


	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 1 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

PROYECTO “ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II” CLAVE HC1610.1 Informe final

COORDINACIÓN DE HIDRÁULICA
SUBCOORDINACIÓN DE HIDRÁULICA URBANA




Petronilo E. Cortez Mejía
Velitchko Tzachkov
José Manuel Rodríguez Varela
Ignacio A. Caldiño Villagómez
Jesús Figueroa Vásquez (outsourcing)
Franco Pellegrini Martínez (outsourcing)

México, 2016




 <p>SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES</p>	<p>ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II</p>	 <p>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</p>
<p>Página 2 de 79</p>	<p>México, 2016</p>	<p>Clave: HC1610.1</p>

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO	9
1 ANTECEDENTES	11
2 METODOLOGÍA.....	13
2.1 Revisión bibliográfica sobre experiencias nacionales e internacionales ...	13
2.1.1 Bibliografía complementaria.....	13
2.1.1.1 Teoría de Morris	13
2.1.2 Bibliografía de etapa 1	13
2.1.2.1 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.....	13
2.1.2.2 Determinación del coeficiente n de Manning y de la rugosidad absoluta ks de la tubería de alcantarillado ADS 600 mm (interior liso) en la Universidad de los Andes.....	15
2.2 Implementación del módulo de pruebas de tuberías con flujo a presión... 16	
2.2.1 Descripción del módulo de pruebas a presión.....	16
2.2.2 Instrumentación del módulo a presión	22
2.2.2.1 Medición de caudales.....	23
2.2.2.2 Medición de presiones.....	23
2.2.2.3 Medición de la temperatura del agua.....	28
2.3 Implementación del módulo de pruebas de tuberías con flujo a superficie libre 29	
2.3.1 Descripción del módulo de pruebas a gravedad.....	29
2.3.2 Instrumentación del módulo a gravedad	32
2.3.2.1 Medición de caudales.....	32
2.3.2.2 Medición de los tirantes de flujo	35
2.3.2.3 Medición de la temperatura del agua.....	37
3 RESULTADOS	38
3.1 Flujo a presión	38
3.1.1 Flujo a presión en tubo de PVC.....	38
3.1.1.1 Ecuaciones básicas de la hidráulica de tuberías a presión.....	38
3.1.1.2 Mediciones realizadas y procesamiento.....	45
3.1.2 Flujo a presión en tubo de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) de pared exterior corrugada y pared interior lisa	51
3.1.2.1 Mediciones realizadas y procesamiento.....	53
3.1.2.2 Discusión de los resultados para el tubo de PEAD.....	56



 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 3 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

3.1.3	Conclusiones de este subcapítulo	59
3.2	Flujo a gravedad.....	60
3.2.1	Flujo en tubo acanalado de PEAD de 12 pulgadas para alcantarillado	60
3.2.1.1	<i>Mediciones realizadas y procesamiento</i>	60
3.2.1.2	<i>Metodos usados para determinar la n de Manning</i>	64
3.2.1.3	<i>Valores obtenidos</i>	66
4	CONCLUSIONES	77
5	Referencias	78
6	ANEXOS DIGITALES	79
6.1	HOJAS DE CÁLCULO	79
6.2	ARTÍCULOS.....	79

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 4 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Valores de a y a' para determinados valores b/B . Fuente: <i>International Standard 1438/1-1980</i> .	33
Tabla 3.1. Espesor de capa límite laminar para un tubo de 155.3 mm.	41
Tabla 3.2. Concentrado de mediciones caudal-tirantes de flujo.	61
Tabla 3.3. Continuación del concentrado de mediciones caudal-tirantes de flujo.	62
Tabla 3.4. Resumen de resultados en tubo de 12 pulgadas de diámetro con pendiente horizontal, para los 11 caudales de pruebas ensayados. Y_2 es el tirante experimental obtenido en el segundo punto de medición; Y_c : tirante crítico.	69
Tabla 3.5. Concentrado y promedio de las n de Manning obtenidas en los cinco tramos evaluados en la tubería de PEAD de 12" de diámetro, en el rango de caudales de prueba.	71
Tabla 3.6. Determinación de n de Manning para cada uno de los 11 gastos de prueba, a partir de los datos de gasto y tirantes de flujo medidos en el tramo 3-4 de la tubería ensayada de PEAD, de 12 pulgadas de diámetro, alojada en canal de pendiente horizontal.	72
Tabla 3.7. Determinación de n de Manning para cada uno de los 11 gastos de prueba, a partir de los datos de gasto y tirantes de flujo medidos en el tramo 3-5 de la tubería ensayada de PEAD, de 12 pulgadas de diámetro, alojada en canal de pendiente horizontal.	73
Tabla 3.8. Determinación de n de Manning para cada uno de los 11 gastos de prueba, a partir de los datos de gasto y tirantes de flujo medidos en el tramo 1-7 de la tubería ensayada de PEAD, de 12 pulgadas de diámetro, alojada en canal de pendiente horizontal.	74
Tabla 3.9. Determinación de n de Manning para cada uno de los 11 gastos de prueba, a partir de los datos de gasto y tirantes de flujo medidos en el tramo 1-6 de la tubería ensayada de PEAD, de 12 pulgadas de diámetro, alojada en canal de pendiente horizontal.	75
Tabla 3.10. Determinación de n de Manning para cada uno de los 11 gastos de prueba, a partir de los datos de gasto y tirantes de flujo medidos en el tramo 2-6 de la tubería ensayada de PEAD, de 12 pulgadas de diámetro, alojada en canal de pendiente horizontal.	76

 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 5 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1. Arreglo para tubería de 18 pulgadas. Fuente: tomado de (Barfuss, Steven L., 1988).....	14
Ilustración 2.2. Esquema del módulo de pruebas. Fuente: Universidad de los Andes (CIACUA, 2009).	16
Ilustración 2.3. Isométrico del módulo de pruebas con flujo a presión, y conexiones al tanque el Zapotillo y al tanque elvado, dentro del IMTALAB.	17
Ilustración 2.4. Isométrico del modulo, con detalles para prueba de tubería de PVC de 6 pulgadas de diámetro.	18
Ilustración 2.5. Detalle de la alimentación hidráulica al módulo de pruebas con flujo a presión.	19
Ilustración 2.6. Detalle de la descarga al canal de recirculación del IMTALAB.	19
Ilustración 2.7. Alimentación de agua a tuberías con flujo a presión.....	20
Ilustración 2.8. Vista del tanque de alimentación del modelo del vertedor de la presa Zapotillo.	20
Ilustración 2.9. Ubicación de reducción campana y espacio para la instalación de equipo ultrasónico de tiempo en tránsito.....	21
Ilustración 2.10. Vista de la tubería de PVC probada con flujo a presión.....	21
Ilustración 2.11. Vista de la tubería de polietileno probada con flujo a presión.	21
Ilustración 2.12. Instalación de descarga de la tubería.	22
Ilustración 2.13. Instrumentación del módulo de pruebas con flujo a presión, para la adquisición de datos de presión y caudal.	22
Ilustración 2.14. Medidor ultrasónico de tiempo en tránsito: vista general del equipo.....	23
Ilustración 2.15. Medidor ultrasónico de tiempo en tránsito: transductores instalados.	23
Ilustración 2.16. Tubos piezométricos: vista general	24
Ilustración 2.17. Tubos piezométricos: detalle,.....	24
Ilustración 2.18. Tubos piezométricos: conexión a tubería.	24
Ilustración 2.19. Toma de lectura de carga de presión durante una prueba en tubería de PVC.	24
Ilustración 2.20. Vista de la derivación para purga de aire, ubicada en la parte baja de los tubos piezométricos.	25
Ilustración 2.21. Vista de una de las celdas de presión utilizadas.	25
Ilustración 2.22. Trabajos realizados en la tubería de polietileno para instalar la toma de carga de presión: retiro de la capa exterior.....	26
Ilustración 2.23. Trabajos realizados en la tubería de polietileno para instalar la toma de carga de presión: colocación de insertos de PVC.....	26
Ilustración 2.24. Tomas de cargas de presión en tubería de PVC.	26
Ilustración 2.25. Tomas de cargas de presión en tubería de polietileno.	26
Ilustración 2.26. Una de las pantallas del Software READ30-PROG30.....	27
Ilustración 2.27. Pantalla del Software READ30-PROG30 que muestra el gráfico generado con los valores reportados por las celdas de presión.	28
Ilustración 2.28. Termómetro de bulbo utilizado para medición de temperatura del agua: vista general.....	28



 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 6 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

Ilustración 2.29. Termómetro de bulbo: vista de detalle de las divisiones.....	28
Ilustración 2.30. Canal de pendiente nula: vista general.	29
Ilustración 2.31. Canal de pendiente nula: tanque de alimentación.	29
Ilustración 2.32. Ubicación de la estructura de transición de flujo en el canal: vista superior.	30
Ilustración 2.33. Ubicación de la estructura de transición de flujo en el canal: vista desde el inicio del canal.....	30
Ilustración 2.34. Estructura de transición: vista general donde se aprecia el sellado..	31
Ilustración 2.35. Estructura de transición: vista superior.	31
Ilustración 2.36. Tramo de tubería de polietileno (12 pulgadas) instalada: vista desde la estructura de transición.	31
Ilustración 2.37. Tramo de tubería de polietileno (12 pulgadas) instalada: vista desde la descarga.	31
Ilustración 2.38. Descarga del tramo de tubería de polietileno (12 pulgadas): vista general.	31
Ilustración 2.39. Descarga del tramo de tubería de polietileno (12 pulgadas): vista superior.	31
Ilustración 2.40. Parámetros a utilizar en la medición de caudal en un vertedor rectangular con contracciones laterales. Fuente: International Standard 1438/1-1980.	32
Ilustración 2.41. Valores de kb para para determinados valores b/B . Fuente: International Standard 1438/1-1980 (con adaptaciones).	34
Ilustración 2.42. Tablero de tubos piezométricos instalados para pruebas en tuberías con flujo a superficie libre: vista general.	36
Ilustración 2.43. Tablero de tubos piezométricos instalados para pruebas en tuberías con flujo a superficie libre: detalle.	36
Ilustración 2.44. Celdas de presión instaladas para pruebas en tuberías con flujo a superficie libre: vista general.	36
Ilustración 2.45. Celdas de presión instaladas para pruebas en tuberías con flujo a superficie libre: vista de detalle de conexiones y derivaciones.	36
Ilustración 2.46. Conexión de la tubería de prueba a la manguera flexible que transmite la presión a los tubos piezométricos y celdas de presión: detalle de la conexión.	37
Ilustración 2.47. Conexión de la tubería de prueba a la manguera flexible que transmite la presión a los tubos piezométricos y celdas de presión: vista de colocación de la manguera desde la toma.	37
Ilustración 3.1. Comparación entre el factor de fricción f calculado por la ecuación propuesta y la ecuación de Swamee-Jain para un tubo hidráulicamente liso de 6” (rugosidad absoluta de 0.002 mm).	43
Ilustración 3.2. Comparación entre la n de Manning calculada por la ecuación propuesta y la ecuación de Swamee-Jain para un tubo hidráulicamente liso de 6” (rugosidad absoluta de 0.002 mm).	44
Ilustración 3.3. n de Manning calculada por la ecuación propuesta para un tubo hidráulicamente liso de 60” (1.524 m).	44




 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 7 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

Ilustración 3.4. Valores de f de todas las 172 mediciones sobre un tubo de PVC de 6” de diámetro nominal, obtenidos con piezómetros y con celdas de presión.	46
Ilustración 3.5. Valores de f de todas las mediciones sobre un tubo de PVC de 6” de diámetro nominal, obtenidos con piezómetros.....	46
Ilustración 3.6. Valores de f de todas las mediciones sobre un tubo de PVC de 6” de diámetro nominal, obtenidas con celdas de presión.	47
Ilustración 3.7. Valores de n de todas las 172 mediciones sobre un tubo de PVC de 6” de diámetro nominal, obtenidos con piezómetros y con celdas de presión.	47
Ilustración 3.8. Valores de n de todas las mediciones sobre un tubo de PVC de 6” de diámetro nominal, obtenidos con piezómetros.....	48
Ilustración 3.9. Valores de n de todas las mediciones sobre un tubo de PVC de 6” de diámetro nominal, obtenidos con celdas de presión.	48
Ilustración 3.10. Valores de n de Manning, obtenidos con piezómetros y celdas de presión ubicados en las mismas posiciones, en puntos 2 y 3.	49
Ilustración 3.11. Comparación entre el factor de fricción f calculado por la ecuación propuesta, la ecuación de Swamee-Jain para rugosidad absoluta de 0.002 mm, y las mediciones realizadas sobre el tubo de 6” de PVC.	50
Ilustración 3.12. Comparación entre la n calculada por la ecuación propuesta y la n calculada por la Ecuación (12) con el factor de fricción f calculado por la ecuación de Swamee-Jain para rugosidad absoluta de 0.002 mm, y las mediciones realizadas sobre el tubo de 6” de PVC.	50
Ilustración 3.13. Aspecto de las paredes exterior e interior de los tubos de PEAD, en el IMTALAB.	51
Ilustración 3.14. Corte de la superficie interior del tubo de 6” de PEAD.	52
Ilustración 3.15. Modelo en AutoCAD del tubo de PEAD de 6”.....	52
Ilustración 3.16. Valores de f de todas las mediciones sobre un tubo de PEAD de 6” de diámetro nominal, obtenidas con piezómetros.	53
Ilustración 3.17. Valores de f de todas las mediciones sobre un tubo de PEAD de 6” de diámetro nominal, obtenidas con celdas de presión.	54
Ilustración 3.18. Valores de n de todas las mediciones sobre un tubo de PEAD de 6” de diámetro nominal, obtenidos con piezómetros.	54
Ilustración 3.19. Valores de n de todas las mediciones sobre un tubo de PEAD de 6” de diámetro nominal, obtenidos con celdas de presión.	55
Ilustración 3.20. Comparación entre el factor de fricción f calculado por la ecuación de Swamee-Jain para rugosidad absoluta de 0.002 mm, y las mediciones realizadas sobre el tubo de 6” de PEAD.	56
Ilustración 3.21. Comparación entre la n calculada por la ecuación de Swamee-Jain para rugosidad absoluta de 0.002 mm, y las mediciones realizadas sobre el tubo de 6” de PEAD.	56
Ilustración 3.22. Los tres tipos de flujo en un conducto rugoso, según Morris (1959). Tomada de Giustolisi et al. (2008).	58
Ilustración 3.23. Medición del caudal de alimentación a las tuberías de prueba con flujo a superficie libre.	60







 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 8 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

Ilustración 3.24. Remanso en la alimentación de la tubería de prueba a superficie libre.....	60
Ilustración 3.25. Vista del tramo aguas arriba de la alimentación a la tubería de prueba, dentro del canal de pendiente nula.	63
Ilustración 3.26. Vista de la descarga de la tubería de prueba al canal de recirculación.....	63
Ilustración 3.27. Medición de perfil de flujo con piezómetros y celdas de presión para un caudal $Q=0.00533 \text{ m}^3/\text{s}$	63
Ilustración 3.28. Medición de perfil de flujo con piezómetros y celdas de presión para un caudal $Q=0.00777 \text{ m}^3/\text{s}$	63
Ilustración 3.29. Comparativa de perfil teórico-experimental para el gasto de prueba $Q_{10}=0.03183 \text{ m}^3/\text{s}$	64
Ilustración 3.30. Energía en flujo a superficie libre gradualmente variado.....	65
Ilustración 3.31. Perfil teórico-experimental ($n=0.0010$) para $Q_1=0.00284 \text{ m}^3/\text{s}$, con Y_c teórico y Y_o experimental en descarga de canal (43.097 m).....	66
Ilustración 3.32. Perfil teórico-experimental ($n=0.0019$) para $Q_1=0.00284 \text{ m}^3/\text{s}$, con Y_c teórico y Y_o experimental en descarga de canal (43.097 m).....	66
Ilustración 3.33. Perfil teórico experimental para $Q_1=0.00284 \text{ m}^3/\text{s}$, con Y_c teórico y Y_o experimental en descarga de canal (43.097 m).....	67
Ilustración 3.34. Perfil teórico experimental para $Q_1=0.00284 \text{ m}^3/\text{s}$, con Y_c teórico en 42.97 m, y Y_o en descarga de canal (43.097 m).	67
Ilustración 3.35. Perfil teórico experimental para $Q_2=0.00533 \text{ m}^3/\text{s}$, con Y_c teórico y Y_o experimental en descarga de canal (43.097 m).....	67
Ilustración 3.36. Perfil teórico experimental para $Q_3=0.00777 \text{ m}^3/\text{s}$, con Y_c y Y_o experimental en descarga de canal (43.097 m).....	67
Ilustración 3.37. Perfil teórico-experimental para $Q_4=0.0105 \text{ m}^3/\text{s}$	68
Ilustración 3.38. Perfil teórico-experimental para $Q_5=0.01288 \text{ m}^3/\text{s}$	68
Ilustración 3.39. Perfil teórico-experimental para $Q_6=0.01708 \text{ m}^3/\text{s}$	68
Ilustración 3.40. Perfil teórico-experimental para $Q_7=0.01985 \text{ m}^3/\text{s}$	68
Ilustración 3.41. Perfil teórico-experimental para $Q_8=0.02351 \text{ m}^3/\text{s}$	68
Ilustración 3.42. Perfil teórico-experimental para $Q_9=0.02697 \text{ m}^3/\text{s}$	68
Ilustración 3.43. Perfil teórico-experimental para $Q_{10}=0.03183 \text{ m}^3/\text{s}$	69
Ilustración 3.44. Perfil teórico-experimental para $Q_{11}=0.03565 \text{ m}^3/\text{s}$	69
Ilustración 3.45. Variación de la n de Manning con los diferentes tirantes de flujo ensayados.....	70
Ilustración 3.46. Resultados de n de Manning obtenidos con la medición de la pendiente de energía.	71

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 9 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

RESUMEN EJECUTIVO

El objetivo de esta segunda etapa del proyecto fue continuar con los trabajos y estudios experimentales de los coeficientes de rugosidad de tuberías, con flujo a presión y a superficie libre, con el fin de poder establecer sistemas y procedimientos para evaluar este coeficiente, y asimismo determinarlo para tuberías de PVC y PEAD para alcantarillado.

Por cuanto al establecimiento de sistemas y procedimientos, se complementaron y afinaron los módulos de pruebas a presión y a superficie libre, con elementos de control de flujo y de medición de variables de prueba, incluyendo celdas de presión probadas con piezómetros, que permiten la adquisición y procesamiento automático de datos.




En el módulo de flujo a superficie libre se usó el canal de pendiente horizontal (nula) del IMTALAB para alojar las tuberías de prueba, y aprovechar su infraestructura de alimentación, medición y recirculación. Las múltiples actividades experimentales que se desarrollan en el canal de pendiente variable impidieron su uso en este estudio.

Uno de los resultados más importantes de este proyecto es el establecimiento de los módulos y procedimientos de prueba, que permitirán la realización de estudios específicos en tuberías de diferentes materiales y diámetros, y en diferentes condiciones operativas, como es la deformación de algunos materiales al ser instaladas.

Por cuanto a la determinación de los coeficientes de rugosidad n de Manning, se probaron tuberías de PVC y de PEAD en el módulo a presión y en el módulo a superficie libre. En el módulo a presión se obtuvieron valores similares en las tuberías de 6 pulgadas de diámetro de ambos materiales. Se presenta una discusión que explica este resultado mediante la teoría de Henry Morris, publicada por primera vez en los años 50 del siglo pasado.

La n de Manning no es una constante para un tubo dado, como muchas veces se asume en la práctica, sino que depende del número de Reynolds, de la misma manera como el factor de fricción f de Darcy-Weisbach.




En el módulo a superficie libre con pendiente horizontal (nula), se probó tubería de PEAD de 12 pulgadas de diámetro con 11 diferentes caudales de flujo, de 0.00284 m³/s a 0.03565 m³/s, que implicaron 11 diferentes perfiles experimentales de Flujo

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 10 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

Gradualmente Variado (FGV), los cuales fueron comparados con perfiles teóricos para determinar la n de Manning. Para cada uno de los 11 perfiles se obtuvo un valor diferente, acorde con lo reportado por la literatura técnica, cuyo promedio fue de 0.01245. Con el procedimiento de la pendiente de energía experimental el promedio resulta de 0.01333.

En otros estudios como el de la Universidad de Utah, en tuberías de PEAD de 12, 15 y 18 pulgadas de diámetro, se obtuvieron n 's de Manning promedio de 0.0119, 0.0148, y 0.0123 respectivamente.

Por su parte la Universidad de los Andes, que realizó pruebas en tubería de 600 mm, obtuvo un valor de 0.0123 ± 0.0001 , que según lo que reportan explica el 100% de posibilidades de caudal y pendiente, para caudales entre 9.72 l/s y 97.2 l/s.

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 11 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

1 ANTECEDENTES

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 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 diseñar, instalar y operar módulos de pruebas con flujo a presión y con flujo a gravedad, en el interior de laboratorio Enzo Levi (IMTALAB), con el fin de determinar experimentalmente los coeficientes de rugosidad en tuberías plásticas de diferentes diámetros y condiciones de flujo.

Esto también debido a que no se encontraron en el país muchos antecedentes de estudios experimentales de estos coeficientes, por lo que otro de los objetivos implícitos ha sido la definición de una metodología para este tipo de pruebas, incluyendo el diseño de los módulos, su instrumentación, procedimientos de ejecución, adquisición y procesamiento de datos, y todo lo necesario para obtener




 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 12 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

los valores buscados, aunque si encontraron referencias de estudios experimentales en otros países, las cuales se describen brevemente en el siguiente apartado.

Adicionalmente existe la demanda técnica de estudios especiales para evaluar los coeficientes en las condiciones particulares en las que se pueden encontrar instaladas las tuberías, específicamente las tuberías de alcantarillado de material plástico, en condiciones de deformación. No ha sido una de las metas del estudio, pero sí dejar las bases para su futura realización.

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.

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 13 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

2 METODOLOGÍA

2.1 Revisión bibliográfica sobre experiencias nacionales e internacionales

2.1.1 Bibliografía complementaria

2.1.1.1 Teoría de Morris

Se encontraron referencias que ayudaron a explicar algunos resultados de coeficientes de rugosidad de tuberías de PVC y PEAD, como la relativamente poco conocida teoría de Henry Morris, publicada por primera vez en los años 50 del siglo pasado en (Morris, H. M., 1959) y en (Henry M. Morris, et al, 1972), y recientemente retomada por algunos investigadores a nivel internacional (O. Giustolisi et al, 2008), (Blake P. Tullis, 2012) (Calomino, F. et al, 2015).

A pesar de que el tubo de PEAD analizado no es liso, sino que ligeramente ondulado en su interior, las mediciones efectuadas mostraron que la pérdida de carga, y con esto el factor de fricción f y la n de Manning son casi los mismos como los del tubo liso de PVC, y con el mismo comportamiento respecto al número de Reynolds. Se procedió entonces a buscar una explicación de este hecho, que se encontró en la teoría mencionada, en la que se definen tres categorías del régimen de flujo en un conducto rugoso:



- de rugosidad aislada (llamado flujo turbulento en tubo semi liso)
- de interferencia de estelas, en inglés “wake interference” (llamado flujo hiper turbulento)
- flujo rasante, en inglés “skimming flow” (llamado flujo turbulento en tubo quasi liso)

Dado su muy ligera corrugación interna, en el tubo de PEAD analizado se tiene el primer tipo de flujo (flujo turbulento en tubo semi-liso). Ver apartado 3.1.2.2 “Discusión de los resultados para el tubo de PEAD”.

2.1.2 Bibliografía de etapa 1

2.1.2.1 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, con interior acanalado, a velocidades entre 0.61 m/s (2 ft

 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 14 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

/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, (Barfuss, Steven L., 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 l/s, 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.

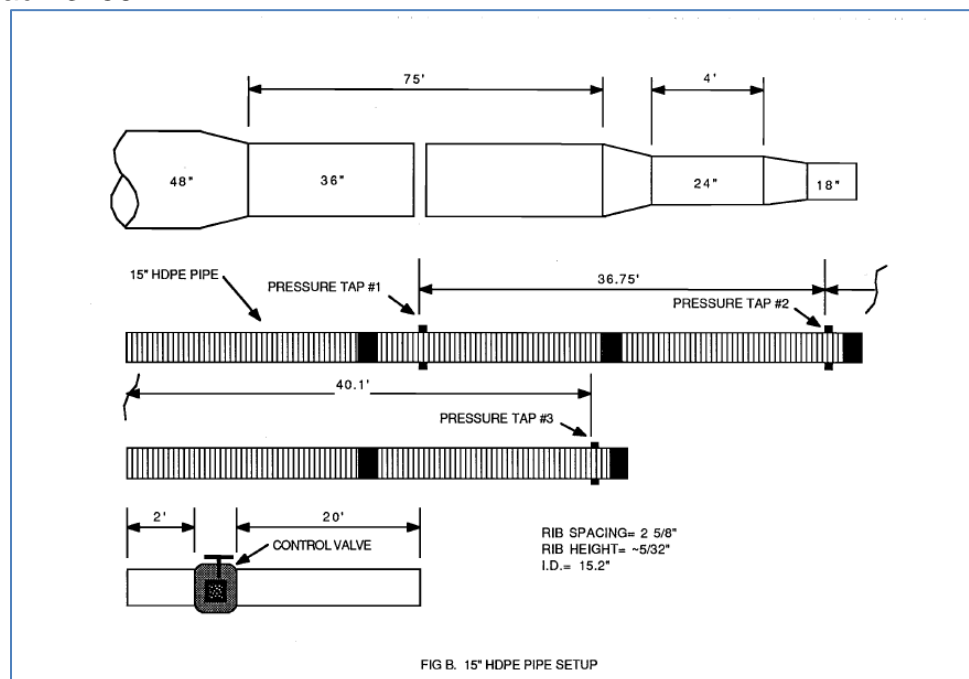





Ilustración 2.1. Arreglo para tubería de 18 pulgadas. Fuente: tomado de (Barfuss, Steven L., 1988).

