

# ESTUDIO DEL COEFICIENTES DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS PRIMERA ETAPA

## INFORME FINAL

COORDINACIÓN DE HIDRÁULICA  
SUBCOORDINACIÓN  
DE HIDRÁULICA URBANA

CONVENIO DE COLABORACIÓN:  
PROYECTO INTERNO HC1508.1



## **INFORME FINAL**

# **ESTUDIO DEL COEFICIENTES DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS PRIMERA ETAPA**

**PROYECTO INTERNO HC1508.1**

**Coordinación de Hidráulica**

**Subcoordinación de Hidráulica Urbana**

Petronilo E. Cortez Mejía.- Jefe de Proyecto

Ignacio A. Caldiño Villagómez.- Especialista en Hidráulica

José Manuel Rodríguez Varela.- Subcoordinador

## Contenido

Diciembre del 2015

Introducción.....	1
1 Identificación y Visita de Laboratorios.....	3
1.1 Laboratorios de Pruebas en Conductos con Flujo a Presión.....	3
1.2 Laboratorios de pruebas en conductos con flujo a superficie libre.....	5
1.3 Normativa Nacional e Internacional de Tuberías.....	6
1.4 Investigación Bibliográfica.....	7
1.5 El Laboratorio de hidráulica Enzo Levi.....	8
1.6 Visita al Laboratorio de la UANL.....	11
2 Planteamiento y Diseño de Módulos Experimentales.....	16
2.1 Módulo para Flujo a Presión.....	16
2.2 Diseño del Módulo junto al Canal de Pendiente Nula.....	18
2.3 Módulo para flujo a superficie libre.....	22
2.4 Diseño de las pruebas.....	27
2.5 Ejecución de Pruebas Preliminares.....	29
3 Instalación de una Primera Etapa de Módulos.....	32
3.1 Instrumentación para las Pruebas.....	34
4 Habilitación del Tanque del Modelo Físico del Zapotillo.....	41
5 Pruebas en el canal de pendiente variable.....	43
6 Resultados.....	45
Bibliografía.....	51

## Indice de Figuras

.....	
Fig. 1. Arreglo para tubería de 18 pulgadas (Barfuss, S. et al, 1988).....	4
Fig. 2. Esquema del módulo de pruebas. Fuente: Universidad de los Andes, CIACUA (2009).....	6
Fig. 3. Variación del coeficiente de Manning .....	7
Fig. 4. Plano con la infraestructura hidráulica en laboratorio Enzo Levy .....	9
Fig. 5. Esquema de instalación de la UANL para calcular los coeficientes de fricción.....	15
Fig. 6. Esquema para planteamiento de la prueba de pérdida por fricción.....	16
Fig. 7. Análisis hidráulico para el módulo de pruebas de pérdida de carga en tuberías con flujo a presión. ....	19
Fig. 8. Esquema hidráulico para el módulo de pruebas de pérdida de carga en tuberías con flujo a superficie libre .....	23
Fig. 9. Formato de las pruebas.....	29
Fig. 10. Planta y perfil de la instalación.....	32
Fig. 11. Esquema de conexiones a tanque del Zapotillo y a la línea de pruebas .....	42
.....	
Fig. 12. Esquema del canal de pendiente variable .....	43
Fig. 13. Resultados de las mediciones en la fecha indicada.....	48
Fig. 14. Resultados de las mediciones en la fecha indicada.....	48
Fig. 15. Resultados de las mediciones en la fecha indicada.....	49
Fig. 16. Resultados de las mediciones en la fecha indicada.....	49
Fig. 17. Resultados de las mediciones en la fecha indicada.....	50
Fig. 18. Resultados de las mediciones en la fecha indicada.....	50

## Indice de Fotografías

Fotos 1 y 2. Modelo físico del túnel del Tecorito.....	10	
Fotos 3 y 4. Vistas generales del exterior del laboratorio.....	12	
Fotos 5 y 6. Vistas interiores generales del laboratorio.....	12	
Fotos 7 y 8. Tanque elevado y equipos de bombeo .....	12	
Fotos 9 y 10. Arreglo de tubos de instalación de pruebas .....	13	
Fotos 11 y 12. Purga de la línea y manómetro U .....	13	
Fotos 13 y 14. Conexiones del tubo al manómetro .....	14	
Foto. 15. Canal largo de pendiente nula del IMTALAB. Longitud: 48 m, y sección de 0.61 m X 0.99 m. ....	18	
Foto 16. Detalle de tubería de alimentación de canal largo de pendiente nula. ....	19	
Foto 17. Panorámica del canal de pendiente variable, de 18 m de longitud, sección de 0.60 m X 0.685 m. Se observa el sistema de control de la pendiente con cilindros hidráulicos y bomba manual. Asimismo el control electromecánico para posicionar placa vertedora en el extremo final del canal. ....	23	
Foto 18. Canal de pendiente variable de 18 m de longitud. Detalle de alimentación del canal de pendiente variable. Se observa una servo-válvula para control de flujo. Asimismo el elemento secundario de un medidor electromagnético.....	24	
Foto 19. Instalación del elemento primario del medidor electromagnético.....	24	
Foto 20. Sitio seleccionado para pruebas	Foto 21. Reconocimiento del sitio.....	25
Fotos 22 y 23. Primer sitio de conexión a la red del laboratorio considerado.	26	
Fotos 24 y 25. Ubicación y vistas al una del canal de pendiente variable.....	26	
Fotos 26 y 27. Piezómetros de manguera .....	30	
Fotos 28 y 29. Piezómetros con vuelta de tubo para reducir fluctuaciones en los piezómetros.....	30	
Fotos 30 y 31. Punto de conexión en la red del laboratorio .....	33	
Fotos 32 y 33. Trabajos de instalación de tubo de 6 pulg. de diámetro.....	33	
Fotos 34 y 35. Trabajos de instalación de tubo de 6 pulg. de diámetro.....	34	
Fotos 36 y 37. Vistas de tubería instalada.....	34	

Fotos 38 a 41. Equipo de medición del gasto.....	35
Foto 42 . Medición de gastos con tres equipos ultrasónicos Thermo Científic .....	36
Fotos 43 y 44. Piezómetros de manguera .....	38
Fotos 45 a 48. Vístase las lecturas de los piezómetros.....	39
Foto 49. Manómetro tipo Bourdon instalado .....	40
Fotos 50 y 51. Trabajos de habilitación del tanque del modelo del Zapotillo..	41
Fotos 52 y 53. Trabajos de habilitación del tanque del modelo del Zapotillo..	41
Fotos 54 y 55. Conexión al tanque terminada.....	42
Fotos 56 a 60. Trabajos en el canal de pendiente variable.....	44

### **Indice de Tablas**

Tabla 1. Cálculos del coeficiente de rugosidad $n$ para los resultados de las pruebas del modelo del túnel del Tecorito .....	11
Tabla 2. Comparación de gastos con tres equipos.....	37

## INTRODUCCIÓN

La construcción y rehabilitación de líneas de conducción, redes de tuberías y estaciones de bombeo, para aplicaciones de agua potable, aguas residuales, agua para uso agrícola, y otras, conlleva una gran demanda de tubería de diferentes diámetros y materiales, por lo que tiene implicaciones comerciales y de competencia en el mercado de estos materiales.

Uno de los parámetros más importantes para definir el diámetro y material de la tubería, además de los costos de suministro, instalación y operación, es el coeficiente de rugosidad, que según el caudal a conducir y otras condiciones, ocasiona cierta cantidad de pérdidas de energía por fricción hidráulica.

Esto significa que dos tuberías del mismo diámetro pero de diferente material y coeficiente de rugosidad, probablemente con diferencias importantes en costos y características, tendrán diferentes pérdidas de energía para un mismo caudal a conducir, o bien diferente capacidad de conducción para una misma energía disponible.

Por ello las dependencias y organizaciones normativas y operativas, los técnicos, los proyectistas, investigadores, fabricantes, y demás involucrados en inversiones como las arriba comentadas, tienen interés en el valor del coeficiente de rugosidad o de fricción, generalmente expresado en la  $n$  de Manning, de las diferentes opciones de tuberías disponibles en el mercado.

Los coeficientes de fricción vienen establecidos o recomendados en manuales y en la literatura técnica correspondiente. Sin embargo hay incertidumbre en la estimación de los valores que se utilizan en las fórmulas para el cálculo de pérdidas de carga hidráulica por fricción, ya que para simplificar se utilizan valores constantes para un determinado material nuevo, los cuales además cambian rápidamente con la operación.

Todo lo anterior motivó la realización de este estudio para planear e instalar un módulo de pruebas con flujo a presión en el interior de laboratorio Enzo Levi, con el fin de determinar experimentalmente los coeficientes de rugosidad en tuberías de diferentes diámetros y materiales. Asimismo para realizar una primera etapa de pruebas en dicho módulo, y realizar el diseño de otro para pruebas con flujo a superficie libre.

El uso de ecuaciones empíricas como es el caso de la que utiliza el coeficiente de Manning se debe a su simplicidad matemática, en lugar de utilizar una ecuación con fundamentos más teóricos como es la de Darcy Weisbach. Una mayor limitación de las ecuaciones empíricas es utilizar un valor constante para todos los diámetros de tubos del mismo material y para cualquier velocidad.

Esto difiere significativamente de la ecuación de Darcy Weisbach en la que el factor de fricción varía con las condiciones del flujo, en particular con la velocidad. Al utilizar fórmulas empíricas con coeficientes de fricción constantes puede seleccionarse un diámetro diferente al más adecuado que represente las condiciones hidráulicas de la línea o red por diseñar.

El objetivo de este trabajo es obtener el coeficiente de Manning a partir de mediciones en el laboratorio Enzo Levi, en tuberías plásticas para diferentes diámetros y diferentes caudales.

# 1 IDENTIFICACIÓN Y VISITA DE LABORATORIOS

## 1.1 LABORATORIOS DE PRUEBAS EN CONDUCTOS CON FLUJO A PRESIÓN

*Pruebas en tubería de PEAD de 12, 15 y 18 pulgadas de diámetro (304 mm, 381 mm, y 457 mm), en la universidad de Utah*

El Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas de la Universidad de (Utah Water Research Laboratory) llevó a cabo el estudio “Pruebas de factor de fricción en tuberías de Polietileno de alta Densidad (Friction Factor Tests on High Density Polyethylene Pipe)”, con flujo a presión en tuberías de 12 pulgadas, 15 pulgadas y 18 pulgadas de diámetro, ver Fig. 1, con interior acanalado, a velocidades entre 0.61 m/s (2 ft /s) y 4.57 m/s (15 ft/s) en tramos 24.38 m (80 ft) , 30.48 m (100 ft) y 36.58 m (120 ft) respectivamente, y (Barfuss, S. et al, 1988).

Los caudales máximos utilizados en las pruebas, según el propio reporte, fueron:

- Tubería de 12 pulgadas: 327.91 l/s, 4.31 m/s
- Tubería de 15 pulgadas: 205.86 l/s, 1.67 m/s
- Tubería de 18 pulgadas: 405.5 l/s, y 535.75, 2.38 m/s y 3.15 m/s

El agua fue suministrada por gravedad a partir de un tanque (carga constante). Se instalaron tres juegos de tomas de presión o de piezómetros con los que se midieron las pérdidas por fricción. Los caudales se midieron con un medidor ultrasónico calibrado contra un tanque volumétrico trazable a la U.S. Bureau of Standards. Los diferenciales de presión se midieron con manómetros diferenciales (Tubo U) utilizando líquido azul de densidad 1.75 y mercurio de densidad 13. 56.

