE.....	38
11.2 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR FRICCIÓN Y LA RUGOSIDAD ABSOLUTA.....	38
11.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	38
CAPÍTULO 12 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PÉRDIDAS PARA UNA TUBERÍA PARA RIEGO POR GOTEO.....	40
12.1 MONTAJE.....	40
12.2 CÁLCULO DE PÉRDIDAS.....	41
12.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	41
12.4 CONCLUSIONES.....	41
CAPÍTULO 13 INFLUENCIA DEL CRECIMIENTO DE BIOPELÍCULAS SOBRE LA RUGOSIDAD ABSOLUTA EN TUBERÍAS PRESURIZADAS.....	42
13.1 CÁLCULO DE PÉRDIDAS.....	42
13.2 RESULTADOS.....	42
CAPÍTULO 14 TABLA DE ECUACIONES.....	43
CAPÍTULO 15 CONCLUSIONES.....	44
CAPÍTULO 16 COEFICIENTES DE PÉRDIDAS MENORES.....	45
CAPÍTULO 17 COEFICIENTES DE RUGOSIDAD ABSOLUTA.....	48
CAPÍTULO 18 ANEXO 1.....	49

Capítulo 1 Introducción

La solución de los problemas de diseño en redes de tuberías, como la predicción de una tasa de flujo o la presión en diversos puntos de la misma entre otros, resulta de la aplicación del principio de energía, la ecuación de continuidad, y principios y ecuaciones de resistencia de fluidos.

La resistencia al flujo de un fluido en un sistema de tuberías a presión es producida por la rugosidad del material de la tubería, y por la cantidad y los tipos de accesorios con que cuente este sistema. Para que el diseño de estos sistemas sea eficiente, es necesario conocer, entre otros parámetros, los valores certeros de los coeficientes de rugosidad absoluta (k_s) y de pérdidas menores (k_m) de los materiales y accesorios con que se construya, esto en busca de lograr una aproximación más cercana a la realidad de las pérdidas de energía que se van a tener durante el funcionamiento de la red.

El PVC y el polietileno son los materiales que más se vienen utilizando en los diseños de redes de tuberías en Colombia. Por esta razón es de gran importancia el conocimiento de las propiedades de las tuberías fabricadas con estos materiales, así como de sus respectivos accesorios. Entre los tipos de accesorios, prácticamente contamos tres como los más comunes, que son, los codos, las uniones y las tees, dada la frecuencia con que estos son utilizados en las redes.

Debido a la influencia de estos coeficientes en el diseño de sistemas de tuberías, en este documento se realizará una recopilación de datos de estos coeficientes de pérdidas para las tuberías y accesorios de PVC y polietileno, con la finalidad de realizar un análisis de estos, y poder obtener con ellos, rangos confiables de los valores para los coeficientes, o patrones de comportamiento de los mismos, según el diámetro, el número de Reynolds, la velocidad, etc.

Todos estos datos serán obtenidos de proyectos de grado realizados en el CIACUA junto con la empresa PAVCO S.A., en el convenio Cátedra PAVCO, los cuales surgieron de montajes experimentales realizados en laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes.

Además del cálculo de estos coeficientes, también serán tenidos en cuenta, dentro del documento, los métodos de obtención y estimación de estos parámetros, así como las conclusiones que se puedan obtener del conjunto de proyectos.

Capítulo 2 Objetivos

- Recopilar información de los trabajos de investigación que se han desarrollado, a través de la Cátedra PAVCO, con el fin de determinar los coeficientes de pérdidas menores y rugosidad absoluta evaluados en diferentes sistemas de tuberías.
- Obtener una buena aproximación del comportamiento y valor de los coeficientes de pérdidas menores para diferentes tipos de accesorios de tuberías en PVC y polietileno.
- Identificar la variación de los coeficientes de pérdidas menores respecto a diferentes parámetros como son el número de Reynolds, el caudal o la presión.
- Identificar valores típicos de coeficientes de rugosidad absoluta para tuberías de PVC y polietileno.
- Determinar diferencias entre rangos de valores de los coeficientes de rugosidad absoluta para las tuberías de PVC contra las de polietileno.
- Analizar y comparar las diferentes investigaciones, buscando establecer una vía de investigación futura en lo que se refiere a coeficientes de pérdidas para tuberías.

Capítulo 3 Personal que participó en la investigación

3.1 PAVCO S.A.

Presidente:	Mauricio Nieto
Gerente general Tubosistemas:	José María Escovar
Gerente de Mercadeo:	Jacqueline Picón
XXX:	Enrique González Inés Elvira Wills
XXX:	Zoraida Castro

3.2 GRUPO CIACUA

Director Cátedra PAVCO:	Juan G. Saldarriaga Valderrama
Asistentes Graduados:	Paula Reyes del Toro Edgar Javier Guevara Manuel Serna
Monitores de Investigación:	Bernardo Revueltas Nicolás Manjares Alejandro Galindo
Coordinadota de Operaciones:	Mireya Perafán

Capítulo 4 Estudio de los coeficientes de pérdidas menores de accesorios de tuberías de PVC. Validación de la metodología de la longitud equivalente.

Esta investigación fue desarrollada como proyecto de grado por el estudiante de Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes Andrés Vega Jaramillo en el año 1993, en conjunto con el convenio entre la Universidad de los Andes y la empresa PAVCO S.A., Cátedra PAVCO. El montaje fue realizado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes.

4.1 Montaje

Se armaron en total 4 sistemas tubería-accesorio. Según el fabricante y el diámetro predominante se les asignaron a los modelos los siguientes nombres: Ralco 2", Gerfor 2", Pavco 2" y Pavco 2.5"; los sistemas estaban conectados a un tanque calibrado que servía como alimentación y medición del caudal de alimentación.

4.2 Medición de pérdidas menores en los accesorios

El sistema para medir las pérdidas menores en cada accesorio consistió en piezómetros colocados a la entrada y a la salida del accesorio, unidos a los dos lados de un manómetro, que en su parte inferior tenía tetracloruro de carbono.

4.3 Resultados

Para cada accesorio se hicieron mediciones para 15 caudales diferentes, obteniendo entonces 15 valores para el coeficiente de pérdidas menores (k_m) en cada accesorio. Como el k_m no es un valor constante, ya que varía en función del número de Reynolds (Re), fue necesario hacer regresiones con el fin de encontrar un único valor para k_m , denominado k_{mf} .

La ecuación supuesta del comportamiento de las pérdidas menores en los accesorios, en función del número de Re está dada por la Ecuación 4-1:

$$\frac{dk_m}{d Re} = C(k_m - k_{mf})$$

Ecuación 4-1

donde C es una constante de proporcionalidad. Integrando esta ecuación se obtiene la Ecuación 4-2:

$$k_m - k_{mf} = ae^{bRe}$$

Ecuación 4-2

En esta ecuación, cuando $k_m = k_{mf}$, se presenta un valor asintótico.

Se graficaron las ecuaciones obtenidas de las regresiones para observar su comportamiento y poder hacer el análisis correspondiente. Los resultados obtenidos para cada accesorio, se muestran en la Tabla 4-1

Tabla 4-1 Resumen de resultados obtenidos para cada accesorio

Accesorio	RALCO		PAVCO		GERFOR	
	Dimensión	k_m	Dimensión	k_m	Dimensión	k_m
<i>Expansión</i>	2" x 2 1/2"	-1.550	2" x 3"	0.529	2" x 3"	0.292
			2" x 2 1/2"	0.240		
	1" x 2"	0.758	1 1/2" x 2"	0.303	1 1/2" x 2"	0.259
			1" x 2"	0.516		
<i>Reducción</i>	2 1/2" x 2"	0.201	3" x 2"	0.051	3" x 2"	0.131
			2 1/2" x 2"	0.145		
	2" x 1"	0,095- 0,15	2" x 1 1/2"	0.091	2" x 1 1/2"	0.115
			2" x 1"	0.328		
<i>Codo Mayor Presión</i>	2"	1.273	2"	1.608	2"	1.465
			2 1/2"	2.180		
<i>Codo Media Presión</i>			2"	1.161		
			2 1/2"	2.316		
<i>Codo Menor Presión</i>			2"	1.185		
			2 1/2"	2.461		
<i>Semicodo Mayor Presión</i>			2"	0.276		
			2 1/2"	0.375		
<i>Semicodo Menor Presión</i>			2 1/2"	2.461		
<i>T Recta</i>	2"	0.167	2"	0.174	2"	0.131
			2 1/2"	0.036		
<i>T Perpendicular</i>	2"	1.293	2"	1.135	2"	1.784
			2 1/2"	0.775		
<i>T Recta flujo perpendicular</i>	2"	0.497	2"	4.489	2"	0.410
			2 1/2"	-1.940		
<i>T Perpendicular flujo recto</i>	2"	5.093	2"	4.471	2"	5.739
			2 1/2"	3.705		
<i>Adaptador Macho</i>	2"	0.500	2"	0.168	2"	0.140
			2 1/2"	0.197		

Accesorio	RALCO		PAVCO		GERFOR	
	Dimensión	k_m	Dimensión	k_m	Dimensión	k_m
Unión	2"	0.096	2"	0.049	2"	0.072
			2 1/2"	0.028	3"	0.185
Unión Z					3"	0.050

4.4 Análisis

La Ecuación 4-1 explica de forma adecuada el comportamiento de las pérdidas menores, ya que el valor del coeficiente de determinación R^2 siempre fue mayor a 0.8, excepto para el caso del adaptador macho Ralco, la reducción Ralco 2"x1", la reducción Pavco 2"x1" y la unión Z de 3" Gerfor.

Respecto a la unión Z, es posible que el comportamiento no haya sido como el supuesto para los demás accesorios, o que debido a sus bajas pérdidas, el manómetro de tetracloruro no haya sido un buen sistema de medición, llevando al experimentador a resultados erróneos por las caídas de presión pequeñas.

Las gráficas de k_m en función de Re tienen una tendencia creciente, siguiendo el patrón de la Ecuación 4-1; es decir que a medida que aumenta el número de Reynolds, aumenta el valor de k_m . Para los accesorios que presentaban un comportamiento ascendente a medida que aumentaba el número de Reynolds, el valor de k_m para $Re = 0$ fue por lo general menor a 0, lo cual es físicamente imposible ya que si el fluido está en reposo, el k_m debe ser 0.

Es posible que los coeficientes de pérdidas menores para Re menores a 2000, se deban analizar con una regresión de comportamiento diferente, ya que los resultados obtenidos para flujo laminar, no se ajustan al comportamiento planteado por la Ecuación 4-1. Por lo tanto, no se hizo análisis del k_m para el rango de número de Reynolds entre 0 y 2000.

Observando los resultados obtenidos respecto al comportamiento de las pérdidas menores en los codos, se plantearon las siguientes hipótesis:

1. El diámetro afecta claramente el k_m ; a medida que aumenta el diámetro, el k_m en el codo aumenta también.
2. La presión también afecta el k_m ; a mayor cabeza, mayores pérdidas menores.
3. Hay diferencias entre los fabricantes, ya que para un mismo diámetro, se obtuvieron coeficientes de pérdidas menores diferentes.

Para los semicodos, se plantearon las hipótesis 1 y 2 expuestas anteriormente. Esto se puede presentar debido a que por tener una configuración similar a los codos, experimenten los mismos fenómenos.

La Tee a través de salida lateral, presentó un comportamiento similar al de los codos y semicodos, sin embargo sólo cumple la hipótesis 2. La hipótesis 1 no la cumple, ya que se encontró para este accesorio, que a mayor diámetro, menores pérdidas.