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

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 15 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

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.

2.1.2.2 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) (CIACUA, 2009).

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.

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 cargas, 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 Ilustración 2.2 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 m³/s y 0.101 m³/s.

Según los detallados análisis reportados, la n de Manning definitiva que obtuvieron y que recomiendan es de 0.0123 ± 0.0001 , pues explica el 100% de posibilidades

 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 16 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

caudal-pendiente, con eficiencias iguales o mayores al 98.44%, para caudales entre 9.72 l/s y 97.2 l/s.

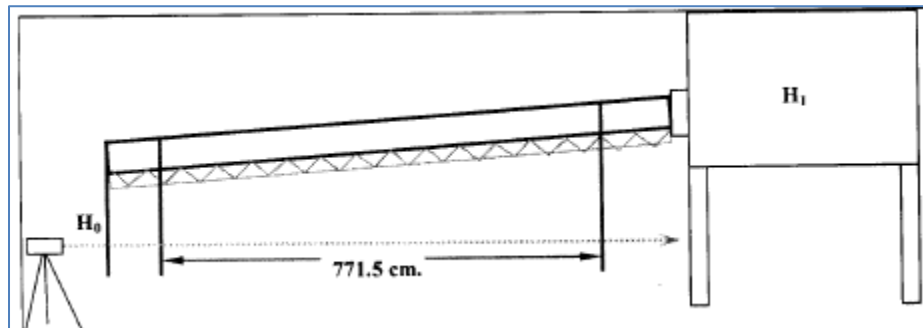


Ilustración 2.2. Esquema del módulo de pruebas. Fuente: Universidad de los Andes (CIACUA, 2009).



2.2 Implementación del módulo de pruebas de tuberías con flujo a presión

En el Laboratorio de Hidráulica Enzo Levi (IMTALAB), se asignó un espacio para la instalación de módulos experimentales que permitan determinar el coeficiente n de Manning de diferentes tipos de tubería, a diferentes caudales y condiciones de flujo, a tubo lleno (a presión) y a superficie libre, en ambos casos con pendiente nula. A continuación se describen los módulos experimentales y su instrumentación.

2.2.1 Descripción del módulo de pruebas a presión

Se llevó a cabo un proceso de diseño y análisis hidráulico que permitió definir e implementar el módulo de pruebas con flujo a presión, con dos opciones de alimentación, ya sea mediante el tanque de carga constante, o bien aprovechando el tanque del modelo físico del vertedor de la Presa el Zapotillo. Ver diseño en vista isométrica en la Ilustración 2.3, y la Ilustración 2.4, con tubería de PVC de 6 pulgadas de diámetro. Ver detalles de alimentación y de descarga al canal de recirculación en la Ilustración 2.5 y la Ilustración 2.6, respectivamente.

Este módulo se ubica a un costado y en paralelo al canal de pendiente nula, existente en el Laboratorio. Aunque está diseñado para tuberías de hasta 12 pulgadas de diámetro, se instalaron y probaron dos tipos de tuberías: la primera de PVC liso (serie inglesa Rd'S 26 con campana integrada), y la segunda de Polietileno de Alta Densidad Corrugado (tubo de doble pared DW con junta espiga-campana con empaque elastomérico), ambas de seis pulgadas de diámetro nominal, las cuales fueron probadas en condiciones de flujo a presión.

 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 17 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

La instalación de pruebas, para ambos tipos de tubería, consta de un tramo de tubería recta de 39.4 m de longitud, apoyada en soportes metálicos sujetos al piso, que permiten mantener las tuberías a una altura de 44 cm.

La alimentación de agua se realizó con un arreglo de conexiones y válvulas de ocho pulgadas de diámetro, para tomar agua de dos fuentes, ya sea del tanque elevado de carga constante, ubicado a diez metros de altura y que suministra agua a toda la red hidráulica del laboratorio, o bien del tanque de alimentación de agua de uno de los modelos existentes, en este caso el del vertedor de la presa Zapotillo (Ilustración 2.7 y Ilustración 2.8. El tanque del modelo proporciona también una carga constante de hasta 2.45 m, a la línea de prueba.

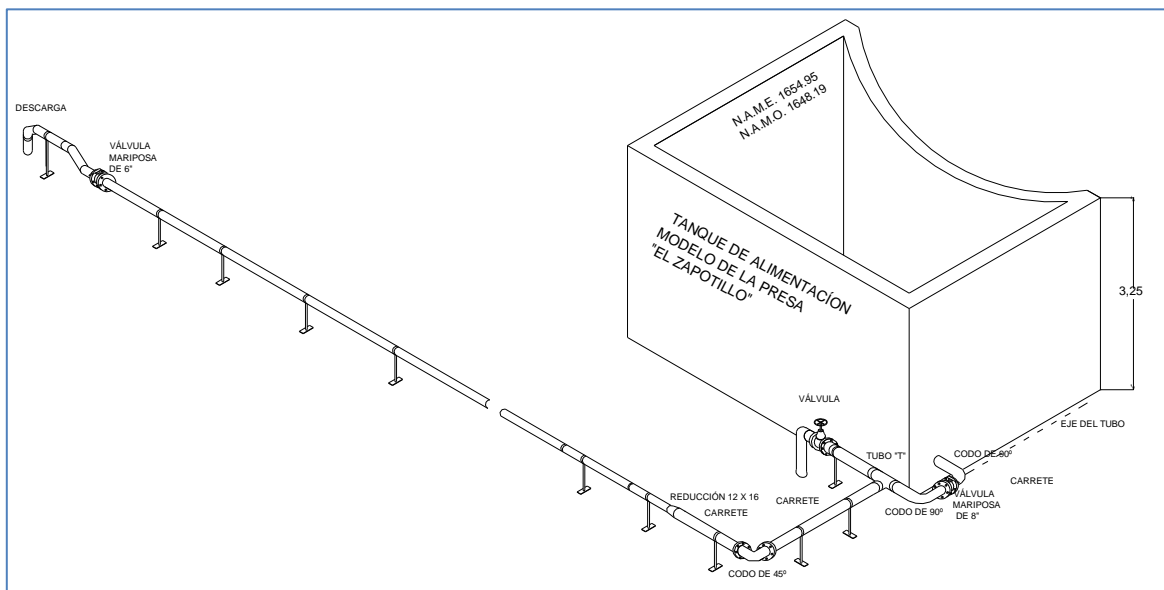


Ilustración 2.3. Isométrico del módulo de pruebas con flujo a presión, y conexiones al tanque el Zapotillo y al tanque elevado, dentro del IMTALAB.

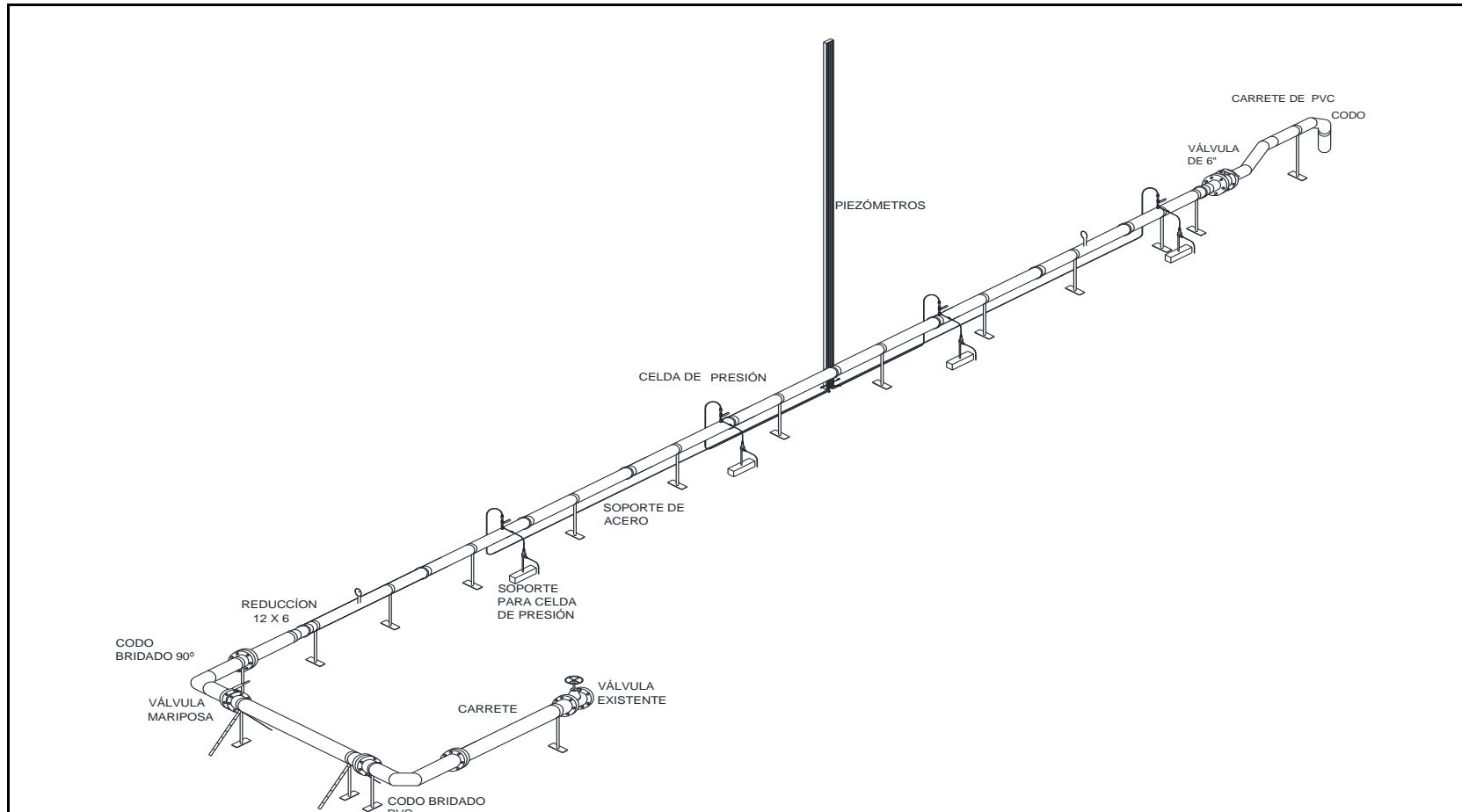


Ilustración 2.4. Isométrico del módulo, con detalles para prueba de tubería de PVC de 6 pulgadas de diámetro.

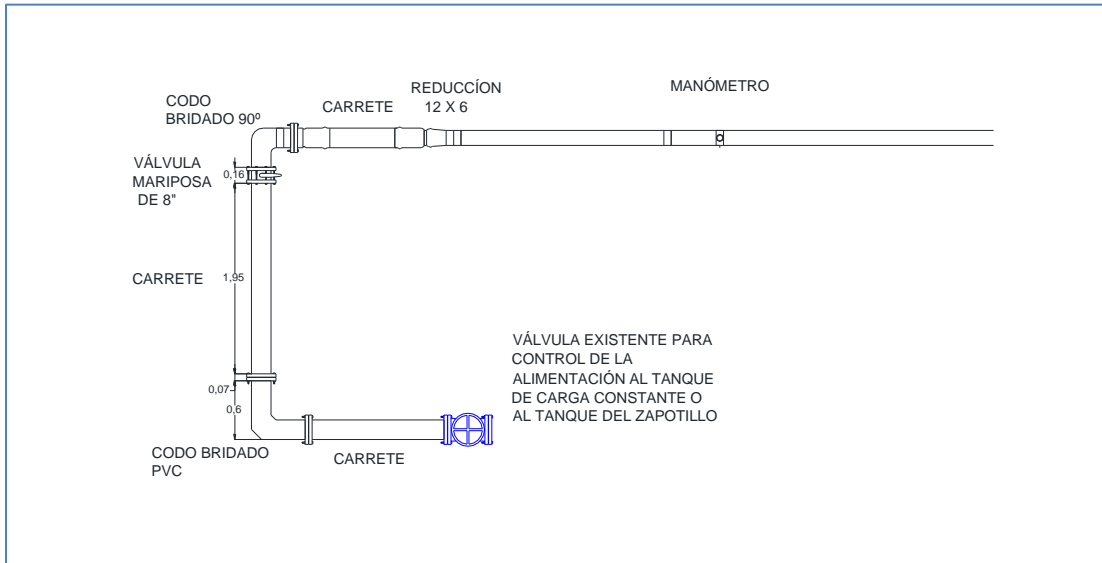


Ilustración 2.5. Detalle de la alimentación hidráulica al módulo de pruebas con flujo a presión.

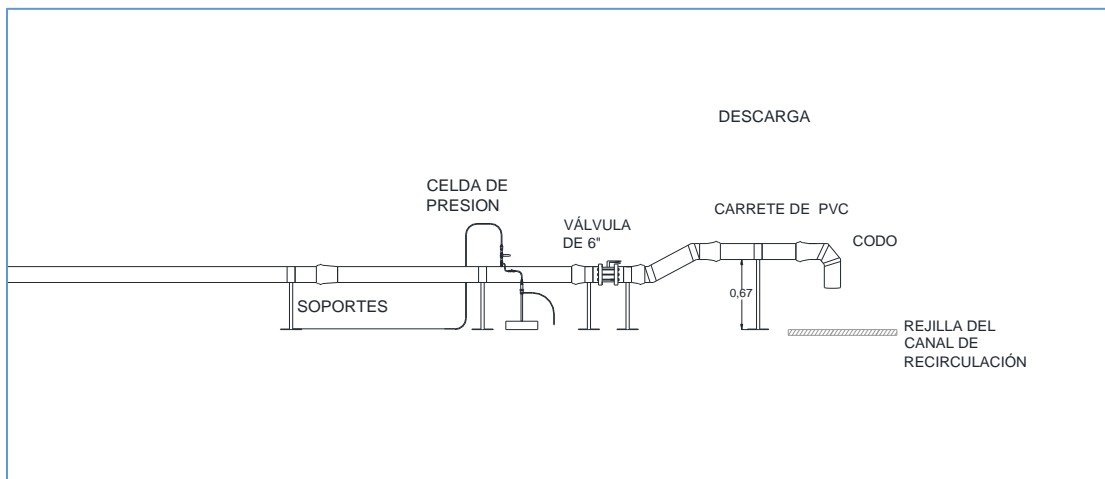


Ilustración 2.6. Detalle de la descarga al canal de recirculación del IMTALAB.

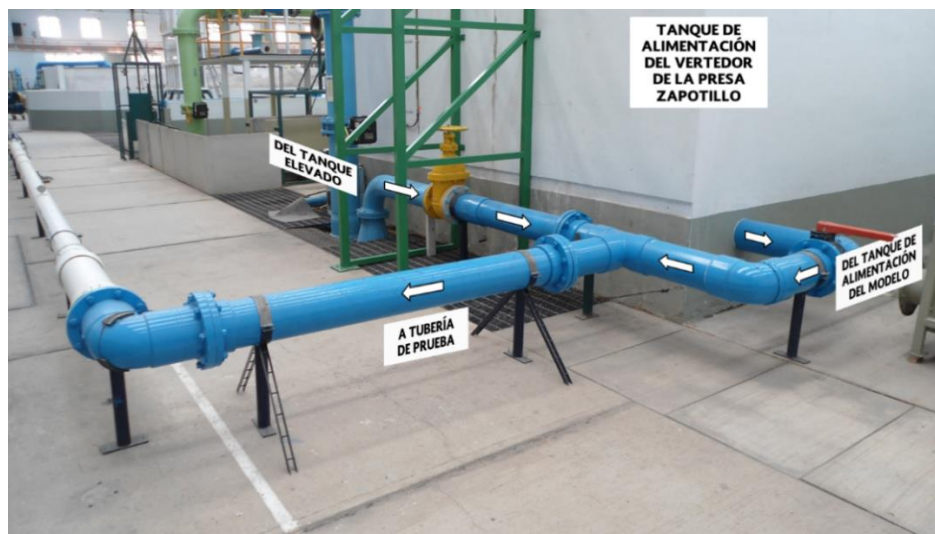


Ilustración 2.7. Alimentación de agua a tuberías con flujo a presión.



Ilustración 2.8. Vista del tanque de alimentación del modelo del vertedor de la presa Zapotillo.

Después del arreglo mencionado en el párrafo anterior y previo a la tubería sometida a prueba, se tiene instalada una reducción campana de 8x6 in y posteriormente un tramo de tubería con el espacio asignado para la instalación del medidor ultrasónico de tiempo en tránsito, utilizado para determinar el caudal de cada prueba, el cual se ubica a diez diámetros aguas abajo y cinco aguas arriba de cualquier conexión, como lo recomienda el fabricante (Ilustración 2.9).



 <p>SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES</p>	<p>ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II</p>	 <p>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</p>
<p>Página 21 de 79</p>	<p>México, 2016</p>	<p>Clave: HC1610.1</p>



Ilustración 2.9. Ubicación de reducción campana y espacio para la instalación de equipo ultrasónico de tiempo en tránsito.

Aguas abajo de los elementos y espacios mencionados, se ubica una brida cementada para recibir la tubería sometida a prueba. La Ilustración 2.10 y la Ilustración 2.11 presentan vistas de las tuberías de PVC y de polietileno probadas.



Ilustración 2.10. Vista de la tubería de PVC probada con flujo a presión.



Ilustración 2.11. Vista de la tubería de polietileno probada con flujo a presión.

Al final del tramo de tubería de prueba, se cuenta con una válvula para regular el caudal de salida y, para garantizar condiciones de tubería llena y ausencia de aire en la misma, se configuró e instaló un “cuello de ganso”, mediante codos a 45° y 90° (Ilustración 2.12).



Ilustración 2.12. Instalación de descarga de la tubería.

2.2.2 Instrumentación del módulo a presión

Los parámetros hidráulicos medidos durante las pruebas son el caudal y la carga de presión en puntos determinados, así como la temperatura del agua utilizada, para determinar la viscosidad cinemática y el peso específico de la misma.

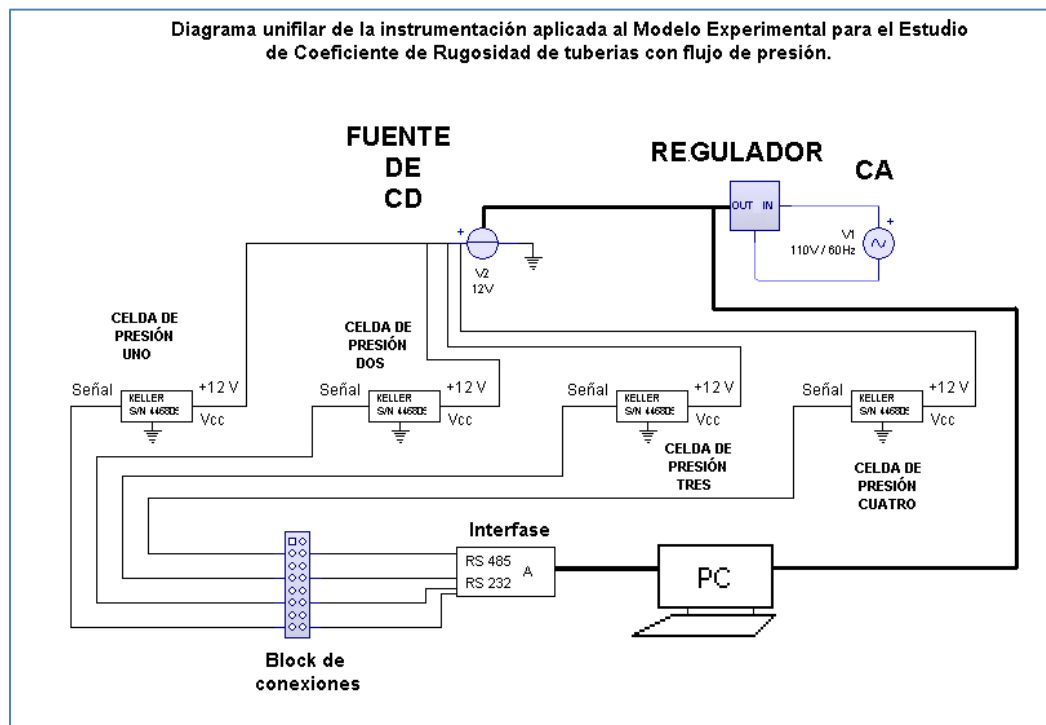





Ilustración 2.13. Instrumentación del módulo de pruebas con flujo a presión, para la adquisición de datos de presión y caudal.

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 23 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

2.2.2.1 Medición de caudales

Para medir caudales se utilizó un medidor ultrasónico de tiempo en tránsito, marca *Thermo Scientific*, modelo DCT7088 (Ilustración 2.14 e Ilustración 2.15). Dicho equipo permite almacenar las mediciones realizadas, generando archivos de texto (*.log) que pueden ser descargados a una computadora, a través de la interfaz de usuario. Las unidades utilizadas fueron m/s para la velocidad y l/s para el caudal.



Ilustración 2.14. Medidor ultrasónico de tiempo en tránsito: vista general del equipo.



Ilustración 2.15. Medidor ultrasónico de tiempo en tránsito: transductores instalados.

2.2.2.2 Medición de presiones

La medición de presiones se realizó mediante tubos piezométricos y transductores o celdas de presión, en metros columna de agua (mca). Los tubos piezométricos instalados son de acrílico transparente de 19 mm de diámetro nominal y cinco metros de altura, colocados a la mitad del largo de la tubería de prueba y a un costado de la misma, y fueron sujetos a un perfil de acero para su estabilidad. La conexión de los tubos se hizo a la parte superior de la tubería de prueba mediante una manguera plástica transparente y flexible de 9.5 mm de diámetro nominal (Ilustración 2.18).



Ilustración 2.16.
Tubos piezométricos:
vista general



Ilustración 2.17. Tubos piezométricos:
detalle,



Ilustración 2.18. Tubos piezométricos:
conexión a tubería.

Como puede observarse en la Ilustración 2.17, para la medición de las cargas de presión se utilizó una cinta metálica flexible y graduada milimétricamente, es decir, con separaciones a cada milímetro. La toma de lectura y registro de la misma se realizó de forma manual (Ilustración 2.19). En la parte baja de cada tubo piezométrico se instaló una derivación con válvula para realizar la purga de aire existente en la tubería de prueba que pase a la manguera que lleva a dicho tubo (Ilustración 2.20).



Ilustración 2.19. Toma de lectura de carga de presión durante una prueba en tubería de PVC.





Ilustración 2.20. Vista de la derivación para purga de aire, ubicada en la parte baja de los tubos piezométricos.

En las pruebas realizadas en tubería de PVC se instalaron dos tubos piezométricos, mientras que en tubería de polietileno se instalaron cuatro, con igual número de celdas de presión, en cada caso.

Las celdas de presión utilizados son del tipo *Preciseline*, de diferentes rangos de medición. En la tubería de PVC se utilizaron con un rango de 0 a 1 bar, mientras que en la tubería de polietileno, además de las antes mencionadas y debido a que las presiones a medir fueron menores, se realizaron pruebas con celdas de 0 a 4, 0 a 6, 0 a 5 y 0 a 8 metros de columna de agua (Ilustración 2.21).



Ilustración 2.21. Vista de una de las celdas de presión utilizadas.

 SEMARNAT SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 26 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

En la tubería de PVC, en los puntos seleccionados para la toma de presión, se colocaron insertos del mismo material (PVC) y se realizaron perforaciones roscadas para la instalación de los conectores correspondientes (Ilustración 2.18). En el caso de la tubería de polietileno, debido a la constitución y forma de su pared, fue necesario retirar la capa exterior (corrugada) y colocar un inserto doble de tubería de PVC para poder roscar los conectores respectivos, ya que la capa interior solo tiene un espesor de poco más de un milímetro.

La Ilustración 2.22 e Ilustración 2.23 presentan vistas de dos tomas de presión terminadas, en donde se puede observar la salida hacia los tubos piezométricos correspondientes y las derivaciones a las celdas de presión.

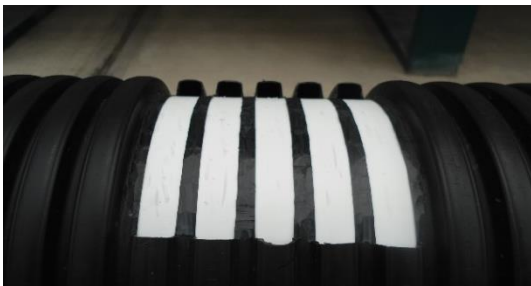


Ilustración 2.22. Trabajos realizados en la tubería de polietileno para instalar la toma de carga de presión: retiro de la capa exterior.



Ilustración 2.23. Trabajos realizados en la tubería de polietileno para instalar la toma de carga de presión: colocación de insertos de PVC.



Ilustración 2.24. Tomas de cargas de presión en tubería de PVC.



Ilustración 2.25. Tomas de cargas de presión en tubería de polietileno.