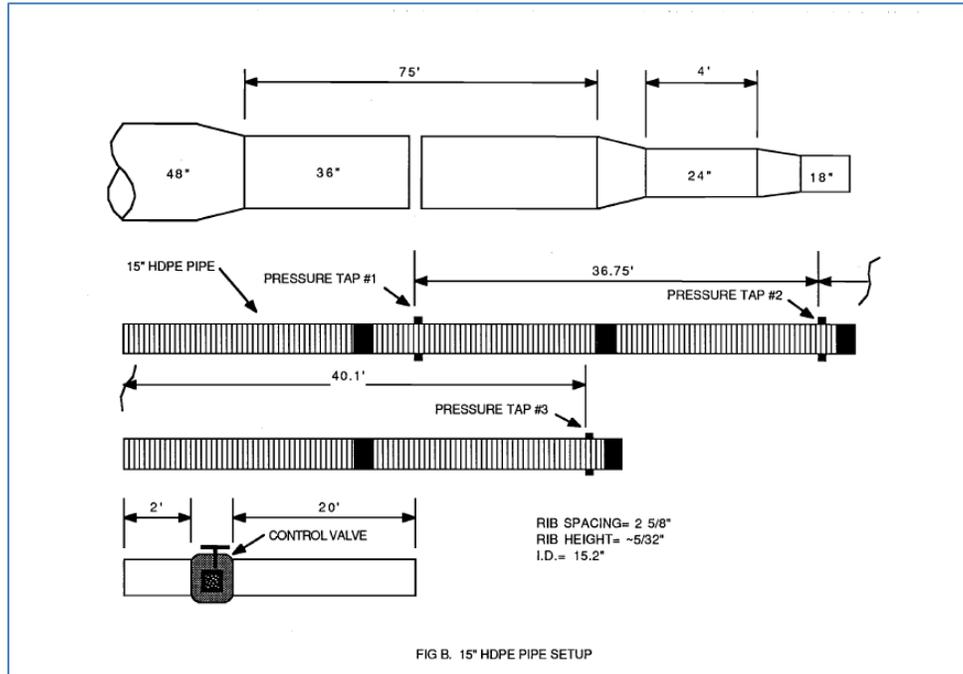


Fig. 1. Arreglo para tubería de 18 pulgadas (Barfuss, S. et al, 1988).

Las  $n$  de Manning promedio obtenidas para las tuberías de PEAD de 12, 15 y 18 pulgadas de diámetro fueron 0.0119, 0.0148, y 0.0123 respectivamente. Los factores de fricción de Darcy-Weisbach  $f$  respectivos fueron 0.0262, 0.0378, and 0.0243.

En 1989, los mismos investigadores realizaron pruebas en tubería de PEAD de 15 pulgadas de diámetro. Con interior ligeramente suave, con ondulaciones. Las instalaciones y métodos de prueba fueron parecidos a las anteriores, aunque la longitud reportada de prueba fue de 23.16 m. Se reporta también que para obtener el caudal promedio, se tomaron 30 muestras de 60 s. Las  $n$  de Manning obtenidas variaron de 0.0108 a 0.0099, correspondientes a la variación de velocidades de 0.7 a 3.4 m/s.

## 1.2 LABORATORIOS DE PRUEBAS EN CONDUCTOS CON FLUJO A SUPERFICIE LIBRE

### **Determinación del coeficiente $n$ de Manning y de la rugosidad absoluta $k_s$ de la tubería de alcantarillado ADS 600 mm (interior liso en la Universidad de los Andes)**

El Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) de la Universidad de los Andes llevó a cabo el estudio “*Determinación del coeficiente  $n$  de Manning y de la rugosidad absoluta  $k_s$  de la tubería de alcantarillado ADS 600 mm (interior liso)*” a través de la Cátedra PAVCO, para el periodo 2007 – 2008.

El estudio se realizó mediante pruebas experimentales y análisis de los datos obtenidos con los modelos matemáticos de flujo a superficie libre, en específico de flujo gradualmente variado para diferentes condiciones de caudal y pendiente, con sus correspondientes perfiles de flujo, y otros. Se reporta en este centro CIACUA la realización de este tipo de estudios desde el 2001, en tuberías de otras especificaciones y diámetros de 6 a 16 pulgadas (15 y 40 cm).

La instalación experimental para evaluar el funcionamiento hidráulico de la tubería mencionada se integró con una armadura para su montaje, y un polipasto de 3.2 toneladas para variar las pendientes. Asimismo por una instalación hidráulica constituida por un tanque para alimentar por gravedad a la tubería, un tanque situado aguas abajo para la recirculación por bombeo, una válvula de control para variar los caudales, tubería de acero de recirculación, y el equipo de bombeo, Fig. 2.

En cuanto a la instrumentación utilizada, los niveles de flujo se midieron con piezómetros distribuidos a lo largo de la tubería, concentrados en un tablero. Los caudales mediante un vertedor circular, y un limnómetro para la lectura de las carga, incluyendo una pantalla de aquietamiento del flujo. Las pendientes se leían con niveles de precisión.

Se reporta que se probó un tramo de tubería de 600 milímetros de diámetro interior (exterior 643.6 milímetros) de cerca 11 metros de longitud. No es muy claro ya que en la Fig. 2 se observa que aparentemente el módulo de pruebas es para una menor longitud. Se realizaron pruebas con perfiles suave, adverso y horizontal con pendientes de 0.32%, -0.32%, -0.52%, -0.82% y 0%. Para cada pendiente se probaron cincuenta (50) caudales, entre 0.002 m<sup>3</sup>/s y 0.101 m<sup>3</sup>/s.

Según los detallados análisis reportados, la  $n$  de Manning definitiva que obtuvieron y que recomienda es de  $0.0123 \pm 0.0001$ , pues explica el 100% de posibilidades caudal pendiente, con eficiencias iguales o mayores al 98.44%, para caudales entre 9.72 l/s y 97.2 l/s.

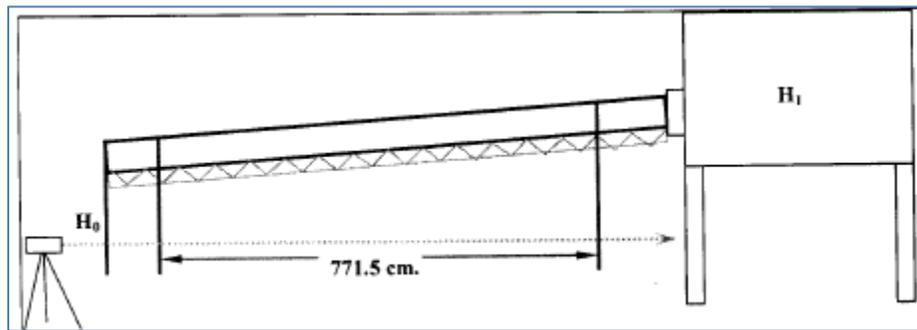


Fig. 2. Esquema del módulo de pruebas. Fuente: Universidad de los Andes, CIACUA (2009).

## 1.3 NORMATIVA NACIONAL E INTERNACIONAL DE TUBERÍAS

Se tiene en proceso la búsqueda en normas de fabricación tuberías de agua potable y alcantarillado, de cualquier material, valores de factores de fricción, coeficientes de rugosidad y parámetros relacionados, pero por el momento no se han encontrado en ese tipo de documentos. Sí se encuentran en manuales como el AWWA MANUAL M 11 "Steel Pipe – A Guide for Design and Installation", o en otros como el MAPAS, pero no en las normas de producto, en lo que se ha revisado.

### **NMX-E-241- CNCP-2013**

Industria del plástico- tubos de polietileno de alta densidad (pead) de pared corrugada con junta hermética de material elastomérico, utilizados en sistemas de alcantarillado sanitario – serie inglesa- especificaciones y método de ensayo.

### **NORMA: ASTM F-1803**

Standard Specification for Poly (Vinyl Chloride) (PVC) Closed Profile Gravity Pipe and Fittings Based on Controlled Inside Diameter (Withdrawn 2015).

## 1.4 INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

### Artículos encontrados y revisados

- Hydraulic Friction Factors for Pipe Flow, Kamand Fadi Z., Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 2, Mayo, 1988.

Cuando se usan ecuaciones empíricas como la de Hazen Williams o la de Manning, se considera un coeficiente de fricción para todos los diámetros y magnitudes de flujo lo cual simplifica el cálculo de las pérdidas de carga por fricción a costa de la exactitud en el cálculo.

A partir de un desarrollo algebraico utilizando las fórmulas de Darcy Weisbach, Colebrook-White y Manning, se obtiene la siguiente gráfica, Fig. 3, donde se observa la variación del coeficiente de Manning con respecto a la velocidad del flujo en tuberías de PVC para diferentes diámetros. Para este dibujo se consideró una rugosidad absoluta de 0.03 mm.

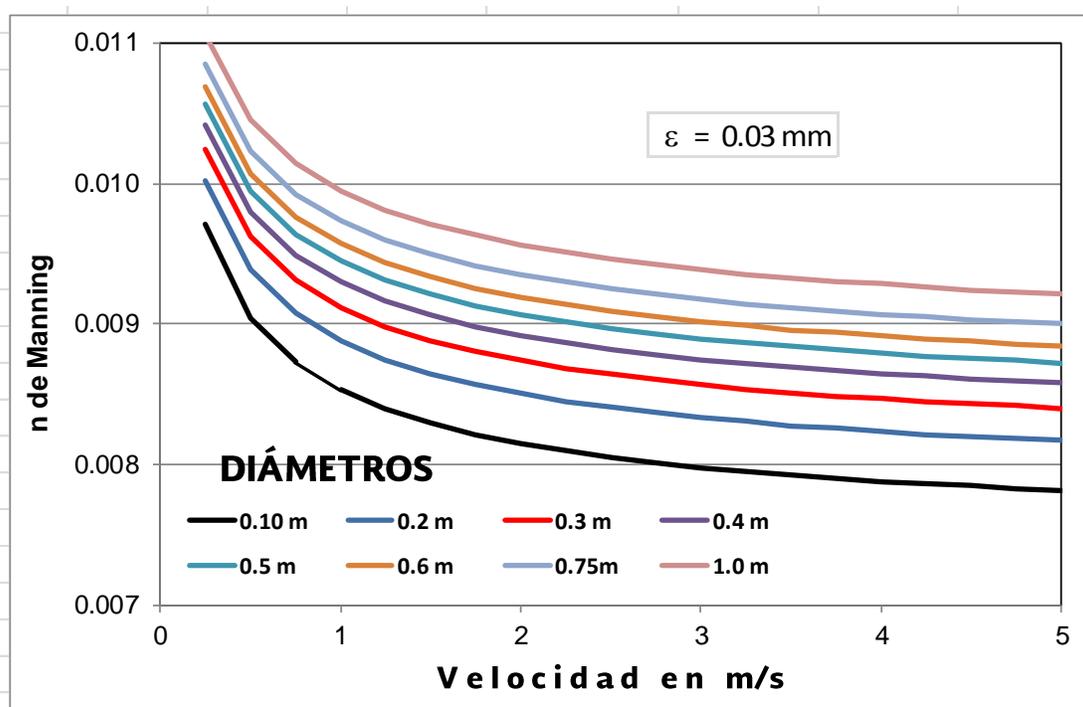


Fig. 3. Variación del coeficiente de Manning

- Friction Factor Tests on High Density Polyethylene Pipe, Steven L. Barfuss, J. Paul Tullis, October 1988, Utah State University.

En el laboratorio de investigación del agua de la Universidad de Utah se efectuaron en 1988, pruebas para obtener los coeficientes de fricción  $n$  de Manning y  $f$  de Darcy en diámetros de 12, 15 y 18 pulg. con longitudes respectivas de 24, 30 y 36 m. Para cada diámetro colocaron sobre la línea tras piezómetros La distancia entre los piezómetros fue de 11.74 m y 12.23 m para 12 pulg., de 11.21 m y 12.23 m para 15 pulg. y 12.14 m para 18 pulg.; para este último diámetro, la separación entre los piezómetros es la misma.

Los valores promedio del coeficiente de fricción  $n$  obtenidos fueron 0.0119 para 12 pulg., 0.0148 para 15 pulg. y 0.0123 para 18 pulg. El factor  $f$  de fricción promedio resultó de 0.0262, 0.0378, y 0.0243 para los mismos diámetros respectivos.

- Friction Factor Tests on 375 mm High Density Polyethylene Pipe, Steven L. Barfuss, J. Paul Tullis, May 1989, Utah State University.

Este escrito se refiere a pruebas en una tubería de 14 pulg. Es similar al anterior, los autores son los mismos, la distancia entre los dos piezómetros en este caso, fue de 23.16 m.

El coeficiente  $n$  de Manning varió de 0.0099 a 0.0108 con un promedio de 0.01016, y la  $f$  de Darcy-Weisbach, de 0.01665 a 0.01988 con un promedio de 0.01783.

