

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y
Ambiental

Centro de Investigaciones en Acueductos
y Alcantarillados
CIACUA



Universidad
de los Andes

PAVCO S.A.
Una empresa AMANCO



CÁTEDRA PAVCO

**Determinación Experimental de la Capacidad de
Conducción Máxima de Tuberías de Drenaje de 4”**

Informe Final

Bogotá, Agosto 10 de 2005

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	OBJETIVOS.....	1
1.2	ANTECEDENTES.....	1
1.3	EQUIPO DE TRABAJO.....	2
1.3.1	PAVCO S.A.....	2
1.3.2	CIACUA.....	2
2	DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	3
2.1	MODELO FÍSICO.....	3
2.2	MODELO MATEMÁTICO.....	6
2.2.1	Ley de fricción.....	7
2.2.2	Ecuación de Manning.....	9
3	DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.....	11
3.1	METODOLOGÍA DE TOMA DE DATOS.....	11
3.2	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	12
3.2.1	Procedimiento general de calibración.....	12
3.2.2	Proceso de Agregación de los coeficientes para cada pendiente.....	18
4	RESULTADOS OBTENIDOS.....	19
4.1	N DE MANNING.....	19
4.2	RUGOSIDAD ABSOLUTA K_s	22
4.3	CAPACIDAD MÁXIMA DE LA TUBERÍA.....	24
4.3.1	Utilizando el valor del n de Manning.....	24
4.3.2	Utilizando la rugosidad absoluta k_s	25
5	CONCLUSIONES.....	27

1 INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

- Determinar el valor del Coeficiente de Rugosidad Absoluta k_s y el valor del n de Manning a flujo lleno, para una tubería de drenaje de 4", mediante metodologías experimentales y el análisis de la información obtenida.
- Diseñar un montaje experimental en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Los Andes, que permita realizar las mediciones y cumplir con el objetivo principal de la investigación.
- Garantizar la hermeticidad del montaje, ya que lo que se pretende es determinar la capacidad de la tubería a flujo lleno, por lo que el caudal debe conservarse a lo largo de la tubería para poder realizar los cálculos.
- Analizar la veracidad de los resultados tanto de k_s como del n de Manning y el sentido físico que éstos puedan tener en aplicaciones prácticas.

1.2 ANTECEDENTES

Como parte de las investigaciones que se realizan en el grupo CIACUA (Centro de Investigaciones en acueductos y alcantarillados de la Universidad de los Andes) a través de la Cátedra **PAVCO**, se encuentra la determinación de la rugosidad de diferentes tuberías, mediante el uso de diferentes coeficientes como la rugosidad absoluta k_s del material o el n de Manning para el caso de tuberías que funcionan a flujo libre o a flujo lleno sin presurizarse.

De esta forma, se ha determinado la rugosidad para tuberías de alcantarillado en productos como W-RETEN para diámetros de 6", NOVAFORT para diámetros desde 6" a 16", tuberías de gres y tuberías NOVALOC de 24".

En tuberías de drenaje no se ha realizado ninguna investigación para determinar la capacidad de las tuberías a través de los coeficientes de rugosidad mencionados, lo que significa que el presente informe constituye una primera aproximación a los valores tanto del coeficiente de Manning a flujo lleno como de la rugosidad absoluta de esta tubería.

1.3 EQUIPO DE TRABAJO

1.3.1 PAVCO S.A.

Presidente:	Mauricio Nieto
Gerente general Tubosistemas:	José María Escovar
Gerente de Mercadeo:	Jacqueline Picón
Ingenieros división Tubosistemas:	Enrique González Inés Elvira Wills Norma Lucía Rodríguez
Asistente de Mercadeo:	Zoraida Castro

1.3.2 CIACUA

Director Cátedra PAVCO:	Juan G. Saldarriaga Valderrama
Asistentes Graduados:	Paula Reyes del Toro Juan Fernando Morales Eduard Cadavid
Coordinadora de Operaciones:	Mireya Preafán

2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

En el presente capítulo se hará una descripción del modelo físico utilizado para determinar la capacidad hidráulica de la tubería de drenaje, y una descripción del modelo matemático que se utilizó para procesar los datos experimentales y de ésta forma determinar los coeficientes de rugosidad de la tubería que permiten calcular el caudal máximo que puede ser transportado por ésta.