Para llevar a cabo el procesamiento y almacenamiento de la información transmitida por las celdas de presión, se utilizó el *Software READ30-PROG30*, de distribución gratuita, el cual permite además programar el transductor, ajustarlo a un nuevo punto cero, observar el valor actual de la presión medida y visualizar gráficamente las lecturas realizadas, entre otras funciones. La Ilustración 2.26 muestra una de las pantallas del *Software* en donde se pueden observar el número de identificación de la celda, la presión actual (medida en metros columna de agua), y el botón que permite ajustar a cero la medición de dicha celda.

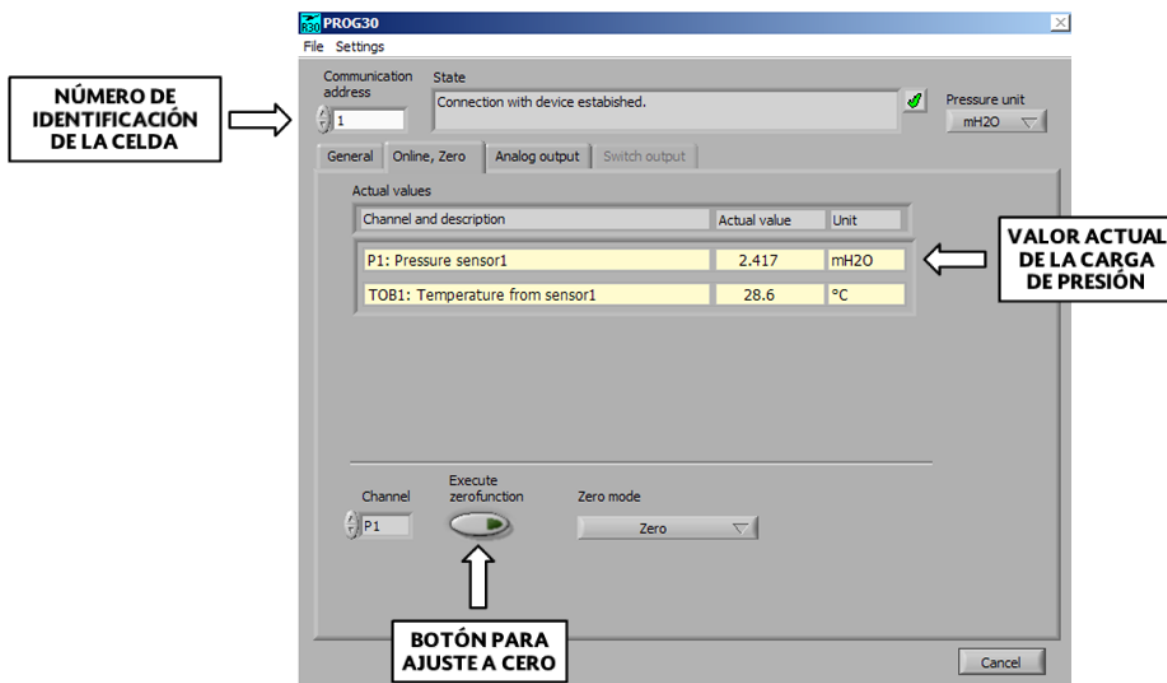


Ilustración 2.26. Una de las pantallas del Software READ30-PROG30.

La Ilustración 2.27 presenta la pantalla con el gráfico resultante de una medición, en este caso, se graficaron los valores de carga de presión reportados por cuatro celdas durante el periodo de medición a cierto caudal. En el eje de las abscisas se reporta el tiempo transcurrido en segundos y en el de las ordenadas la carga de presión en metros columna de agua. Una vez concluida cada medición, se generaron los archivos de texto correspondientes (*.log) con dichos valores.

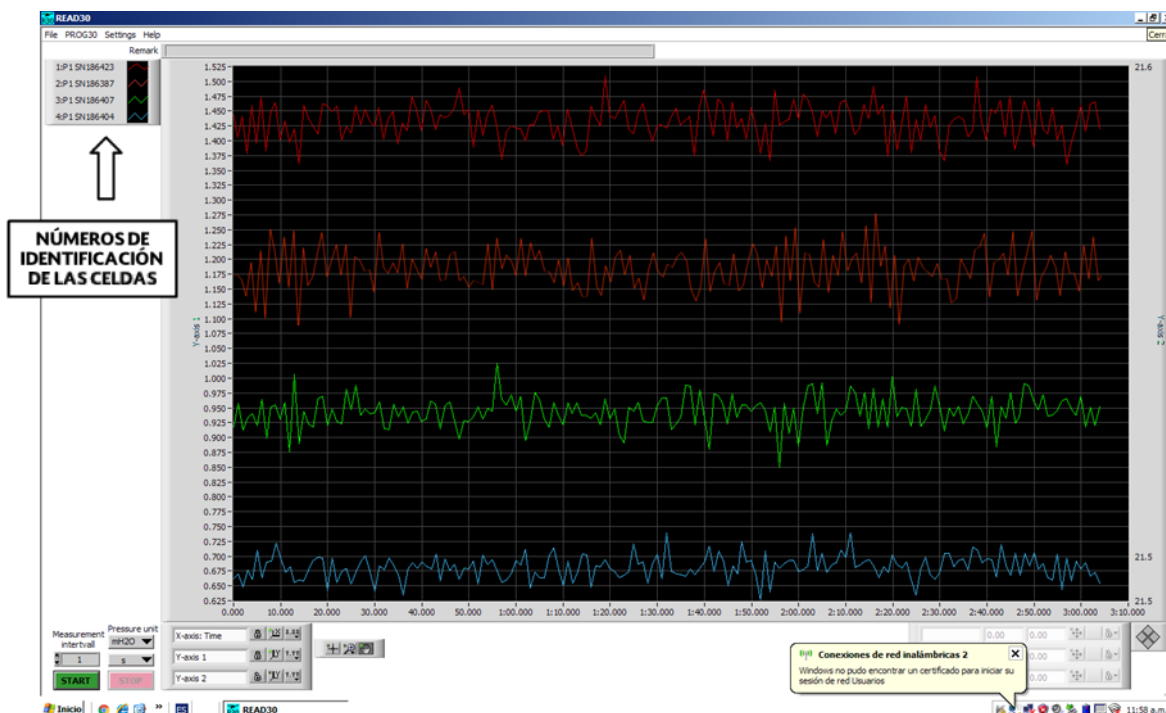


Ilustración 2.27. Pantalla del Software READ30-PROG30 que muestra el gráfico generado con los valores reportados por las celdas de presión.

2.2.2.3 Medición de la temperatura del agua

La temperatura del agua, a la cual se llevaron a cabo las pruebas, fue medida con un termómetro de bulbo (Lo-Tox), de 305mm de longitud, rango de medición -10 a 50 °C y divisiones cada 0.5 °C (Ilustración 2.28 e Ilustración 2.29).

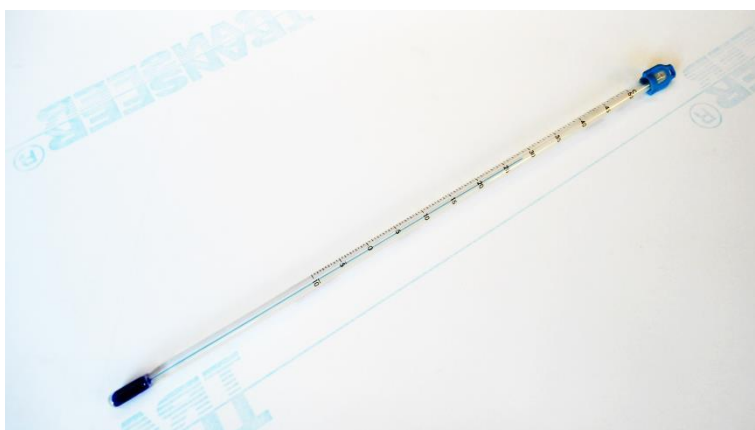


Ilustración 2.28. Termómetro de bulbo utilizado para medición de temperatura del agua: vista general.

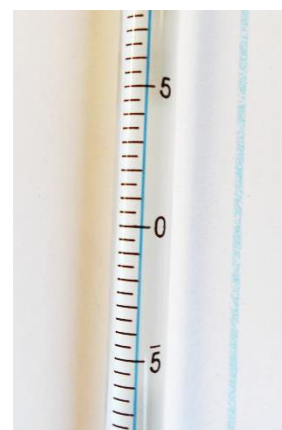




Ilustración 2.29. Termómetro de bulbo: vista de detalle de las divisiones.

 <p>SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES</p>	<p>ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II</p>	 <p>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</p>
<p>Página 29 de 79</p>	<p>México, 2016</p>	<p>Clave: HC1610.1</p>

2.3 Implementación del módulo de pruebas de tuberías con flujo a superficie libre

El canal de pendiente nula, del mismo Laboratorio “Enzo Levi”, por su longitud y ancho (49.63x0.60 m), fue utilizado para el montaje de tubería de Polietileno de Alta Densidad Corrugado (tubo de doble pared DW con junta espiga-campana con empaque elastomérico), de 12 pulgadas de diámetro nominal, la cual fue probada en condiciones de flujo a superficie libre. La instalación se realizó aprovechando la plantilla del canal y realizando la estructura necesaria para hacer la transición del agua del canal hacia la tubería.

2.3.1 Descripción del módulo de pruebas a gravedad

Por ser un modelo permanente en el laboratorio, el canal de pendiente nula cuenta con su tanque de alimentación, el cual es abastecido de agua por el tanque elevado de carga constante que suministra agua a toda la red hidráulica del laboratorio, proporcionando hasta 300 l/s (Ilustración 2.30 e Ilustración 2.31).

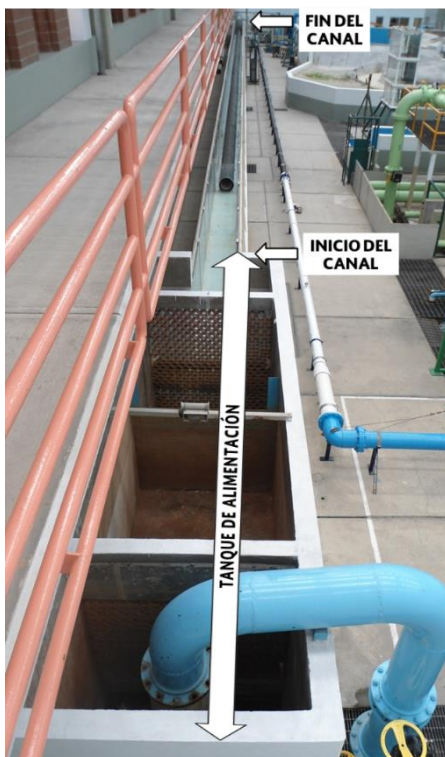


Ilustración 2.30. Canal de pendiente nula: vista general.

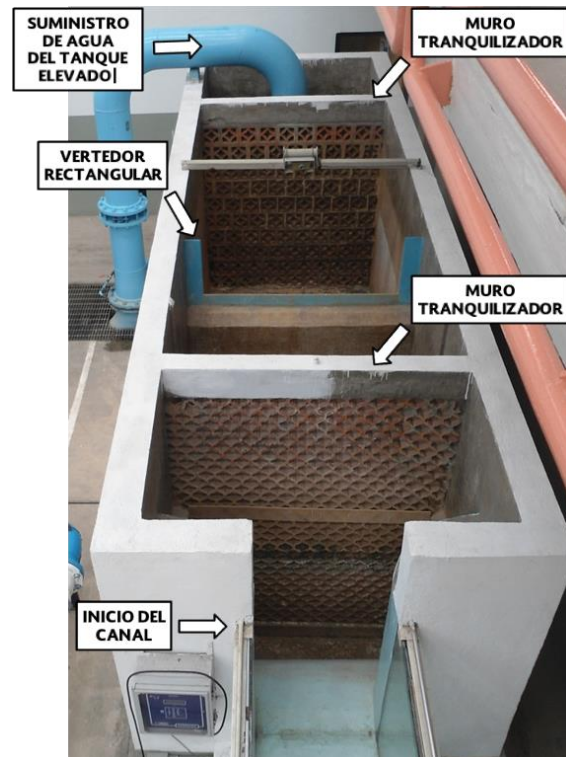




Ilustración 2.31. Canal de pendiente nula: tanque de alimentación.

 <p>SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES</p>	<p>ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II</p>	 <p>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</p>
<p>Página 30 de 79</p>	<p>México, 2016</p>	<p>Clave: HC1610.1</p>

Previo a la transición del flujo de agua del canal a la tubería, se dejó libre un tramo de canal de 7.05 m de longitud (Ilustración 2.32 e Ilustración 2.33). Para realizar la transición se utilizó una placa de acrílico de 12 mm de espesor, 60 cm de ancho y 70 cm de altura. A dicha placa se le trazó y cortó el diámetro exterior del extremo del tubo de polietileno (por el lado de la campana) para incrustar el tubo en ella y se apoyó sobre la plantilla del canal y sobre dos perfiles de aluminio adheridos a su vez a las paredes del canal, para darle el soporte adecuado. Posteriormente, fueron selladas todas las uniones existentes entre la placa, la plantilla del canal, las paredes del mismo y el tubo de polietileno (Ilustración 2.34 e Ilustración 2.35).

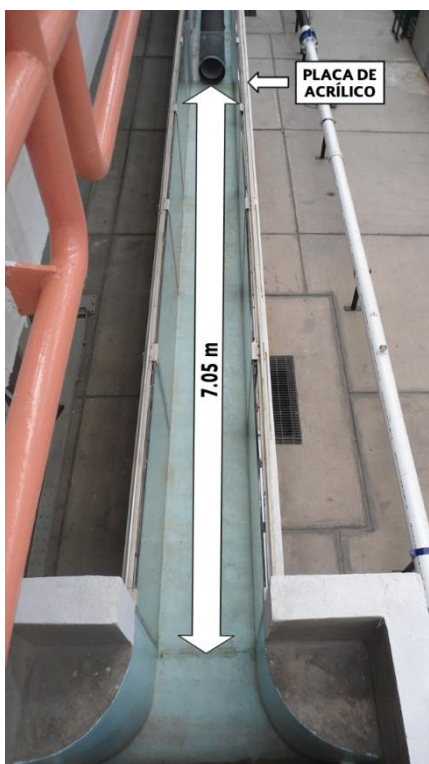


Ilustración 2.32. Ubicación de la estructura de transición de flujo en el canal: vista superior.



Ilustración 2.33. Ubicación de la estructura de transición de flujo en el canal: vista desde el inicio del canal.

Desde la estructura de transición hasta la descarga, la tubería de polietileno tiene una longitud de 43.097 m, integrada por siete tramos completos de tubería de 6.306 m de longitud en promedio, cada uno (Ilustración 2.36 e Ilustración 2.37). Al final del canal, se dejó un tramo de tubería excedente, para garantizar la descarga libre de agua (Ilustración 2.38 e Ilustración 2.39).



Ilustración 2.34. Estructura de transición: vista general donde se aprecia el sellado.



Ilustración 2.35. Estructura de transición: vista superior.



Ilustración 2.36. Tramo de tubería de polietileno (12 pulgadas) instalada: vista desde la estructura de transición.





Ilustración 2.37. Tramo de tubería de polietileno (12 pulgadas) instalada: vista desde la descarga.



Ilustración 2.38. Descarga del tramo de tubería de polietileno (12 pulgadas): vista general.



Ilustración 2.39. Descarga del tramo de tubería de polietileno (12 pulgadas): vista superior.

 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 32 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

2.3.2 Instrumentación del módulo a gravedad

De manera similar al módulo con flujo presión, los parámetros hidráulicos medidos durante las pruebas con flujo a superficie libre son el caudal y las presiones generadas por el tirante de flujo; así como la temperatura del agua utilizada, para determinar la viscosidad cinemática y su peso específico.

2.3.2.1 Medición de caudales

Para medir caudales se utilizó el vertedor rectangular con contracciones laterales existente en el tanque de alimentación del canal de pendiente nula (Ilustración 2.31), aplicando las especificaciones y metodología descritas en en el Estandar Internacional (ISO 1438/1, 1980); por lo que se obtuvieron los parámetros a utilizar, mostrados en la Ilustración 2.40, donde:

b : ancho de la cresta del vertedor (1.30 m);

h : carga sobre el vertedor a medir durante las pruebas (m);

p : altura a la cual se ubica la cresta del vertedor, medida desde el piso del canal de aproximación (1.20 m);

B : ancho del canal de aproximación (1.52 m).

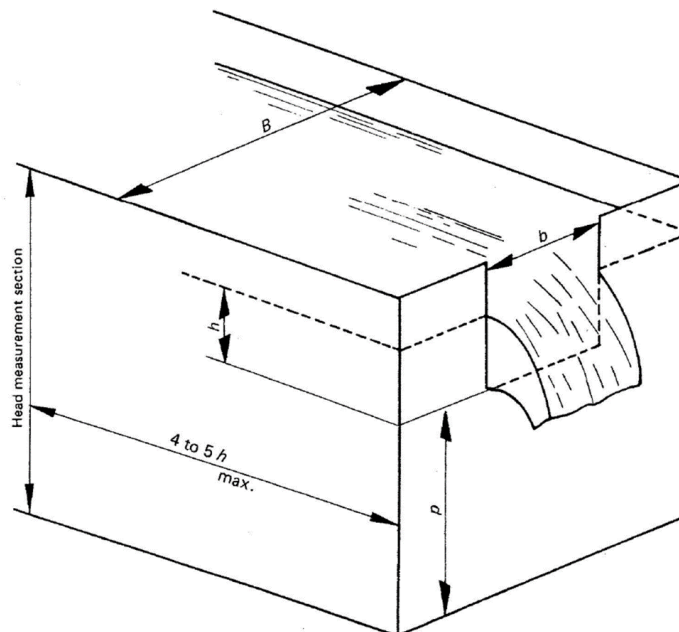


Ilustración 2.40. Parámetros a utilizar en la medición de caudal en un vertedor rectangular con contracciones laterales. Fuente: International Standard 1438/1-1980.

La ecuación utilizada para el cálculo del caudal es la de Kindsvater-Carter (Ecuación 2.1).

Ecuación 2.1

$$Q = C_e \frac{2}{3} \sqrt{2g} b_e h_e^{\frac{3}{2}}$$

donde:

- Q : caudal (m³/s);
- C_e : coeficiente de descarga (adimensional);
- g : aceleración de la gravedad (9.80665 m/s²);
- b_e : ancho efectivo de la cresta del vertedor (m);
- h_e : carga efectiva sobre el vertedor (m).

El coeficiente de descarga (C_e) se calcula con la expresión siguiente:

Ecuación 2.2

$$C_e = a + a' \frac{h}{p}$$

donde los términos adimensionales a y a' se obtuvieron por medio de interpolación con base en valores específicos de b/B (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Valores de a y a' para determinados valores b/B . Fuente: *International Standard 1438/1-1980*.

$\frac{b}{B}$	a	a'
1.0	0.602	0.0750
0.9	0.598	0.0640
0.8	0.596	0.0450
0.7	0.594	0.0300
0.6	0.593	0.0180
0.5	0.592	0.0100
0.4	0.591	0.0058
0.2	0.589	0.0018
0.0	0.587	0.0023

Para un valor de $b/B = 0.855$, resultaron valores de $a = 0.5971$ y $a' = 0.0555$, por lo que al sustituir los mismos en la Ecuación 2.2, C_e se calcula de la siguiente forma:

Ecuación 2.3

$$C_e = 0.5971 + .04625h$$

Para obtener el ancho efectivo de la cresta del vertedor (b_e), se utiliza la expresión siguiente:

Ecuación 2.4

$$b_e = b + k_b$$

donde el valor de k_b se obtiene del gráfico presentado en la Ilustración 2.41, tomando un valor de 4.0 mm (0.004 m), para una relación de $b/B = 0.855$.

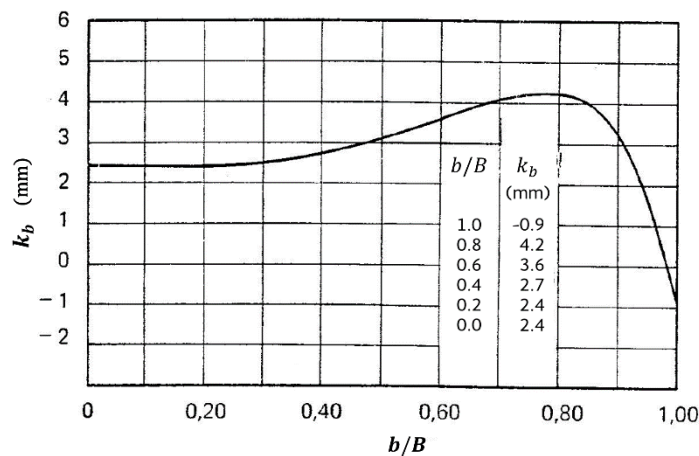


Ilustración 2.41. Valores de k_b para para determinados valores b/B . Fuente: International Standard 1438/1-1980 (con adaptaciones).

Por lo tanto, el valor de b_e es:




$$b_e = 1.30 + 0.004 = 1.304 \text{ m}$$

Para calcular la carga efectiva sobre el vertedor (h_e), se utiliza la ecuación siguiente:

Ecuación 2.5

$$h_e = h + k_h$$

donde k_h (medido en metros), al igual que k_b , determinado anteriormente, compensan los efectos combinados de viscosidad y tensión superficial del agua.

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 35 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

Experimentalmente se ha demostrado que k_h tiene un valor constante de 0.001 m, para vertedores construidos de acuerdo a las especificaciones mencionadas en el *Standard*, de tal forma que el valor tomado por h_e es:

Ecuación 2.6

$$h_e = h + 0.001 \text{ m}$$

Finalmente, sustituyendo en la Ecuación 2.1, para el cálculo del caudal durante las pruebas realizadas, la expresión resultante es:

Ecuación 2.7

$$Q = \frac{2.608\sqrt{19.6133}}{3} (0.5971 + 0.04625h)(h + 0.001)^{\frac{3}{2}}$$

Las limitantes mencionadas en el *Estandar* para utilizar la ecuación de Kindsvater-Carter, son las siguientes:

- a) El cociente de h/p no debe exceder de 2.5, lo cual en este caso se cumple, ya que la carga máxima que puede pasar por el vertedor es 0.40 m y el valor de p es 1.20 m, así que el cociente máximo resultante es 0.33.
- b) El valor de h (carga sobre el vertedor) no debe ser menor a 0.03 m.
- c) El valor de b no debe ser menor a 0.15 m, lo cual se cumple, ya que su valor es 1.30 m.
- d) El valor de p no debe ser menor a 0.10 m, lo cual se cumple ya que su valor es 1.20 m.
- e) El resultado de $(B - b)/2$ no debe ser menor a 0.10 m, lo cual se cumple ya que el valor resultante es 0.11 m.

2.3.2.2 Medición de los tirantes de flujo

La medición de los tirantes se realizó también por medio de tubos piezométricos y celdas de presión, colocados en el extremo final del canal, y conectados a lo largo de la tubería de prueba mediante manguera flexible transparente, en puntos distribuidos de manera uniforme. Se instalaron siete tubos de acrílico transparente de 19 mm de diámetro nominal y 1.5 m de altura, e igual número de celdas de presión (Ilustración 2.42 a Ilustración 2.45).



Ilustración 2.42. Tablero de tubos piezométricos instalados para pruebas en tuberías con flujo a superficie libre: vista general.

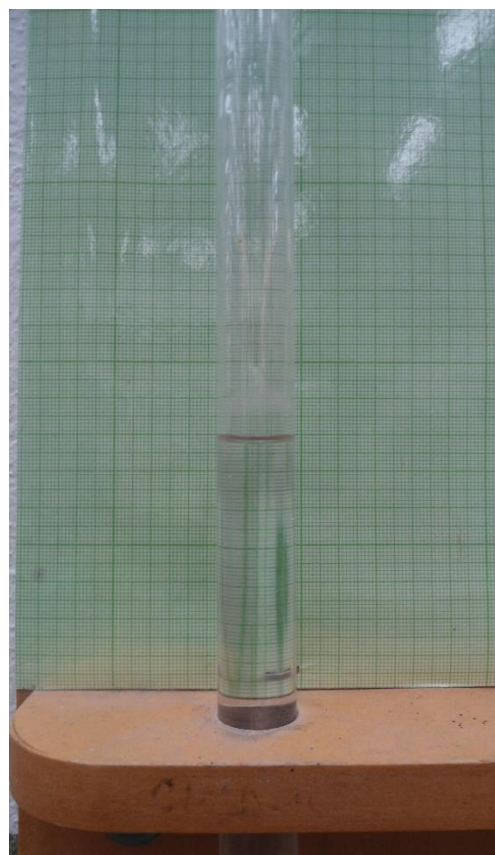


Ilustración 2.43. Tablero de tubos piezométricos instalados para pruebas en tuberías con flujo a superficie libre: detalle.

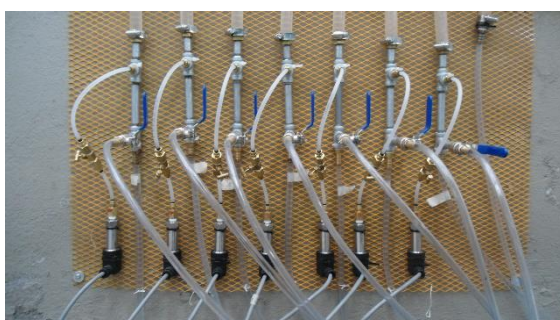





Ilustración 2.44. Celdas de presión instaladas para pruebas en tuberías con flujo a superficie libre: vista general.