- Coeficiente de Pérdida por Fricción en un Modelo de Flujo de Tuberías de Laboratorio, Universidad Autónoma de Nuevo León, octubre 2014.

## 1.5 EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA ENZO LEVI

Debido a que la primera opción fue efectuar las pruebas dentro de laboratorio Enzo Levi se efectuó un reconocimiento de las instalaciones y se recopiló información sobre las mismas, se obtuvieron los siguientes documentos.

### Infraestructura de laboratorio Enzo Levi.

- Instructivo de Operación del Sistema de Abastecimiento de Agua del Laboratorio Enzo Levi, IMTA, febrero 2014.
- Funcionamiento Hidráulico del Sistema de Bombeo y Distribución del Laboratorio Enzo Levi, IMTA, abril, 2014.

En estos se describe el funcionamiento del laboratorio y la infraestructura del mismo, Fig. 4.

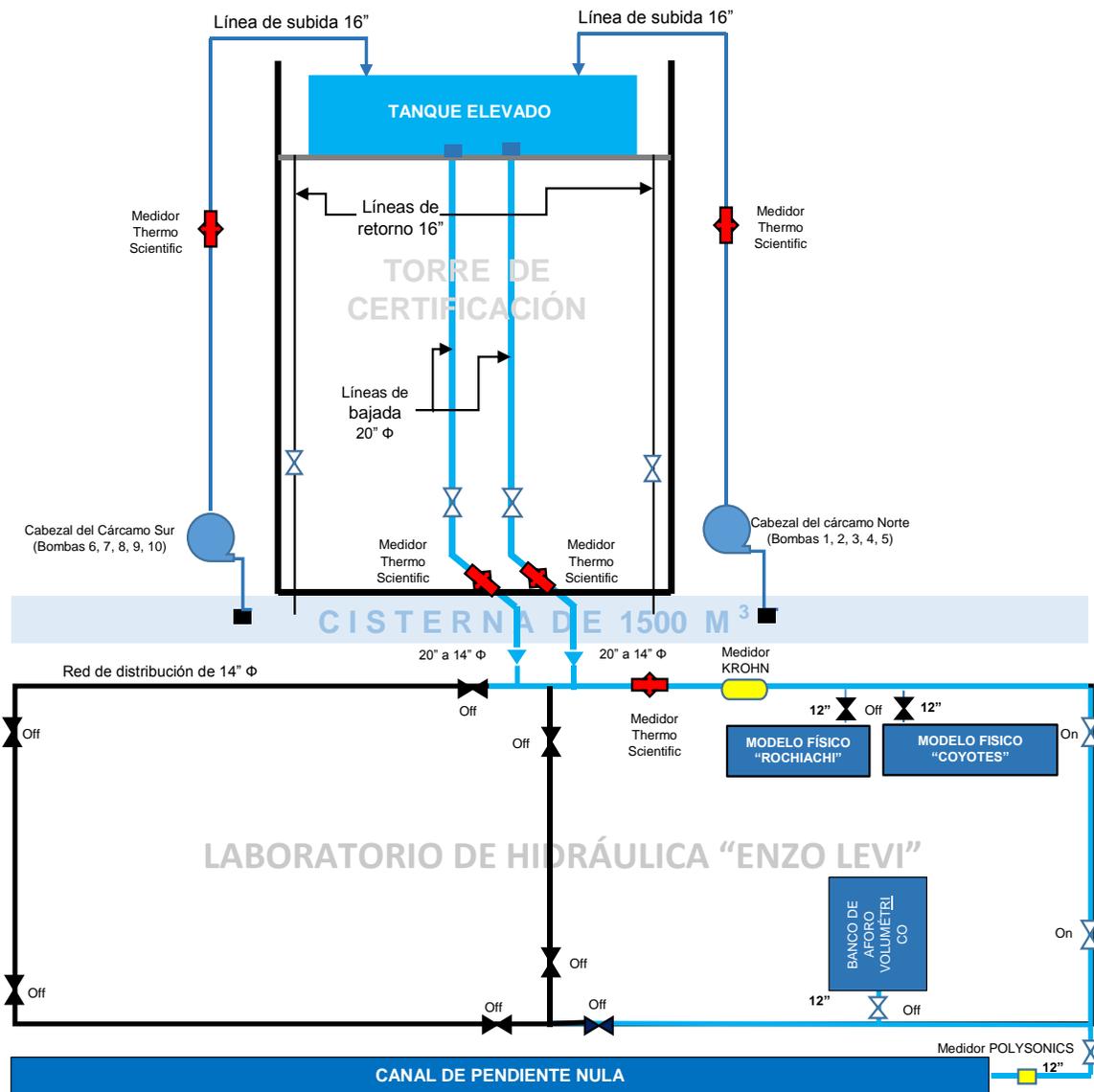


Fig. 4. Plano con la infraestructura hidráulica en laboratorio Enzo Levy

En coordinación con el personal encargado de laboratorio Enzo Levi se reconocieron varios sitios donde se podría instalar la tubería para las pruebas. También se visitó el sitio del modelo físico del túnel del Tecorito en el exterior de laboratorio. Asimismo se obtuvo el archivo del informe final preliminar.

- Estudio en Modelo Físico del Funcionamiento Hidráulico del Túnel Tecorito del Canal Principal Humaya, Culiacán, Sinaloa, IMTA, 2014.

En el exterior de laboratorio Enzo Levi, al sur, se construyó el modelo físico escala de del túnel Tecorito, tiene una longitud de 38 m del túnel que lo representa una tubería de acrílico de 6 pulg. de diámetro, fotos 1 y 2. Se consideró también la posibilidad de utilizar esta instalación para las pruebas del presente estudio.



Fotos 1 y 2. Modelo físico del túnel del Tecorito

A partir de los resultados de las pruebas en este modelo se efectuó el cálculo del coeficiente de rugosidad. La Tabla 1 contiene el cálculo del coeficiente de rugosidad n.

Tabla 1. Cálculos del coeficiente de rugosidad n para los resultados de las pruebas del modelo del túnel del Tecorito

D =	0.2032 m								
ángulo $\theta$ =	2.94244	4.33046	4.55315	5.23252	4.5403	4.7995	5.23252	3.7082	4.15712
Q =	0.00552 m <sup>3</sup> /s	0.01266	0.0135	0.0137	0.01375	0.0122	0.01375	0.01044	0.01266
y medido aguas arriba	0.093 m	0.157	0.165	0.189	0.165	0.179	0.189	0.128	0.149
y medido aguas abajo	0.09 m	0.16	0.17	0.19	0.169	0.174	0.19	0.132	0.153
diferencia	0.003	-0.003	-0.005	-0.001	-0.004	0.005	-0.001	-0.004	-0.004
y promedio medido	0.0915 m	0.1585	0.1675	0.1895	0.167	0.1765	0.1895	0.13	0.151
y calculado	0.09149976 m	0.15850003	0.16750047	0.18949997	0.16700228	0.17650204	0.18949997	0.13000016	0.15100039
y =	$D/2*(1 - \cos(\theta/2))$								
A =	0.014166 m <sup>2</sup>	0.027140	0.028596	0.031485	0.028519	0.029913	0.031485	0.021909	0.025842
P =	0.29895 m <sup>2</sup>	0.43997	0.46260	0.53162	0.46129	0.48763	0.53162	0.37675	0.42236
R =	0.04738 m	0.06169	0.06182	0.05922	0.06182	0.06134	0.05922	0.05815	0.06118
R =	0.04738 m	0.06169	0.06182	0.05922	0.06182	0.06134	0.05922	0.05815	0.06118
S =	0.00103	0.00103	0.00103	0.00103	0.00103	0.00103	0.00103	0.00103	0.00103
n =	0.01078466	0.01074119	0.01062816	0.01120658	0.01040757	0.01223974	0.01116582	0.0101096	0.01017189

## 1.6 VISITA AL LABORATORIO DE LA UANL

Con la finalidad de conocer experiencias similares en la obtención de coeficientes de rugosidad en tuberías, se visitó de laboratorio de la Universidad Autónoma de Nuevo León cuyo personal que labora en el Instituto de Ingeniería Civil publicó el artículo “Coeficiente de Pérdida por Fricción en un Modelo de Flujo de Tuberías de Laboratorio” en las memorias del XXIII Congreso Nacional de Hidráulica de 2014. A continuación se incluye un reporte de la visita.

Se efectuó primero un recorrido general; se observaron canales dependiente variable, rejillas para recirculación, en el exterior de laboratorio se encuentra una cisterna, los equipos de bombeo y un tanque elevado para dar la carga hidráulica en las pruebas del laboratorio, fotos 3 a 8.



Fotos 3 y 4. Vistas generales del exterior del laboratorio



Fotos 5 y 6. Vistas interiores generales del laboratorio



Fotos 7 y 8. Tanque elevado y equipos de bombeo

Posteriormente, la atención se enfocó en el módulo de tuberías donde se obtienen a partir de pruebas los coeficientes de rugosidad. Como se observa en las fotos 9 a 14, consiste en cinco líneas paralelas, de las cuales se utilizan las de 1, 2 y 4 pulg. de diámetro, con una longitud de 12.2 m. El material es fierro fundido y tiene varios años de instalado, no se precisó cuánto; comentaron que no se verificó el diámetro interior.

Se observó el funcionamiento del módulo para la tubería de 4 pulg., la purga para la expulsión del aire, la columna de mercurio en el tubo U y la conexión al diafragma para el aforo del gasto. La lectura de la columna de mercurio es visual, la presión máxima de operación de  $0.7 \text{ kg/cm}^2$ .

La utilización de este módulo está orientada a las prácticas de estudiantes.



Fotos 9 y 10. Arreglo de tubos de instalación de pruebas



Fotos 11 y 12. Purga de la línea y manómetro U



Fotos 13 y 14. Conexiones del tubo al manómetro

La pérdida de carga se obtiene con la expresión  $\Delta h = h_2 - h_1$ ;

Y el coeficiente de fricción se calcula con  $h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$

El gasto se obtiene a partir de la pérdida de carga en un diafragma, foto 11.

$$Q = C_d A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}}$$

En la Fig. 5, se muestra un esquema del módulo de pruebas para el cálculo de los coeficientes de fricción.

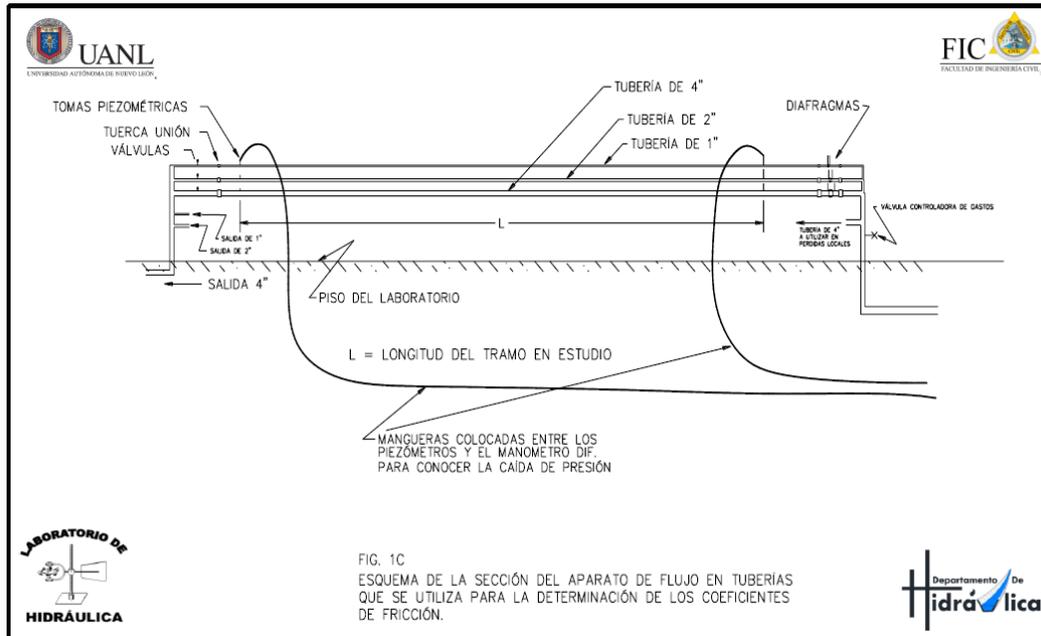


Fig. 5. Esquema de instalación de la UANL para calcular los coeficientes de fricción

## Conclusiones sobre la visita

El módulo visitado cumple con su objetivo que es el de las prácticas de los estudiantes para obtener el coeficiente de rugosidad.