2.1 MODELO FÍSICO

El modelo para determinar la capacidad hidráulica de la tubería de drenaje de 4" fabricada por PAVCO, se encuentra ubicado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes y consta de una tubería de 12 m de largo aproximadamente conectada en su extremo de aguas arriba con un tanque de alimentación de agua.

Esta tubería se encuentra localizada dentro de una tubería Novafort de 16" que a su vez se encuentra soportada en una cercha metálica con la que se puede variar la pendiente. Aguas abajo de la tubería se encuentra un canal de conducción del agua hacia el tanque subterráneo, de donde es bombeada nuevamente hacia el tanque de aguas arriba.

La descripción anterior se puede visualizar en la Figura 2-1, en donde se muestra un esquema con la vista lateral del montaje.

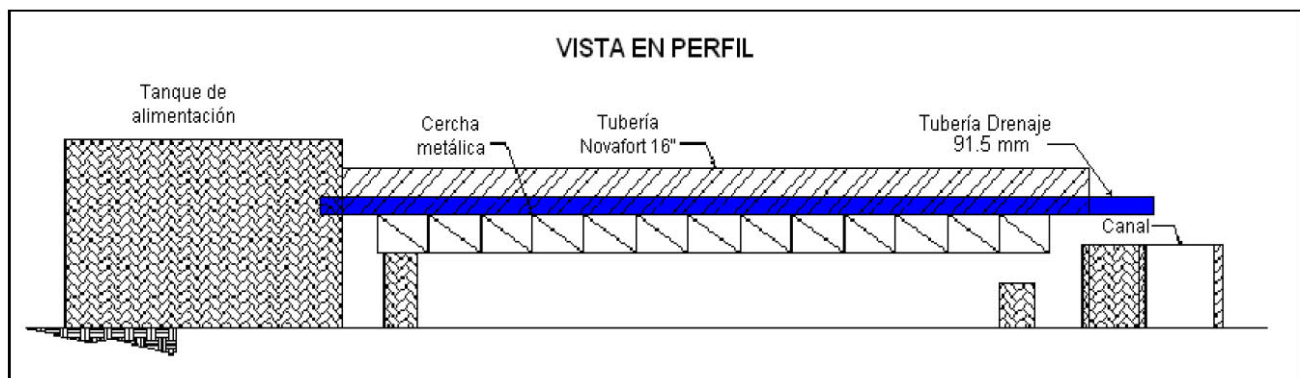


Figura 2-1 Vista lateral del montaje

La tubería que se utilizó es una tubería de drenaje de 91.5 mm de diámetro interno y 98.7 mm de diámetro medido en los valles de las rugosidades, fabricada especialmente para este ensayo sin las aberturas tradicionales de una tubería de drenaje, con el fin de determinar la capacidad máxima de conducción para diferentes pendientes. Como se dijo anteriormente, ésta tubería fue introducida dentro de una tubería Novafort de 16" con el fin de garantizar su estabilidad y mantener una pendiente constante en toda su longitud, como se muestra en la Figura 2-2.



Figura 2-2 Vista del extremo de aguas abajo del montaje

A lo largo de los 12 metros que tiene la tubería, se instalaron piezómetros para leer el perfil de flujo o la presión piezométrica cuando la tubería estuviera presurizada. El espaciamiento entre los piezómetros fue mucho menor en la zona de aguas abajo de la tubería con el fin de determinar mejor la forma del perfil cerca de la caída. En la Figura 2-2 se observa que la tubería Novafort cuenta con unas aberturas en la parte inferior por donde salen los piezómetros hacia un tablero de medición. Adicionalmente, por estas aberturas se instalaron unos dispositivos que funcionaron como pesas con el fin de mantener la tubería de drenaje en la parte inferior de la tubería Novafort, y así garantizar también la rectitud longitudinal de la tubería.

Para la medición del caudal, se utilizó la técnica volumétrica, midiendo cuánto volumen de agua sale por unidad de tiempo. Para esto, se diseñó un mecanismo de llenado de una caneca de 48 L como se muestra en la Figura 2-3, y se tomaban varios tiempos de llenado, para luego calcular el caudal promedio que salía por la tubería. Este proceso garantiza una alta precisión en las medidas de caudal.