Para las uniones, los adaptadores macho y la Tee en sentido recto, se presentó un fenómeno diferente pues no se vio una clara incidencia del diámetro sobre el valor de las pérdidas.

Las reducciones 2"x1" de Pavco y Ralco, no se comportaron como los demás accesorios. La toma de datos de campo fue difícil para números de Reynolds altos, en donde el manómetro ya no era útil debido a la diferencia de cabeza piezométrica en el accesorio. Por lo tanto, los resultados para estos dos accesorios en particular, no son confiables.

En las reducciones y expansiones, los accesorios de mismo diámetro nominal utilizados, presentan diferencias entre si, de acuerdo con el fabricante. Para ciertos diámetros y marcas, los bujes tenían pequeñas transiciones que reducían las pérdidas.

Es importante mencionar que las expansiones tuvieron un comportamiento diferente a los demás accesorios, ya que para Reynolds bajos, el coeficiente de pérdidas menores fue mayor que el valor asintótico que experimentaban los demás accesorios a medida que crecía el numero de Reynolds. Siendo este valor asintotico el de mayor magnitud para determinado accesorio. Por ejemplo los resultados obtenidos para la expansión PAVCO de 1 ½" x 2" ilustrados en la Tabla 4-2

Tabla 4-2 Coeficiente de pérdidas menores en función del numero de Reynolds

Accesorio	Re	k_m
<i>Expansión 1 ½" x 2"</i>	2000	0.53
	4000	0.32
	6000	0.32
	8000	0.31
	10000	0.31

En todas las reducciones, se encontraron valores negativos para el coeficiente de pérdidas menores. Parece no haber explicación para esto; se plantearon entonces, dos posibles hipótesis:

1. Mala evaluación de la ecuación de momentum por tener diferentes condiciones de frontera.
2. Mala evaluación de la ecuación de energía, al no haber tenido en cuenta el factor de corrección de la energía cinética.

4.5 Conclusiones

El coeficiente de pérdidas menores no es constante para todas las condiciones de flujo, ya que depende del número de Reynolds. El comportamiento de k_m respecto al Re , se puede describir mediante la Ecuación 4-1:

$$\frac{dk_m}{dRe} = C(k_m - k_{mf})$$

Ecuación 4-1

donde $\pm C$ es una constante de proporcionalidad y k_{mf} es el valor asintótico al que tiende k_m a medida que aumenta el número de Reynolds.

Derivando la ecuación anterior resulta la Ecuación 4-2

$$k_m - k_{mf} = ae^{bRe}$$

Ecuación 4-2

con $a > 0$ y $b < 0$. Para expansiones y tees con flujo lateral el signo de la Ecuación 4-2 es positivo, para todos los demás accesorios es negativo.

De las regresiones se obtuvo que para $Re \leq 2000$, se presentaba $k_m < 0$, lo cual es físicamente imposible. Se cree entonces que para flujo laminar el comportamiento de k_m respecto a Re es diferente al planteado por la Ecuación 4-1.

- Para los dobleces (codos y semicodos) se encontró que:
 1. A mayor diámetro, mayor k_m .
 2. A mayor presión, mayor k_m .
- El coeficiente de pérdidas menores de los accesorios, depende en gran medida, del acople que se haga entre el accesorio y la tubería.
- El coeficiente de pérdidas menores de ciertos accesorios varía entre fabricantes, ya que los mismos son diferentes internamente y por lo tanto, el agua experimenta mayor o menor turbulencia.
- Al comparar el k_{mf} obtenido, con el reportado en los catálogos de los fabricantes, se encontró que en algunos casos se subestima y en otros se sobrestima el valor de k_m .
- En todas las contracciones fue común encontrar valores de k_m menores a 0, para Reynolds menores a 4000, sin que hubiera una explicación clara al respecto.

Capítulo 5 Determinación de la rugosidad absoluta y pérdidas menores de tubería de polietileno de media densidad.

Esta investigación fue realizada por Andrés Mauricio Hernández Gambin como proyecto de grado de Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes en el año 1997. Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes y el proyecto fue desarrollado en conjunto con la C

5.1 Montaje

Para el estudio del modelo se dividió en 4 partes principales:

1. Tubería madre que alimentaba todo el sistema.
2. Tuberías a la que se le determinó el k_s .
3. Sistema de manómetros para medir las diferencias de presión.
4. Sistema de medición de caudales.

La tubería madre era de 12". Tenía una trampa de aire con el fin de capturar las burbujas mezcladas en el agua y de esta manera incrementar la precisión del experimento.

Los ensayos fueron hechos en tuberías de polietileno de media densidad, fabricados por la empresa PAVCO S.A. Se utilizaron tuberías de 2, 3 y 4". La tubería de 2" constaba de 8 tramos de 10m de largo cada uno, unidos por 2 uniones y 4 codos de 90°. Solo se instrumentaron 5 de los 8 tramos, 2 codos y las 2 uniones.

Para las tuberías de 3 y 4" el montaje estaba compuesto de 5 tramos de 5 m de largo cada uno, unidos por 3 uniones y 2 codos. El sistema estaba unido a un tubo para desaguar al canal con vertedero. Todas las uniones tubería-accesorio se hicieron mediante termofusión.

Para medir las diferencias de presión en los sistemas de 3 y 4", se utilizaron diez manómetros. Estos estaban conectados a las tuberías y accesorios a analizar. Se utilizaron 8 manómetros de tetracloruro de carbono, para 5 tuberías y 3 uniones, y otros 2 manómetros con mercurio para los 2 codos.

Para el sistema de 2" se utilizaron 9 manómetros: 7 con tetracloruro de carbono para las 2 uniones y los 5 tramos, y 2 con mercurio para los 2 codos. Los k_m se determinaron a partir de la pérdida de energía medida en cada accesorio.

5.2 Resultados

Para el sistema de 2" se realizaron mediciones de pérdidas menores para caudales diferentes, obteniendo entonces 34 valores de k_m diferentes para cada accesorio, en

igual número de pruebas. Se determinó entonces, de todas las pruebas, un rango promedio de valores de k_m . Se utilizó un rango de caudales entre 0.0017 y 0.0035 m^3/s . Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1 Resultados para accesorios de 2"

2"	Rango de k_m	
<i>Unión 1</i>	0.32	0.37
<i>Unión 2</i>	0.27	0.31
<i>Codo 1</i>	1.4	1.6
<i>Codo 2</i>	1.6	1.8

En el sistema de 3" se utilizaron 55 caudales diferentes, que variaron entre 0.001 y 0.0098 m^3/s , y al igual que en el sistema de 2" se obtuvo un rango de valores para k_m . Los resultados para este sistema se resumen en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2 Resultados para accesorios de 3"

3"	Rango de k_m	
<i>Unión 1</i>	0.17	0.22
<i>Unión 2</i>	0.15	0.25
<i>Unión 3</i>	0.24	0.40
<i>Codo 1</i>	2.0	3.0
<i>Codo 2</i>	1.9	3.1

Para el sistema de 4" se hicieron 63 mediciones, con caudales entre 0.002 y 0.013 m^3/s obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3 Resultados para accesorios de 4"

4"	Rango de k_m	
<i>Unión 1</i>	0.1	0.19
<i>Unión 2</i>	0.175	0.27
<i>Unión 3</i>	0.19	0.36
<i>Codo 1</i>	2.5	3.1
<i>Codo 2</i>	2.7	3.2

En los tres sistemas se encontró que el k_m tiende a disminuir con el aumento de caudal. Se esperaba, sin embargo, según lo encontrado en la tesis anterior, que el k_m aumentara con el aumento de caudal.

5.3 Análisis

Se encontró que el k_m tiende a disminuir a medida que el caudal aumenta. Se pudo ver también que para caudales bajos hay gran variación en los valores de k_m . En ningún caso se pudo obtener un valor único de coeficientes de pérdidas menores, sólo se pudieron determinar rangos dentro de los cuales puede variar el valor de estos coeficientes; por lo tanto, cada k_m debe ser analizado para cada accesorio.

Se observó con detalle el interior de las tuberías y se encontró que los k_m más altos coincidían con los rebordes internos más gruesos dejados al hacer la soldadura tubería-accesorio.

5.4 Conclusiones

Se observaron importantes diferencias en los coeficientes de pérdidas menores de los accesorios. El autor recomienda que el instalador tenga especial cuidado en la instalación de los sistemas siguiendo las recomendaciones de los fabricantes, con el fin de evitar rebordes internos gruesos que afecten considerablemente las pérdidas en los accesorios.

Capítulo 6 *Rugosidad absoluta, coeficientes de pérdidas menores y metodología de la longitud equivalente en tuberías de PVC.*

Esta investigación fue efectuada, en conjunto con Cátedra PAVCO, por Carlos David Umaña Mesa, como su proyecto de grado de Ingeniería Civil en la Universidad de los Andes en el año 1996. Los montajes fueron elaborados en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes.

6.1 Montaje

Para este trabajo se utilizaron dos montajes diferentes (Ver Figura 6-1 y Figura 6-2), construidos en tubería de PVC unión Z con un RDE 21. El primero consistía en una tubería principal de 6" de diámetro. De la tubería madre del laboratorio, se derivó una tubería de 4" para alimentar el sistema. El caudal del sistema era controlado por una válvula. Después de la tubería de 4", había una curva y luego una expansión 4"x 6" de hierro fundido para alcanzar la tubería principal (Ver Figura 6-3), que conformaba un óvalo doble de dos niveles (Ver Figura 6-4). Los dos niveles del óvalo doble se hicieron uniendo 3 tubos, luego 2 codos para el retorno, otros 2 codos, y así sucesivamente, teniendo un total de 12 tubos rectos y 6 codos de 90°. Al final del último tubo, se colocó una reducción 6"x 4" en hierro fundido, para la tubería de descarga al vertedero.

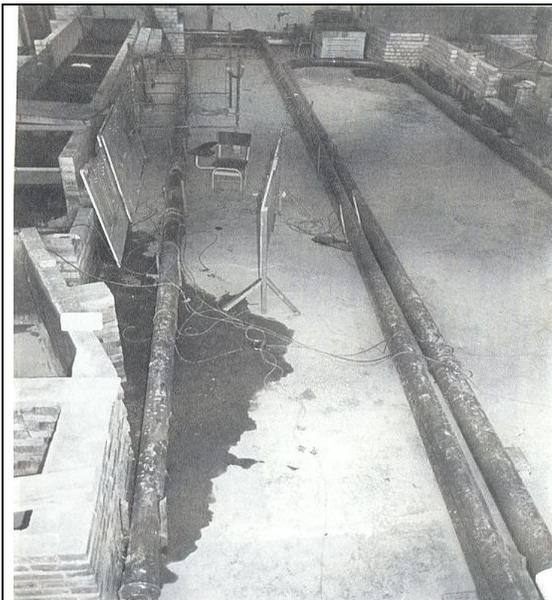


Figura 6-1 Primer montaje



Figura 6-2 Segundo montaje



Figura 6-3 Detalle codo de 4" y expansión de 4"-6"

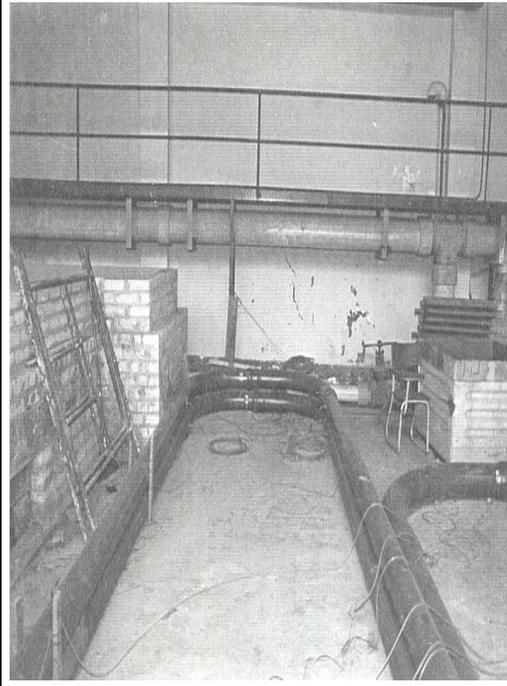


Figura 6-4 Doble óvalo

El segundo sistema utilizado, estaba compuesto principalmente por una tubería de 8", conectada al tubo madre, por medio de tubos de 6" y una válvula para el control de flujo. El montaje incluía codos y semicodos, una expansión 6"x8" y una reducción 8"x6" en hierro fundido, y uniones Z (Ver Figura 6-5, Figura 6-6 y Figura 6-7).