En el laboratorio se dispone de la metodología para la ejecución de las pruebas y para el cálculo de los coeficientes.

Resulta conveniente que se mida el diámetro interior de la tubería de fierro fundido pues no se conoce su antigüedad y sólo se toma el equivalente al diámetro nominal en pulgadas.

Conviene corroborar la medición del gasto con el diafragma, con algún otro método de aforo.

## 2 PLANTEAMIENTO Y DISEÑO DE MÓDULOS EXPERIMENTALES

### 2.1 MÓDULO PARA FLUJO A PRESIÓN

#### Planteamiento hidráulico para la determinación de las pérdidas de carga por fricción en líneas con flujo a presión

En la Fig. 6 se muestra un esquema de tubería con flujo a presión, en el que se observa de manera gráfica la pérdida de carga  $h_f$  a partir de la cual se puede determinar el factor de fricción y la  $n$  de Manning, como se describe a continuación.

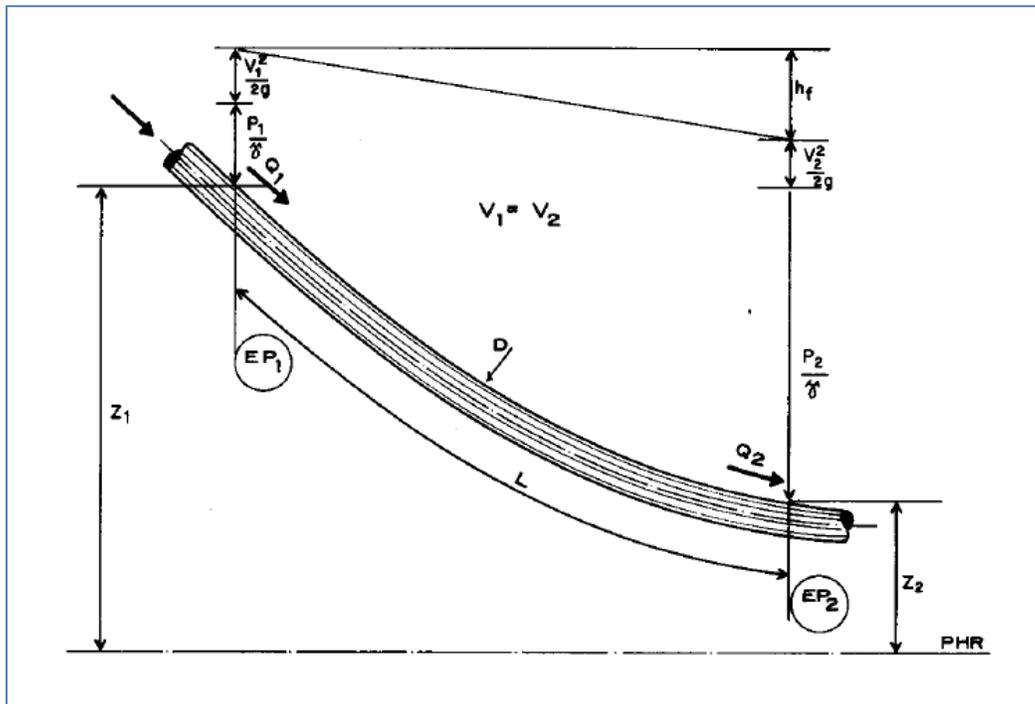


Fig. 6. Esquema para planteamiento de la prueba de pérdida por fricción

Aplicando la ecuación de la energía en los extremos de la tubería bajo prueba:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + h_f$$

De donde con  $V_1 = V_2$ , por ser el tramo de tubo del mismo diámetro, entonces  $h_f$ :

$$h_f = \left( \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 \right) - \left( \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \right)$$

De la fórmula de Darcy-Weisbach

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

El factor de fricción es:

$$f = 2g \frac{D}{L} \frac{h_f}{V^2}$$

De la pendiente de fricción:

$$S_f = \frac{h_f}{L}$$

Y de la fórmula de Manning:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}$$

La  $n$  de Manning es:

$$n = \frac{1}{V} R_h^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}$$

## 2.2 DISEÑO DEL MÓDULO JUNTO AL CANAL DE PENDIENTE NULA

Se debe realizar un **módulo de pruebas a presión** con una longitud igual o mayor a 40 m. La tubería de prueba se ubicó a un lado del *canal de pendiente nula*, y se fijó al piso mediante abrazaderas. Otra opción fue ubicarla dentro de este canal para aprovechar su alimentación y su descarga, con la restricción del ancho del canal, pero también del caudal disponible de 250 l/s. Ver foto. 15.



Foto. 15. Canal largo de pendiente nula del IMTALAB. Longitud: 48 m, y sección de 0.61 m X 0.99 m.

Se debe diseñar el arreglo de alimentación. La instrumentación debe incluir celdas de presión, y/o celdas de presión diferencial, y medidor de flujo electromagnético. Todos con certificado de calibración vigente para garantizar la trazabilidad de las mediciones, y con salidas analógicas y digitales para la adquisición de datos. Ver foto. 16.



Foto 16. Detalle de tubería de alimentación de canal largo de pendiente nula.

En la Fig.7 se presenta el modelo hidráulico para alimentación al módulo de pruebas dentro del canal de pendiente nula.

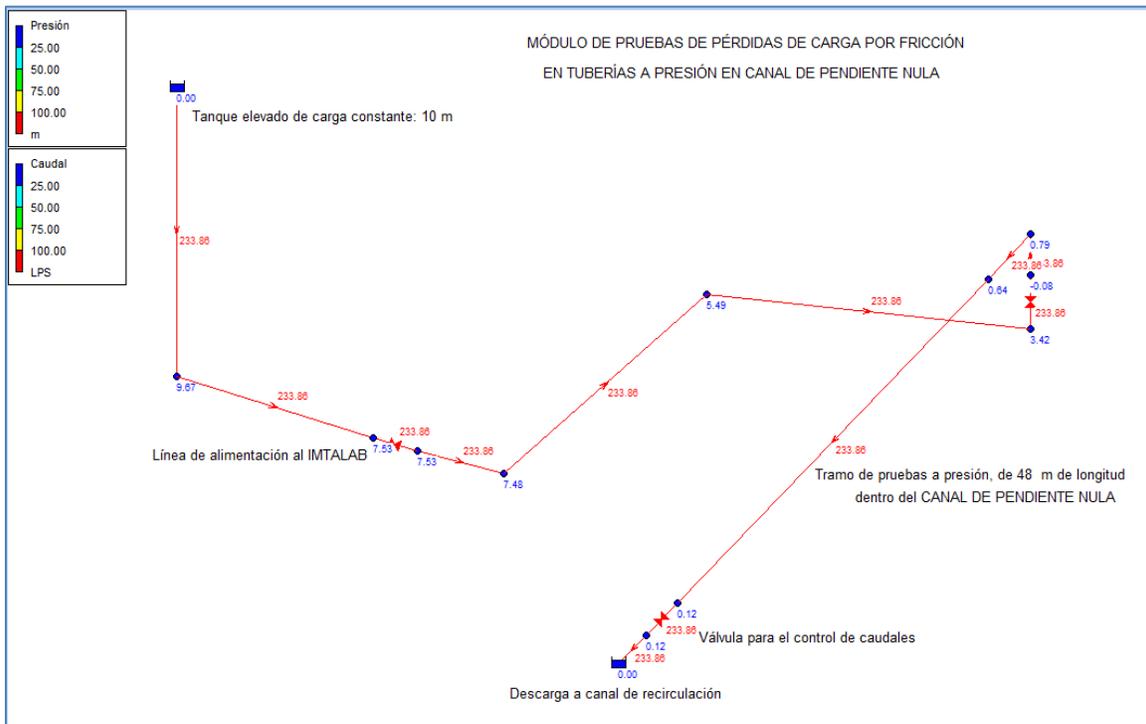


Fig. 7. Análisis hidráulico para el módulo de pruebas de pérdida de carga en tuberías con flujo a presión.

Con los datos disponibles de la instalación hidráulica del IMTALAB, tanque elevado de carga constante, tuberías y accesorios con sus diámetros, rugosidad estimada de tubería de acero, así como datos preliminares recabados de caudal y presiones, medidos por personal del laboratorio, se muestran los resultados de caudal (233 L/s) y presión (0.64 mca a la entrada y 0.12 mca a la salida) considerando un tramo de tubería de prueba PVC, de 50 m de longitud y 350 mm de diámetro.

Se puede con esto modelar para los diferentes materiales y diámetros que se requieran, para poder especificar la instrumentación para lectura de caudales y presiones. Este esquema permite visualizar también el diseño de conexiones y accesorios hidráulicos para poder hacer las pruebas.

Entonces se deben considerar los siguientes requerimientos, de manera cualitativa más no limitativa, para la instalación y operación de este módulo:

Realizar los levantamientos adicionales que sean necesarios, considerando la información que se tiene disponible del IMTALAB, principalmente de las instalaciones hidráulicas.

Diseñar la fontanería para la alimentación del tramo de prueba, para diferentes materiales y diámetros, revisando diámetro máximo a probar según el ancho del canal, y si es necesario instalar una válvula de regulación adicional a las disponibles en la red de distribución del IMTALAB. Incluye la cuantificación de la obra mecánica (desmontajes y montajes) y civil necesarias para la instalación.

Diseñar la fontanería de descarga a canal de recirculación, con una válvula para control de caudales. También incluye la cuantificación de la obra mecánica (desmontajes y montajes) y civil necesarias para la instalación.

Elaborar un procedimiento para el montaje de las tuberías de prueba dentro del canal sin dañar las piezas de cristal que lo forman, incluyendo el diseño y especificación de los medios de fijación de la tubería en el canal, considerando los diferentes diámetros y materiales.

Cuantificar las cantidades de tubería de PEAD y PVC a suministrar para su montaje y prueba. Se recomienda su adquisición para no crear compromisos con fabricantes y proveedores.

Especificar la instrumentación básica para la medición de las variables más importantes en las pruebas: caudal, presión, temperatura, y otras. Incluye ubicación, cantidades necesarias, y procedimiento para su operación, registro y manejo de información. Los instrumentos de medición deben contar con certificado de calibración vigente que demuestre su trazabilidad con los laboratorios primarios o secundarios que apliquen. De esta instrumentación determinar cuál puede estar disponible dentro del IMTALAB o dentro del IMTA.

Preparar los croquis o planos necesarios, especificaciones, presupuesto, y cronograma para el suministro de materiales, equipos e instrumentos, y su instalación.

Llevar a cabo la instalación básica que recibirá los tramos de prueba, e instalar y desmontar estos tramos conforme estas se realicen. Esto puede ser por administración directa haciendo las adquisiciones necesarias, o bien mediante una orden de servicio o contrato que incluya los suministros y mano de obra. Incluye pruebas de instalación.

Elaborar un programa de pruebas con la preparación de formatos, o bien el sistema de adquisición y procesamiento de datos.

Llevar a cabo las pruebas programadas: Medir y registrar las variables controladas de prueba, haciendo las comprobaciones necesarias. Esto inicialmente de manera manual, y después, en su caso, de manera automatizada. Incluye la determinación de incertidumbres de medición de las variables de prueba.

Procesar y analizar los datos de prueba para determinar los factores de fricción y  $n$ 's de Manning resultantes, así como realizar el análisis de datos para encontrar valores que sean más representativos de las diferentes condiciones de operación de las tuberías.

Elaborar un reporte técnico de las pruebas realizadas, incluyendo una comparativa comentada con resultados de otros laboratorios, con recomendaciones y conclusiones.