Ilustración 2.45. Celdas de presión instaladas para pruebas en tuberías con flujo a superficie libre: vista de detalle de conexiones y derivaciones.

La conexión hacia los tubos piezométricos y celdas de presión se realizó en la parte inferior de la tubería de prueba mediante una manguera plástica transparente y flexible de 9.5 mm de diámetro nominal. Para realizar las tomas, en los puntos donde se midieron las cargas de presión en la tubería, se realizaron

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 37 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

perforaciones en hendiduras o valles de la pared del tubo, insertando en cada una un niple roscado (6.35 mm x 10 cm) y sellando la unión con silicón acético. Cada niple se unió a un codo de 90°, para finalmente colocar una reducción campana y un conector espiga, al cual se conectó la manguera flexible correspondiente. Con este arreglo, las mangueras se dispusieron de manera horizontal y paralelas al tubo, desde cada toma y en dirección aguas abajo, evitando flexiones que pudieran afectar la medición (Ilustración 2.46 e Ilustración 2.47).



Ilustración 2.46. Conexión de la tubería de prueba a la manguera flexible que transmite la presión a los tubos piezométricos y celdas de presión: detalle de la conexión.

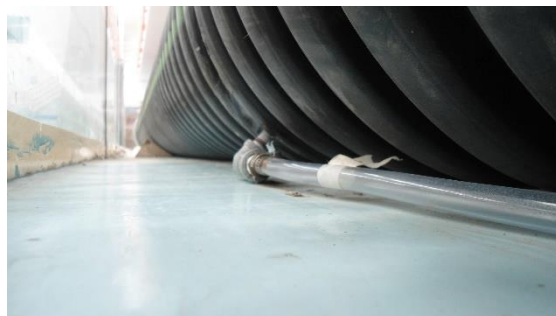





Ilustración 2.47. Conexión de la tubería de prueba a la manguera flexible que transmite la presión a los tubos piezométricos y celdas de presión: vista de colocación de la manguera desde la toma.

Como puede observarse en la Ilustración 2.43, para la medición de las cargas de presión en los tubos piezométricos se utilizó papel milimetrado; la lectura y registro de la misma se realizó de forma manual.

Las celdas de presión utilizadas son del mismo tipo que las empleadas en las pruebas de tuberías con flujo a presión, *Preciseline*; se utilizaron seis unidades con un rango de 0 a 2 psig y una de 0 a 2 metros de columna de agua. El procesamiento y almacenamiento de la información transmitida por las celdas se realizó también mediante el *Software READ30-PROG30*, como en las pruebas con flujo a presión (Ilustración 2.27).

2.3.2.3 Medición de la temperatura del agua

La temperatura del agua, a la cual se llevaron a cabo las pruebas, fue medida de la misma manera que en las pruebas en tuberías con flujo a presión (2.2.2.3 Medición de la temperatura del agua).

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 38 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

3 RESULTADOS

3.1 Flujo a presión

3.1.1 Flujo a presión en tubo de PVC

3.1.1.1 Ecuaciones básicas de la hidráulica de tuberías a presión

De la fórmula de Darcy-Weisbach

Ecuación 3.1

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

se puede expresar el factor de fricción f como:

Ecuación 3.2

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

donde h_f es la pérdida de carga por fricción, L es la longitud, D es el diámetro interior de la tubería, V es la velocidad media del flujo, y g es la aceleración de la gravedad.

La fórmula de Manning es:

Ecuación 3.3




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

Donde el coeficiente n se puede expresar como:

Ecuación 3.4

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

R_h es el radio hidráulico, y la pendiente de fricción S_f se da de:

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 39 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

Ecuación 3.5

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

La Ecuación 3.2 y la Ecuación 3.4 se utilizan para calcular n y f de datos de mediciones de h_f y V, para D y L dados.

Para el cálculo del factor de fricción f se tiene la siguiente ecuación, conocida como ecuación de Swamee-Jain (Swamee, P.K.; Jain, A.K., 1976):

Ecuación 3.6




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

Nuevas ecuaciones para n y f en tubos hidráulicamente lisos

Es conocido en la hidráulica que en contacto con las paredes de la tubería siempre persiste una capa muy delgada en la que el flujo es laminar, denominada capa límite, subcapa laminar o capa viscosa, de forma tal que es nula la velocidad del fluido en contacto con las paredes. El flujo turbulento en el tubo se puede dividir en tres zonas. Lejos de la pared el flujo es turbulento y prácticamente sin rozamientos. En las proximidades de la pared se desarrolla una zona (capa límite) sometida a esfuerzos cortantes, donde los fenómenos viscosos son importantes, ya que la velocidad sobre la pared ha de ser forzosamente nula. A pequeñísimas distancias de la pared persiste la subcapa laminar, que es una característica constante del movimiento desarrollado. Se pueden presentar entonces los siguientes 3 regímenes del flujo:

A) Flujo hidráulicamente liso (tubería hidráulicamente lisa): La rugosidad ε queda cubierta por la subcapa laminar. La rugosidad, por tanto, no influye en el valor de f puesto que ningún punto de la pared queda afectado por las turbulencias que producirían las rugosidades internas, comportándose la tubería como un material liso.

B) Flujo hidráulicamente semirrugoso o zona de transición: El espesor de la subcapa laminar se aproxima al valor medio de rugosidad absoluta, de manera que la rugosidad emerge de la subcapa laminar en unos puntos y en otros no, quedando sólo las rugosidades que emergen afectadas por la turbulencia. El

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 40 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

coeficiente de fricción depende tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa.

C) Flujo hidráulicamente rugoso (tubería hidráulicamente rugosa): Si el espesor de la subcapa laminar es menor que la rugosidad absoluta, las irregularidades internas de la conducción rebasan la subcapa laminar, produciendo turbulencia completa. Cuanto mayor sea el número de Reynolds, más delgada será la subcapa laminar y más puntos de la pared sobresaldrán de ella. En este caso, las fuerzas de inercia son muy importantes y apenas influyen las fuerzas viscosas, por lo que el factor de fricción sólo depende de la rugosidad relativa y el número de Reynolds no tiene importancia en su determinación.

Para definir el régimen de flujo se utilizan las siguientes condiciones, referidas a rugosidades absolutas irregulares, que es el caso de las tuberías comerciales:

Ecuación 3.7

$$\varepsilon \leq \frac{19.25 D}{Re^{0.9}} - \text{Tubo (flujo) hidráulicamente liso}$$

Ecuación 3.8

$$\varepsilon \geq 560 \frac{\nu}{V} - \text{Tubo (flujo) hidráulicamente rugoso}$$




donde ν es la viscosidad cinemática del agua.

La ecuación de Swamee-Jain contiene dos términos que reflejan la influencia de estos dos tipos de flujo: el término $\left(\frac{\varepsilon}{3.7D}\right)$ considera la influencia de la rugosidad relativa del tubo y el término $\left(\frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)$ que considera la influencia del número de Reynolds. En particular, si predomina el término $\left(\frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)$, el flujo es hidráulicamente liso.

La Tabla 3.1 muestra la magnitud $\frac{19.25 D}{Re^{0.9}}$ calculada para el diámetro de 155.3 mm, sobre el cual se hicieron mediciones, y un amplio rango del número de Reynolds. La rugosidad de tubos de PVC comerciales nuevos es del orden 0.002 mm, muy inferior a la capa límite para cualquier valor del número de Reynolds en la Tabla 3.1. Esto indica que se trata de tubo hidráulicamente liso.

Tabla 3.1. Espesor de capa límite laminar para un tubo de 155.3 mm.

Re	Capa límite tubo de 155.3 mm
	(mm)
10,000	0.9453708
25,000	0.4240379
50,000	0.2312083
100,000	0.1260672
150,000	0.0884143
200,000	0.0687386
250,000	0.0565464
300,000	0.0482082
350,000	0.0421253
400,000	0.0374800
450,000	0.0338097
500,000	0.0308321
550,000	0.0283651
600,000	0.0262857
650,000	0.0245077
700,000	0.0229690
750,000	0.0216234
800,000	0.0204361
850,000	0.0193803
900,000	0.0184349
950,000	

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 42 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

Re	Capa límite tubo de 155.3 mm
	0.0175830
1,000,000	0.0168113

Para tubos hidráulicamente lisos no es necesario incluir el término $\frac{\epsilon}{3.7D}$ en la Ecuación 3.6 con lo que esta ecuación se simplifica en:

Ecuación 3.9

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10}\left(\frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2} = \frac{0.25}{\left[\log_{10}\left(\frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2}$$

Ecuación 3.10

$$= \frac{0.25}{\left[0.7589 - 0.9 \log_{10} Re\right]^2}$$

Combinando la Ecuación 3.1, la Ecuación 3.4 y la Ecuación 3.5 se obtiene la siguiente relación entre la n de Manning y el factor de fricción f :

Ecuación 3.11

$$n = 0.281 f^{0.5} D^{0.167} g^{-0.5}$$



La Ecuación 3.10 se sustituye en la Ecuación 3.11:

Ecuación 3.12

$$n = \frac{0.1405 D^{0.167} g^{-0.5}}{\left|\log_{10} 5.74 - 0.9 \log_{10} Re\right|}$$

Para $g=9.80665 \text{ m/s}^2$:

Ecuación 3.13

 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 43 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

$$n = \frac{0.044866 D^{0.167}}{|0.7589 - 0.9 \log_{10} Re|}$$

La Ecuación 3.10 y la Ecuación 3.13 proporcionan el factor de fricción f de Darcy-Weisbach y la n de Manning para tubos hidráulicamente lisos. La Ilustración 3.1 compara el factor de fricción f calculado por la ecuación propuesta con la ecuación de Swamee-Jain para rugosidad absoluta de 0.002 mm, y la Ilustración 3.2 muestra lo mismo para la n de Manning. Para el rango de mayor importancia de los números de Reynolds (correspondiente a velocidades de entre 0.50 y 3.00 m/s aproximadamente), la coincidencia se puede calificar de muy buena a excelente. Las mediciones realizadas en el laboratorio Enzo Levi del IMTA, que se describen a continuación en este informe, también confirmaron su validez.

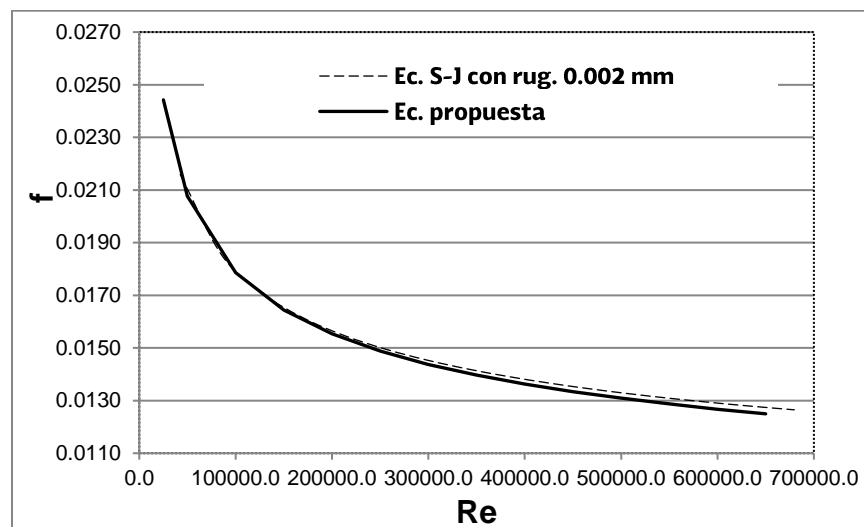


Ilustración 3.1. Comparación entre el factor de fricción f calculado por la ecuación propuesta y la ecuación de Swamee-Jain para un tubo hidráulicamente liso de 6" (rugosidad absoluta de 0.002 mm).

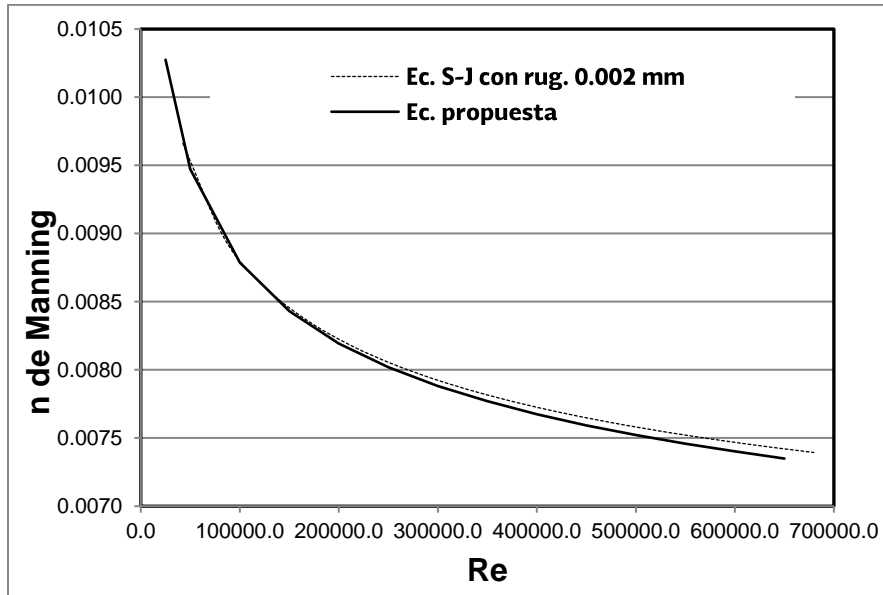


Ilustración 3.2. Comparación entre la n de Manning calculada por la ecuación propuesta y la ecuación de Swamee-Jain para un tubo hidráulicamente liso de 6" (rugosidad absoluta de 0.002 mm).

Cabe señalar que en la Ecuación 3.10 f depende solamente del número de Reynolds. La n calculada por la Ecuación 3.13, sin embargo depende también del diámetro de la tubería. La Ilustración 3.3 muestra la n calculada por la Ecuación 3.13 para un tubo hidráulicamente liso de 60" (1.524 m). Los de n valores son obviamente mucho más altos, comparado con el tubo de 6".

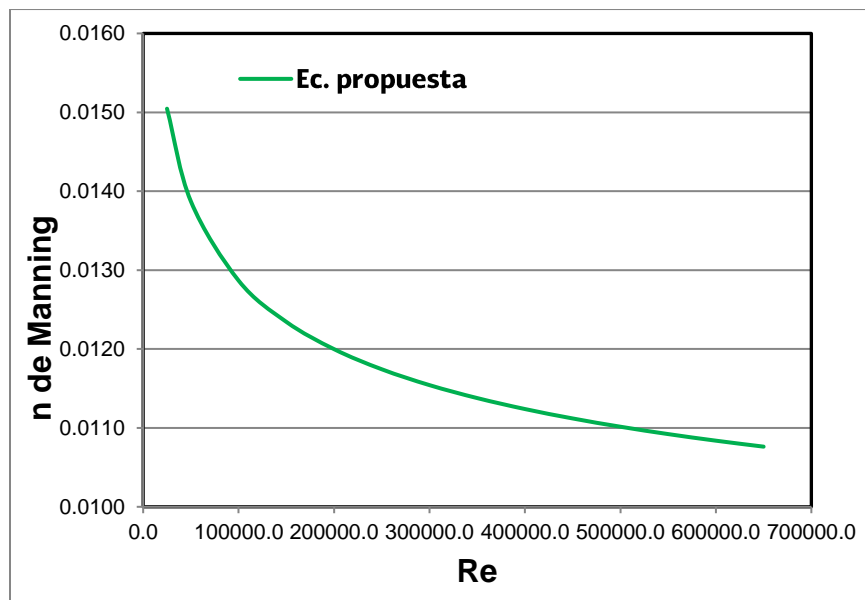





Ilustración 3.3. n de Manning calculada por la ecuación propuesta para un tubo hidráulicamente liso de 60" (1.524 m).

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 45 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

3.1.1.2 Mediciones realizadas y procesamiento

Se utilizó el siguiente procedimiento:

1. Se midió el diámetro real interno del tubo.
2. Se tomó la temperatura del agua.
3. Se hizo pasar cierto gasto por el tubo, que se midió con el medidor ultrasónico.
4. Se tomaron lecturas de la presión, en dos de los cuatro puntos fijos de la tubería, con piezómetros y con celdas de presión.
5. Se calculó la pérdida de carga, como la diferencia entre las presiones en los dos puntos en metros, teniendo en cuenta que la colocación de la tubería es completamente horizontal.
6. Se determinó la viscosidad cinemática del agua con la temperatura medida, y se calculó el número de Reynolds.
7. Se calculó el factor de fricción f por la Ecuación 3.2.
8. Se calculó la n de Manning por la Ecuación 3.4.

Los puntos 2 a 8 de este procedimiento se repitieron para diferentes gastos. Se emplearon cuatro puntos para tomar las lecturas de presión, numerados como 1, 2, 3 y 4. En los puntos 2 y 3 siempre fueron colocadas las dos celdas de presión de que se disponía. En la mayoría de las mediciones los piezómetros fueron colocados en los puntos 1 y 4, pero también se hicieron mediciones con piezómetros colocados en los puntos 2 y 3.

Se realizaron de esta manera un total de 172 determinaciones de f y n sobre un tubo de PVC de 6" de diámetro nominal (155.3 mm de diámetro interior real). La Ilustración 3.4 muestra los valores de f de todas las 172 mediciones, con piezómetros y con celdas de presión, para los números de Reynolds correspondientes, comparados con lo que da la ecuación de Swamee-Jain para rugosidad de 0.002 mm. La Ilustración 3.5 y la Ilustración 3.6 muestran la misma información, separada por piezómetros y celdas de presión respectivamente. De la Ilustración 3.7 a la Ilustración 3.9 se muestra lo mismo para la n de Manning.

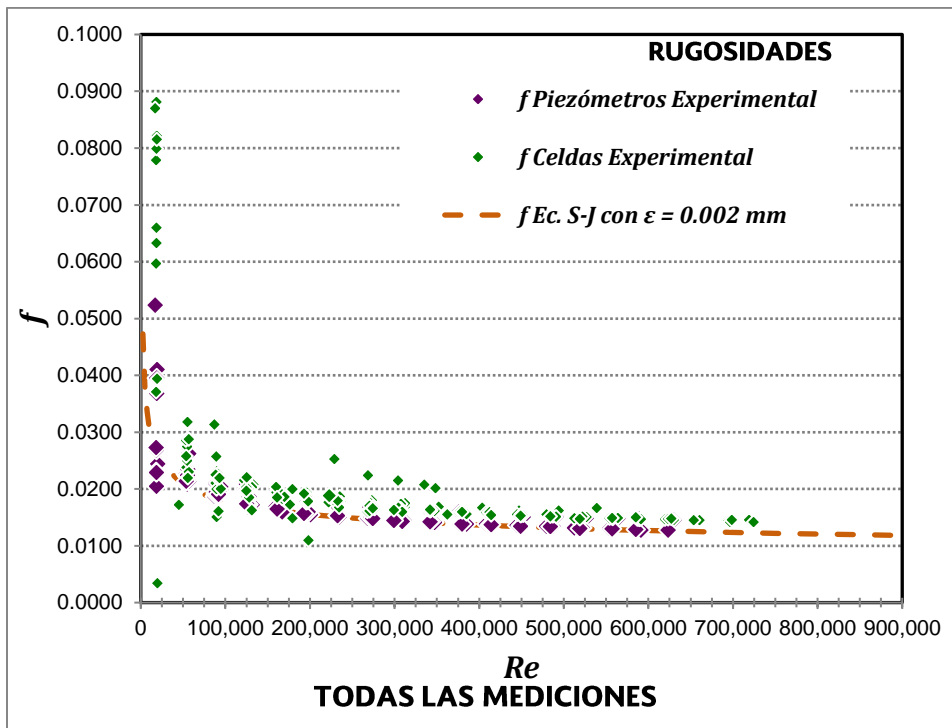


Ilustración 3.4. Valores de f de todas las 172 mediciones sobre un tubo de PVC de 6" de diámetro nominal, obtenidos con piezómetros y con celdas de presión.

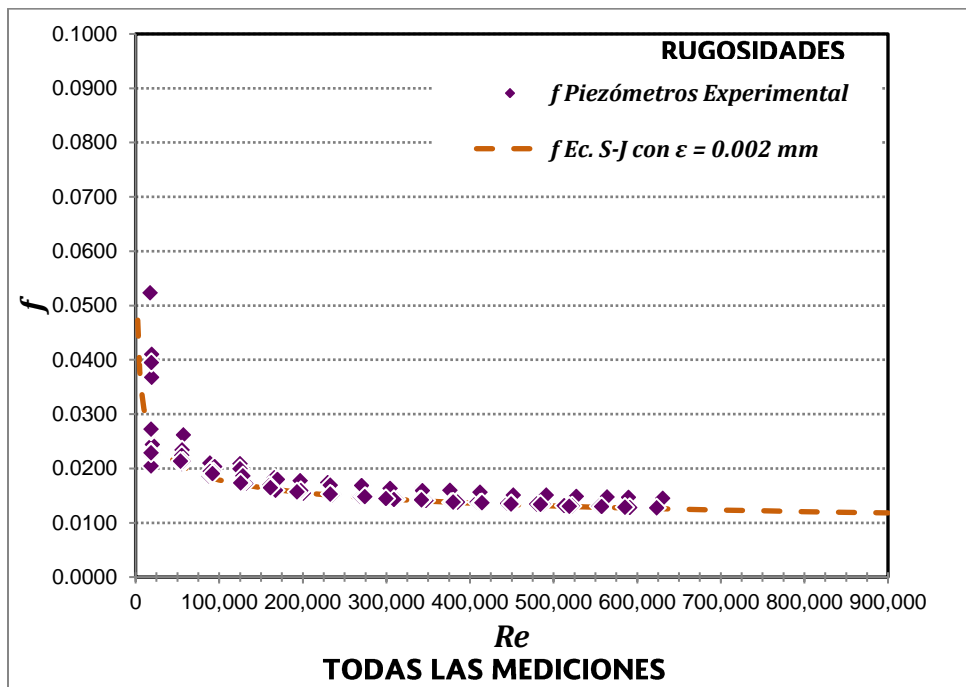


Ilustración 3.5. Valores de f de todas las mediciones sobre un tubo de PVC de 6" de diámetro nominal, obtenidos con piezómetros.

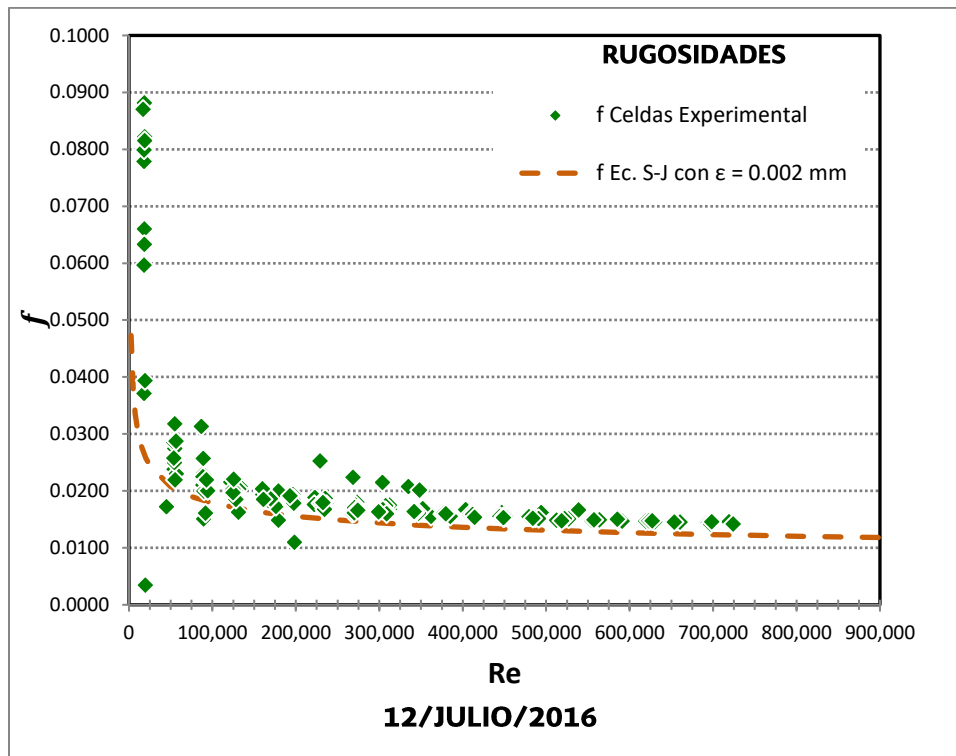


Ilustración 3.6. Valores de f de todas las mediciones sobre un tubo de PVC de 6" de diámetro nominal, obtenidas con celdas de presión.