Figura 6-5 Detalle unión Z de 8"

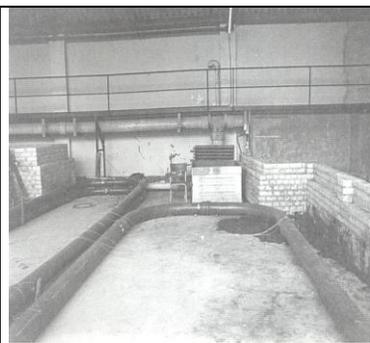


Figura 6-6 Vista sur sistema de 8"

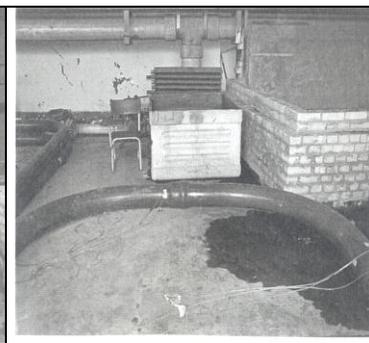


Figura 6-7 Detalle codos de 8"

6.2 Medición de pérdidas menores en los accesorios

El sistema para medir las pérdidas menores en cada accesorio consistió en piezómetros colocados aguas arriba y aguas abajo del accesorio, unidos a los dos lados de un manómetro, que contenía fluido manométrico; como fluido manométrico se utilizó tetracloruro de carbono y mercurio.

El coeficiente de pérdidas menores en los codos y las uniones, se determinó despejando k_m de la Ecuación 6-1 de pérdidas menores:

$$h_m = k_m \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 6-1

donde h_m son las pérdidas de energía en el accesorio medidas con los manómetros y v es la velocidad del flujo.

Para las expansiones, se usó una variación de la ecuación anterior, que tiene en cuenta el cambio de velocidad en el accesorio. De igual manera se despeja el k_m de la ecuación, conociendo las otras variables. La Ecuación 6-2 es la correspondiente para las expansiones.

$$h_m = k_m \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$$

Ecuación 6-2

Los subíndices 1 y 2 corresponden a la entrada y a la salida del accesorio respectivamente.

6.3 Resultados y análisis

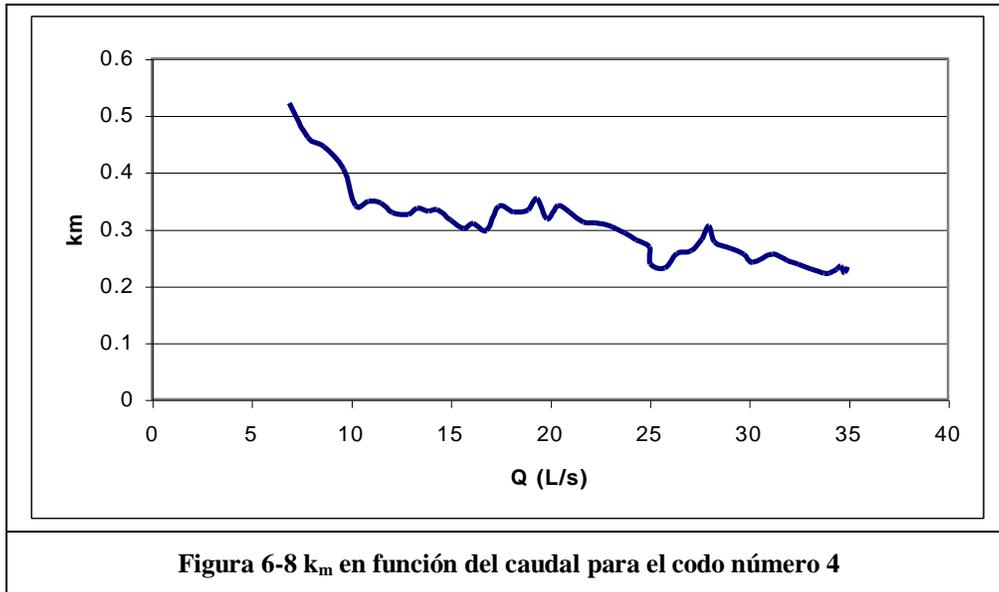
En el sistema de 6", se analizaron en total 6 codos, 1 reducción, 1 expansión y 9 uniones Z. Para cada accesorio se hicieron 54 pruebas para diferentes caudales. El rango de caudales fue desde 0.63 l/s hasta 34.96 l/s. Los resultados para cada uno de los accesorios se muestran en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1 Resultados de k_m obtenidos para cada accesorio en tuberías de 6"

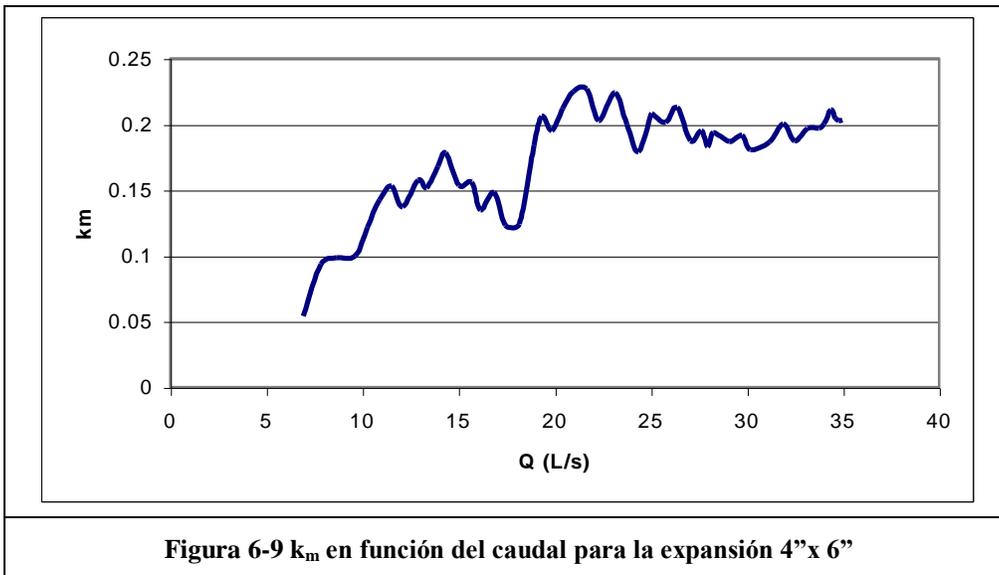
Elemento	k_{mf}
Codo 6	0,2368
Codo 5	0,3066
Codo 4	0,3473
Codo 3	0,2575
Codo 2	0,1986
Codo 1	0,4056
<i>Promedio codos</i>	<i>0,2921</i>
<i>Reducción</i>	<i>0,1657</i>
<i>Expansión</i>	<i>0,1676</i>
Unión 1	0,2927
Unión 2	0,1518
Unión 3	0,1689
Unión 4	0,1613
Unión 5	0,1326
Unión 6	0,2122
Unión 7	0,1366
Unión 8	0,1596
Unión 9	0,1725
<i>Promedio uniones</i>	<i>0,1798</i>

El valor final del coeficiente de pérdidas menores en la Tabla 6-1 para los codos y las uniones, corresponde al promedio aritmético de los valores obtenidos en las 54 pruebas para cada accesorio, sin embargo para cada accesorio se realizó un estudio de su variación con el número de Reynolds.

En el caso de los codos, se observó un comportamiento irregular en el valor del k_m . De acuerdo con las gráficas de caudal contra h_m , se determinó que las pérdidas menores disminuyen cuando aumenta el caudal como se muestra en la Figura 6-8 correspondiente a uno de los codos del sistema; para los demás codos el comportamiento fue similar. Para el autor, los resultados obtenidos fueron satisfactorios, considerando que las pérdidas menores en accesorios no se pueden describir con claridad. Sin embargo, no plantea ningún criterio que permita justificar la aceptación de los resultados.



El valor del coeficiente obtenido para la expansión, es consecuente con el valor esperado teóricamente de 0.17. Aun así, se observó aleatoriedad de los datos según el caudal (Ver Figura 6-9).



Para la reducción, el valor obtenido fue inferior al teórico. El autor determinó que el valor obtenido era confiable, debido a que se observaba una variación predecible del coeficiente k_m con el caudal tendiendo a estabilizarse, de donde se pudo determinar también que para el caso de la reducción el k_m disminuye con el aumento de caudal.

Respecto a las uniones, se lograron obtener resultados similares en 7 de las 9 uniones analizadas. Se presentó, en el caso de las uniones, una gran diferencia entre los resultados obtenidos y los teóricos. Esta diferencia se puede atribuir a problemas en la instrumentación y a errores de lectura en los manómetros.

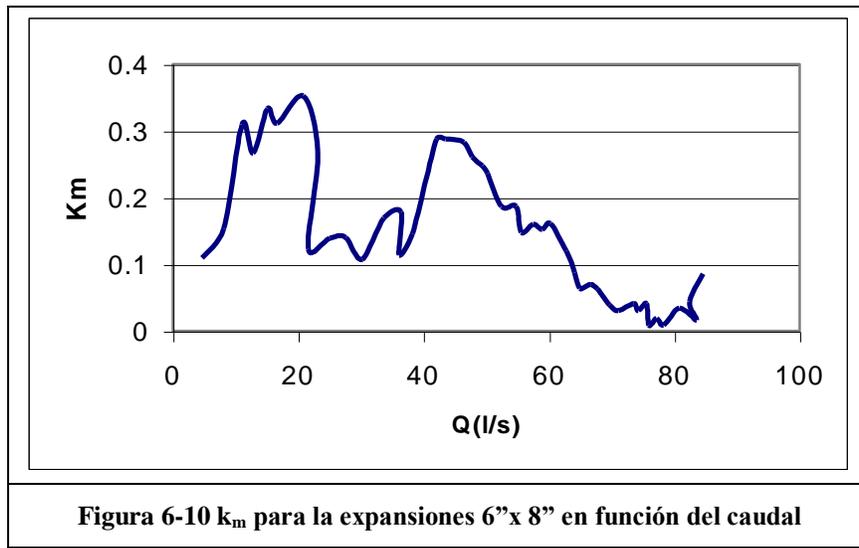
En el sistema de 8", se analizaron en total 2 codos, 1 reducción, 1 expansión y 4 uniones Z. En este caso, para cada accesorio se hicieron diferente número de pruebas. El mayor número de pruebas realizado fue 45 y el mínimo 26. El rango de caudales fue desde 4.62l/s hasta 84.60l/s. Los resultados para cada uno de los accesorios se muestran en la Tabla 6-2. El valor de k_m obtenido, corresponde al promedio aritmético de los valores obtenidos en cada prueba.