## 2.3 MÓDULO PARA FLUJO A SUPERFICIE LIBRE

Se debe instalar un **módulo de pruebas para flujo a superficie libre** con una longitud igual o mayor a 14 m. Se puede aprovechar el *canal de pendiente variable*, foto 17, para aprovechar la estructura de montaje, ubicando dentro la tubería de prueba, con la restricción del ancho disponible. Asimismo para aprovechar el sistema de cilindros hidráulicos para variar y fijar pendientes, y su alimentación y descarga hidráulica. Se debe diseñar el arreglo de alimentación a la tubería bajo prueba, Flg. 8. De otra manera se debe diseñar y construir una instalación similar a un lado de la existente, fotos 17 y 18.

La instrumentación debe incluir celdas de presión distribuidas a lo largo de la tubería bajo prueba, medidor de flujo electromagnético en la tubería de alimentación, vertedor triangular, e instrumentación para nivelación. Todos con certificado de calibración vigente para garantizar la trazabilidad de las mediciones, y con salidas analógicas y digitales para la adquisición de datos.

En ambos casos se recomienda utilizar un **sistema de adquisición y procesamiento de datos** (Lab View). Se deben definir las variables a manejar mediante la tarjeta de adquisición de datos, el análisis y procesamiento requeridos y su visualización gráfica. Asimismo se debe hacer la programación correspondiente en el software, etc.

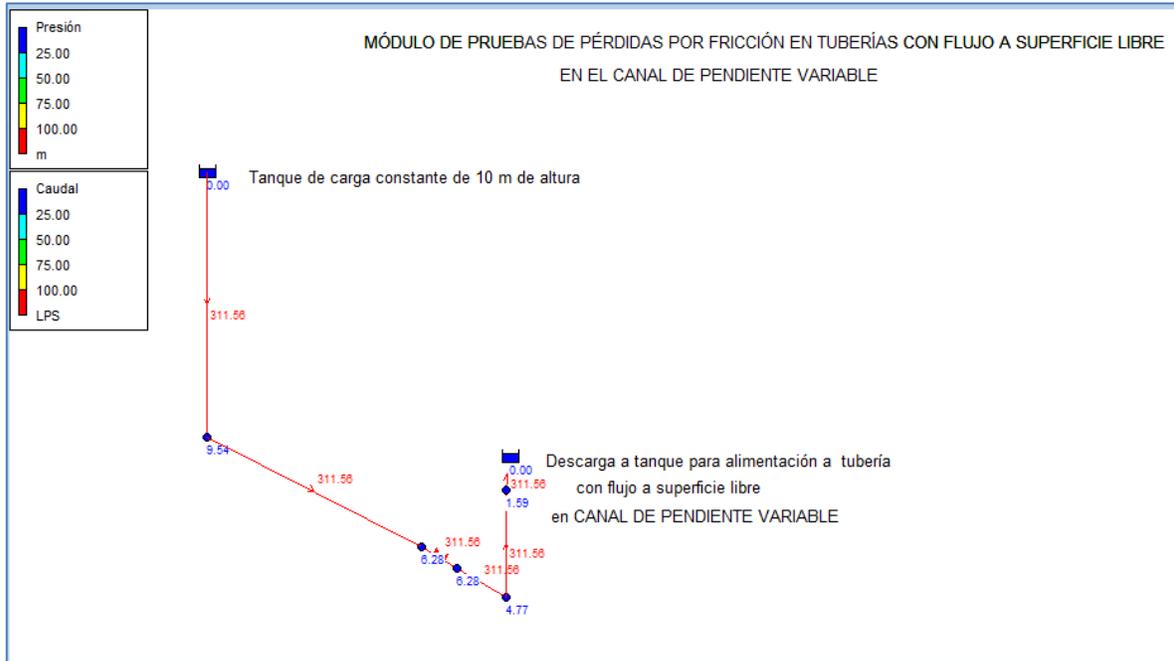


Fig. 8. Esquema hidráulico para el módulo de pruebas de pérdida de carga en tuberías con flujo a superficie libre



Foto 17. Panorámica del canal de pendiente variable, de 18 m de longitud, sección de 0.60 m X 0.685 m. Se observa el sistema de control de la pendiente con cilindros hidráulicos y bomba manual. Asimismo el control electromecánico para posicionar placa vertedora en el extremo final del canal.



Foto 18. Canal de pendiente variable de 18 m de longitud. Detalle de alimentación del canal de pendiente variable. Se observa una servo-válvula para control de flujo. Asimismo el elemento secundario de un medidor electromagnético.



Foto 19. Instalación del elemento primario del medidor electromagnético.

Considerando la operación de laboratorio y de los requerimientos para realizar las pruebas fuera de este, se decidió construir la instalación en el interior junto al canal de pendiente nula.

### **Selección del sitio para las pruebas**

Una primera opción consistió en la conexión de la red de laboratorio a la toma que alimenta el canal de pendiente nula haciendo los ajustes necesarios. En las fotografías 20 y 21 se observa esta toma.

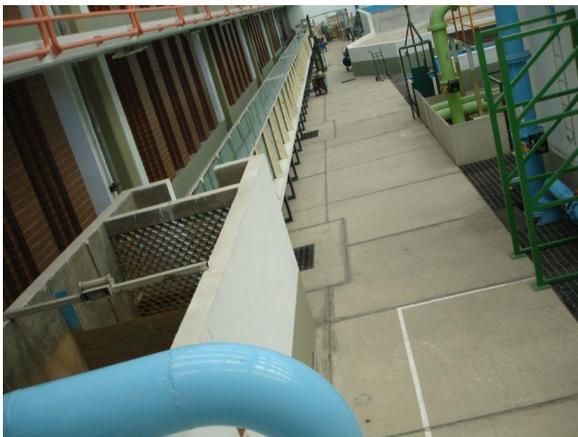


Foto 20. Sitio seleccionado para pruebas



Foto 21. Reconocimiento del sitio

Por ser un espacio recto de aproximadamente 50 m y de disponer de una toma para la alimentación así como el encontrarse en el interior de laboratorio Enzo Levi, se seleccionó el sitio junto al canal de pendiente nula para efectuar las pruebas correspondientes este estudio, fotos 22 y 23.



Fotos 22 y 23. Primer sitio de conexión a la red del laboratorio considerado

Por otra parte se requiere también efectuar pruebas con flujo a superficie libre por lo que se identificó y ubicó en sitio del canal de pendiente variable en el interior de laboratorio Enzo Levi, fotos 24 y 25.



Fotos 24 y 25. Ubicación y vistas al una del canal de pendiente variable

## 2.4 DISEÑO DE LAS PRUEBAS

De acuerdo con las condiciones de laboratorio Enzo Levi, se dispone de un tanque con carga constante, con una elevación de 10 m a la superficie libre del agua, las líneas de la red son de acero al carbón de 14 pulg. Se requiere de la mayor longitud posible para la localización longitudinal de la tubería, cuando el tubo va lleno el procedimiento se simplifica.

La estimación del gasto para las condiciones indicadas y con la tubería de 6 pulg. se estimó con el programa Epanet.

Las pruebas requeridas son en material de PVC y de polietileno de alta densidad, PAD, de 4 a 12 pulg. de diámetro.

Se requiere medir el caudal las pruebas y la carga piezómetros en dos puntos de la conducción alejados entre sí para obtener las pérdidas por fricción.

El coeficiente de pérdidas por fricción  $n$  de Manning, se calcula con expresión:

$$n = \frac{A R^{2/3} S^{1/2}}{Q} \quad (1)$$

Donde:

$n$  = coeficiente de rugosidad del material.

$A$  = Área hidráulica

$$A = \frac{D^2}{8} (\theta - \text{sen } \theta) \quad (2)$$

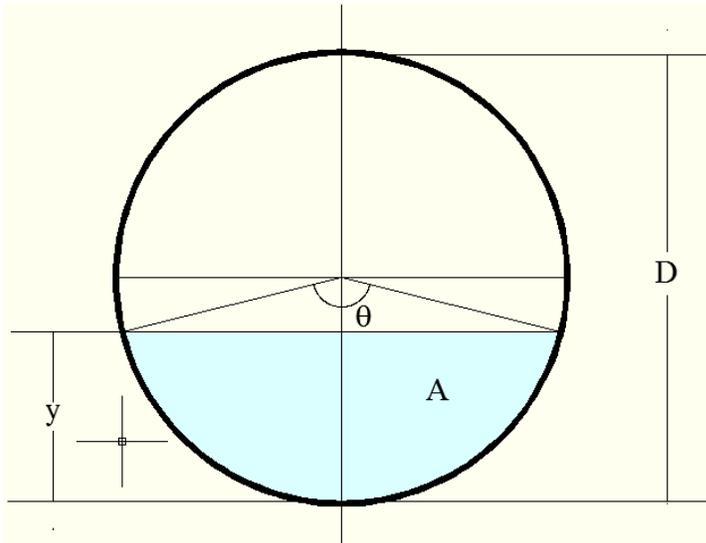
$D$  = Diámetro interior del tubo, en m.

$$S_f = \frac{h_f}{L} \dots\dots\dots ( )$$

$$h_f = h_2 - h_1 \dots\dots\dots ( )$$

$\theta$  = Ángulo de la superficie libre del agua, con el centro, ver figura, en radianes.

$R$  = Radio hidráulico que se calcula como sigue:



$$R = \frac{D}{4} \left( 1 - \frac{\text{sen } \theta}{\theta} \right) \quad (3)$$

S = pendiente de la superficie libre del agua.

Q = Gasto, en m<sup>3</sup>/s.

La profundidad del agua o tirante y está dado por la siguiente expresión:

$$y = \frac{D}{2} \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) \quad (4)$$

La expresión anterior se utilizó para el cálculo del coeficiente de Manning n; como se midió la profundidad y, se propuso el ángulo  $\theta$  y por aproximaciones, cuando la y calculada es igual a la y medida, se obtuvo la n.

El procedimiento descrito es general y es válido para cualquier tirante en la tubería El proceso es el siguiente:

Se proporcionan los datos:

Diámetro D, Gasto Q, Profundidad y medida, que en algunos casos es la profundidad media al inicio y al final del tramo cuando la diferencia es menor de 5 mm..

Pendiente de la superficie del fondo del conducto circular S, qué es constante.

Las unidades de longitud se dan en metros.

Se diseñó el formato para la ejecución de las pruebas, ver Fig. 9, el cual se muestra a continuación.

ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA 1										
Laboratorio Enzo Levi										
Fecha:		Hora:		Realiza:		Franco P.		Supervisa:		
T °C:		OBS:				Nicolás V.				
Z <sub>1</sub> (m)	Z <sub>2</sub> (m)	g (m/s <sup>2</sup> )	γ kg/m <sup>3</sup>	L (m)	∅ <sub>Inter</sub> (m)	r (m)				
1	1	9.806	1000	38	0.1553	0.07765				
d	θ °	θ rad	P	A	Rh					
0.155	360.00	6.28318531	0.488	0.0189	0.0388					
No.	Hora	V (m/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	$\frac{P_1}{\gamma}$ (m)	$\frac{P_2}{\gamma}$ (m)	$h_f = \left(\frac{z_1+z_2}{\gamma}\right) - \left(\frac{z_2+z_2}{\gamma}\right)$	$f = 2g \frac{D}{L} \frac{h_f}{V^3}$	$S_f = \frac{h_f}{L}$	Rh	$n = \frac{1}{V} R_h^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}$
1										
2										
3										

Fig. 9. Formato de las pruebas

## 2.5 EJECUCIÓN DE PRUEBAS PRELIMINARES

Se efectuaron las primeras pruebas de funcionamiento con piezómetros de manguera de 1/4 de pulg. de diámetro; las mangueras se conectaron de forma vertical en la parte superior del tubo y tenían una longitud de más de 9 m, fotos 26 y 27.

En estas primeras pruebas se observaron fluctuaciones del nivel del agua significativas que dificultaban la lectura. Con el objetivo de disminuir o eliminar las fluctuaciones se instalaron dispositivos denominados “colas de cochino”, sin embargo; no se observó una reducción significativa de las fluctuaciones, fotos 28 y 29.



Fotos 26 y 27. Piezómetros de manguera



Fotos 28 y 29. Piezómetros con vuelta de tubo para reducir fluctuaciones en los piezómetros

Otra opción para resolver este problema y a la vez efectuar la lectura de manera concentrada de puede ubicar el punto de lectura a la misma distancia de los puntos de inserción. Con esto se logró la reducción significativa de las fluctuaciones.