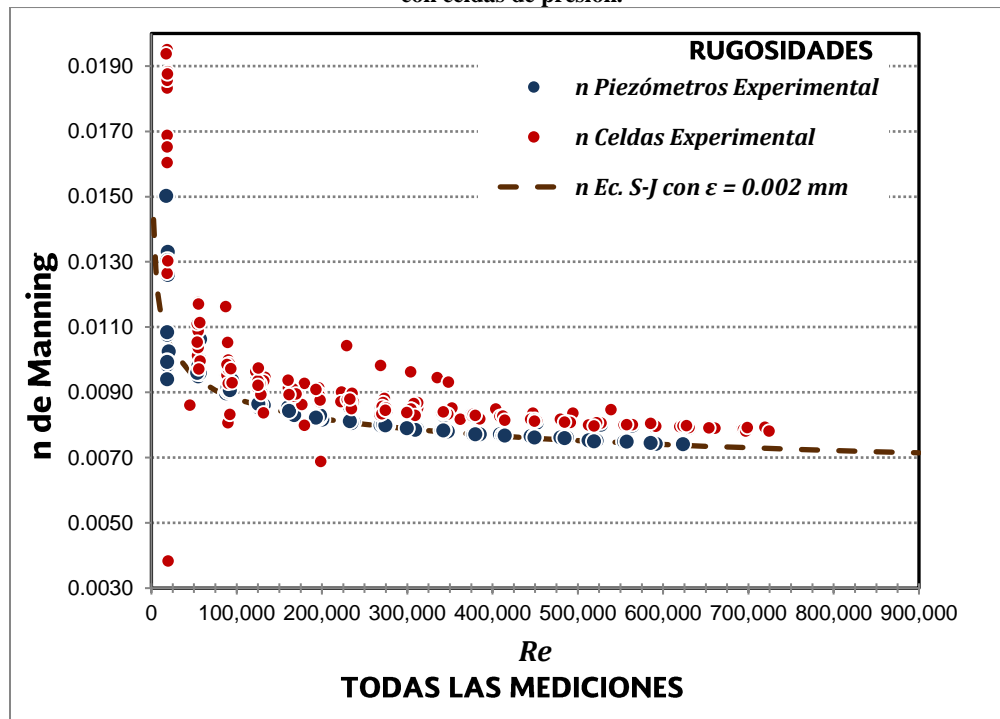


Ilustración 3.7. Valores de n de todas las 172 mediciones sobre un tubo de PVC de 6" de diámetro nominal, obtenidos con piezómetros y con celdas de presión.

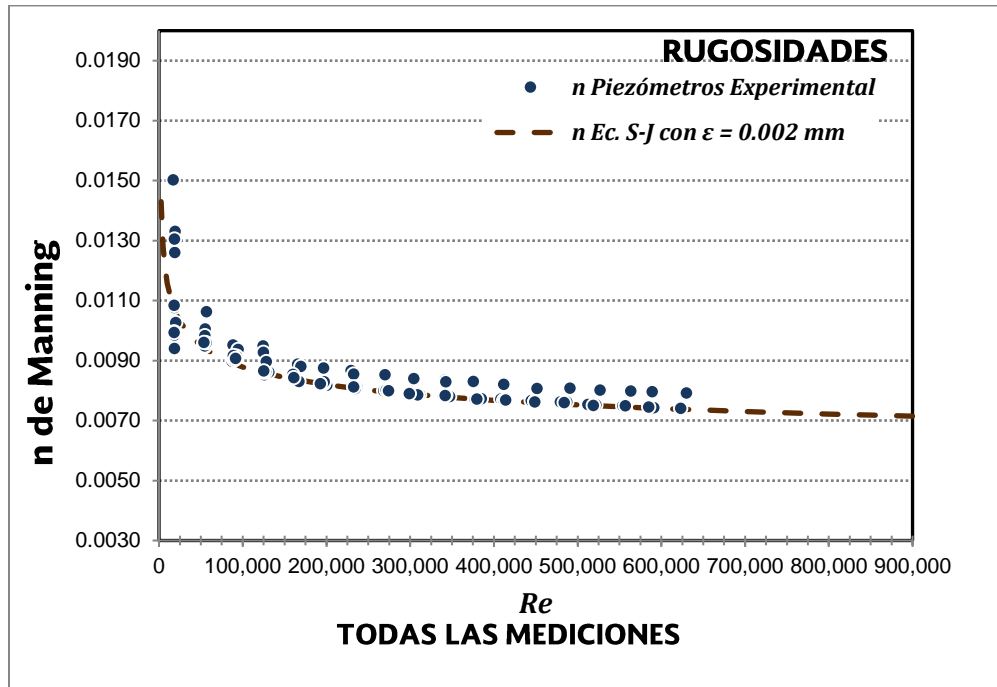


Ilustración 3.8. Valores de *n* de todas las mediciones sobre un tubo de PVC de 6" de diámetro nominal, obtenidos con piezómetros.

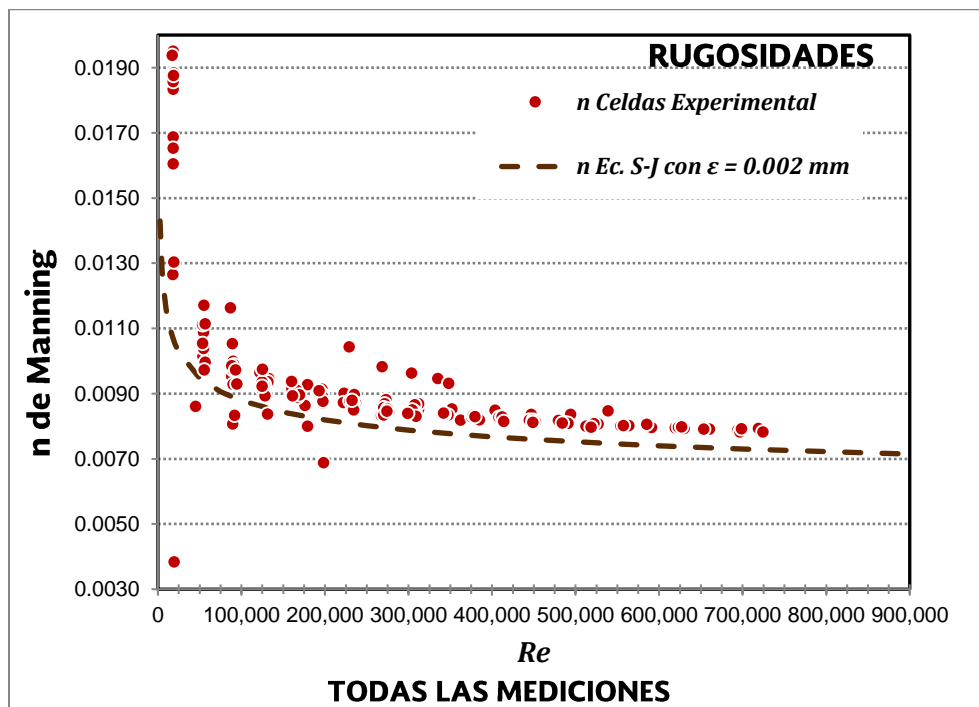


Ilustración 3.9. Valores de *n* de todas las mediciones sobre un tubo de PVC de 6" de diámetro nominal, obtenidos con celdas de presión.

De la Ilustración 3.4 a la Ilustración 3.9 se observa que las mediciones con las celdas sobrestiman f y n , con respecto a la curva teórica. Esto se explica con el hecho de que en todas las mediciones las dos celdas se ubicaron en los puntos 2 y 3, a una distancia de 10.040 m una de otra, mientras que los piezómetros se ubicaron, en la mayoría de las mediciones, en los puntos 1 y 4, a una distancia de 31.470 m uno de otro. La Ilustración 3.10 muestra los valores de n de Manning, obtenidos con piezómetros y celdas de presión ubicados en la misma posición, es decir en los puntos 2 y 3. Los resultados para piezómetros y celdas prácticamente coinciden, y ambos están desfasados con respecto a la curva teórica esperada, mientras que para piezómetros ubicados en los puntos 1 y 4 el resultado muestra casi perfecta coincidencia.

Tratándose de pérdidas de carga por fricción, es decir pérdidas que son proporcionales a la longitud de la tubería, mientras más largo sería el tramo en que se mide, más exacto sería el resultado. A esto se suma el hecho que la pérdida de carga medida incluye la pérdida por fricción en las paredes de la tubería más las pérdidas de carga menores (concentradas) en las uniones entre los tubos. Se depuraron entonces los datos, con esta base, dejando solamente las mediciones con piezómetros, y ubicados en puntos 1 y 4. La Ilustración 3.11 muestra una comparación entre el factor de fricción obtenido con los datos depurados, la ecuación propuesta y la ecuación de Swamee-Jain para rugosidad absoluta de 0.002 mm. La coincidencia es casi perfecta, a excepción del inicio de la curva (correspondiente a velocidades bajas) donde existe cierta dispersión en los valores, que se puede explicar con la cercanía de la zona de transición entre flujo laminar y flujo turbulento.

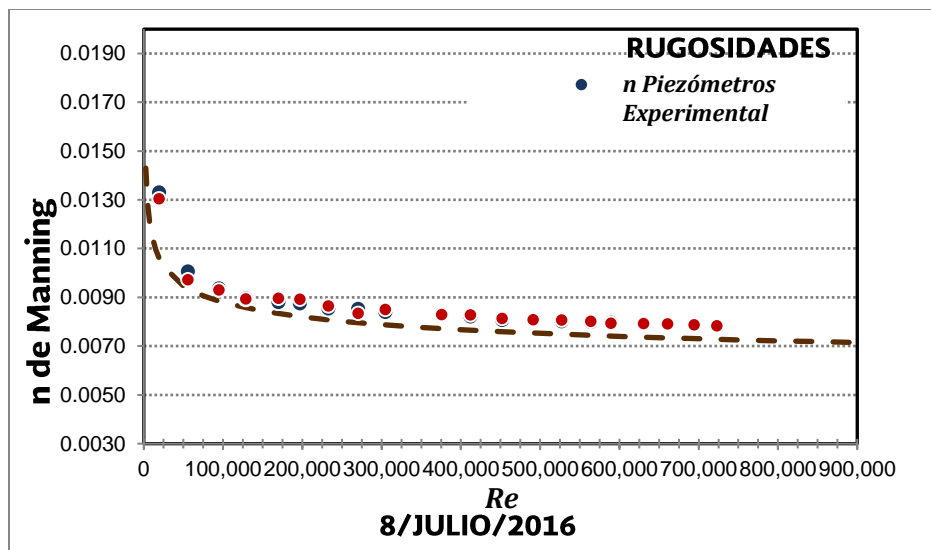


Ilustración 3.10. Valores de n de Manning, obtenidos con piezómetros y celdas de presión ubicados en las mismas posiciones, en puntos 2 y 3.

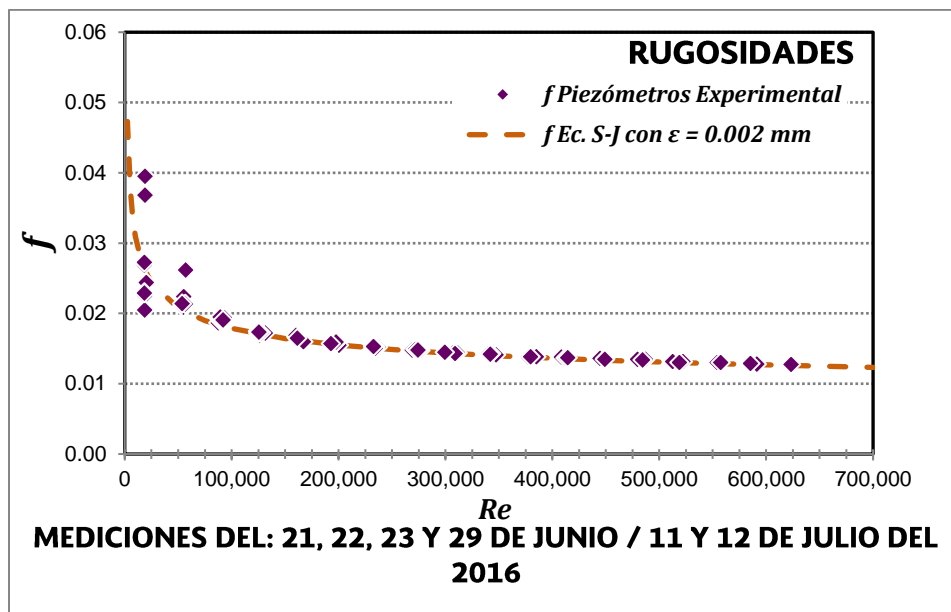


Ilustración 3.11. Comparación entre el factor de fricción f calculado por la ecuación propuesta, la ecuación de Swamee-Jain para rugosidad absoluta de 0.002 mm, y las mediciones realizadas sobre el tubo de 6" de PVC.

A su vez, la Ilustración 3.12 muestra el mismo resultado para la n de Manning.

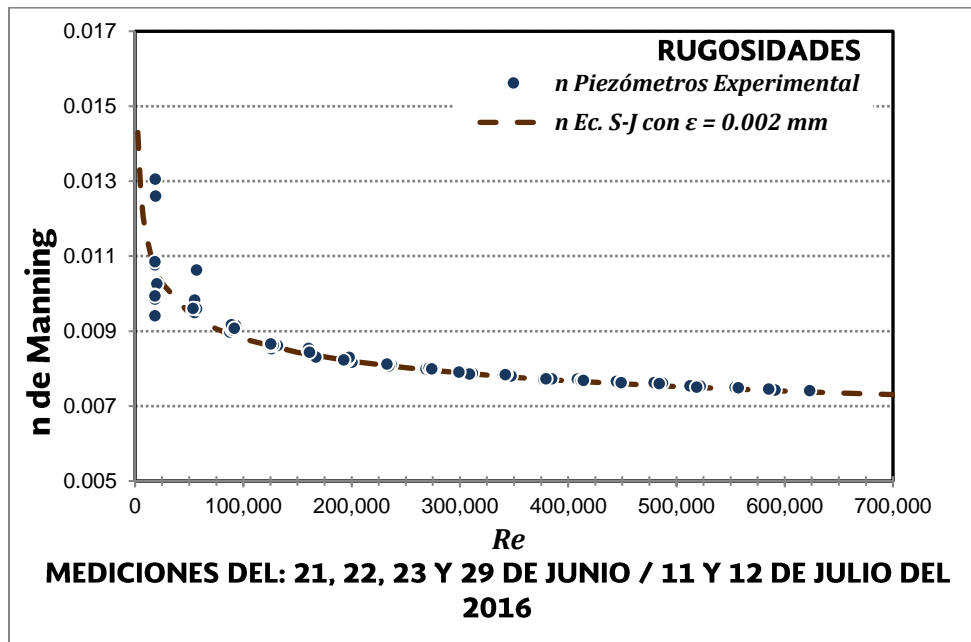





Ilustración 3.12. Comparación entre la n calculada por la ecuación propuesta y la n calculada por la Ecuación (12) con el factor de fricción f calculado por la ecuación de Swamee-Jain para rugosidad absoluta de 0.002 mm, y las mediciones realizadas sobre el tubo de 6" de PVC.

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 51 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

3.1.2 Flujo a presión en tubo de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) de pared exterior corrugada y pared interior lisa

A pesar de que por su nombre pretende de tener una pared interior lisa, la pared interior en realidad es ligeramente ondulada. La Ilustración 3.13 muestra una fotografía del tubo, donde se observa la ligera ondulación interior; la Ilustración 3.14 muestra un corte de la superficie interior del tubo de 6", sobre el cual se realizaron mediciones de la pérdida de carga, con las dimensiones de la ondulación, y la Ilustración 3.15 es un modelo en AutoCAD del mismo tubo. Se midió la altura de la ondulación, que resultó de 0.94 mm.

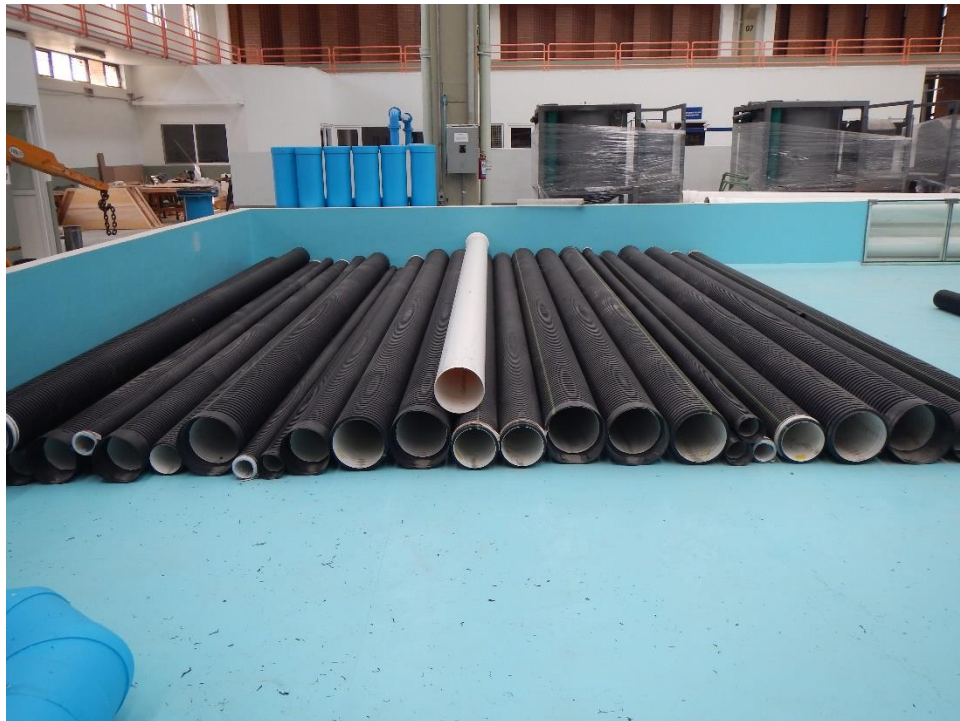


Ilustración 3.13. Aspecto de las paredes exterior e interior de los tubos de PEAD, en el IMTALAB.

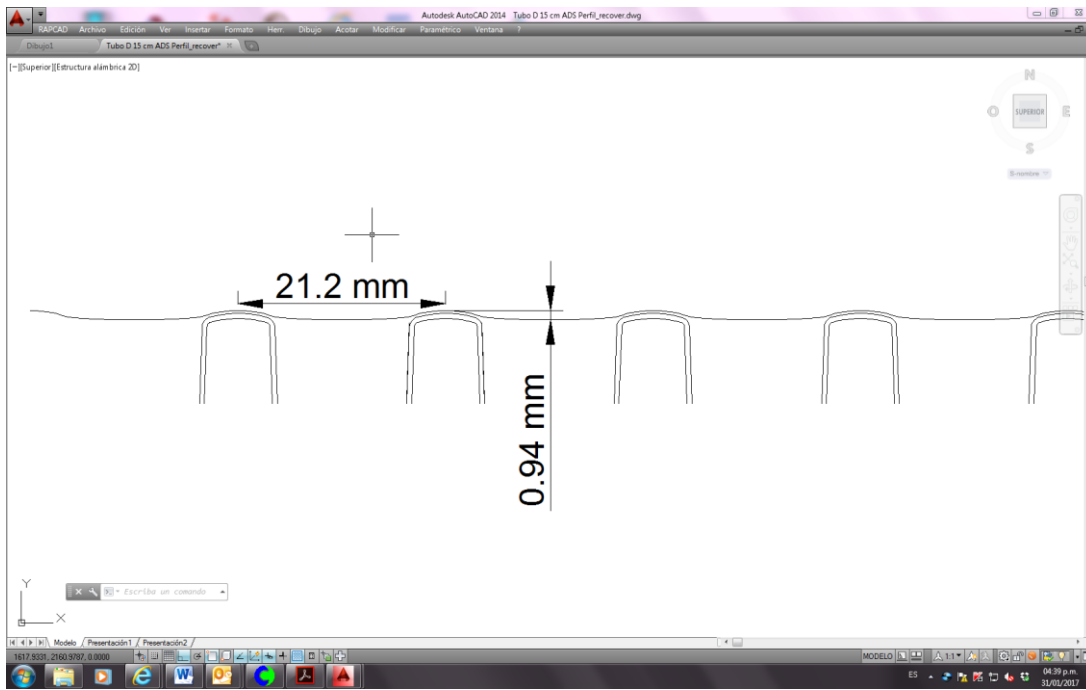


Ilustración 3.14. Corte de la superficie interior del tubo de 6" de PEAD.

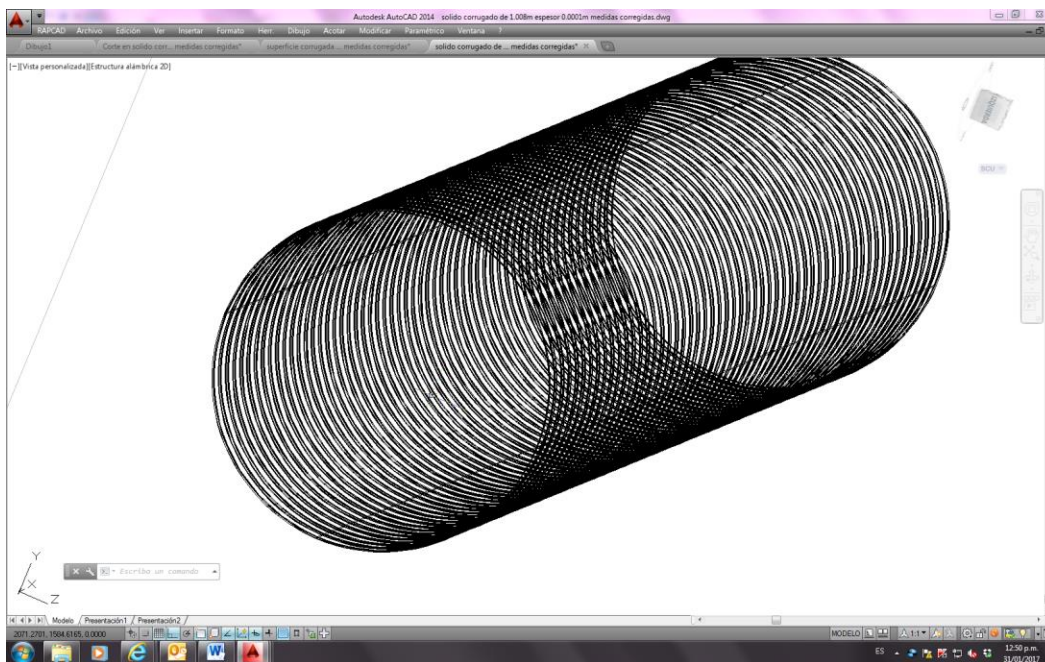


Ilustración 3.15. Modelo en AutoCAD del tubo de PEAD de 6".

3.1.2.1 Mediciones realizadas y procesamiento

Se utilizó el mismo procedimiento como en el caso el tubo de PVC. Se emplearon también cuatro puntos fijos para tomar las lecturas de presión, numerados como 1, 2, 3 y 4, pero en el caso de este tubo se contó con 4 celdas de presión y cuatro piezómetros, por lo que midió en los tramos entre los puntos 1 y 2, 1 y 3, 1 y 4, 2 y 3, 2 y 4, 3 y 4, en todos los casos con celdas de presión y piezómetros en todos los puntos.

Se realizaron de esta manera un total de 228 determinaciones de f y n sobre un tubo de polietileno de 6" de diámetro nominal (151.76 mm de diámetro promedio interior real). La Ilustración 3.16 y la Ilustración 3.17 muestran los valores de f de todas las mediciones, con piezómetros y con celdas de presión respectivamente, para los números de Reynolds correspondientes, comparados con lo que da la ecuación de Swamee-Jain. La Ilustración 3.18 y la Ilustración 3.19 muestran lo mismo para la n de Manning.

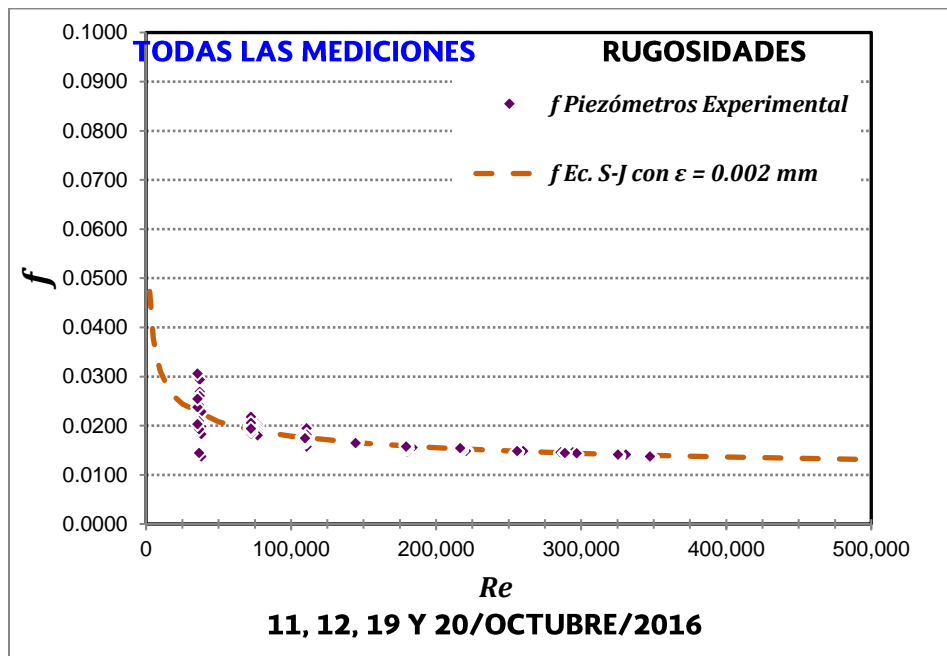


Ilustración 3.16. Valores de f de todas las mediciones sobre un tubo de PEAD de 6" de diámetro nominal, obtenidas con piezómetros.