Tabla 6-2 Resultados de k_m obtenidos para cada accesorio en tuberías de 8"

Elemento	k_{mf}
<i>Codo 1</i>	0,2704
<i>Codo 2</i>	0,1983
<i>Promedio Codos</i>	0,2343
<i>Reducción</i>	0,2998
<i>Expansión</i>	0,1472
<i>Unión 1</i>	0,1484
<i>Unión 2</i>	0,1259
<i>Unión 3</i>	0,1832
<i>Unión 4</i>	0,2842
<i>Promedio uniones</i>	0,1854

El autor determinó que los resultados obtenidos para los codos, son satisfactorios, por ser inferiores al valor teórico. Nuevamente no hay un criterio claro de aceptación de las pruebas.

Para la expansión, se encontró nuevamente que el comportamiento de k_m respecto al caudal es bastante irregular (Ver Figura 6-10). Sin embargo al tomar el valor promedio, se encontró gran similitud en el valor de k_m obtenido en los dos sistemas, siendo inferior el k_m del sistema de 8". Debido a la cercanía de los valores, se determinó que el resultado era confiable. El autor planteó que una posible causa de la irregularidad en las expansiones, puede ser la falta de desarrollo en el flujo antes de entrar a la expansión.



En el caso de la reducción, se encontró para el sistema de 8" que el valor de k_m estuvo por encima del valor teórico de 0.21. Este fue el único accesorio dentro de los probados, que presentó este comportamiento. Se determinó que el valor de k_m para este accesorio, era inaceptable, por su alto valor respecto al teórico. La fuente de error en esta prueba pudo estar dada por las condiciones de conexión del accesorio a la tubería. Parece que el autor determina la confiabilidad de los datos, basado en si se encuentran por encima o por debajo del valor teórico, sin embargo no expone un criterio claro; no plantea ninguna teoría que permita basarse en ese criterio para aceptar o rechazar los resultados.

Para las uniones se encontraron valores muy similares entre sí. El resultado final de k_m obtenido para el sistema de 8", es además, muy similar al valor de k_m obtenido para el sistema de 6", por lo tanto se determinó que los resultados eran confiables.

Para todos los accesorios de ambos montajes se hicieron gráficas de la relación k_m contra Re . A partir de esto se aproximaron los resultados a regresiones estadísticas. Se obtuvo que los modelos que más explicaban los resultados de las pruebas eran los modelos exponenciales y potenciales, obteniendo coeficientes de correlación mayores a 0.9, y en la mayor parte de los casos mayores a 0.95, obteniendo así el valor de k_m como una función del número de Reynolds.

6.4 Conclusiones

- Se encontró que para todos los accesorios, el valor del coeficiente de pérdidas menores es función del número de Reynolds. El autor sin embargo, no encuentra ninguna función, simplemente hace el promedio aritmético para determinar un único k_m .
- En la mayoría de los casos, el coeficiente de pérdidas menores encontrado experimentalmente, fue menor, que el valor teórico reportado por la literatura.
- Los valores teóricos de k_m encontrados por el autor, no consideran el hecho de que dichos coeficientes varían con el número de Reynolds, es decir que los fabricantes proveen un valor puntual para el k_m y no una función.

Capítulo 7 Determinación de la rugosidad absoluta (k_s) de tuberías de pequeños diámetros utilizadas en riego localizado de alta frecuencia.

Esta investigación fue realizada, en conjunto con Cátedra PAVCO, por Humberto Pérez Pedreros, para su tesis de maestría en Ingeniería Civil sobre recursos hídricos en la Universidad de los Andes en el año de 1999. EL montaje fue realizado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes.

7.1 Montaje

El modelo del laboratorio estaba constituido principalmente por 10 tramos de diez metros cada uno aproximadamente, conectados a manómetros diferenciales de mercurio para determinar las pérdidas de energía en cada sección evaluada (Ver Figura 7-1). Los manómetros utilizados fueron fabricados en tubos de vidrio, cortados y doblados en “U”. Para algunas mediciones de pérdidas de energía, se utilizaron mangueras plásticas en lugar de manómetros diferenciales.

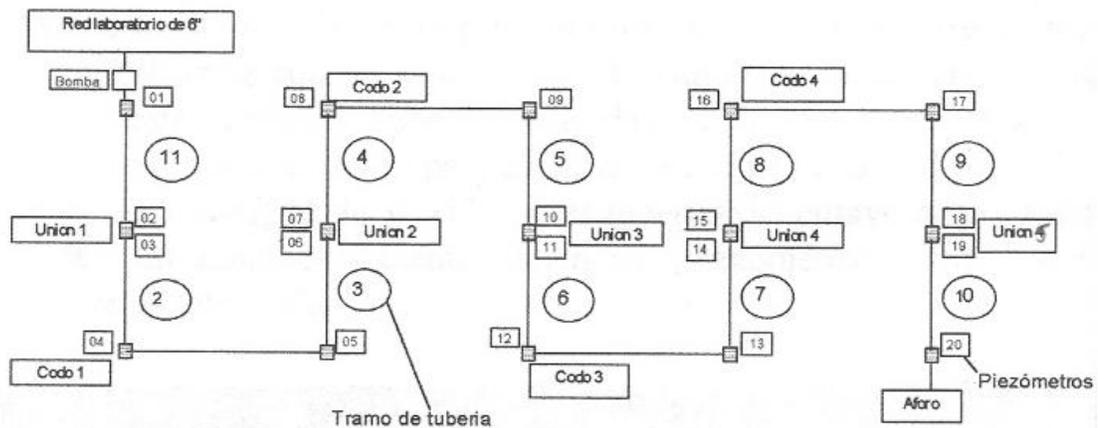


Figura 7-1 Modelo del montaje en el laboratorio

Las tuberías evaluadas fueron la PR 35 de diámetro nominal de 12mm y RDE=11¹ fabricada por PAVCO y dos tuberías de AGRIFIM DE COLOMBIA de 12 y 18mm con RDE=14². Se evaluaron conectores Bayoneta – Bayoneta (Tipo 1) y Rosca – Bayoneta (Tipo 2) (Ver Figura 7-2 y Figura 7-3)

¹ Tomado de la página web de PAVCO www.pavco.com.co

² Tomado de la página web de AGRIFIM de Colombia www.agrifim.com.co

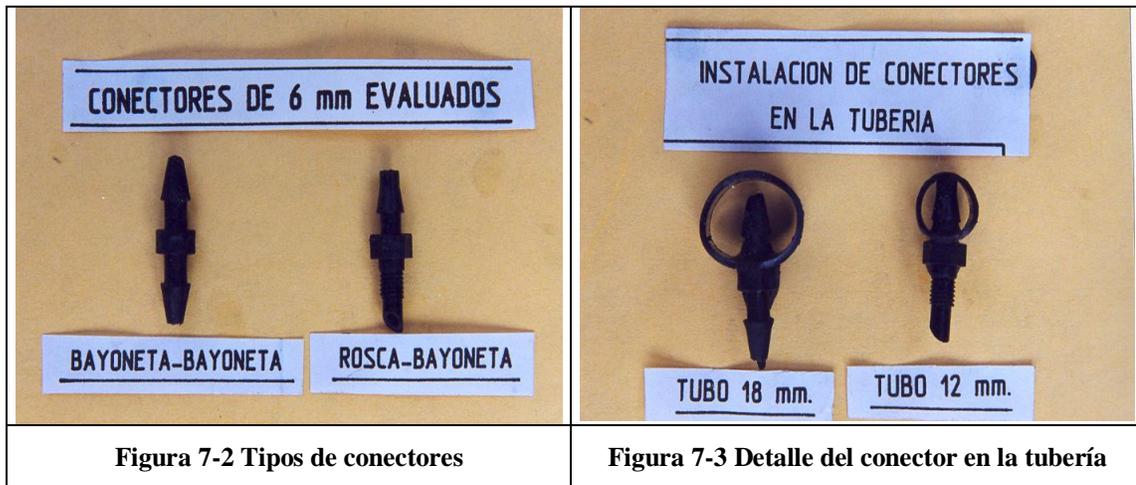


Figura 7-2 Tipos de conectores

Figura 7-3 Detalle del conector en la tubería

7.2 Resultados

El coeficiente de pérdidas menores en cada accesorio, se determinó despejando k_m de la Ecuación 7-1 de pérdidas menores.

$$h_m = k_m \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 7-1

donde h_m son las pérdidas de energía en el accesorio medidas con los manómetros y v es la velocidad del flujo; se determinaron coeficientes de pérdidas menores para conectores, codos y uniones.

Para los conectores, se realizaron alrededor de 55 pruebas con un rango de caudales entre 1.89×10^{-5} y $8.69 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ en las tuberías de 12mm y de 8.4×10^{-5} y $2.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ en la tubería de 18mm para cada tramo. Se determinaron los coeficientes para los conectores Bayoneta – Bayoneta (BB) y Rosca – Bayoneta (RB), con separaciones de 1m y 2m. En la Tabla 7-1 y Tabla 7-2 se presentan los resultados del coeficiente de pérdidas menores para cada conector, en las tuberías AGRIFIM de 12 y 18mm. El valor de cada tramo corresponde al promedio aritmético de todas las pruebas realizadas para el tramo.

Tabla 7-1 Tubería de 12mm Agrifim

Tramo	BB cada 2m	BB cada 1m	RB cada 2m	RB cada 1m
1	3,963	4,176	3,471	4,792
2	4,124	3,176	3,205	4,505
3	3,672	4,036	3,173	4,414
4	3,694	3,677	3,182	4,322
5	3,677	4,149	3,288	4,210
6	3,437	4,114	2,835	3,680
7	3,401	4,105	2,892	3,746
8	3,594	4,277	3,060	3,818
9	3,430	4,068	2,798	4,000
10	3,362	4,040	2,912	3,822
Promedio	3,634	3,981	3,081	4,131

Tabla 7-2 Tubería de 18mm Agrifim

Tramo	BB cada 2m	BB cada 1m	RB cada 2m	RB cada 1m
1	3,396	2,844	2,986	3,049
2	1,819	2,844	2,897	2,983
3	1,751	2,861	2,801	2,932
4	1,736	2,798	2,775	2,938
5	1,824	2,818	2,733	2,889
6	1,667	2,954	2,646	2,871
7	1,632	2,769	2,583	2,785
8	1,598	2,674	2,461	2,616
9	1,664	2,732	2,321	2,806
10	1,615	2,638	2,315	2,787
Promedio	1,868	2,793	2,652	2,865

También se determinaron coeficientes de pérdidas en codos y uniones en las tuberías de 12 y 18mm. Para estos accesorios se realizaron 60 pruebas con rangos de caudal entre 4.59×10^{-5} y 1.03×10^{-4} m³/s para cada uno y se obtuvo el promedio aritmético de los k_m . Los resultados de estas pruebas están consignados en la Tabla 7-3.