En las pruebas preliminares se midió la presión con manómetros tipo Bourdon con rango de 0 a 2 kg /cm<sup>2</sup> . Las lecturas tomadas de esta manera sólo para una referencia ya que la exactitud de estos instrumentos no es la adecuada para este tipo de pruebas.

En estas pruebas se utilizaron tubos de PVC de 6 pulg. de diámetro para agua potable

El gasto máximo medido con las válvulas completamente abiertas para la tubería de 6 pulg. en las condiciones de prueba fue de 87.32 l/s con una velocidad de 4.61 m/s. Sólo como una referencia la pérdida de carga fue de aproximadamente 3.5 m.

En cuanto al gasto mínimo para el cual no ingresa aire en el piezómetro de aguas abajo, fue del orden de 5 l/s.

El caudal se midió con un equipo ultrasónico de tiempo en tránsito Thermo Scientific.

### 3 INSTALACIÓN DE UNA PRIMERA ETAPA DE MÓDULOS

De acuerdo, que espacio disponible y las características de los tubos concretizar se procedió al diseño de la instalación, Fig. 10.

Los tubos que se utilizan son de PVC y de polietileno de alta densidad, PEAD, los diámetros a utilizar la varían de 4 a 12 pulg., se fabrican en tramos de 6 m, su unión es con espiga-campana con anillo de hule.

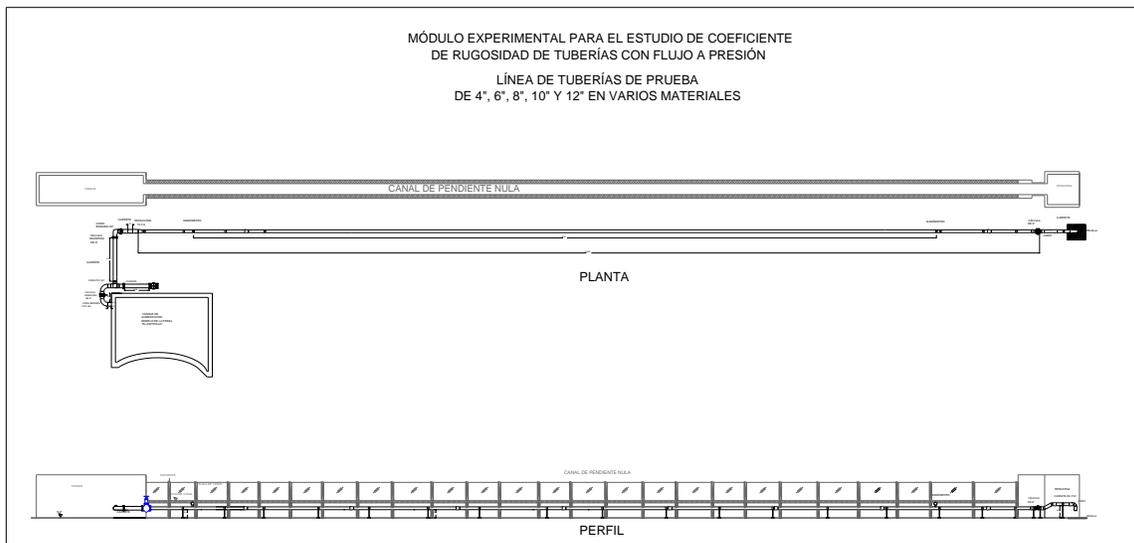


Fig. 10. Planta y perfil de la instalación

El punto de conexión para la alimentación se ubicó en un punto cercano, donde se dispone de una válvula y una salida exterior, fotos 30 y 31.



Fotos 30 y 31. Punto de conexión en la red del laboratorio

Se decidió colocar los tubos sobre soportes de 45 cm de altura, espaciados cada 3 m. Se adquirieron las piezas especiales necesarias para la instalación como son codos y reducciones para los diferentes diámetros a usar, fotos 32 a 37. Asimismo se instalaron dos válvulas de mariposa, (ver dibujo).



Fotos 32 y 33. Trabajos de instalación de tubo de 6 pulg. de diámetro



Fotos 34 y 35. Trabajos de instalación de tubo de 6 pulg. de diámetro



Fotos 36 y 37. Vistas de tubería instalada

### 3.1 INSTRUMENTACIÓN PARA LAS PRUEBAS

Los parámetros hidráulicos principales por medir en las pruebas correspondientes a este estudio son el caudal y la carga de presión.

#### **Medición del gasto**

Para medir el gasto o caudal se utilizó un equipo ultrasónico de tiempo en tránsito Thermo Scientific que se muestra en las fotos 38 a 41:



Fotos 38 a 41. Equipo de medición del gasto

Las unidades de velocidad utilizadas fueron de m/s para la velocidad y de l/s para el caudal.

Al disponer de dos equipos ultrasónicos adicionales iguales al que se utilizaba en las mediciones, se efectuó una verificación resultando satisfactoria ya que los tres equipos arrojaron prácticamente mismo valor del gasto medido en un rango de 10 al 50 l/s, foto 42. En la tabla 2 encuentran los valores de los costos obtenidos en esta verificación.

El gasto máximo medido con las válvulas completamente abiertas para la tubería de 6 pulg. en las condiciones de prueba fue de 87.32 l/s con una velocidad de 4.61 m/s. Sólo como una referencia la pérdida de carga fue de aproximadamente 3.5 m.

En cuanto al gasto mínimo para el cual no ingresa aire en el piezómetro de aguas abajo, fue del orden de 5 l/s.



Foto 42 . Medición de gastos con tres equipos ultrasónicos Thermo Scientific

Tabla 2. Comparación de gastos con tres equipos

<b>Medición del gasto con equipos ultrasónicos</b>			
Laboratorio Enzo Levi			
		Fecha	12 feb 16
			Tubo de 6 pulg.
<b>Gasto de los medidores</b>			
	Equipo 1	Equipo 2	Equipo 3
Núm. de serie	34564	29269	34565
Hora	<b>G a s t o e n l/s</b>		
11:15	7.5	7.1	7.6
11:17	10.2	9.8	10.2
11:25	20.4	20	20.3
11:28	30	29.5	30
11:31	40	39.5	39.6
11:37	50	50	50

### **Medición de la carga de presión**

Se efectuaron las primeras pruebas de funcionamiento en un tren de tubos de PVC de 6 pulg. de diámetro, con piezómetros de manguera de 1/4 de pulg. de diámetro; las mangueras se conectaron de forma vertical en la parte superior del tubo y tenían una longitud de más de 9 m, el extremo superior llegaba cerca del techo de laboratorio, fotos 43 y 44.

En las primeras pruebas se observaron fluctuaciones del nivel del agua significativas que dificultaban la lectura.



Fotos 43 y 44. Piezómetros de manguera

Lo que más nos interesa en la medición de los niveles piezométricos esta diferencia de cargas entre los dos puntos de interés.

En las fotos 45 a 48 se observan aspectos que las columnas de agua en los piezómetros y su diferencia. Como referencia se instalaron manómetros tipo Bourdon, foto 49, con rango de 0 a 2 kg /cm<sup>2</sup> cercanos a los puntos de medición con los piezómetros. Las lecturas de los manómetros tipo Bourdon son sólo una referencia ya que la exactitud de estos instrumentos no es la adecuada para este tipo de pruebas.



Fotos 45 a 48. Vístase las lecturas de los piezómetros



Foto 49. Manómetro tipo Bourdon instalado

## 4 HABILITACIÓN DEL TANQUE DEL MODELO FÍSICO DEL ZAPOTILLO

Debido a que el estudio está más orientado a obtener el coeficiente de rugosidad para tuberías de alcantarillado, se efectuó la conexión del tanque del modelo físico del Zapotillo, sin dejar de contar con la conexión del tanque general de laboratorio Enzo Levi con carga disponible de 10 m. Este tanque tiene una altura de 3.20 m y se puede disponer al nivel de las tuberías de prueba, de: 2.90 m de carga. En las fotos 50 a 55 se muestran aspectos de los trabajos desarrollados y la Fig. 11 contiene un esquema de la conexión a este tanque.



Fotos 50 y 51. Trabajos de habilitación del tanque del modelo del Zapotillo



Fotos 52 y 53. Trabajos de habilitación del tanque del modelo del Zapotillo



Fotos 54 y 55. Conexión al tanque terminada

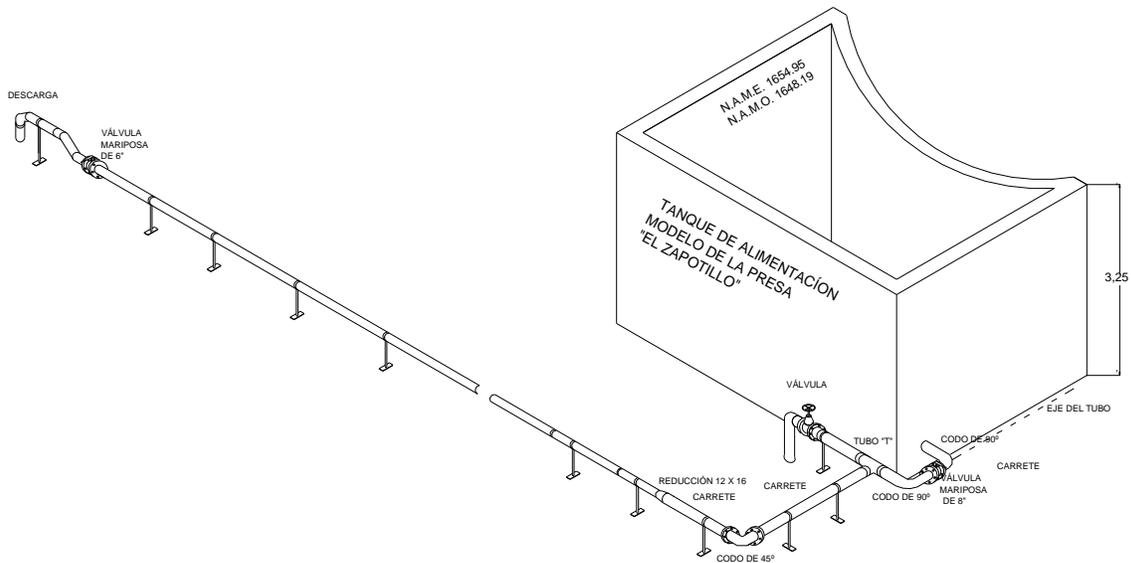


Fig. 11. Esquema de conexiones a tanque del Zapotillo y a la línea de pruebas

## 5 PRUEBAS EN EL CANAL DE PENDIENTE VARIABLE

El laboratorio Enzo Levi del IMTA se dispone de un canal de pendiente variable construido para ensayar flujos a superficie libre. Su longitud de 18 m, un ancho de 90 cm y una altura de 78 cm. Dado que este estudio está orientado al flujo en tuberías plásticas, se efectuaron las adaptaciones necesarias para el ensayo en tuberías aprovechando esta instalación. La Fig. 12 es un esquema de la estructura de este canal.