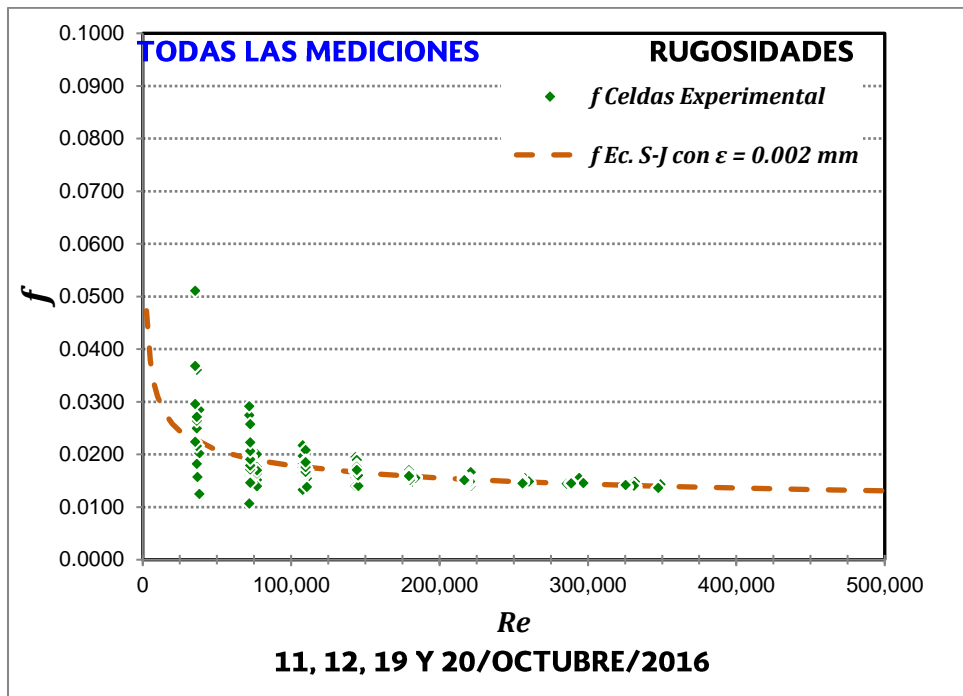


Ilustración 3.17. Valores de f de todas las mediciones sobre un tubo de PEAD de 6" de diámetro nominal, obtenidas con celdas de presión.

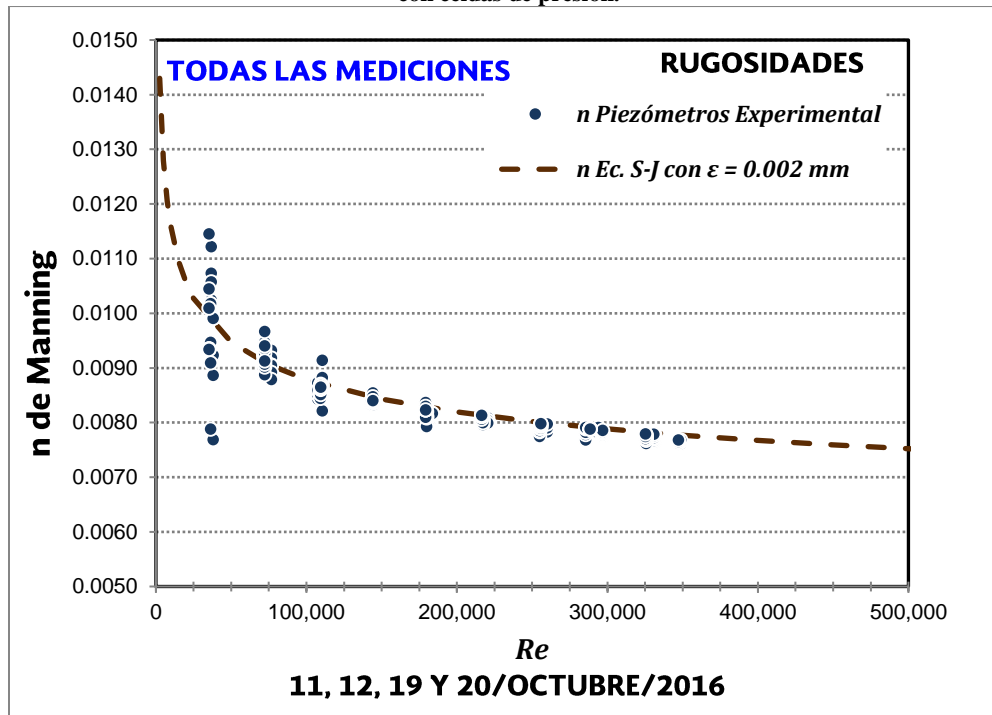


Ilustración 3.18. Valores de n de todas las mediciones sobre un tubo de PEAD de 6" de diámetro nominal, obtenidos con piezómetros.

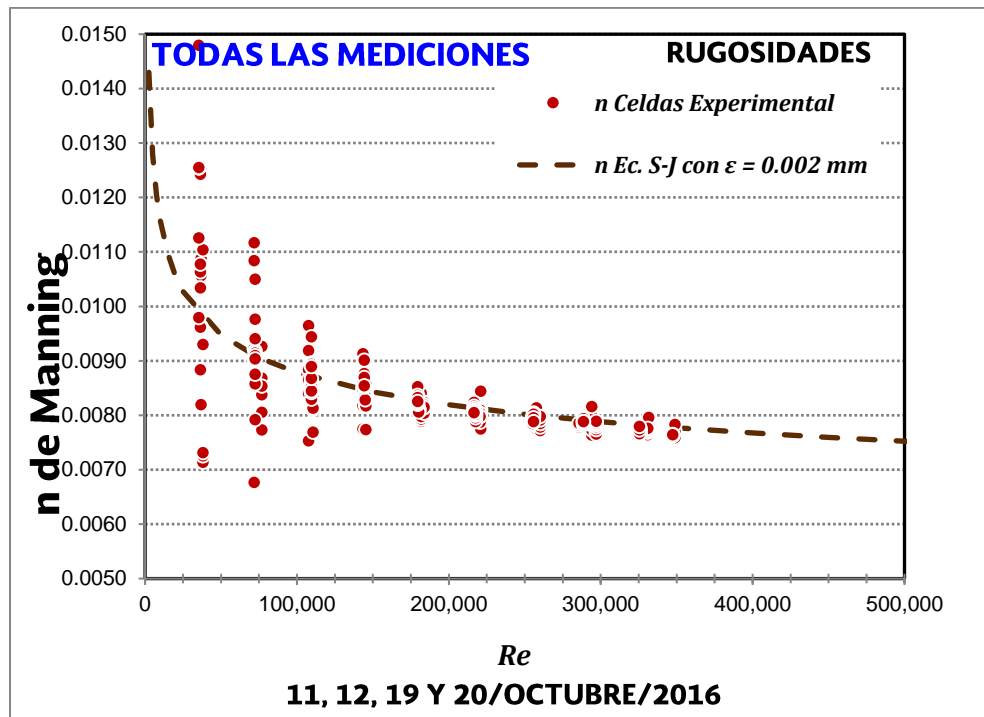


Ilustración 3.19. Valores de n de todas las mediciones sobre un tubo de PEAD de 6" de diámetro nominal, obtenidos con celdas de presión.

Similar al caso del tubo de PVC, las mediciones con las celdas sobreestiman f y n , con respecto a la curva teórica. Aplicando el mismo criterio, se depuraron los datos dejando solamente las mediciones con piezómetros, y ubicados en los puntos 1 y 4. La Ilustración 3.20 muestra una comparación entre el factor de fricción obtenido con los datos depurados y la ecuación de Swamee-Jain para rugosidad absoluta de 0.002 mm. La Ilustración 3.21 muestra el mismo resultado para la n de Manning.

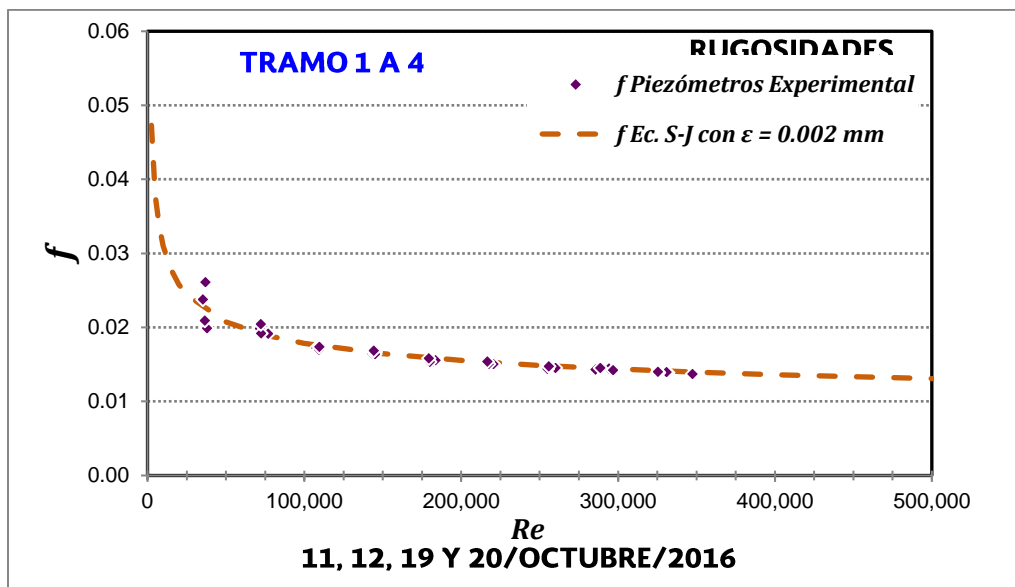


Ilustración 3.20. Comparación entre el factor de fricción f calculado por la ecuación de Swamee-Jain para rugosidad absoluta de 0.002 mm, y las mediciones realizadas sobre el tubo de 6" de PEAD.

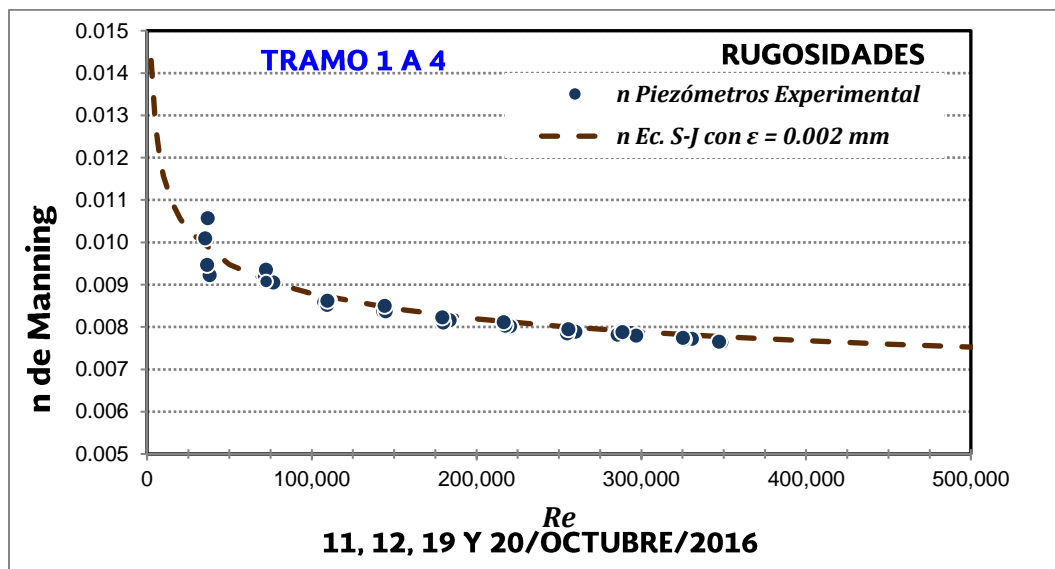





Ilustración 3.21. Comparación entre la n calculada por la ecuación de Swamee-Jain para rugosidad absoluta de 0.002 mm, y las mediciones realizadas sobre el tubo de 6" de PEAD.

3.1.2.2 Discusión de los resultados para el tubo de PEAD

A pesar de que el tubo de PEAD analizado no es liso, sino que ligeramente ondulado en su interior, las mediciones de pérdida de carga efectuadas mostraron que la pérdida de carga, y con esto el factor de fricción f y la n de Manning son casi los mismos como los del tubo liso de PVC, y con el mismo comportamiento respecto al número de Reynolds. Sería obviamente incorrecto usar para este tipo

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 57 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

de tubo la ecuación de Swamee-Jain (y la de Colebrook-White de la cual ésta proviene) con una rugosidad de 0.94 mm que representa la ondulación, dado que ello daría valores muy altos no realistas del factor de fricción f y de la n de Manning. Se procedió entonces a buscar una explicación de este hecho, que se encontró en la relativamente poco conocida teoría de Henry Morris, publicada por primera vez en los años 50 del siglo pasado en (Morris, H. M., 1959), y en (Henry M. Morris, et al, 1972), y recientemente retomada por algunos investigadores a nivel internacional (O. Giustolisi et al, 2008), (Blake P. Tullis, 2012), y (Calomino, F. et al, 2015).



En (Morris, H. M., 1959) se definen tres categorías del régimen de flujo en un conducto rugoso:

- 1) de rugosidad aislada (llamado flujo turbulento en tubo semi liso)
- 2) de interferencia de estelas, en inglés “wake interference” (llamado flujo hiper turbulento)
- 3) flujo rasante, en inglés “skimming flow” (llamado flujo turbulento en tubo quasi liso)

El flujo turbulento en tubo semi liso se caracteriza por la turbulencia con fricción por arrastre en la pared de entre las rugosidades, generación de vórtices independientes y su disipación en la cercanía de las rugosidades aisladas. En este régimen, las estelas y las zonas de generación de vórtices se desarrollan y disipan antes de alcanzar la siguiente rugosidad. Las rugosidades actúan como cuerpos separados. Por lo tanto, las características de flujo y la geometría de la rugosidad, en particular la distancia de separación longitudinal de los elementos de rugosidad y su altura son importantes para el valor del factor de fricción.

El flujo rasante (flujo en tubo cuasi-liso) se produce cuando la distancia entre las rugosidades y su altura son similares. En este caso existe una región de agua muerta entre dos elementos de rugosidad, de modo que desarrollan vórtices estables en los espacios entre las rugosidades y el flujo pasa por encima de las crestas de rugosidad. Por lo tanto, el flujo rasante se caracteriza por una pseudo-pared formada por crestas de rugosidad con vórtices estables que ocupan sus intersticios.

El flujo con interferencia de estelas se produce cuando los elementos de rugosidad están colocados cerca uno de otro, de modo que las zonas de separación, producción y disipación en cada elemento de rugosidad no se desarrollan por completo antes de alcanzar el siguiente elemento. Se tiene una turbulencia fuerte cerca de la pared de la tubería que sustituye la subcapa viscosa típica con una capa caracterizada por mezcla intensa. Por esta razón, Morris define este régimen como flujo hiper turbulento. La subcapa hiper-turbulenta se define por vorticidad

	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	
Página 58 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

intensa y mezcla turbulenta. Mientras tanto, en la región central del tubo prevalece la turbulencia normal, es decir, en este régimen, es posible observar dos distintas regiones: la zona central de la tubería con flujo turbulento desarrollado y la zona cerca de la pared con flujo de interferencia de la estela. En este régimen la altura de las rugosidades no influye, mientras que la separación longitudinal de los elementos, referida al radio del tubo, λ/r_o es el parámetro más importante.

La Ilustración 3.22, tomada de (O. Giustolisi et al, 2008) muestra una esquematización de estos 3 tipos de flujo.

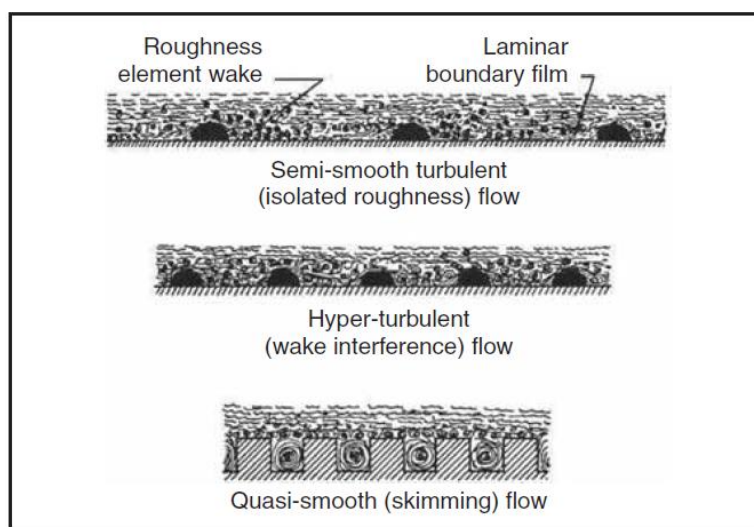





Ilustración 3.22. Los tres tipos de flujo en un conducto rugoso, según Morris (1959). Tomada de Giustolisi et al. (2008).

Dado su muy ligera corrugación interna, en el tubo de PEAD analizado se tiene el primer tipo de flujo (flujo turbulento en tubo semi-liso). De acuerdo con la teoría de Morris, en el primer y en el segundo tipos de flujo (flujo turbulento en tubo semi-liso y flujo en tubo cuasi-liso) se forma una pseudo-pared lisa dentro del flujo, a cierta distancia muy pequeña de la pared física del tubo. Por esta razón, para estos tipos de flujo se pueden usar las ecuaciones de f (y con esto de n) para tubos hidráulicamente lisos multiplicadas por un coeficiente (cuyo valor es mayor que uno) que considera que la pared física del tubo en realidad no es lisa y por lo tanto depende del tamaño de las macro rugosidades, las distancias entre ellas y el coeficiente de arrastre. De esta manera las curvas $f-Re$ deben ser paralelas a la curva para tubo hidráulicamente liso de las tuberías. Los análisis de Morris indican que, para un tubo corrugado, con este término el factor de fricción f se da por la siguiente ecuación:

Ecuación 3.14

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA <small>INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA</small>
Página 59 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

$$f = f_l \left(1 + \frac{67.2 C_D \epsilon}{\lambda} \right)$$

donde f_l es el factor de fricción para el tubo liso, ϵ es la altura de la rugosidad, λ es la distancia entre dos crestas de la misma, y C_D es el coeficiente de arrastre que depende de la forma de la rugosidad. La determinación precisa de C_D , para la geometría mostrada en la Ilustración 3.14, está fuera del alcance de este proyecto, pero para los fines de explicar el comportamiento de f en el tubo de PEAD analizado es suficiente tener la orden de magnitud del mismo. (Morris, H. M., 1959) y (Henry M. Morris, et al, 1972) presentan valores de C_D para varias geometrías, todas ellas mucho más pronunciadas en comparación con la suave geometría de la Ilustración 3.14. (H.M. Blackburn¹, A. Ooi² and M.S. Chong, 2007) investigaron el efecto de la altura relativa de la corrugación interna de una tubería y encontraron que para una corrugación ligera C_D tiene valores del orden de 0.05. Dada la forma mostrada en la Ilustración 3.14, el valor de C_D es muy bajo, del orden de 0.01. Asumiendo $C_D = 0.01$, de la Ecuación 3.14 y la Ilustración 3.14 se obtiene:

Ecuación 3.15

$$f = f_l \left(1 + \frac{67.2 \times 0.01 \times 0.94}{21.2} \right) = 1.03 f_l$$




3.1.3 Conclusiones de este subcapítulo

La n de Manning no es una constante para un tubo dado, como muchas veces se asume en la práctica, sino que depende del número de Reynolds, de la misma manera como el factor de fricción f de Darcy-Weisbach.

Los tubos de PVC se comportan como tubos hidráulicamente lisos, por lo que su factor de fricción f de Darcy-Weisbach puede ser obtenido por la Ecuación 3.10, y su n de Manning con flujo a tubo lleno por la Ecuación 3.13. Ambas ecuaciones fueron obtenidas en este proyecto, y comprobadas con las mediciones. Pueden aplicarse también para tubos hidráulicamente lisos de otros materiales.

Como lo indica la Ecuación 3.13, la n de Manning a tubo lleno también depende del diámetro, y es mayor para los diámetros mayores.

Los tubos de Polietileno de Alta Densidad con nombre “de pared exterior corrugada y pared interior lisa” están en realidad ligeramente onduladas en su pared interior. Su comportamiento hidráulico no obstante es muy similar a los tubos de PVC, y su factor de fricción f de Darcy-Weisbach puede ser obtenido por la Ecuación 3.10, y su n de Manning con flujo a tubo lleno por la Ecuación 3.13, con una ligera corrección dada por la Ecuación 3.14. La explicación de este comportamiento similar se da por la teoría de H. Morris, que postula que los tubos

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 60 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

con rugosidades asiladas se comportan con pseudo lisos hidráulicamente. Se requiere de trabajo futuro para obtener valores precisos del coeficiente de arrastre C_D para la geometría de pared interior ligeramente ondulada de los tubos de Polietileno de Alta Densidad (PEAD).

3.2 Flujo a gravedad

3.2.1 Flujo en tubo acanalado de PEAD de 12 pulgadas para alcantarillado

3.2.1.1 Mediciones realizadas y procesamiento

De la Ilustración 3.23 a la Ilustración 3.26 se muestran las siguientes vistas de las pruebas a superficie libre de tubería de PEAD: medición del caudal en el vertedor rectangular, remanso en la transición de flujo del canal a la tubería, tramo aguas arriba de la tubería de prueba, y descarga de la tubería al canal de recirculación del IMTALAB.

En la Tabla 3.2 y en la Tabla 3.3 se presenta el concentrado de 11 caudales de prueba y los tirantes de flujo medidos para cada caudal, con piezómetros y celdas de presión.



Ilustración 3.23. Medición del caudal de alimentación a las tuberías de prueba con flujo a superficie libre.

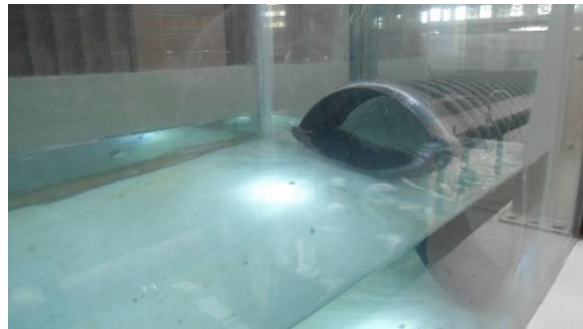


Ilustración 3.24. Remanso en la alimentación de la tubería de prueba a superficie libre.

Tabla 3.2. Concentrado de mediciones caudal-tirantes de flujo

Puntos de medición	Distancia (m)	Q ₁ = 0.00284 m ³ /s		Q ₂ = 0.00533 m ³ /s		Q ₃ = 0.00777 m ³ /s		Q ₄ = 0.01051 m ³ /s		Q ₅ = 0.01288 m ³ /s		Q ₆ = 0.01708 m ³ /s	
		Lectura Piezom (m)	Lectura Celdas (m)	Lectura Piezom (m)	Lectura Celdas (m)	Lectura Piezom (m)	Lectura Celdas (m)	Lectura Piezom (m)	Lectura Celdas (m)	Lectura Piezom (m)	Lectura Celdas (m)	Lectura Piezom (m)	Lectura Celdas (m)
Inicio de tubería	0	0.1067	0.10668	0.1227	0.12268	0.1417	0.14168	0.1577	0.15768	0.1717	0.17168	0.1907	0.19068
Piezómetro/ Celda 1	3.220	0.0963	0.10117	0.1108	0.11573	0.1268	0.13168	0.1418	0.14657	0.1543	0.15841	0.1713	0.17648
Piezómetro/ Celda 2	9.345	0.0948	0.09622	0.1088	0.11040	0.1248	0.12605	0.1398	0.14080	0.1518	0.15213	0.1698	0.16994
Piezómetro/ Celda 3	15.485	0.0918	0.09116	0.1053	0.10435	0.1203	0.11913	0.1343	0.13279	0.1448	0.14338	0.1618	0.16002
Piezómetro/ Celda 4	21.635	0.0893	0.08997	0.1018	0.10319	0.1168	0.11771	0.1303	0.13124	0.1413	0.14168	0.1573	0.15814
Piezómetro/ Celda 5	27.777	0.0853	0.08641	0.0978	0.09913	0.1123	0.11300	0.1253	0.12584	0.1353	0.13584	0.1508	0.15135
Piezómetro/ Celda 6	33.927	0.0808	0.08239	0.0923	0.09435	0.1053	0.10726	0.1173	0.11922	0.1273	0.12860	0.1413	0.14295
Piezómetro/ Celda 7	40.167	0.0748	0.07554	0.0853	0.08665	0.0973	0.09857	0.1078	0.10948	0.1173	0.11822	0.1303	0.13126
Descarga	43.097	0.0300	0.03000	0.0400	0.04000	0.0480	0.04800	0.0580	0.05800	0.0640	0.06400	0.0750	0.07500

Tabla 3.3. Continuación del concentrado de mediciones caudal-tirantes de flujo.