Tabla 7-3 Resultados obtenidos en accesorios de 12 mm y 18 mm

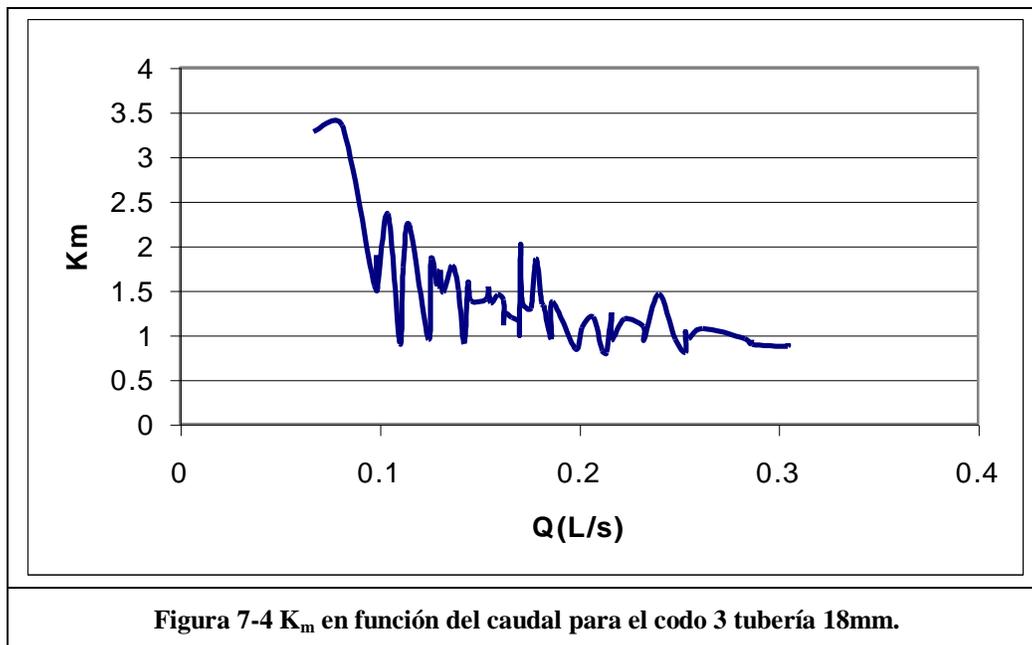
Diámetro	UNIONES					CODOS				
	1	2	3	4	Promedio	1	2	3	4	Promedio
12mm	1,97	2,66	1,42	1,19	1,81	2,33	2,22	1,76	1,87	2,045
18mm	0,798	0,807	0,746	0,690	0,760	1,393	1,368	1,344	1,302	1,352

Los resultados obtenidos son altos, comparados con los encontrados en las tablas emitidas por los fabricantes. El valor reportado por PAVCO es de 0.9 para los codos y de 0.07 para unión Z, cabe aclarar que estos valores son para tubería más grande de 6".

7.3 Análisis de resultados

Como ya se mencionó anteriormente, en las uniones se obtuvieron valores relativamente altos respecto a los reportados por los fabricantes. Esta inconsistencia se pudo estar determinada por el terminado final del elemento, que en algunos casos presenta un borde que ocasiona una pérdida adicional.

Se pudo determinar para los codos que el coeficiente de pérdida menor depende del caudal (Ver Figura 7-4). Los k_m obtenidos para este accesorio, fueron mayores a los reportados por Pavco, ya que se obtuvieron 2.045 y 1.325 para las tuberías de 12 y 18mm respectivamente, y el valor teórico es de apenas 0.9. El autor recomienda hacer evaluaciones más profundas sobre este accesorio en particular por su importancia en la ejecución de cálculos hidráulicos.



Lo que se pretendía evaluar con la inclusión de conectores en puntos fijos, era el aumento en la rugosidad del tramo. Sin embargo, esta rugosidad es aparente, ya que el obstáculo se ubica en puntos fijos, pero actúa como si estuviera a todo lo largo del tramo. Adicionalmente hay que tener en cuenta, la pérdida de caudal en el punto de inclusión del conector, que hace variar el número de Reynolds y por lo tanto el cálculo de la rugosidad absoluta.

Es importante resaltar, que la parte del conector insertada en la tubería mide 9mm (Ver Figura 7-3). Esto genera un obstáculo considerable en el flujo que no se puede despreciar, y que puede ser la causa del alto coeficiente encontrado para estos accesorios.

7.4 Conclusiones

- Se recomienda continuar con las investigaciones de pérdidas de energía para diferentes diámetros y otros accesorios.
- No es recomendable la utilización de conectores de 6mm en tuberías de menos de 18mm de diámetro, dadas las altas pérdidas generadas por este accesorio.

Capítulo 8 Influencia del crecimiento de biopelículas sobre la rugosidad absoluta en tuberías presurizadas.

Esta investigación fue efectuada por María Angélica Echevarría Gregory en conjunto con Cátedra PAVCO como su proyecto de grado de Ingeniería Civil en la Universidad de los Andes en el año 2003. Los montajes se realizaron en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes.

8.1 Montaje

El modelo físico está constituido por tres tuberías en serie de longitud 0.50, 6 y 3 m y un diámetro de ocho pulgadas característico de las redes de distribución de agua potable. Estas tuberías en serie de resistencia a presión de 200 psi, se conectan con dos tanques, A y B, de dimensiones internas 1 m de ancho, por 1 m de largo, por 1.6 m de altura.

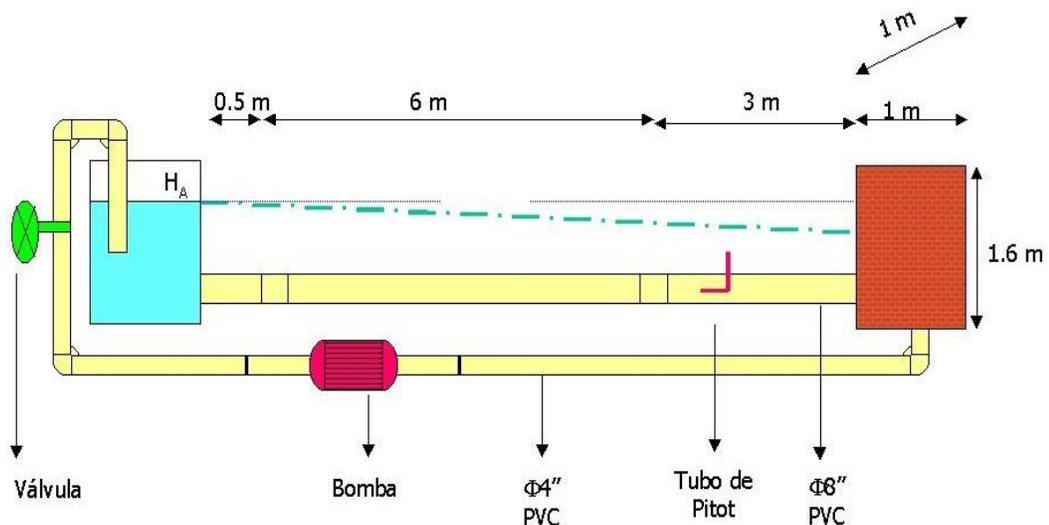


Figura 8-1 Modelo del montaje en el laboratorio

Del tanque B sale la tubería de realimentación del sistema, de diámetro 4 pulgadas e igualmente resistente a una presión de 200 psi, que se conecta a una bomba que aprovecha el exceso de cabeza hidráulica del tanque B (altura desde el nivel del tanque a la superficie superior de la tubería de 8") para impulsar el flujo hacia el tanque A de nuevo. El caudal que llega al tanque A para recircular está controlado por medio de una válvula. Este caudal es medido indirectamente a partir de la velocidad media de flujo obtenida con un tubo de Pitot localizado en la tubería principal (de longitud 6m). El sistema está provisto de piezómetros en determinadas

secciones de la serie de tuberías de 8 pulgadas, de forma que estos, llevados en su extremo libre a un tablero de medición, determinan la cabeza piezométrica a la que la sección está sometida.

8.2 Medición de pérdidas menores

Dadas la velocidad (v) y la pérdida de energía en el accesorio (h_m), se puede despejar el coeficiente de pérdidas menores (k_m) de la Ecuación 8-1.

$$h_m = \sum k_m \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

Ecuación 8-1

8.3 Resultados

En este proyecto de grado, se analizaron únicamente las pérdidas menores en dos uniones Z de 8" con RDE=32.5. En las tablas del ANEXO 1, se encuentran los datos de coeficientes de pérdidas menores para todas las pruebas realizadas en los accesorios mencionados. Se hicieron 10 pruebas por día con rangos de caudales entre 0.021 y 0.032m³/s, y se determinó el k_m de cada accesorio para cada prueba. Estos diez valores se promediaron y se tomó como un solo valor por prueba.

Se realizó la recopilación de los coeficientes de pérdidas menores para obtener valores promedio para las uniones Z. (ANEXO 1).

Se podría hacer una recopilación de todos los valores de k_m del ANEXO 1y de las velocidades, caudales o números de Reynolds correspondientes, de manera que se pueda hacer algún tipo de análisis estadístico que permita; o bien determinar un valor único de k_m , o bien una ecuación de k_m en función de la velocidad, el caudal o el número de Reynolds.

8.4 Conclusiones

Respecto a las pérdidas menores, se planteó únicamente la siguiente conclusión:

- Las pérdidas *menores* en las uniones presentan los mismos ciclos de comportamiento con relación al crecimiento de la biopelícula. La diferencia esquemática es que la amplitud de las variaciones del k_m es menor. Pero sigue siendo proporcional a la variación del espesor de la biopelícula, así como la variación del coeficiente de rugosidad absoluta.

Capítulo 9 Determinación de la rugosidad absoluta del PVC

Esta investigación estuvo a cargo de Oscar Alberto Cepeda Alzate en el año de 1995 como su proyecto de investigación. Este fue desarrollado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes en conjunto con la Cátedra PAVCO.

9.1 Montaje

Para la realización de las pruebas se utilizó tubería de PVC elaborado por la empresa PAVCO, de 2" de diámetro nominal y $RDE=21$, que soporta presiones de 200psi o 14.6Kg/cm^2 . La red de suministro del laboratorio tenía un diámetro de 12", lo que hizo necesario reducirlo a 4", donde se conectó un tramo de 1m de 4" el cual contaba con una válvula de control. Después el diámetro es reducido a 2 1/2" mediante un buje y posteriormente se conecta la tubería de prueba de 2". La tubería de prueba de 2" constaba de 12 tramos de 6m de longitud distribuidos en cuatro ramales (cada ramal 3 tramos de 6m y dos uniones soldadas), unidos mediante codos de 90° y uniones soldados, para una longitud aproximada de 70m. La medición de presiones se efectuaba mediante manómetros de mercurio y de tetracloruro de Carbono conectados a mangueras incrustadas en el inicio y final de los tramos de tubería de 2". Para la medición de los caudales fueron construidos dos canales, cada uno con su propio vertedero, comunicados entre sí por una válvula de 3" de diámetro ubicada en el fondo del canal principal. El canal principal posee un vertedero metálico triangular de 90°, diseñado para medir caudales altos, mayores a 5L/s, y el canal secundario tiene un vertedero triangular de cresta delgada hecho en acrílico con 30° de abertura, para medir caudales bajos, en este caso de 0.3L/s.

9.2 Resultados

Una vez se determinen las pérdidas de cabeza de agua con los manómetros y los caudales con los vertederos calibrados, se procede a calcular el número de Reynolds en la tubería (Ver Tabla 14-1), teniendo en cuenta la velocidad del flujo dentro de la tubería, el diámetro interno real cuyo valor es 0.05545 y ν la viscosidad cinemática del agua $1.14\text{e-}6$.

Con el valor de las pérdidas se obtiene el valor del factor de fricción f despejando de la ecuación de Darcy (Tabla 14-1).

Se tomaron un total de 858 lecturas, para 78 caudales diferentes, con un rango de número de Reynolds entre 8000 y 110000. Se observó que a medida que el número de Reynolds aumentaba, el factor de fricción disminuía. Después de realizar un análisis estadístico mediante una regresión de potencias (Ver Ecuación 9-1) se obtuvo el mejor resultado para la relación entre el Re y el factor de fricción, con un coeficiente de correlación de 0.99. Al comparar los resultados con los obtenidos por Blassius

(Tabla 14-1), se observa que se mantiene la misma tendencia de variación para el valor del factor de fricción según el número de Reynolds, aunque la curva del experimento esta por debajo de la curva determinada para la ecuación de Blassius.

$$f = \frac{0.6669}{Re^{0.3445}}$$

Ecuación 9-1

9.3 Análisis de resultados

Se obtuvo el diagrama de Moody (Ver Figura 9-1) para la tubería dentro de un rango de variación para el número de Reynolds de 8000 a 110000.