Figura 2-3 Medición volumétrica del caudal

Este sistema de medición fue implementado pues la precisión con la que mide un vertedero como se realiza tradicionalmente, no es suficiente para aforar los caudales que salen por esta tubería, que en algunos casos pueden ser muy pequeños.

Por último, fue necesario leer la cabeza de entrada de agua en el tanque de aguas arriba, pues la tubería funciona como un culvert con control a la entrada. De esta forma, se instaló una regla por encima de la cota clave de la tubería para leer la profundidad del agua por encima de ésta. En la Figura 2-4 se observa el extremo de aguas arriba de la tubería con la regla instalada.

Para garantizar la hermeticidad a la entrada, se colocó una tapa de acrílico sobre la tubería Novafort, con una abertura para la tubería de drenaje en el fondo de ésta. Todos los bordes fueron sellados con silicona, garantizando de esta forma que la única entrada de agua al montaje fuera por la tubería de drenaje. Por estar sin huecos, el caudal a la entrada se conservó a lo largo de la tubería.



Figura 2-4 Vista del extremo de aguas arriba del montaje

2.2 *MODELO MATEMÁTICO*

La capacidad máxima de conducción de la tubería de drenaje sin presurizarse, corresponde al caso en el que la profundidad de flujo es muy cercana al diámetro de la tubería, funcionando como un alcantarillado bajo flujo uniforme, es decir, con una profundidad constante, y en donde la pendiente de fricción, es decir, la pendiente de la lámina de agua, es equivalente a la pendiente del fondo de la tubería.

Mediante el modelo de laboratorio utilizado, no es posible garantizar un flujo uniforme pues la longitud utilizada es muy baja. Sin embargo, a través de las pruebas es posible encontrar los coeficientes de rugosidad de la tubería (n de Manning y k_s), para luego calcular teóricamente la capacidad máxima alcanzada por ésta.

Analizar los perfiles de flujo gradualmente variado en esta tubería es muy difícil debido a la turbulencia que se genera y a las ondas de diamante producto del choque entre el fluido y la pared rugosa de la tubería. En la Figura 2-5 se observan estos dos fenómenos.



Figura 2-5 Turbulencia del flujo

Debido al problema mencionado, la forma de determinar los coeficientes de rugosidad de la tubería fue presurizándola y calibrando el coeficiente que más se ajustara al perfil piezométrico generado, tanto para el caso del n de Manning como para el k_s . Por lo tanto, la descripción matemática que se realiza a continuación se basa en el supuesto de que la tubería se encuentra presurizada y por lo tanto no se forman perfiles de flujo gradualmente variado, excepto en un pequeño tramo cerca del borde de aguas abajo.

2.2.1 Ley de fricción

Mediante el uso de la ecuación de Darcy – Weisbach, se pueden determinar las pérdidas de energía en un tramo de longitud conocida como sigue:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad [2-1]$$

donde,

h_f es la pérdida de energía en un tramo de longitud L (m)

f es el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach.

L es la longitud del tramo (m)

D es el diámetro de la tubería a flujo lleno (m).

$\frac{V^2}{2g}$ es la cabeza de energía (m)

El coeficiente de fricción f se calcula mediante el uso de la ecuación de Colebrook – White, en donde se muestra que dicho factor es función tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa del material. El cálculo se realiza por métodos iterativos con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{k_s}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right] \quad [2-2]$$

donde,

f es el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach.

k_s es el coeficiente de rugosidad absoluta (m)

D es el diámetro de la tubería a flujo lleno (m).

Re es el número de Reynolds.

Para esta ecuación, los términos que se encuentran dentro del logaritmo, representan

dos fenómenos importantes: El primer término $\left[\frac{k_s}{3.7D} \right]$ representa el Flujo Turbulento

Hidráulicamente Rugoso (FTHR), el cual se caracteriza por ser un flujo donde el coeficiente de rugosidad tiene un efecto importante en la hidráulica y el número de Reynolds es lo suficientemente grande (Flujo turbulento) para hacer al segundo término

numéricamente despreciable. El segundo término $\left[\frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right]$ representa el Flujo

Turbulento Hidráulicamente Liso (FTHL), donde el coeficiente de rugosidad no tiene un efecto significativo sobre la hidráulica y el número de Reynolds es lo suficientemente bajo como para hacer despreciable al primer término con relación al segundo.