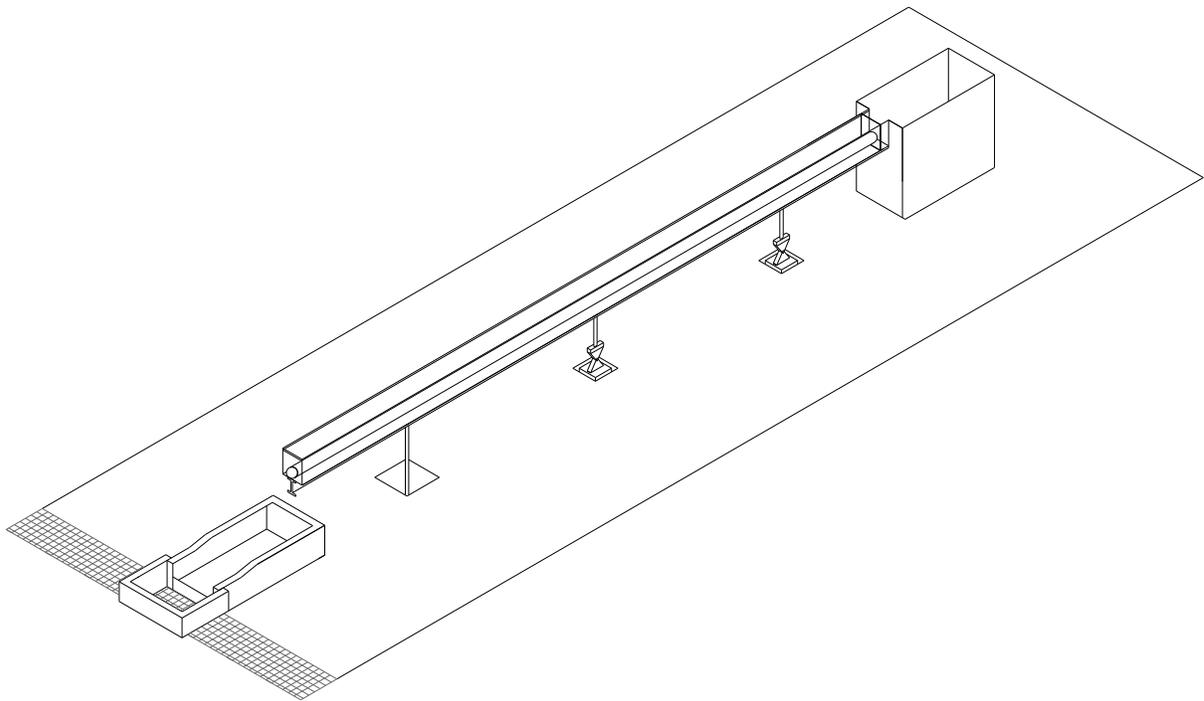


Fig. 12. Esquema del canal de pendiente variable

### **Instalación de tuberías dentro del canal de pendiente variable**

El primer acondicionamiento se efectuó para instalar una tubería de 12 pulg. de diámetro dentro del canal. La unión de los tramos de tubo se efectuó fuera del canal en el piso de laboratorio y después utilizando de una grúa se colocó en el interior del canal, fotos 56 a 60.



Fotos 56 a 60. Trabajos en el canal de pendiente variable

## 6 RESULTADOS

De acuerdo con lo expuesto en este informe se efectuaron pruebas en un tren de tubos de PVC hidráulico de 6 pulg., con unión espiga campana y anillo de hule; en un rango de gastos de 16 a 85 l/s y velocidades correspondientes de 0.85 a 4.4 m/s.

En el capítulo uno se incluyó una figura (Fig. 3) de una referencia bibliográfica (Swamee y Jain, 1976) donde se construyen curvas del comportamiento de la  $n$  de Manning con respecto a la velocidad del flujo en tubos llenos de 0.1 a 1 m para una rugosidad absoluta de 0.03 mm.

De esta forma no se considera que la  $n$  de Manning sea constante sino que varía de manera relacionada con la  $f$  de Darcy-Weisbach, con la velocidad y con el diámetro.

Por considerarlo de importancia fundamental para el tema de este estudio se incluye un resumen del desarrollo para llegar a la ecuación de la  $n$  de Manning en la función de la  $f$  de Darcy. Un mayor detalle puede consultarse en referencia señalada.

### **Dibujo de curvas velocidad $n$ de Manning $v - n$**

Del artículo “Hydraulic Friction Factors for Pipe Flow”, Kamand Fadi Z., Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 114, No. 2, Mayo, 1988:

La ecuación de Darcy – Weisbach (DW) está dada por:

$$h_f = \left(\frac{L}{D}\right) \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

La ecuación de Colebrook-White relaciona el factor de fricción  $f$  con valores adimensionales de rugosidad relativa  $\epsilon/D$  y número de Reynolds  $Re$  para flujo de turbulento  $Re > 4000$ .

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log_{10} \left( \frac{\epsilon}{D} + \frac{9.35}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

Al aparecer el factor de fricción  $f$  en ambos miembros de la ecuación, no es posible una solución explícita por lo que debe procederse de manera iterativa. Reescribiendo:

$$f = \frac{1}{\left[1.14 - 2 \log_{10} \left( \frac{9.35}{Re \sqrt{f}} \right) \right]^2} \quad (3)$$

Una ventaja de esta última ecuación es que converge rápidamente al proporcionar un valor inicial y sustituir el valor calculado en la siguiente iteración.

La ecuación de Manning está dada por:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (4)$$

Para tubos llenos  $R = D/4$ ;  $S = h_f / L$ . Rearreglando:

$$h_f = 6.35 n^2 v^2 L D^{-1.333} \quad (5)$$

Igualando (1) y (5).

$$f = 12.699 g n^2 D^{-0.333} \quad (6)$$

A partir de la ecuación (6) se puede dibujar el nomograma que se utilizaba de forma más generalizada antes de desarrollo actual de las computadoras.

El Committee on Pipeline Planning, Pipeline Division, American Society of Civil Engineers (1975) comparó la ecuación de D-W con la de Manning utilizando un valor  $\epsilon = 0.00019$  m y una  $n = 0.01$  con el velocidad del flujo de 1.524 m/s sólo para dos diámetros de tubos 0.305 y 0.61 m y encontró que las diferencias de pérdidas por fricción  $h_f$  fueron de aproximadamente el 6%. El comité concluyó que las diversas fórmulas con sus respectivos coeficientes de fricción estarían en el mismo rango de exactitud para tubos con diámetros de 152 a 1829 mm y velocidades de flujo mayores de 1.524 m/s.

La variación de  $n$  con respecto  $f$  se obtiene de la ecuación (6).

$$n = 0.281 k_2 f^{0.5} D^{0.167} g^{-0.5} \quad (7)$$

Dibujando la ecuación (7) para  $\epsilon = 0.03$  mm, se obtiene la gráfica de la Fig. 3.

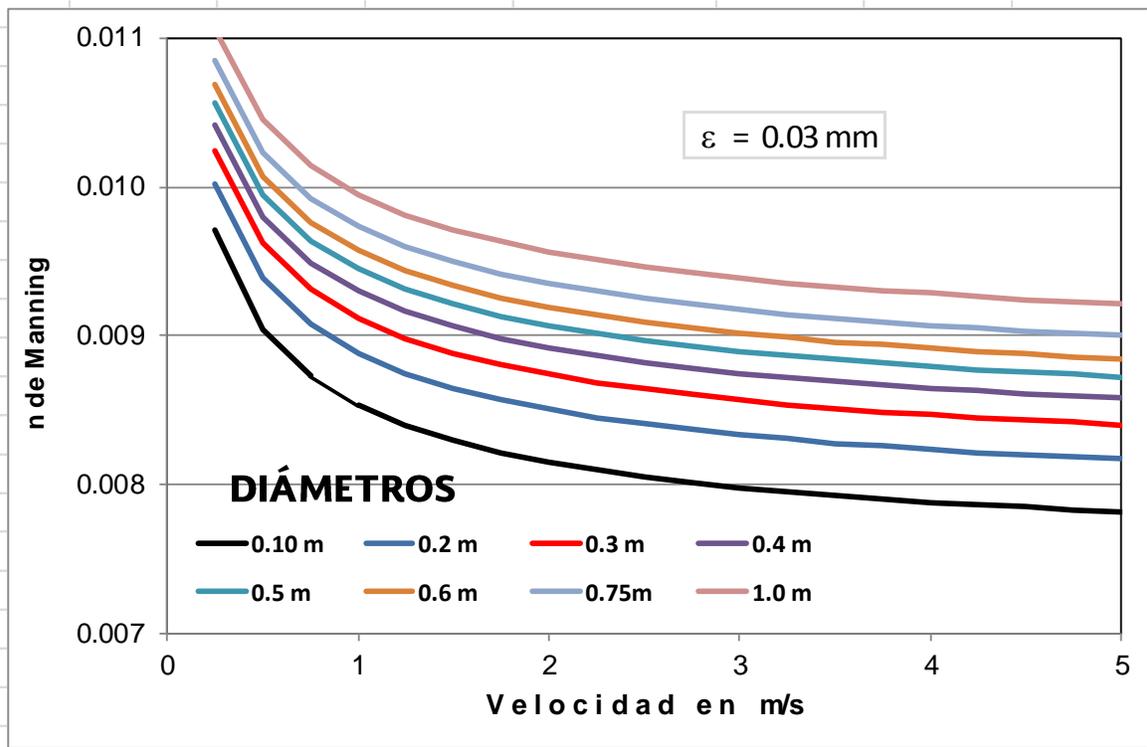


Fig. 3. Variación de la n con la velocidad y el diámetro del tubo

El coeficiente de fricción f se calculó con la ecuación de Swamee y Jain (1976):

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (8)$$

De la Fig. 3 se observa que la mayor variación ocurre en el rango de velocidades de 0 a 1 m/s siendo la variación notablemente menor para velocidades mayores a 2 m/s.

Con base en las ecuaciones de esta figura se construyeron otras gráficas para tubería de PVC de 6 pulg, de diámetro y con rugosidades absolutas e de 0.015, 0.02 y 0.03 mm que en referencias se consideran para este material.

En estas gráficas también se dibujaron los resultados de las pruebas, Figs. 13 a18.

Los puntos representan las mediciones de las pruebas y se observa que en general siguen la tendencia de las curvas.