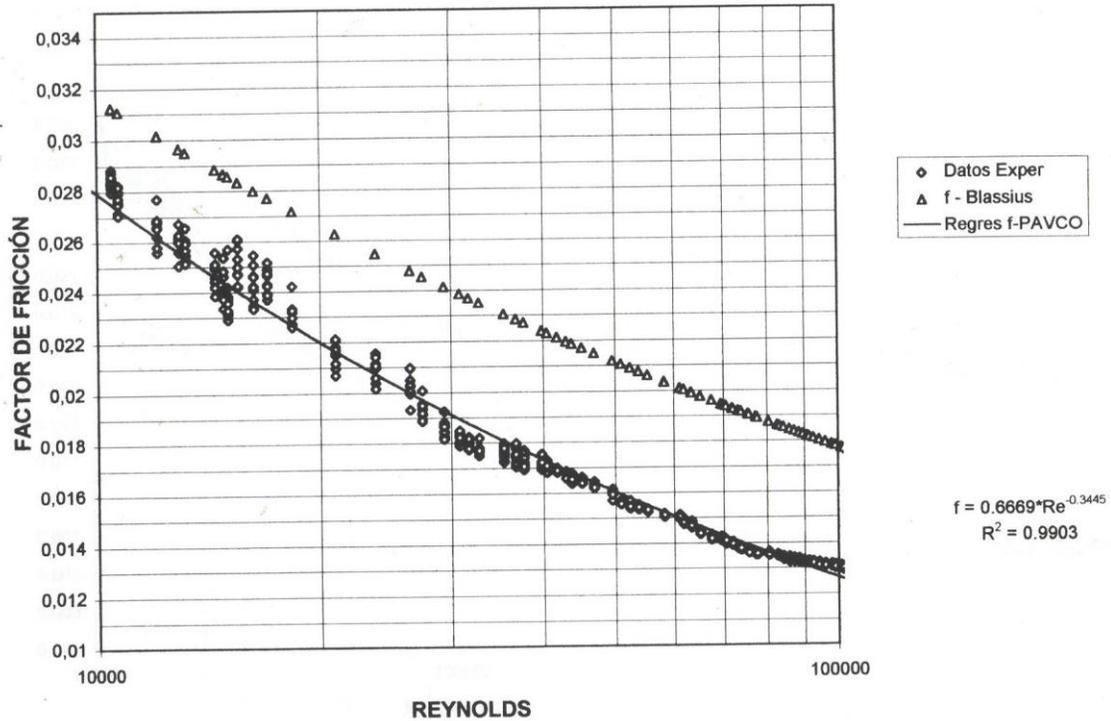


Figura 9-1 Diagrama de Moody

Para encontrar la ecuación que logró describir el mejor comportamiento del fluido, se realizó un análisis estadístico empleando para ello varios tipos de regresión a los que se les calculó el coeficiente de correlación y la ecuación que determinaba el comportamiento del factor de fricción según el número de Reynolds.

Regresión logarítmica: Se obtiene un $R^2=0.9693$. Presenta problemas con Reynolds mayores a 1482000 pues el factor de fricción se hace negativo.

$$f = -0.0064 \ln(\text{Re}) + 0.859$$

Ecuación 9-2

Regresión exponencial: Fue descartada puesto que para valores de Reynolds mayores a 500000 se obtiene factores de fricción cercanos a cero.

$$f = 0.0251 e^{-7 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Re}}$$

Ecuación 9-3

Regresión lineal: Tiene una baja correlación y se obtienen valores negativos para el factor de fricción.

$$f = -1 \cdot 10^{-7} \text{Re} + 0.246$$

Ecuación 9-4

Regresión polinómica grado dos: Se aprecia gráficamente (Ver Figura 9-2) que la curva difiere en gran medida de los resultados experimentales, además que para Reynolds mayores a 100.000 el factor de fricción crece.

$$f = 2 \cdot 10^{-12} \cdot \text{Re}^2 - 4 \cdot 10^{-7} \text{Re} + 0.03$$

Ecuación 9-5

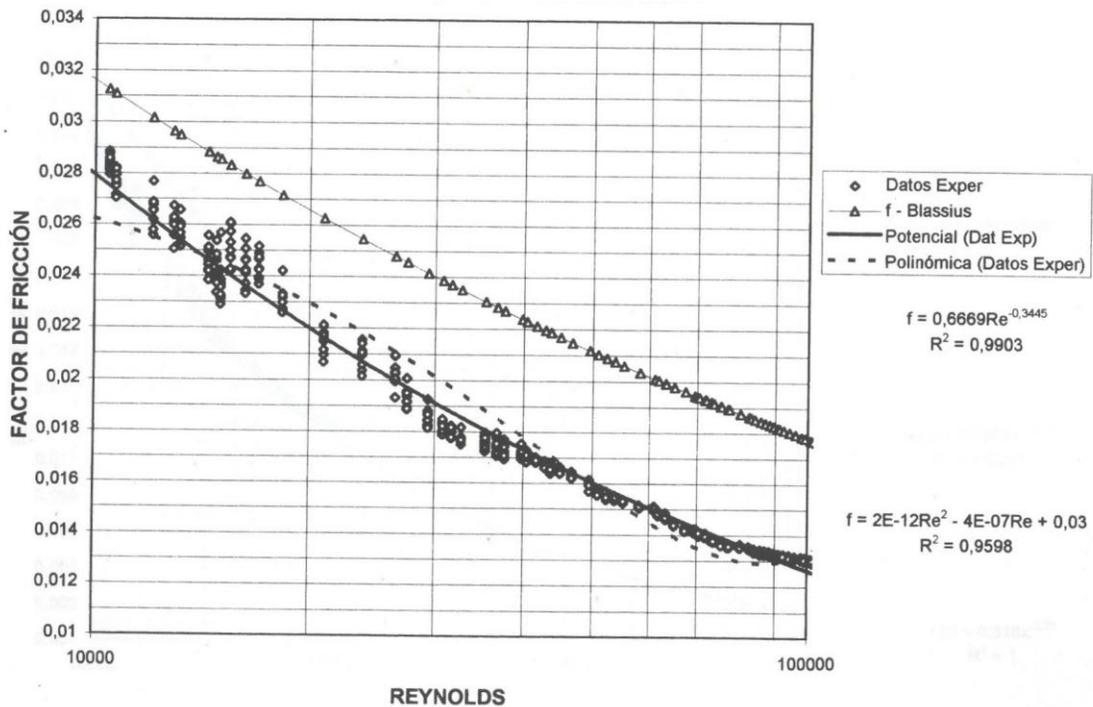


Figura 9-2 Regresión polinómica (línea punteada)

Regresión potencial: Es la que mejor se ajusta, se obtiene un coeficiente $R^2=0.99$, con una probabilidad de error de $\pm 1.26\%$.

$$f = \frac{0.6669}{\text{Re}^{0.3445}}$$

Ecuación 9-6

Al comparar la Ecuación 9-6 con la obtenida por Blassius, se observa que la del experimento se localiza por debajo de esta, aumentando la separación a medida que el Reynolds aumenta.

Se observó que los valores de f presentaron estabilización para Reynolds mayores a 60000 (Ver Figura 9-1), por lo que se presentó la hipótesis de realizar una regresión para números de Reynolds mayores a 60000 de donde se obtuvo la Ecuación 9-7, que es muy parecida a la encontrada por Blassius, pero cabe resaltar que esta fuera del rango de aplicabilidad de Blassius y que solo es válida para valores de Reynolds mayores a 60000.

$$f = \frac{0.248}{\text{Re}^{0.2567}}$$

Ecuación 9-7

Debido a que el flujo es hidráulicamente liso no es posible encontrar un valor para el coeficiente de rugosidad absoluta k_s , pero si obtener un límite para su tamaño determinando este límite como el 30.5% de la subcapa laminar viscosa (Tabla 14-1).

Con un número de Reynolds igual a 108346, pérdida de energía $hf=0.3568\text{m}$., en una longitud de 5.885m, se obtiene que el coeficiente de rugosidad absoluta debe ser menor a $4.44 \cdot 10^{-5}\text{m}$.

9.4 Conclusiones

- El comportamiento del flujo es más liso que el observado por Blassius, debido a que los valores para el factor de fricción siempre se localizan por debajo que la curva producida por su ecuación.
- Si se utiliza la ecuación de Blassius para la determinación del factor de fricción, se incurre en un error, sobrediseñando las redes de tuberías obteniendo diámetros mayores.
- No fue posible obtener la rugosidad de la tubería por encontrarse en flujo hidráulicamente liso. Se obtuvo que este coeficiente debe ser menor a $4.44 \cdot 10^{-5}\text{m}$.
- Es necesario aumentar el rango de número de Reynolds en las pruebas para obtener valores más significativos.

Capítulo 10 Determinación de la rugosidad absoluta (k_s) de tuberías de pequeños diámetros en polietileno utilizadas en riego localizado de alta frecuencia.

Este proyecto de grado también fue citado en el área de coeficientes de pérdidas menores en el capítulo 7. Este proyecto que fue realizado por Humberto Pérez Pedreros también trabajó en el área de coeficientes de rugosidad absoluta. Repetiremos este proyecto pero nos concentraremos en la parte de rugosidad de la tubería, así como realizaremos una explicación breve del montaje.

10.1 Montaje

El montaje constaba de tres sistemas de tuberías para riego, de diez tramos cada una. Los diámetros utilizados fueron en dos casos 12mm, una fabricada por PAVCO y otra por Agrifim, y en el tercer caso fue 18mm fabricada por Agrifim. A estos sistemas se le evaluarían las pérdidas de energía a causa de la instalación de conectores para riego.

10.2 Resultados y análisis

Para los cálculos de de las pérdidas por fricción se utilizo un diámetro real de 9.75mm para la tubería de PAVCO, 9.68mm para la tubería Agrifim de 12mm y 16.505mm para la tubería Agrifim de 18mm. Teniendo los valores de caudal y pérdidas de presión, se procede al cálculo de la velocidad y del número de Reynolds (Tabla 14-1). Utilizando la ecuación de Darcy (Tabla 14-1) se despeja el factor de fricción, para con este valor utilizar la ecuación de Colebrook-white (Tabla 14-1) y obtener el valor del coeficiente de rugosidad absoluta k_s . Este cálculo se realizó para la tubería lisa, sin la instalación de los conectores.

Los valores de k_s obtenidos pueden ser apreciados en la

Tabla 10-1, Tabla 10-2 y Tabla 10-3, para números de Reynolds que variaron entre 2000 y 7900 para la tubería de 12mm y entre 4000 y 21000 para la de 18mm. Números de Reynolds por debajo de 2000 fueron descartados para los cálculos de k_s .