Puntos de medición	Distancia (m)	Q ₇ = 0.01985 m ³ /s		Q ₈ = 0.02351 m ³ /s		Q ₉ = 0.02697 m ³ /s		Q ₁₀ = 0.03184 m ³ /s		Q ₁₁ = 0.03566 m ³ /s	
		Lectura Piezom (m)	Lectura Celdas (m)	Lectura Piezom (m)	Lectura Celdas (m)	Lectura Piezom (m)	Lectura Celdas (m)	Lectura Piezom (m)	Lectura Celdas (m)	Lectura Piezom (m)	Lectura Celdas (m)
Inicio de tubería	0	0.2067	0.20668	0.2217	0.22168	0.2377	0.23768	0.2597	0.25968	0.2747	0.27468
Piezómetro/ Celda 1	3.220	0.1838	0.18769	0.1978	0.20129	0.2103	0.21414	0.2283	0.23171	0.2403	0.24353
Piezómetro/ Celda 2	9.345	0.1808	0.18119	0.1938	0.19455	0.2068	0.20779	0.2243	0.22501	0.2363	0.23697
Piezómetro/ Celda 3	15.485	0.1728	0.17052	0.1843	0.18288	0.1963	0.19502	0.2123	0.21097	0.2238	0.22195
Piezómetro/ Celda 4	21.635	0.1683	0.16838	0.1803	0.18074	0.1913	0.19262	0.2073	0.20853	0.2143	0.21918
Piezómetro/ Celda 5	27.777	0.1603	0.16095	0.1713	0.17226	0.1818	0.18339	0.1968	0.19801	0.2063	0.20789
Piezómetro/ Celda 6	33.927	0.1513	0.15182	0.1613	0.16248	0.1713	0.17258	0.1843	0.18636	0.1933	0.19539
Piezómetro/ Celda 7	40.167	0.1388	0.13916	0.1478	0.14873	0.1568	0.15794	0.1698	0.17033	0.1763	0.17773
Descarga	43.097	0.0800	0.08000	0.0870	0.08700	0.0930	0.09300	0.1130	0.11300	0.1190	0.11900



Ilustración 3.25. Vista del tramo aguas arriba de la alimentación a la tubería de prueba, dentro del canal de pendiente nula.



Ilustración 3.26. Vista de la descarga de la tubería de prueba al canal de recirculación.

En la Ilustración 3.27 y en la Ilustración 3.28 se muestran los resultados de las mediciones de tirantes de flujo a superficie libre, con piezómetros y celdas de presión, para dos de los 11 caudales de prueba. Como se observa, los valores son muy parecidos, lo que significa que las celdas son factibles y confiables para implementar un sistema de adquisición y procesamiento de datos.

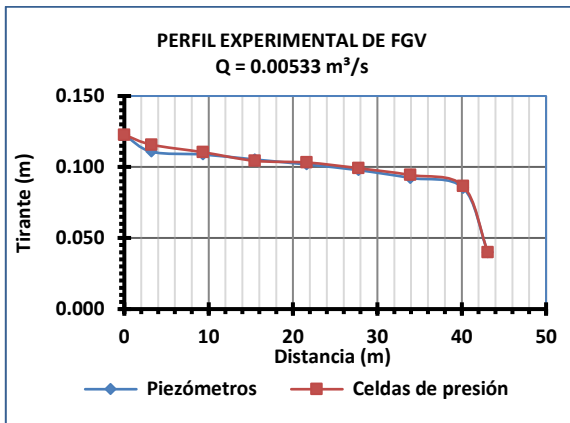


Ilustración 3.27. Medición de perfil de flujo con piezómetros y celdas de presión para un caudal $Q=0.00533 \text{ m}^3/\text{s}$.

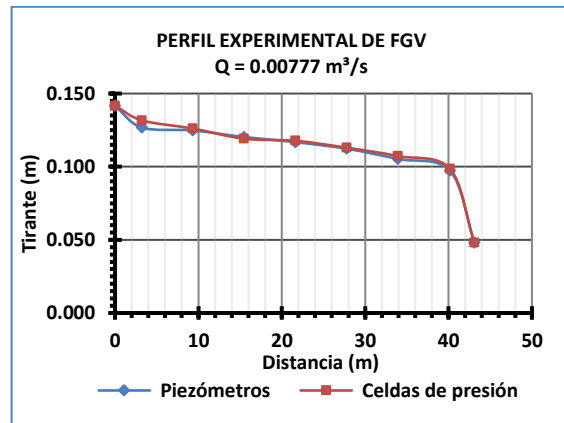


Ilustración 3.28. Medición de perfil de flujo con piezómetros y celdas de presión para un caudal $Q=0.00777 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para determinar la n de Manning correspondiente a cada uno de los caudales con los que se efectuaron las pruebas, se siguieron los dos procedimientos siguientes:

3.2.1.2 Metodos usados para determinar la n de Manning

3.2.1.2.1 Determinación de n por comparación de perfiles experimentales y teóricos

Se comparó el perfil obtenido de la medición de tirantes a lo largo de la tubería para caudal de prueba, con perfiles teóricos obtenidos a partir de la ecuación dinámica de Flujo Gradualmente Variado (FGV) para diferentes valores de n , de manera que aquel valor cuyo perfil coincidía con el experimental se consideraba el valor buscado. Ver en la Ilustración 3.29 el perfil de los tirantes experimentales (Y_{exp}) y el perfil de los tirantes teóricos ($Y_{teó}$).

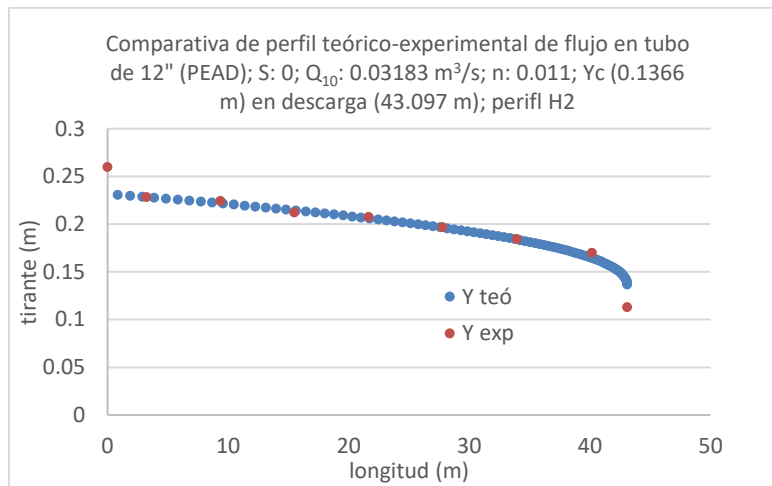


Ilustración 3.29. Comparativa de perfil teórico-experimental para el gasto de prueba $Q_{10}= 0.03183$ m³/s.



Para el cálculo de los perfiles teóricos se hizo uso del software HIDRA-BAS desarrollado en la DEPMI Campus Morelos de la UNAM como tema de tesis de maestría, que realiza el cálculo numérico con base en la Ecuación 3.16, la Ecuación 3.17, y la Ecuación 3.18 (Pérez Ostos, 2015).

Ecuación 3.16

$$\frac{dz}{dx} + \frac{d}{dx} \left(y \cos\theta + \alpha \frac{v^2}{2g} \right) + \frac{dh_f}{dx} = 0$$

Ecuación 3.17

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S - S_f}{1 - F_r^2 \cos\theta}$$

 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 65 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

Ecuación 3.18

$$S_f = \left(v \frac{n}{R^2} \right)^2$$

3.2.1.2.2 Determinación de n a partir de la pendiente de energía experimental

En este método se determinó la energía en dos puntos de medición de tirantes de flujo, para de ahí obtener la pérdida h_f y la propia pendiente de energía S_f en el tramo respectivo, conforme a la Ecuación 3.19, Ecuación 3.20, y Ecuación 3.21, considerando pruebas en canal horizontal. Ver Ilustración 3.30.

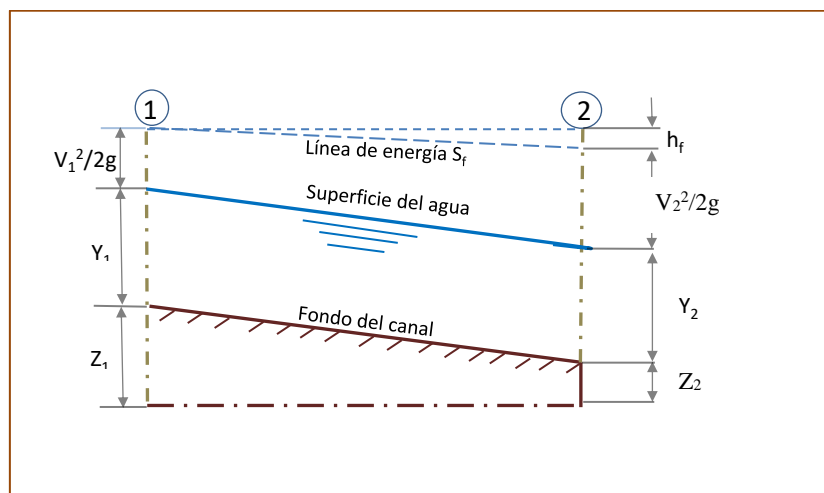


Ilustración 3.30. Energía en flujo a superficie libre gradualmente variado.

Ecuación 3.19

$$h_f = \left(z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right)$$

Retomando la Ecuación 3.5:



Ecuación 3.20

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

Ecuación 3.21

$$n = \frac{1}{v} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}$$

La Ecuación 3.21 se aplicó con datos de V y R de la sección inicial del tramo considerado. Adicionalmente a la n de Manning de cada caudal de prueba, se determinaron los valores del factor de fricción f de la fórmula de Darcy-Weisbach,

 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 66 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

aplicable a flujo uniforme y cercanamente uniforme en canales según la Ecuación 3.22 (Chow, 1959).

Ecuación 3.22

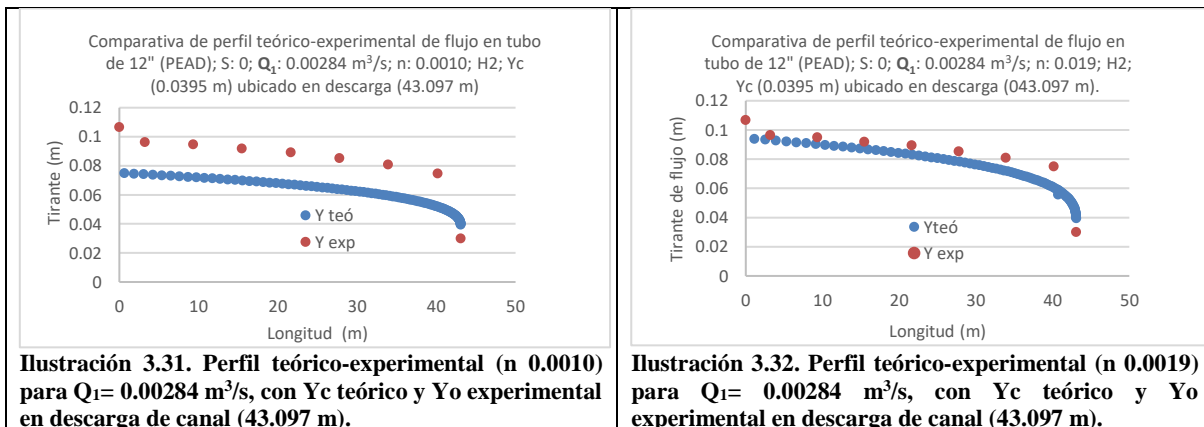
$$f = \frac{8gRS}{V^2}$$

3.2.1.3 Valores obtenidos

3.2.1.3.1 Por comparación de perfiles

En la Ilustración 3.31 se presenta la comparativa del primer gasto prueba, de 0.00284 m³/s, entre el perfil experimental y el perfil teórico determinado con una *n* de Manning de 0.0010. En la Ilustración 3.32 la comparativa con una *n* de 0.0019. Como se observa el segundo perfil teórico se ajusta más al experimental, pero sigue desfasado, por lo que al usar *n* de 0.023 se logra el ajuste, como se muestra en la Ilustración 3.33.

En la Ilustración 3.34 el tirante crítico *Y_c* se recorrió 3*Y_c* antes del punto de descarga experimental para tener en cuenta el flujo no paralelo de esta, sin embargo como se puede ver no impacta en el valor de *n*.



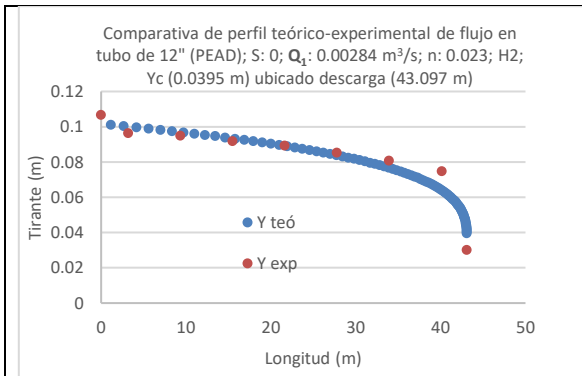


Ilustración 3.33. Perfil teórico experimental para $Q_1=0.00284$ m³/s, con Yc teórico y Yo experimental en descarga de canal (43.097 m).

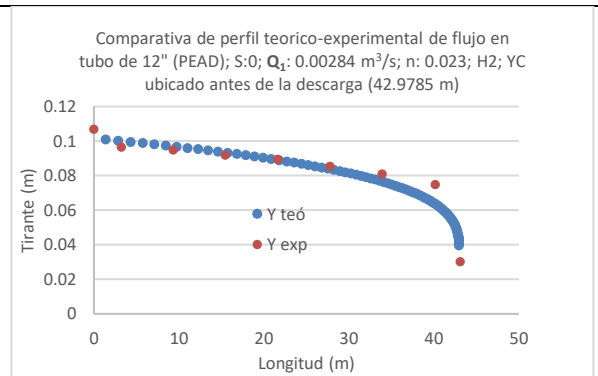


Ilustración 3.34. Perfil teórico experimental para $Q_1=0.00284$ m³/s, con Yc teórico en 42.97 m, y Yo en descarga de canal (43.097 m).

A continuación se presentan las comparativas de los otros 10 caudales de prueba, con los valores de n de Manning cuyos perfiles teóricos coinciden con los experimentales. Ver Ilustración 3.35 a la Ilustración 3.44.

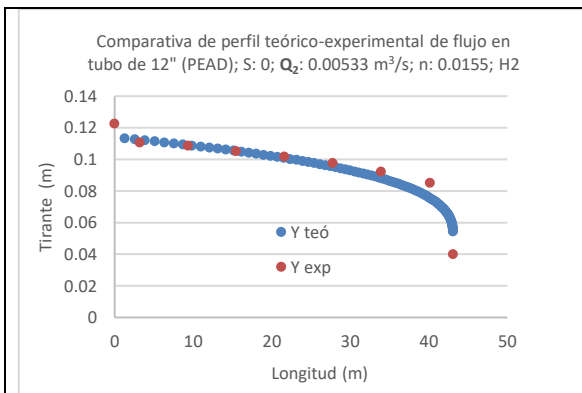


Ilustración 3.35. Perfil teórico experimental para $Q_2=0.00533$ m³/s, con Yc teórico y Yo experimental en descarga de canal (43.097 m).

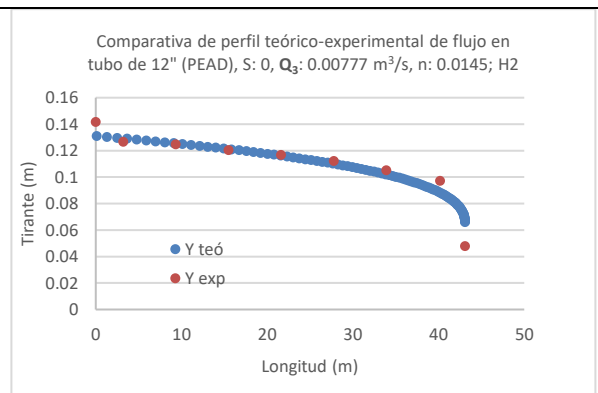


Ilustración 3.36. Perfil teórico experimental para $Q_3=0.00777$ m³/s, con Yc y Yo experimental en descarga de canal (43.097 m).

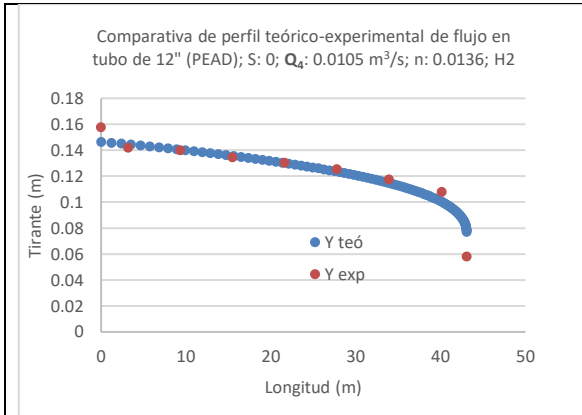


Ilustración 3.37. Perfil teórico-experimental para $Q_4=0.0105$ m³/s.

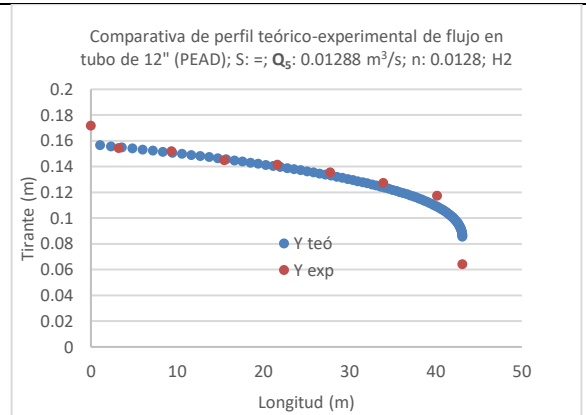


Ilustración 3.38. Perfil teórico-experimental para $Q_5=0.01288$ m³/s.

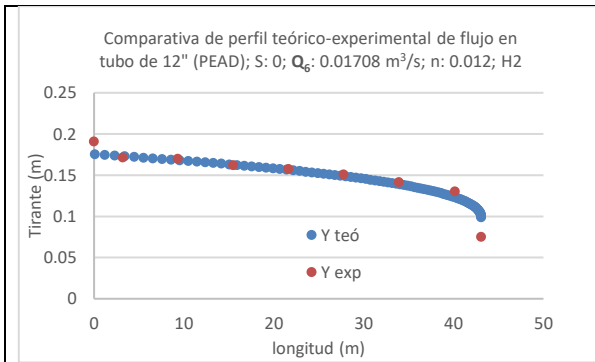


Ilustración 3.39. Perfil teórico-experimental para $Q_6=0.01708$ m³/s.

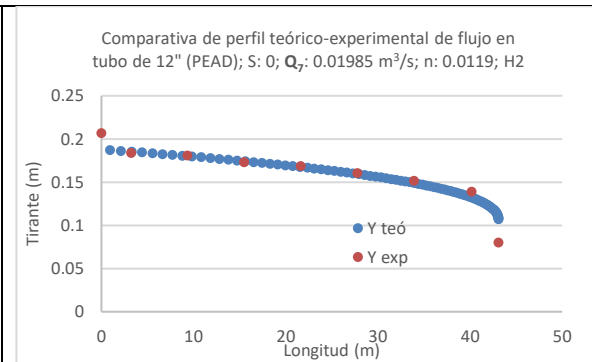


Ilustración 3.40. Perfil teórico-experimental para $Q_7=0.01985$ m³/s.

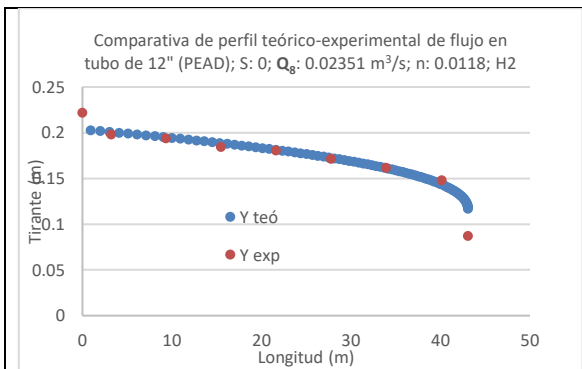


Ilustración 3.41. Perfil teórico-experimental para $Q_8=0.02351$ m³/s.

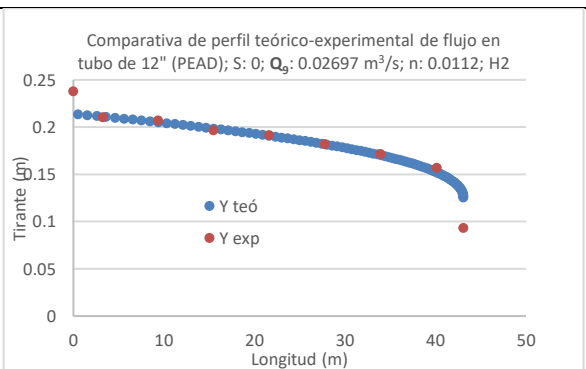


Ilustración 3.42. Perfil teórico-experimental para $Q_9=0.02697$ m³/s.

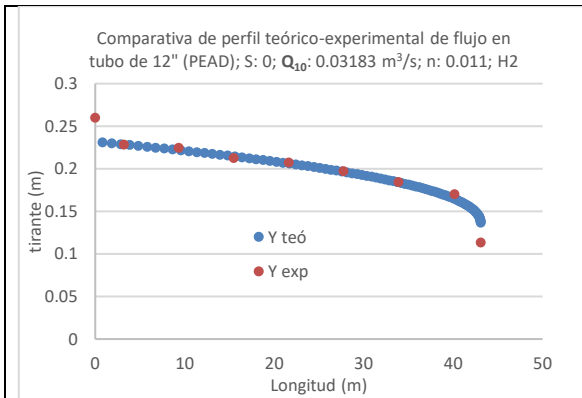


Ilustración 3.43. Perfil teórico-experimental para $Q_{10}=0.03183 \text{ m}^3/\text{s}$.

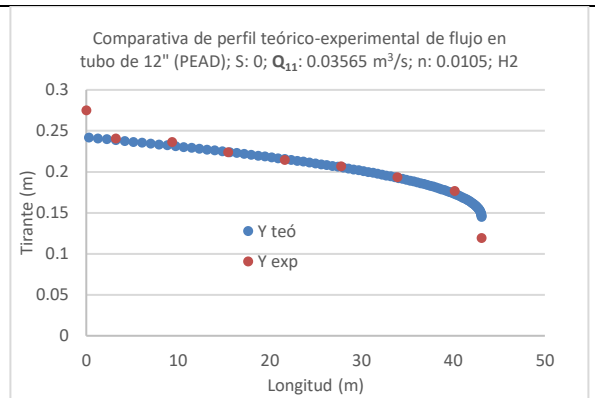


Ilustración 3.44. Perfil teórico-experimental para $Q_{11}=0.03565 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la Tabla 3.4 se resumen los resultados teórico-experimentales de los 11 caudales ensayados en la tubería de PEAD de alcantarillado de 12 pulgadas de diámetro, con flujo en pendiente horizontal. Excluyendo el valor del primer caudal, el promedio de la n de Manning de los otros 10 caudales resulta de 0.01245. Ver resultados gráficos en la Ilustración 3.45.

Tabla 3.4. Resumen de resultados en tubo de 12 pulgadas de diámetro con pendiente horizontal, para los 11 caudales de pruebas ensayados. Y_2 es el tirante experimental obtenido en el segundo punto de medición; Y_c : tirante crítico.

No.	Q (m ³ /s)	Y ₂ (m)	Y _c (m)	Y ₂ /D	n
1	0.00284	0.096	0.0395	31.98%	0.023
2	0.00533	0.111	0.0544	36.79%	0.0157
3	0.00777	0.127	0.0659	42.11%	0.0145
4	0.0105	0.142	0.0769	47.09%	0.0136
5	0.01288	0.154	0.0854	51.24%	0.0128
6	0.01708	0.171	0.0988	56.89%	0.0120
7	0.01985	0.184	0.1068	61.04%	0.0116
8	0.02351	0.198	0.1166	65.69%	0.0113
9	0.02697	0.210	0.1253	69.84%	0.0112
10	0.03183	0.228	0.1366	75.82%	0.0110
11	0.03565	0.240	0.1449	79.80%	0.0108

Promedio 0.01245

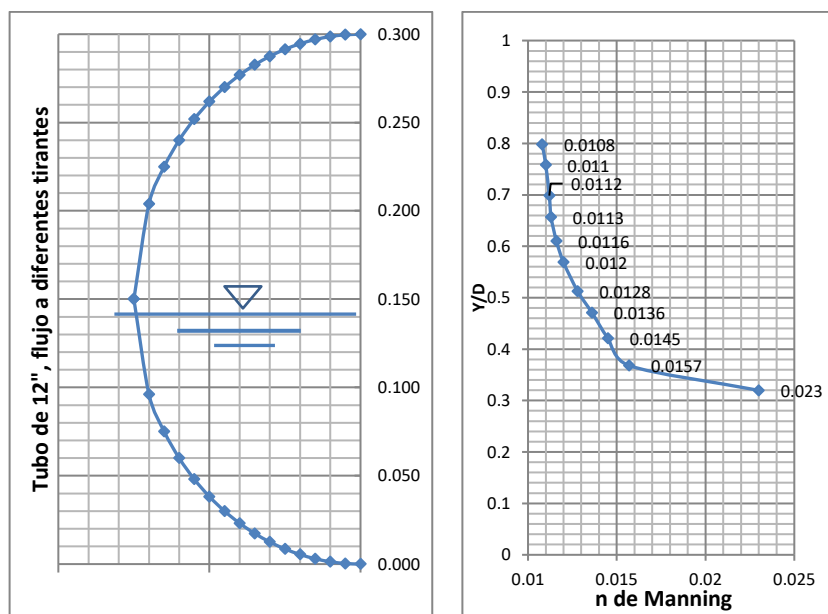


Ilustración 3.45. Variación de la n de Manning con los diferentes tirantes de flujo ensayados.