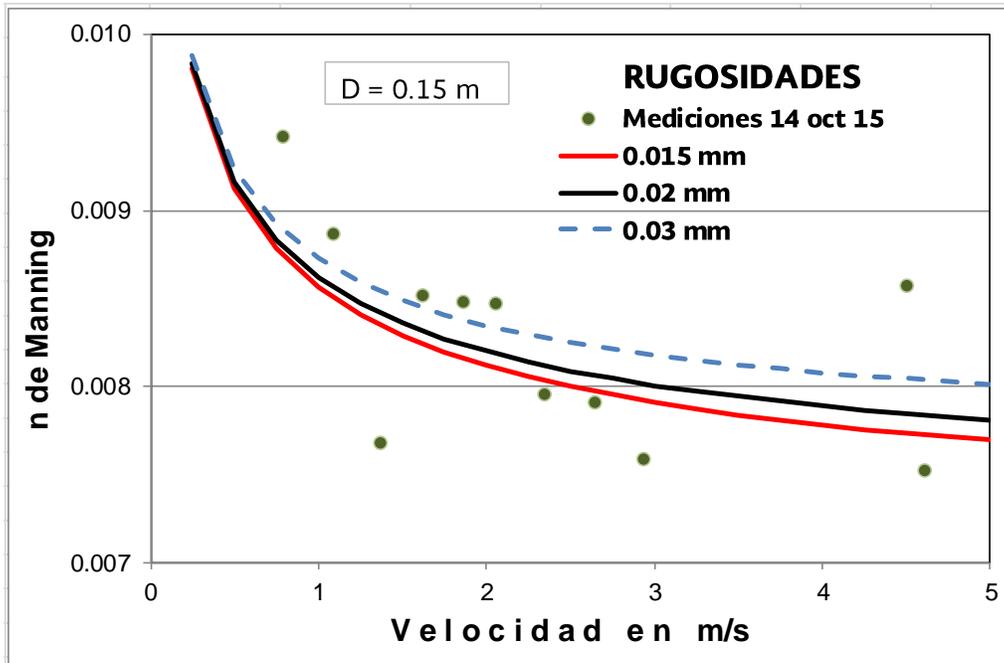


Fig. 13. Resultados de las mediciones en la fecha indicada

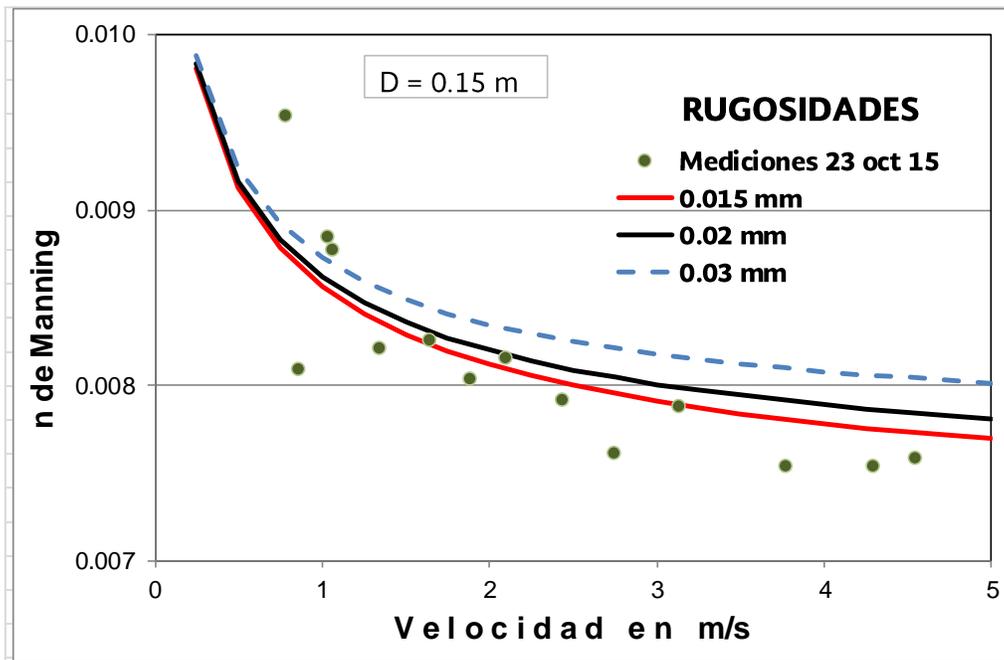


Fig. 14. Resultados de las mediciones en la fecha indicada

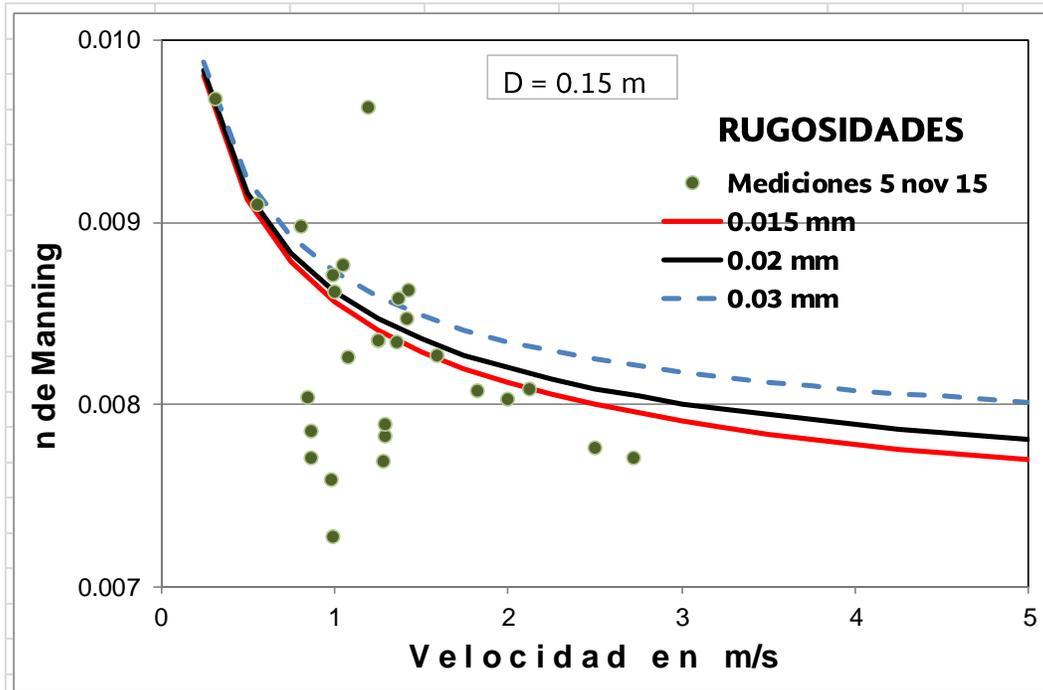


Fig. 15. Resultados de las mediciones en la fecha indicada

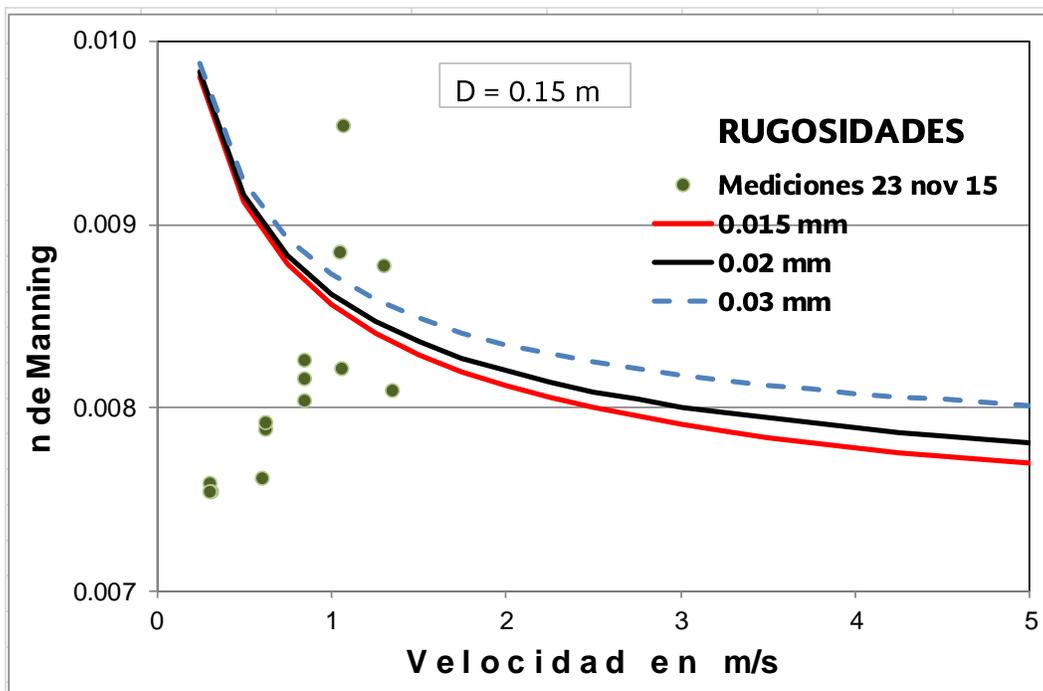


Fig. 16. Resultados de las mediciones en la fecha indicada

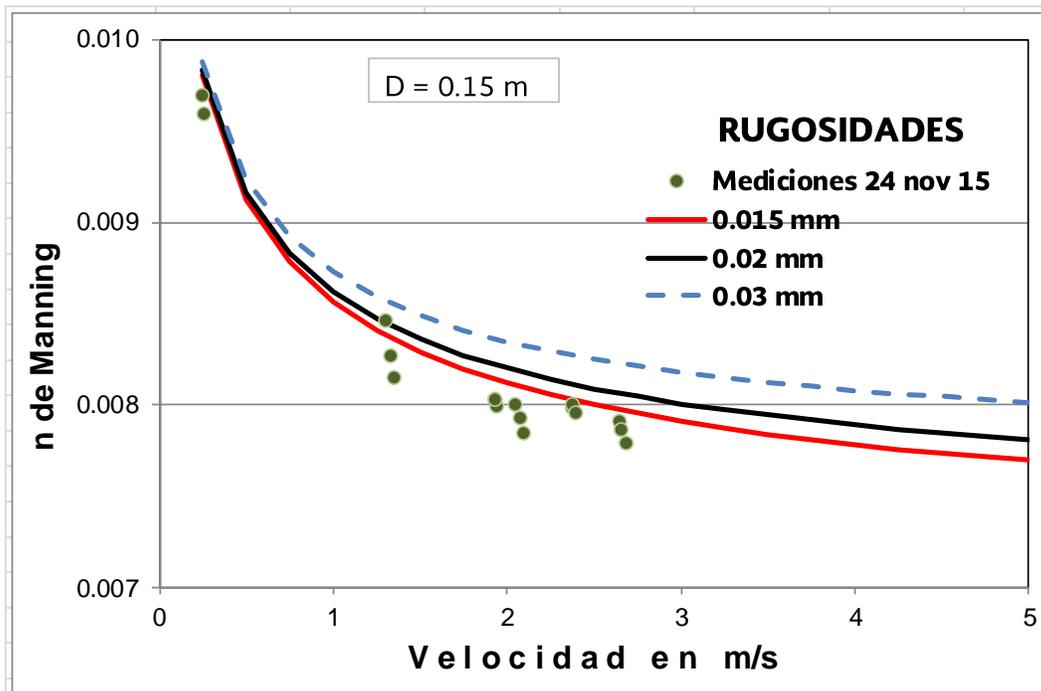


Fig. 17. Resultados de las mediciones en la fecha indicada

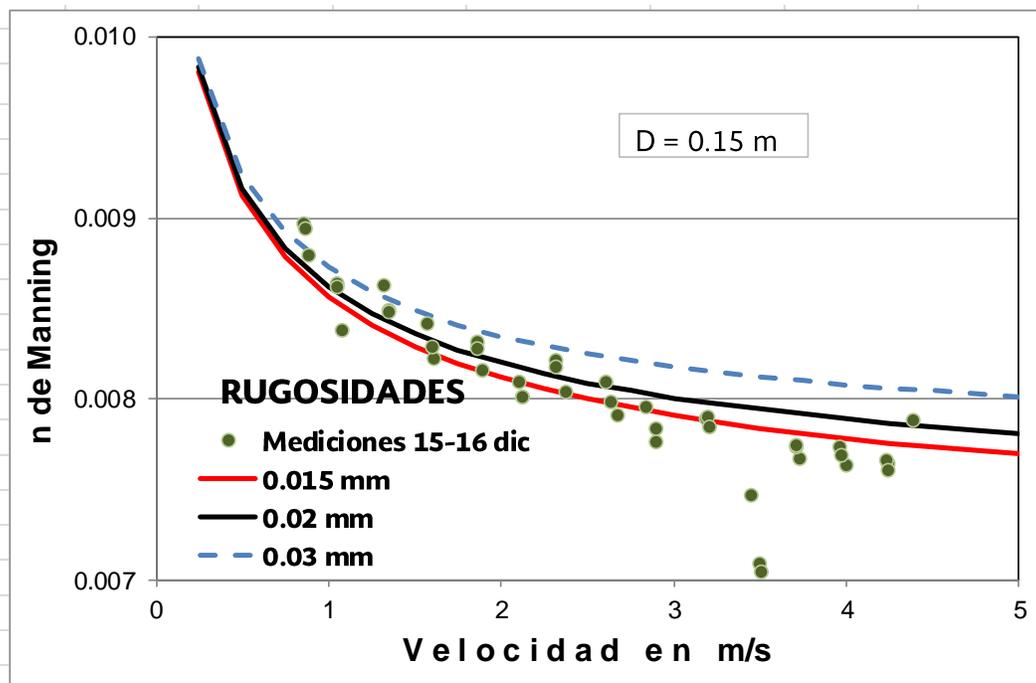


Fig. 18. Resultados de las mediciones en la fecha indicada

Las gráficas correspondientes a las pruebas del 5 y del 25 de noviembre contienen puntos que difieren notoriamente de la tendencia de las curvas al igual que algunos puntos entre 3 y 4 m/s para las pruebas del 15 y 16 de diciembre. En una etapa posterior se repetirán de estas mediciones.

## BIBLIOGRAFÍA

Steven L. Barfuss, J. Paul Tullis, *Friction Factor Tests on High Density Polyethylene Pipe*, Octubre 1988, Utah State University.

Steven L. Barfuss, J. Paul Tullis, *Friction Factor Tests on 375 mm High Density Polyethylene Pipe*, Mayo 1989, Utah State University.

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) de la Universidad de los Andes llevó a cabo el estudio, *Determinación del Coeficiente  $n$  de Manning y de la Rugosidad Absoluta  $k_s$  de la Tubería de Alcantarillado ADS 600 mm (interior liso)*, a través de la Cátedra PAVCO, para el periodo 2007 – 2008.

Kamand Fadi Z., *Hydraulic Friction Factors for Pipe Flow*, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 2, Mayo, 1988.

Swamee, P: K. y Jain A K. *Explicit Equations for Pipeflow Problems*, *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, 1976, pp 657-664.

Sotelo, A. G., *Hidráulica General*, Limusa, México, 1976.