Tabla 10-1 Rugosidad tubería PAVCO 12mm

Tramo	Factor de fricción	Rugosidad
1	0,04571	7,65E-05
2	0,04625	7,11E-05
3	0,04141	8,80E-05
4	0,04943	6,44E-05
5	0,05301	6,94E-05
6	0,06643	5,42E-05
7	0,03622	4,71E-05
8	0,03547	4,03E-05
9	0,04047	4,57E-05
10	0,03199	3,55E-05

Tabla 10-2 Rugosidad tubería Agrifim 12mm

Tramo	Factor de fricción	Rugosidad
1	0,04354	6,95E-05
2	0,04365	7,04E-05
3	0,04317	6,54E-05
4	0,04347	6,89E-05
5	0,04347	6,87E-05
6	0,04332	6,74E-05
7	0,04182	5,03E-05
8	0,04214	5,28E-05
9	0,04136	4,54E-05
10	0,04111	4,24E-05

Tabla 10-3 Rugosidad tubería Agrifim 18mm

Tramo	Factor de fricción	Rugosidad
1	0,40450	1,45E-04
2	0,03889	1,15E-04
3	0,03843	1,08E-04
4	0,03825	1,05E-04
5	0,03985	1,30E-04
6	0,03926	1,21E-04
7	0,03896	1,15E-04
8	0,03898	1,15E-04

9	0,03892	1,14E-04
10	0,03821	1,03E-04

Dada la existencia de flujo turbulento hidráulicamente liso, se calculó la variación del factor de fricción con el número de Reynolds, los resultados se ilustran en la Tabla 10-4, Tabla 10-5 y Tabla 10-6

Tabla 10-4 Regresión potencial para factor de fricción (PAVCO12mm)

Tramo	Ecuación	R ²
1	$f=0.3246Re^{-0.2308}$	0.9545
2	$f=0.2713Re^{-0.2096}$	0.9049
3	$f=0.2749Re^{-0.2067}$	0.9406
4	$f=0.1856Re^{-0.1685}$	0.9196
5	$f=0.2294Re^{-0.1905}$	0.9313
6	$f=0.2427Re^{-0.2024}$	0.9544
7	$f=0.4533Re^{-0.2788}$	0.9057
8	$f=0.3253Re^{-0.2419}$	0.9052
9	$f=0.6244Re^{-0.3164}$	0.9396
10	$f=0.3560Re^{-0.2523}$	0.9319

Tabla 10-5 Regresión potencial para factor de fricción (Agrifim12mm)

Tramo	Ecuación	R ²
1	$f=0.4081Re^{-0.2435}$	0.9257
2	$f=0.3941Re^{-0.2446}$	0.9151
3	$f=0.3207Re^{-0.2462}$	0.9427
4	$f=0.4323Re^{-0.2466}$	0.9222
5	$f=0.3958Re^{-0.2376}$	0.9116
6	$f=0.3859Re^{-0.2251}$	0.9087
7	$f=0.3950Re^{-0.2402}$	0.9143
8	$f=0.4135Re^{-0.2473}$	0.9240
9	$f=0.4091Re^{-0.2467}$	0.9187
10	$f=0.3841Re^{-0.2355}$	0.9050

Tabla 10-6 Regresión potencial para factor de fricción (Agrifim18mm)

Tramo	Ecuación	R ²
1	$f=0.6812Re^{-0.3424}$	0.9027
2	$f=0.4262Re^{-0.3012}$	0.9098
3	$f=0.4421Re^{-0.3110}$	0.9035
4	$f=0.5214Re^{-0.3240}$	0.9353
5	$f=0.5010Re^{-0.3224}$	0.9044
6	$f=0.4886Re^{-0.2976}$	0.9148
7	$f=0.3860Re^{-0.2928}$	0.9258
8	$f=0.3560Re^{-0.2812}$	0.9217
9	$f=0.3900Re^{-0.2979}$	0.9222

10	$f=0.4394Re^{-0.3042}$	0.9262
----	------------------------	--------

Los datos de la tubería de 12mm de PAVCO fueron tomados de una investigación realizada previamente por Jaime Izquierdo Bautista en su trabajo llamado “Determinación de la rugosidad absoluta (k_s) de tuberías de pequeños diámetros en polietileno utilizados en riego localizado de alta frecuencia”.

10.3 Conclusiones

- El valor de la rugosidad absoluta para la tubería de polietileno de 12mm producida por la compañía PAVCO se estableció como $5.92108 \cdot 10^{-5}$ m, de $6.012 \cdot 10^{-4}$ m para la tubería de 12mm de AGRIFIM y de $1.171 \cdot 10^{-4}$ m para la tubería de 18mm de AGRIFIM.

Capítulo 11 Rugosidad absoluta, coeficientes de pérdidas menores y metodología de la longitud equivalente en tuberías de PVC.

Este proyecto de investigación fue realizado por Carlos David Umaña Mesa. Esta investigación también fue revisada en la parte de pérdidas menores en el capítulo 6, por lo que hacemos una breve explicación del montaje y nos concentramos en los procedimientos de cálculo y análisis de resultados de los coeficientes de rugosidad absoluta.

11.1 Montaje

Consistía en dos sistemas de tuberías de 6 y 8” respectivamente, donde se realizaron pruebas para el cálculo del coeficiente de rugosidad absoluta en la tubería y del coeficiente de pérdidas menores en accesorios.

11.2 Cálculo de las pérdidas por fricción y la rugosidad absoluta

Para el cálculo del factor de fricción se utiliza la ecuación de Darcy (Tabla 14-1). Como se espera tener flujo turbulento hidráulicamente liso lo que se busca es ajustar estos valores a la ecuación de Blassius (Tabla 14-1). Además no es posible obtener un valor del coeficiente de rugosidad absoluta, por lo que se debe calcular su rango con las ecuaciones de límite para el coeficiente de rugosidad absoluta (Tabla 14-1)

11.3 Resultados y análisis

El comportamiento de los diagramas de Moody fue típico. La curva de estos diagramas siempre estuvo por debajo de la descrita por Blassius con excepción de una tubería. Se realizó una regresión de potencias con los valores del factor de fricción y su respectivo número de Reynolds por ser la relación que dedujo Blassius, teniendo en cuenta valores de Reynolds mayores a 100000 que es el rango donde se estabiliza el factor de fricción. Los resultados se observan en la Tabla 11-1 y Tabla 11-2.

Tabla 11-1 Regresión potencial para factor de fricción tubería 6"

Tramo 6"	Ecuación	R ²
1	$f=63.1Re^{-0.76}$	0.959
2	$f=2.24Re^{-0.483}$	0.942
3	$f=1.7868Re^{-0.4508}$	0.961
4	$f=0.2584Re^{-0.2511}$	0.971
5	$f=1.4025Re^{-0.4079}$	0.963
6	$f=0.1924Re^{-0.26}$	0.970
7	$f=0.2493Re^{-0.2664}$	0.970
8	$f=0.9823Re^{-0.3884}$	0.964
10	$f=1.069Re^{-0.3901}$	0.964

Tabla 11-2 Regresión potencial para factor de fricción tubería 8"

Tramo 8"	Ecuación	R ²
1	$f=0.0627Re^{-0.1433}$	0.950
2	$f=0.00972Re^{-0.006}$	0.963
3	$f=0.00758Re^{-0.0362}$	0.965
4	$f=0.14027Re^{-0.1489}$	0.946

Para el cálculo del límite del valor de k_s se trabajó con rangos de número de Reynolds de entre 5000 y 260000 para la tubería de 6" y entre 25000 y 470000 para la tubería de 8". Los valores máximos para los coeficientes de rugosidad absoluta están consignados en la Tabla 11-3

Tabla 11-3 Valores máximos para según k_s

Diámetro	Valor máximo para k_s (m)
2*	4.44e-5
2.5*	3.78e-5
3*	3.65e-5
4*	3.54e-5
6*	5.03e-5
6	6.24e-5
8	4.31e-5

*Tomado del proyecto de grado de Andrés Forero 1995.

Capítulo 12 Determinación del coeficiente de pérdidas para una tubería para riego por goteo.

Este trabajo de investigación fue realizado por Daniel Umaña Echevarria, como proyecto de grado en Ingeniería Civil en la Universidad de los Andes. Fue desarrollado en el laboratorio de hidráulica de esta misma universidad en el año de 1994 en conjunto con la Cátedra PAVCO.

12.1 Montaje

El modelo consta de 30 manómetros, discriminados entre Alcohol Bencílico, Tetracloruro de Carbono y mercurio, diez de cada uno. Además de un tanque de aforo de caudales calibrado utilizado para conocer el volumen en un determinado tiempo. Para la toma de medidas en los manómetros se adaptó un flexómetro en el centro de la "U" de los manómetros.

Para el sistema de riego se utilizó una manguera PAVCO de 16mm de diámetro nominal, de referencia TUBERÍA PR 35 RIEGO 44 11 08 ½" 16 x 1.2mm 35psi 0.25Mpa I.S.O. Esta manguera había sido ya utilizada en proyectos anteriores por lo que ya tenía instalados los conectores de 6mm a distancias determinadas de esta manera (Ver Tabla 12-1).

Tabla 12-1 Distancia entre conectores

Tramo	Distancia (m)
1	10.045
2	9.970
3	9.970
4	10.200
5	10.160
6	9.960
7	10.010
8	10.160
9	10.200
10	9.920

La manguera esta conectada a una tubería de 1" en PVC, la cual es abastecida a través de una silleta colocada en un tubo de 6" de asbesto cemento que hace parte de la red de tuberías del laboratorio. Se cuenta, adicionalmente, con una bomba conectada a la tubería de 1" para obtener presiones mayores de 10psi.

12.2 Cálculo de pérdidas

Teniendo los valores de caudal y pérdidas de presión, se procede al cálculo de la velocidad y del número de Reynolds (Tabla 14-1). Utilizando la ecuación de Darcy (Tabla 14-1) se despeja el factor de fricción, para con este valor utilizar la ecuación de Colebrook-white (Tabla 14-1) y obtener el valor del coeficiente de rugosidad absoluta k_s .

12.3 Resultados y análisis

Para los resultados obtenidos de números de Reynolds mayores a 2000 y sus respectivos factores de fricción, se analizó el error experimental respecto a la ecuación de Blassius (Tabla 14-1 ec. De Blassius). La ecuación de Blassius tuvo una proximidad con los datos del 87.705% y unos mínimos cuadrados de 4.796e-8. También se analizaron los datos mediante una regresión potencial, la que mostró una ecuación para el factor de fricción f muy parecida a la obtenida por Blassius, con un coeficiente de correlación igual a 0.93055 (Ver Ecuación 12-1).

$$f = \frac{0.5493}{Re^{0.3013}}$$

Ecuación 12-1

Utilizando la ecuación de Colebrook-White (Tabla 14-1) se obtuvieron diferentes valores para el coeficiente de rugosidad absoluta. Después de sacar el promedio se obtuvo un valor de k_s igual a 6.178e-5m.

12.4 Conclusiones

- La ecuación de Blassius es la que mejor se aproxima a los resultados experimentales.
- El coeficiente de rugosidad absoluta para la manguera PAVCO 16mm es aproximadamente 6.178e-5m.

Capítulo 13 Influencia del crecimiento de biopelículas sobre la rugosidad absoluta en tuberías presurizadas.

Este montaje realizado por María Angélica Echevarría, ya fue estudiado para pérdidas menores en el capítulo 8. Por esto nos concentramos en la parte de rugosidad y exceptuamos la explicación del montaje

13.1 Cálculo de pérdidas

Dado el hecho que este trabajo de investigación fue realizado para observar la variación del k_s en tuberías presurizadas por crecimiento de biopelícula, se calculó el k_s de la tubería lisa para la primera semana de pruebas.

Para este cálculo se utilizaron las ecuaciones de Darcy para hallar el factor de fricción, con el que posteriormente se obtuvo el valor de k_s a partir de la ecuación de Colebrook-white (Tabla 14-1).