3.2.1.3.2 Por pendiente de energía

Por otra parte, en la aplicación del segundo procedimiento se tomaron los gastos de alimentación y los tirantes medidos en dos secciones de la tubería de prueba alojada en el canal de pendiente horizontal. Se hizo la determinación para los siguientes cinco tramos, ubicados entre puntos de medición de tirantes de flujo: 3-4, 3-5, 1-7, 1-6, y 2-6. De la Tabla 3.6 a la Tabla 3.10 se muestran los resultados obtenidos.

En la Tabla 3.5 se muestra el concentrado y promedio de las n de Manning obtenidas en los cinco tramos evaluados. El promedio general resultante mediante este método es 0.01313. En la Ilustración 3.46 se muestran los resultados de manera gráfica.

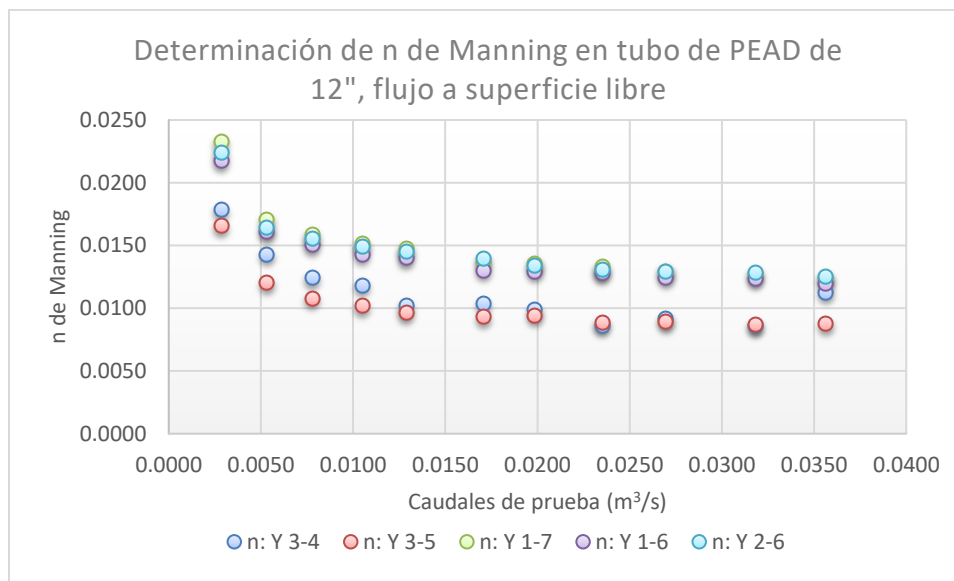


Ilustración 3.46. Resultados de n de Manning obtenidos con la medición de la pendiente de energía.

Tabla 3.5. Concentrado y promedio de las n de Manning obtenidas en los cinco tramos evaluados en la tubería de PEAD de 12" de diámetro, en el rango de caudales de prueba.

No.	Q (m ³ /s)	n: Y 3-4	n: Y 3-5	n: Y 1-7	n: Y 1-6	n: Y 2-6
1	0.0028	0.0178	0.0166	0.0233	0.0218	0.0224
2	0.0053	0.0143	0.0120	0.0171	0.0161	0.0164
3	0.0078	0.0124	0.0108	0.0159	0.0150	0.0155
4	0.0105	0.0118	0.0102	0.0151	0.0143	0.0149
5	0.0129	0.0102	0.0097	0.0147	0.0140	0.0145
6	0.0171	0.0104	0.0093	0.0136	0.0130	0.0140
7	0.0199	0.0099	0.0094	0.0136	0.0130	0.0134
8	0.0235	0.0086	0.0089	0.0133	0.0128	0.0130
9	0.0270	0.0092	0.0089	0.0130	0.0125	0.0130
10	0.0318	0.0086	0.0087	0.0127	0.0124	0.0129
11	0.0357	0.0113	0.0087	0.0124	0.0120	0.0126
		0.01133	0.01029	0.01497	0.01426	0.01478
						0.01313

Tabla 3.6. Determinación de n de Manning para cada uno de los 11 gastos de prueba, a partir de los datos de gasto y tirantes de flujo medidos en el tramo 3-4 de la tubería ensayada de PEAD, de 12 pulgadas de diámetro, alojada en canal de pendiente horizontal.

No.	Q (m ³ /s)	Z ₃ (m)	Y ₃ (m)	θ ₃	P ₃	A ₃	Rh ₃	V ₃ (m/s)	V ₃ ² /2g (m)	Z ₄ (m)	y ₄ (m)	θ ₄	P ₄	A ₄	Rh ₄	V ₄ (m/s)	V ₄ ² /2g (m)	h _f =Z ₃ +Y ₃ +V ₃ ² /2g -(Z ₄ +Y ₄ +V ₄ ² /2g)	f=8gR S/V ²	S _f	n: Y 3-4
1	0.0028	1	0.092	134.05	0.3522	0.0184	0.0521	0.155	0.00122	1	0.089	131.97	0.347	0.0177	0.0510	0.161	0.00132	0.00240	0.0605	0.00039	0.0178
2	0.0053	1	0.105	145.00	0.3810	0.0222	0.0582	0.240	0.00295	1	0.102	142.20	0.374	0.0212	0.0567	0.252	0.00323	0.00321	0.0367	0.00052	0.0143
3	0.0078	1	0.120	156.80	0.4120	0.0266	0.0644	0.293	0.00437	1	0.117	154.08	0.405	0.0255	0.0630	0.304	0.00473	0.00314	0.0272	0.00051	0.0124
4	0.0105	1	0.134	167.59	0.4404	0.0307	0.0697	0.342	0.00596	1	0.130	164.53	0.432	0.0295	0.0683	0.356	0.00646	0.00351	0.0241	0.00057	0.0118
5	0.0129	1	0.145	175.61	0.4614	0.0339	0.0734	0.380	0.00738	1	0.141	172.94	0.454	0.0328	0.0722	0.393	0.00786	0.00302	0.0180	0.00049	0.0102
6	0.0171	1	0.162	188.56	0.4955	0.0390	0.0787	0.438	0.00979	1	0.157	185.13	0.486	0.0376	0.0774	0.454	0.01051	0.00378	0.0181	0.00062	0.0104
7	0.0199	1	0.173	196.99	0.5176	0.0423	0.0817	0.470	0.01125	1	0.168	193.53	0.509	0.0409	0.0805	0.485	0.01200	0.00375	0.0164	0.00061	0.0099
8	0.0235	1	0.184	205.90	0.5410	0.0457	0.0844	0.515	0.01352	1	0.180	202.78	0.533	0.0445	0.0835	0.528	0.01424	0.00328	0.0125	0.00053	0.0086
9	0.0270	1	0.196	215.37	0.5659	0.0492	0.0869	0.549	0.01536	1	0.191	211.40	0.555	0.0477	0.0859	0.565	0.01630	0.00406	0.0139	0.00066	0.0092
10	0.0318	1	0.212	228.42	0.6002	0.0537	0.0894	0.593	0.01796	1	0.207	224.28	0.589	0.0523	0.0887	0.609	0.01892	0.00404	0.0123	0.00066	0.0086
11	0.0357	1	0.224	238.21	0.6259	0.0567	0.0907	0.628	0.02013	1	0.214	230.09	0.605	0.0542	0.0897	0.658	0.02207	0.00756	0.0200	0.00123	0.0113

Promedio **0.01133**

Tabla 3.7. Determinación de n de Manning para cada uno de los 11 gastos de prueba, a partir de los datos de gasto y tirantes de flujo medidos en el tramo 3-5 de la tubería ensayada de PEAD, de 12 pulgadas de diámetro, alojada en canal de pendiente horizontal.

No.	Q (m ³ /s)	Z ₃ (m)	Y ₃ (m)	θ ₃	P ₃	A ₃	Rh ₃	V ₃ (m/s)	V ₃ ² /2g (m)	Z ₅ (m)	y ₅ (m)	θ ₅	P ₅	A ₅	Rh ₅	V ₅ (m/s)	V ₅ ² /2g (m)	$h_f = Z_3 + Y_3 + V_3^2/2g - (Z_5 + Y_5 + V_5^2/2g)$	f=8gRS/V ²	S _f	n: Y 3-5
1	0.0028	1	0.092	134.05	0.3522	0.0184	0.0521	0.155	0.00122	1	0.085	128.62	0.338	0.0166	0.0491	0.171	0.00150	0.00622	0.0443	0.00034	0.0166
2	0.0053	1	0.105	145.00	0.3810	0.0222	0.0582	0.240	0.00295	1	0.098	138.97	0.365	0.0200	0.0549	0.266	0.00361	0.00684	0.0226	0.00037	0.0120
3	0.0078	1	0.120	156.80	0.4120	0.0266	0.0644	0.293	0.00437	1	0.112	150.55	0.396	0.0242	0.0612	0.321	0.00526	0.00711	0.0180	0.00039	0.0108
4	0.0105	1	0.134	167.59	0.4404	0.0307	0.0697	0.342	0.00596	1	0.125	160.68	0.422	0.0280	0.0664	0.375	0.00716	0.00780	0.0157	0.00042	0.0102
5	0.0129	1	0.145	175.61	0.4614	0.0339	0.0734	0.380	0.00738	1	0.135	168.36	0.442	0.0310	0.0701	0.415	0.00880	0.00808	0.0140	0.00044	0.0097
6	0.0171	1	0.162	188.56	0.4955	0.0390	0.0787	0.438	0.00979	1	0.151	180.18	0.473	0.0357	0.0753	0.479	0.01170	0.00910	0.0127	0.00049	0.0093
7	0.0199	1	0.173	196.99	0.5176	0.0423	0.0817	0.470	0.01125	1	0.160	187.41	0.492	0.0385	0.0782	0.515	0.01354	0.01021	0.0128	0.00055	0.0094
8	0.0235	1	0.184	205.90	0.5410	0.0457	0.0844	0.515	0.01352	1	0.171	195.83	0.515	0.0418	0.0813	0.562	0.01612	0.01040	0.0114	0.00056	0.0089
9	0.0270	1	0.196	215.37	0.5659	0.0492	0.0869	0.549	0.01536	1	0.182	203.95	0.536	0.0449	0.0839	0.600	0.01838	0.01148	0.0114	0.00062	0.0089
10	0.0318	1	0.212	228.42	0.6002	0.0537	0.0894	0.593	0.01796	1	0.197	215.77	0.567	0.0493	0.0870	0.646	0.02127	0.01219	0.0108	0.00066	0.0087
11	0.0357	1	0.224	238.21	0.6259	0.0567	0.0907	0.628	0.02013	1	0.206	223.46	0.587	0.0520	0.0886	0.686	0.02399	0.01365	0.0109	0.00074	0.0087

Promedio **0.01029**

Tabla 3.8. Determinación de n de Manning para cada uno de los 11 gastos de prueba, a partir de los datos de gasto y tirantes de flujo medidos en el tramo 1-7 de la tubería ensayada de PEAD, de 12 pulgadas de diámetro, alojada en canal de pendiente horizontal.

No.	Q (m ³ /s)	Z ₁ (m)	Y ₁ (m)	θ ₁	P ₁	A ₁	Rh ₁	V ₁ (m/s)	V ₁ ² /2g (m)	Z ₇ (m)	y ₇ (m)	θ ₇	P ₇	A ₇	Rh ₇	V ₇ (m/s)	V ₇ ² /2g (m)	$h_f = Z_1 + Y_1 + V_1^2/2g - (Z_7 + Y_7 + V_7^2/2g)$	f=8gRS/V ²	S _f	n: Y 1-7
1	0.0028	1	0.096	137.74	0.3619	0.0196	0.0542	0.145	0.00107	1	0.075	119.57	0.314	0.0138	0.0439	0.206	0.00216	0.02041	0.0448	0.00055	0.0233
2	0.0053	1	0.111	149.37	0.3925	0.0238	0.0606	0.224	0.00257	1	0.085	128.62	0.338	0.0166	0.0491	0.321	0.00527	0.02280	0.0230	0.00062	0.0171
3	0.0078	1	0.127	161.83	0.4252	0.0285	0.0670	0.273	0.00380	1	0.097	138.56	0.364	0.0199	0.0547	0.390	0.00777	0.02552	0.0194	0.00069	0.0159
4	0.0105	1	0.142	173.32	0.4554	0.0330	0.0724	0.319	0.00518	1	0.108	146.99	0.386	0.0229	0.0593	0.458	0.01073	0.02845	0.0170	0.00077	0.0151
5	0.0129	1	0.154	182.84	0.4804	0.0367	0.0764	0.351	0.00628	1	0.117	154.47	0.406	0.0257	0.0632	0.502	0.01285	0.03043	0.0162	0.00082	0.0147
6	0.0171	1	0.171	195.83	0.5146	0.0418	0.0813	0.408	0.00851	1	0.130	164.53	0.432	0.0295	0.0683	0.579	0.01708	0.03243	0.0140	0.00088	0.0136
7	0.0199	1	0.184	205.51	0.5400	0.0455	0.0843	0.436	0.00970	1	0.139	171.03	0.449	0.0321	0.0713	0.619	0.01955	0.03514	0.0139	0.00095	0.0136
8	0.0235	1	0.198	216.57	0.5691	0.0496	0.0871	0.474	0.01147	1	0.148	177.89	0.467	0.0348	0.0744	0.676	0.02333	0.03814	0.0132	0.00103	0.0133
9	0.0270	1	0.210	226.75	0.5958	0.0531	0.0891	0.508	0.01316	1	0.157	184.75	0.485	0.0375	0.0772	0.720	0.02642	0.04024	0.0127	0.00109	0.0130
10	0.0318	1	0.228	242.17	0.6363	0.0579	0.0910	0.550	0.01541	1	0.170	194.68	0.512	0.0414	0.0809	0.769	0.03019	0.04372	0.0127	0.00118	0.0127
11	0.0357	1	0.240	253.17	0.6652	0.0609	0.0916	0.585	0.01747	1	0.176	199.68	0.525	0.0433	0.0826	0.823	0.03456	0.04691	0.0121	0.00127	0.0124

Promedio **0.01497**

Tabla 3.9. Determinación de n de Manning para cada uno de los 11 gastos de prueba, a partir de los datos de gasto y tirantes de flujo medidos en el tramo 1-6 de la tubería ensayada de PEAD, de 12 pulgadas de diámetro, alojada en canal de pendiente horizontal.




No.	Q (m ³ /s)	Z ₁ (m)	Y ₁ (m)	θ ₁	P ₁	A ₁	Rh ₁	V ₁ (m/s)	V ₁ ² /2g (m)	Z ₆ (m)	y ₆ (m)	θ ₆	P ₆	A ₆	Rh ₆	V ₆ (m/s)	V ₆ ² /2g (m)	$h_f = Z_1 + Y_1 + V_1^2/2g - (Z_6 + Y_6 + V_6^2/2g)$	f=8gRS/V ²	S _f	n: Y 1-6
1	0.0028	1	0.096	137.74	0.3619	0.0196	0.0542	0.145	0.00107	1	0.081	124.79	0.328	0.0154	0.0469	0.185	0.00174	0.01483	0.0520	0.00048	0.0218
2	0.0053	1	0.111	149.37	0.3925	0.0238	0.0606	0.224	0.00257	1	0.092	134.46	0.353	0.0185	0.0524	0.288	0.00423	0.01683	0.0271	0.00055	0.0161
3	0.0078	1	0.127	161.83	0.4252	0.0285	0.0670	0.273	0.00380	1	0.105	145.00	0.381	0.0222	0.0582	0.350	0.00626	0.01904	0.0231	0.00062	0.0150
4	0.0105	1	0.142	173.32	0.4554	0.0330	0.0724	0.319	0.00518	1	0.117	154.47	0.406	0.0257	0.0632	0.409	0.00854	0.02114	0.0204	0.00069	0.0143
5	0.0129	1	0.154	182.84	0.4804	0.0367	0.0764	0.351	0.00628	1	0.127	162.22	0.426	0.0286	0.0672	0.450	0.01033	0.02295	0.0194	0.00075	0.0140
6	0.0171	1	0.171	195.83	0.5146	0.0418	0.0813	0.408	0.00851	1	0.141	172.94	0.454	0.0328	0.0722	0.521	0.01382	0.02469	0.0168	0.00080	0.0130
7	0.0199	1	0.184	205.51	0.5400	0.0455	0.0843	0.436	0.00970	1	0.151	180.56	0.474	0.0358	0.0755	0.554	0.01567	0.02653	0.0167	0.00086	0.0130
8	0.0235	1	0.198	216.57	0.5691	0.0496	0.0871	0.474	0.01147	1	0.161	188.18	0.494	0.0388	0.0785	0.605	0.01870	0.02927	0.0160	0.00095	0.0128
9	0.0270	1	0.210	226.75	0.5958	0.0531	0.0891	0.508	0.01316	1	0.171	195.83	0.515	0.0418	0.0813	0.645	0.02121	0.03095	0.0154	0.00101	0.0125
10	0.0318	1	0.228	242.17	0.6363	0.0579	0.0910	0.550	0.01541	1	0.184	205.90	0.541	0.0457	0.0844	0.697	0.02478	0.03463	0.0154	0.00113	0.0124
11	0.0357	1	0.240	253.17	0.6652	0.0609	0.0916	0.585	0.01747	1	0.193	212.98	0.560	0.0483	0.0863	0.738	0.02780	0.03667	0.0148	0.00119	0.0120

Promedio **0.01426**

Tabla 3.10. Determinación de n de Manning para cada uno de los 11 gastos de prueba, a partir de los datos de gasto y tirantes de flujo medidos en el tramo 2-6 de la tubería ensayada de PEAD, de 12 pulgadas de diámetro, alojada en canal de pendiente horizontal.

No.	Q (m ³ /s)	Z ₂ (m)	Y ₂ (m)	θ ₂	P ₂	A ₂	Rh ₂	V ₂ (m/s)	V ₂ ² /2g (m)	Z ₆ (m)	y ₆ (m)	θ ₆	P ₆	A ₆	Rh ₆	V ₆ (m/s)	V ₆ ² /2g (m)	h _f =Z ₂ +Y ₂ +V ₂ ² /2g -(Z ₆ +Y ₆ +V ₆ ² /2g)	f=8gRS/V ²	S _f	n: Y 2-6
1	0.0028	1	0.095	136.52	0.3587	0.0192	0.0535	0.148	0.00112	1	0.081	124.79	0.328	0.0154	0.0469	0.185	0.00174	0.01337	0.0586	0.00054	0.0224
2	0.0053	1	0.109	147.79	0.3883	0.0232	0.0597	0.230	0.00270	1	0.092	134.46	0.353	0.0185	0.0524	0.288	0.00423	0.01496	0.0301	0.00061	0.0164
3	0.0078	1	0.125	160.29	0.4212	0.0279	0.0662	0.279	0.00396	1	0.105	145.00	0.381	0.0222	0.0582	0.350	0.00626	0.01720	0.0260	0.00070	0.0155
4	0.0105	1	0.140	171.80	0.4514	0.0324	0.0717	0.324	0.00537	1	0.117	154.47	0.406	0.0257	0.0632	0.409	0.00854	0.01933	0.0233	0.00079	0.0149
5	0.0129	1	0.152	180.94	0.4754	0.0360	0.0757	0.358	0.00654	1	0.127	162.22	0.426	0.0286	0.0672	0.450	0.01033	0.02071	0.0219	0.00084	0.0145
6	0.0171	1	0.170	194.68	0.5115	0.0414	0.0809	0.413	0.00869	1	0.141	172.94	0.454	0.0328	0.0722	0.521	0.01382	0.02337	0.0199	0.00095	0.0140
7	0.0199	1	0.181	203.17	0.5338	0.0446	0.0836	0.445	0.01009	1	0.151	180.56	0.474	0.0358	0.0755	0.554	0.01567	0.02392	0.0188	0.00097	0.0134
8	0.0235	1	0.194	213.38	0.5607	0.0484	0.0864	0.485	0.01202	1	0.161	188.18	0.494	0.0388	0.0785	0.605	0.01870	0.02582	0.0176	0.00105	0.0130
9	0.0270	1	0.207	223.87	0.5882	0.0521	0.0886	0.517	0.01366	1	0.171	195.83	0.515	0.0418	0.0813	0.645	0.02121	0.02794	0.0174	0.00114	0.0130
10	0.0318	1	0.224	238.65	0.6271	0.0569	0.0907	0.560	0.01598	1	0.184	205.90	0.541	0.0457	0.0844	0.697	0.02478	0.03120	0.0173	0.00127	0.0129
11	0.0357	1	0.236	249.43	0.6554	0.0599	0.0915	0.595	0.01805	1	0.193	212.98	0.560	0.0483	0.0863	0.738	0.02780	0.03324	0.0168	0.00135	0.0126

Promedio **0.01478**

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 77 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

4 CONCLUSIONES

La n de Manning no es una constante para un tubo dado, como muchas veces se asume en la práctica, sino que depende del número de Reynolds, de la misma manera como el factor de fricción f de Darcy-Weisbach.




Los tubos de PVC de comportan como tubos hidráulicamente lisos, por lo que su factor de fricción f de Darcy-Weisbach puede ser obtenido por la Ecuación 3.10, y su n de Manning con flujo a tubo lleno por la Ecuación 3.13. Ambas ecuaciones fueron obtenidas en este proyecto, y comprobadas con las mediciones. Pueden aplicarse también para tubos hidráulicamente lisos de otros materiales.

Como lo indica la Ecuación 3.13, la n de Manning a tubo lleno también depende del diámetro, y es mayor para los diámetros mayores.

Los tubos de Polietileno de Alta Densidad con nombre “de pared exterior corrugada y pared interior lisa” están en realidad ligeramente ondulados en su pared interior. Su comportamiento hidráulico no obstante es muy similar a los tubos de PVC, y su factor de fricción f de Darcy-Weisbach puede ser obtenido por la Ecuación 3.10, y su n de Manning con flujo a tubo lleno por la Ecuación 3.13, con una ligera corrección dada por la Ecuación 3.14. La explicación de este comportamiento similar se da por la teoría de H. Morris, que postula que los tubos con rugosidades asiladas se comportan con pseudo lisos hidráulicamente.




Se requiere de trabajo futuro para obtener valores precisos del coeficiente de arrastre C_D para la geometría de pared interior ligeramente ondulada de los tubos de Polietileno de Alta Densidad.

Con flujo a superficie libre, en tubería de PEAD de 12 pulgadas de diámetro, probada con 11 diferentes caudales, de 0.00284 m³/s a 0.03565 m³/s, con pendiente horizontal, los perfiles experimentales de FGV fueron comparados con perfiles teóricos para determinar la n de Manning, obteniendo un valor promedio de 0.01245. Evaluando directamente en tramos del perfil experimental, a través de la pendiente de energía, el promedio resulta de 0.01333. La Universidad de Utah, en tuberías de PEAD de 12, 15 y 18 pulgadas de diámetro, obtuvo valores promedio de 0.0119, 0.0148, y 0.0123 respectivamente. La Universidad de los Andes, que realizó pruebas en tubería de 600 mm, obtuvo un valor de 0.0123±0.0001, que según lo que reportan explica el 100% de posibilidades de caudal y pendiente, para caudales entre 9.72 l/s y 97.2 l/s.

 	ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 78 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1

5 Referencias

- Barfuss, Steven L. (1988). *Friction factor tests on High Density Polyethylene Pipe-Hydraulics Reporte No. 204*. Utah: Utah Water Research Laboratory-Utah State University Foundation.
- Blake P. Tullis. (2012). *Hydraulic Loss Coefficients for Culverts, REPORT 734, NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM*,. Utah: Utah State University.
- Calomino, F. et al. (2015). “Experimental and Numerical Study on the Flow Field and Friction Factor in a Pressurized Corrugated Pipe”. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, June 9, 2015*,, DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1.
- Chow, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. Illinois: McGraw-Hill.
- CIACUA. (2009). *Determinación del coeficiente n de Manning y de la rugosidad absoluta Ks de la tubería de alcantarillado ADS 600 mm (interior liso)*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental- Centro de Investigación en Acueductos y alcantarillados (CIACUA).
- H.M. Blackburn¹, A. Ooi² and M.S. Chong. (2007). “The effect of corrugation height on flow in a wavy-walled pipe”, . *16th Australasian Fluid Mechanics Conference, Crown Plaza, Gold Coast, Australia, 2-7 December*,, p. 559-566.
- Henry M. Morris, et al. (1972). *Applied hydraulics in engineering, 2a edición*,. New York, N.Y.: John Wiley.
- ISO 1438/1. (1980). Water flow measurement in open channels using weirs and venturi flumes-Part 1: Thin-plate weirs. *Standar, International*. Switzerland: ISO.
- Morris, H. M. (1959). “Design methods for flow in rough conduits”. *J. Hydraul. Div.*, 85(HY7), , 43–62.
- O. Giustolisi et al. (2008). “Determination of friction factor for corrugated drains”,. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Water Management 161, February 2008, Issue WMI*,, p. 31–42, doi: 10.1680/wama.2008.161.1.31.
- Pérez Ostos, L. G.-U. (2015). *Hidra-Bas Versión 1.0.0-Sistema computacional de hidráulica de canales-Tesis de maestría-DEPFI UNAM Campus Morelos*. Jiutepec, Morelos: UNAM.
- Swamee, P.K.; Jain, A.K. (1976). "Explicit equations for pipe-flow problems" . *Journal of the Hydraulics Division*. , 102 (5): 657–664.

 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES		ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II	 IMTA INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Página 79 de 79	México, 2016	Clave: HC1610.1	

6 ANEXOS DIGITALES

6.1 HOJAS DE CÁLCULO

6.2 ARTÍCULOS