13.2 Resultados

Para la primera semana se obtuvo, a partir de un promedio de pruebas, un valor de k_s para la tubería de $2.372e-5$

Capítulo 14 Tabla de ecuaciones

Tabla 14-1 Ecuaciones para cálculo de coeficiente de rugosidad absoluta

Numeración	Referencia	Ecuación(es)
14-1	Cálculo de la velocidad	$v=Q/A$
14-2	Cálculo del número de Reynolds	$Re = \frac{v * d}{\nu}$
14-3	Ec. de Darcy	$hf = f \frac{l * v^2}{d * 2g}$
14-4	Ec. de Blassius	$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$
14-5	Cálculo del límite para el valor del k_s .	$\tau = \frac{d}{4} \rho g \frac{hf}{l}$ $V^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$ $\delta = \frac{11.6v}{V^*}$ $k_s \leq 0.305 \delta k$
15-6	Ec. de Colebrook-White y cálculo de k_s a partir de esta.	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right]$ $k_s = 3.7d * \left[10^{-\frac{1}{-2\sqrt{f}}} - \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right]$

Capítulo 15 CONCLUSIONES

- Comparando los valores de los coeficientes de pérdidas menores de accesorios de igual diámetro, se observa que varían bastante de un fabricante a otro, incluso del mismo fabricante. También se observan variaciones de estos coeficientes según situaciones de flujo, que implican un k_m no constante.
- En general, en la mayoría de la tesis se determinó el coeficiente de pérdidas menores haciendo el promedio aritmético de las pruebas. Sin embargo se podría estar incurriendo en un error, ya que se pudo ver que el coeficiente de pérdidas menores varía con el número de Reynolds, llegando a un valor asintótico para Reynolds muy altos. Al tomar el promedio aritmético se estaría incurriendo en errores grandes al exponerse a números de Reynolds que produzcan k_m relativamente altos o bajos respecto al promedio.
- Posiblemente, lo más correcto sería no determinar un único coeficiente de pérdidas menores, sino determinar una ecuación en función de Reynolds para cada accesorio, con el fin de diseñar con el coeficiente de pérdidas menores exacto para el caudal demandado y de esta manera no subestimar o sobrestimar el valor de las pérdidas menores, logrando el diseño óptimo.
- Se observó que el comportamiento del flujo para tuberías a presión es más liso que el observado por Blassius, debido a que la curva siempre se localiza por debajo de la producida por su ecuación. El cálculo mediante estos procedimientos (Ec. de Blassius) podría traducirse en un error en los diseños, necesitando diámetros mas grandes para las redes de tuberías.
- Se observó para todas las investigaciones que las pruebas estaban en el rango de flujo turbulento hidráulicamente liso, por esto no era posible obtener un valor exacto para k_s , sino un valor máximo para este evaluado como el 30.5% de la subcapa laminar viscosa. En algunas investigaciones se procedió a calcular este coeficiente utilizando la ecuación de Colebrook-white, debido a la necesidad de evaluar cambios en este valor ya sea por crecimiento de biopelícula o por inclusión de accesorios para riego. Cabe aclarar que en las tesis la inclusión de accesorios para riego era tomado como un aumento en la rugosidad absoluta, y solo en algunas se tomó como pérdida menor.

Capítulo 16 Coeficientes de pérdidas menores

Accesorio	Dimensión	Material	Fabricante	k_m
Expansión	2" x 2 1/2"	PVC	RALCO	-1.550
	1" x 2"	PVC	RALCO	0.758
	2" x 3"	PVC	PAVCO	0.529
	2" x 2 1/2"	PVC	PAVCO	0.240
	1 1/2" x 2"	PVC	PAVCO	0.303
	1" x 2"	PVC	PAVCO	0.516
	2" x 3"	PVC	GERFOR	0.292
	1 1/2" x 2"	PVC	GERFOR	0.259
	4" x 6"	Hierro fundido	PAVCO	0.1676
	6" x 8"	Hierro fundido	PAVCO	0.1472
Reducción	2 1/2" x 2"	PVC	RALCO	0.201
	2" x 1"	PVC	RALCO	0,095 - 0,15
	3" x 2"	PVC	PAVCO	0.051
	2 1/2" x 2"	PVC	PAVCO	0.145
	2" x 1 1/2"	PVC	PAVCO	0.091
	2" x 1"	PVC	PAVCO	0.328
	3" x 2"	PVC	GERFOR	0.131
	2" x 1 1/2"	PVC	GERFOR	0.115
	6" x 4"	Hierro fundido	PAVCO	0.1657
	8" x 6"	Hierro fundido	PAVCO	0.2998
Codo	2"	PVC	RALCO	1.273
	2"	PVC	PAVCO	1.608
	2 1/2"	PVC	PAVCO	2.180
	2"	PVC	PAVCO	1.161
	2 1/2"	PVC	PAVCO	2.316
	2"	PVC	PAVCO	1.185
	2 1/2"	PVC	PAVCO	2.461
	2"	PVC	GERFOR	1.465
	2"	Polietileno	PAVCO	1.4-1.6
	2"	Polietileno	PAVCO	1.6-1.8
	3"	Polietileno	PAVCO	2.0-3.0
	3"	Polietileno	PAVCO	1.9-3.1
	4"	Polietileno	PAVCO	2.5-3.1
	4"	Polietileno	PAVCO	2.7-3.2
	6"	PVC	PAVCO	0.2921
	8"	PVC	PAVCO	0.2343
	12mm	PVC	AGRIFIM	2.045
	18mm	PVC	AGRIFIM	1.352

Accesorio	Dimensión	Material	Fabricante	k_m
<i>Semicodo</i>	2"	PVC	PAVCO	0.276
	2 1/2"	PVC	PAVCO	0.375
	2 1/2"	PVC	PAVCO	2.461
<i>T recta</i>	2"	PVC	RALCO	0.167
	2"	PVC	PAVCO	0.174
	2 1/2"	PVC	PAVCO	0.036
	2"	PVC	GERFOR	0.131
<i>T perpendicular</i>	2"	PVC	RALCO	1.293
	2"	PVC	PAVCO	1.135
	2 1/2"	PVC	PAVCO	0.775
	2"	PVC	GERFOR	1.784
<i>T Recta flujo perpendicular</i>	2"	PVC	RALCO	0.497
	2"	PVC	PAVCO	4.489
	2 1/2"	PVC	PAVCO	-1.940
	2"	PVC	GERFOR	0.410
<i>T Perpendicular flujo recto</i>	2"	PVC	RALCO	5.093
	2"	PVC	PAVCO	4.471
	2 1/2"	PVC	PAVCO	3.705
	2"	PVC	GERFOR	5.739
<i>Adaptador Macho</i>	2"	PVC	RALCO	0.500
	2"	PVC	PAVCO	0.168
	2 1/2"	PVC	PAVCO	0.197
	2"	PVC	GERFOR	0.140
<i>Union</i>	2"	PVC	RALCO	0.096
	2"	PVC	PAVCO	0.049
	2 1/2"	PVC	PAVCO	0.028
	2"	PVC	GERFOR	0.072
	3"	PVC	GERFOR	0.185
	2"	Polietileno	PAVCO	0.32-0.37
	2"	Polietileno	PAVCO	0.27-0.31
	3"	Polietileno	PAVCO	0.17-0.22
	3"	Polietileno	PAVCO	0.15-0.25
	3"	Polietileno	PAVCO	0.24-0.40
	4"	Polietileno	PAVCO	0.10-0.19
	4"	Polietileno	PAVCO	0.175-0.27
<i>Union Z</i>	3"	PVC	PAVCO	0.05
	6"	PVC	PAVCO	0.1798
	8"	PVC	PAVCO	0.1854
	12mm	PVC	AGRIFIM	1.810

Accesorio	Dimensión	Material	Fabricante	k_m
<i>Union Z</i>	18mm	PVC	AGRIFIM	0.760
	8"	PVC	PAVCO	0.172
	8"	PVC	PAVCO	0.105
<i>Conector bayoneta-bayoneta</i>	Tubería de 12mm cada 1m	Polietileno	AGRIFIM	3.981
	Tubería de 12mm cada 2m	Polietileno	AGRIFIM	3.634
	Tubería de 18mm cada 1m	Polietileno	AGRIFIM	2.793
	Tubería de 18mm cada 2m	Polietileno	AGRIFIM	1.868
<i>Conector rosca-bayoneta</i>	Tubería de 12mm cada 1m	Polietileno	AGRIFIM	4.131
	Tubería de 12mm cada 2m	Polietileno	AGRIFIM	3.081
	Tubería de 18mm cada 1m	Polietileno	AGRIFIM	2.865
	Tubería de 18mm cada 2m	Polietileno	AGRIFIM	2.652

Capítulo 17 Coeficientes de rugosidad absoluta

Dimensión	Material	Fabricante	Valor máximo para k_s (m)
2"	PVC	PAVCO	4.44e-5
2.5"	PVC	PAVCO	3.78e-5
3"	PVC	PAVCO	3.65e-5
4"	PVC	PAVCO	3.54e-5
6"	PVC	PAVCO	5.03e-5
6"	PVC	PAVCO	6.24e-5
8"	PVC	PAVCO	4.31e-5

Dimensión	Material	Fabricante	Valor para k_s (m)
12mm	Polietileno	PAVCO	5.921e-5
12mm	Polietileno	Agrifim	6.012e-4
18mm	Polietileno	Agrifim	1.171e-4
16mm	Polietileno	PAVCO	6.178e-5
8"	PVC	PAVCO	2.372e-5

Capítulo 18 ANEXO 1

Prueba número	Unión1	Unión2
Prueba 1	0,067	0,131
Prueba 2	0,130	0,121
Prueba 3	0,289	0,137
Prueba 4	0,258	0,125
Prueba 5	0,277	0,132
Prueba 6	0,314	0,126
Prueba 7	0,263	0,132
Prueba 8	0,253	0,118
Prueba 9	0,282	0,114
Prueba 10	0,199	0,097
Prueba 11	0,129	0,073
Prueba 12	0,009	0,075
Prueba 13	0,020	0,071
Prueba 14	-0,026	0,081
Prueba 15	-0,031	0,086
Prueba 16	0,015	0,088
Prueba 17	0,041	0,069
Prueba 18	-0,030	0,072
Prueba 19	-0,036	0,097
Prueba 20	0,062	0,088
Prueba 21	0,005	0,096
Prueba 22	0,055	0,087
Prueba 23	0,100	0,092
Prueba 24	0,061	0,107
Prueba 25	0,077	0,070
Prueba 26	0,086	0,098
Prueba 27	0,058	0,071
Prueba 28	0,074	0,065
Prueba 29	0,096	0,075
Prueba 30	0,035	0,095
Prueba 31	0,054	0,155
Prueba 32	-0,234	0,060
Prueba 33	0,091	0,063
Prueba 34	0,097	0,069
Prueba 35	0,165	0,108
Prueba 36	0,206	0,100
Prueba 37	0,240	0,138
Prueba 38	0,223	0,153
Prueba 39	0,285	0,153
Prueba 40	0,330	0,100
Prueba 41	0,372	0,053
Prueba 42	0,219	0,167

Prueba número	Unión1	Unión2
Prueba 43	0,184	0,109
Prueba 44	0,208	0,083
Prueba 45	0,209	0,096
Prueba 46	0,372	0,103
Prueba 47	0,734	0,138
Prueba 48	0,452	0,123
Prueba 49	0,198	0,113
Prueba 50	0,194	0,130
Prueba 51	0,202	0,130
Prueba 52	0,409	0,137
Prueba 53	0,292	0,106
Prueba 54	0,192	0,115
Prueba 55	0,170	0,107
Prueba 56	0,207	0,081
Prueba 57	0,217	0,111
Prueba 58	0,423	0,125
Prueba 59	0,160	0,145
Prueba 60	0,191	0,111
Prueba 61	0,189	0,109
Prueba 62	0,200	0,104
Prueba 63	0,217	0,110
Prueba 64	0,189	0,113
Promedio	0,172	0,105