El número de Reynolds por su parte se define como:

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \quad [2-3]$$

donde,

Re es el número de Reynolds

V es la velocidad del flujo (m/s)

D es el diámetro a tubo lleno (m)

ν es la viscosidad cinemática (m²/s). Tomando como valor 1.14×10^{-6} m²/s.

Mediante el uso de las ecuaciones anteriores es posible determinar la pérdida de energía por unidad de longitud (Pendiente de fricción), para una rugosidad dada en términos del valor del coeficiente de rugosidad absoluta k_s .

2.2.2 Ecuación de Manning

La ecuación de Manning permite determinar el caudal que fluye por una tubería o un canal abierto a flujo libre, como función de las condiciones del flujo, evaluadas por medio del área mojada y el radio hidráulico; como función de las condiciones topográficas de la tubería, a través del término de la pendiente del terreno; y como función del coeficiente de Manning (n), que es una medida indirecta de la rugosidad del material y de cómo ésta afecta las pérdidas de energía.

La ecuación de Manning se escribe como:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad [2-4]$$

donde,

Q es el caudal (m³/s)

A es el área mojada de la sección transversal (m²)

R es el radio hidráulico (m)

S es la pendiente del terreno (m/m)

n es el coeficiente de Manning

Cuando se tiene la condición de flujo lleno bajo la suposición de flujo uniforme se tienen las siguientes expresiones:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad [2-5]$$

$$R = \frac{\frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = \frac{D}{4} \quad [2-6]$$

$$S_0 = S_f = \frac{h_f}{L} \quad [2-7]$$

El área y el radio hidráulico se calculan como en el caso de tuberías presurizadas, y se tiene que la pendiente del fondo del canal es igual a la pendiente de la superficie del agua y por lo tanto a la pendiente de fricción, que es la caída de fricción (h_f) entre la distancia en que se produce dicha caída. Reemplazando estas expresiones en la ecuación de Manning se tiene que:

$$Q = \frac{1}{n} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \left(\frac{D}{4} \right)^{2/3} \left(\frac{h_f}{L} \right)^{1/2} \quad [2-8]$$

Como se puede observar, el resultado del caudal cuando se tiene flujo uniforme a capacidad máxima, es independiente de la pendiente del fondo del canal o tubería, y tiene una forma similar a la ecuación de Darcy – Weisbach, en donde la caída de presión h_f depende de la velocidad (Q/A), de la longitud, del diámetro de la tubería y de un factor que representa la rugosidad del material que en este caso es el n de Manning.

3 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS

En el presente capítulo se explicarán las metodologías que se llevaron a cabo tanto para la toma de los datos experimentales, como para el procesamiento de éstos hasta obtener unos valores de n de Manning y k_s que se ajustaran a los perfiles obtenidos.

3.1 METODOLOGÍA DE TOMA DE DATOS

Cada una de las pruebas se llevó a cabo siguiendo el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 3-1:

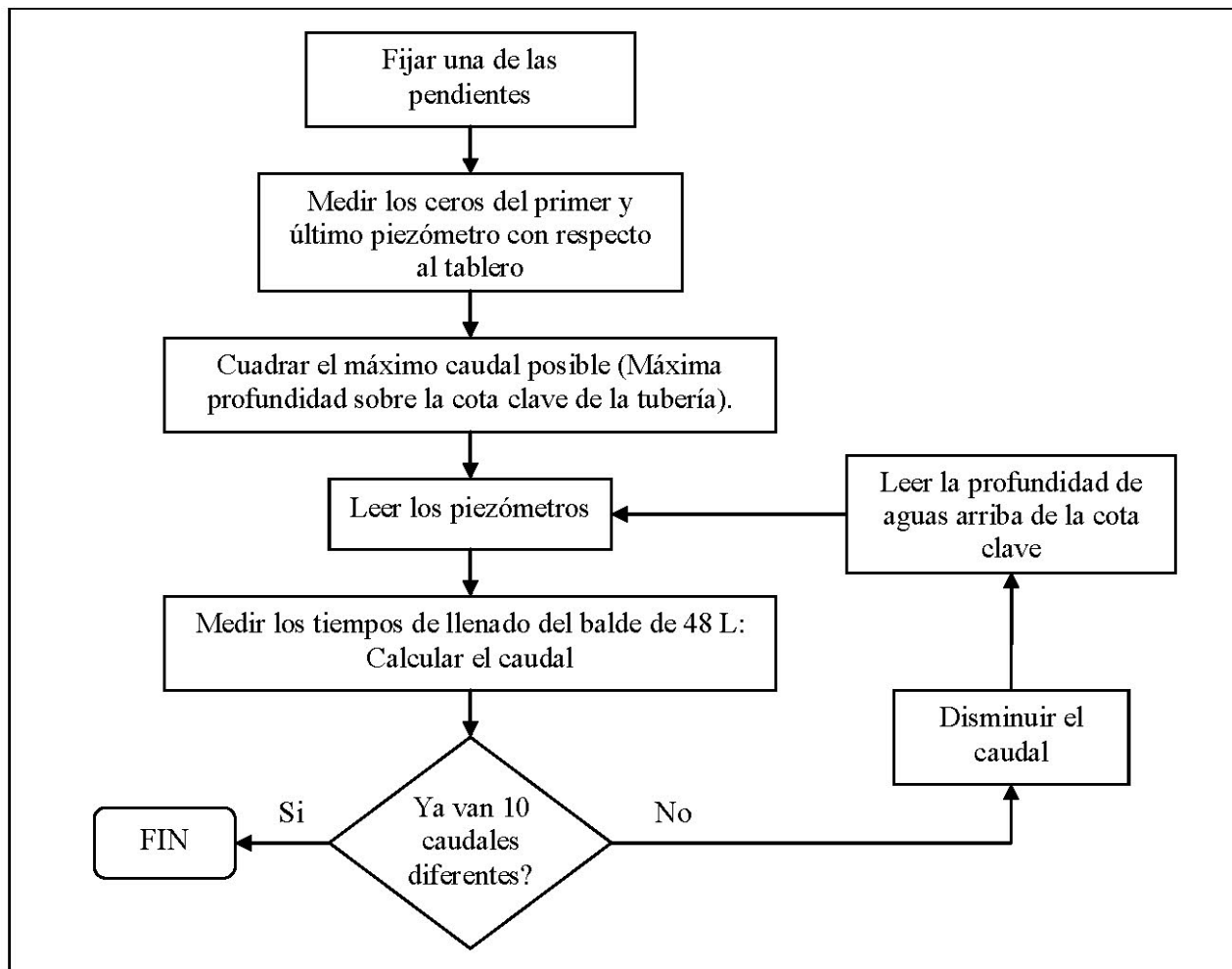


Figura 3-1 Diagrama de flujo para la toma de datos

Esta metodología se llevó a cabo para dos pendientes: de 0.5% y 1%. Como los análisis que se llevaron a cabo fueron independientes de la pendiente, se realizó una tercera prueba con una pendiente intermedia entre estos dos valores con el fin de corroborar los resultados obtenidos.

3.2 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El objeto de la metodología de cálculo es encontrar unos coeficientes de rugosidad (n de Manning y k_s) que permitan describir, de forma adecuada, la mayor cantidad de condiciones de caudal y pendiente posibles, variando estos dos coeficientes dentro de un rango de posibles valores hasta obtener el de mejor ajuste.

El rango dentro del cual se espera que se encuentre el n de Manning se fijó entre 0.01 y 0.015, mientras que para el k_s se utilizó un rango entre 5×10^{-4} y 5×10^{-3} .

3.2.1 Procedimiento general de calibración

A continuación se describirá el procedimiento general para la calibración de cualquiera de los dos coeficientes a partir de los datos experimentales del perfil de flujo. Los pasos generales son:

1. Obtención de datos experimentales.
2. Visualización del perfil, ya sea presurizado o bajo flujo gradualmente variado.
3. Para los perfiles presurizados:
 - a. Cálculo de los perfiles teóricos de flujo.
 - b. Calibración del coeficiente óptimo para cada prueba.
 - c. Determinación de un óptimo global que se ajuste a todas las pruebas de una misma pendiente.

En la Figura 3-2 se observa el diagrama de flujo para calibrar los coeficientes de rugosidad de la tubería (n de Manning ó k_s) siguiendo los pasos generales descritos anteriormente.

La diferencia entre la calibración de los dos coeficientes es que para determinar el k_s teórico se utiliza la ecuación de Darcy – Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook – White, mientras que para el caso del n de Manning se utiliza la ecuación de Manning bajo la suposición de flujo uniforme con la tubería a flujo lleno. Es por esta razón que sólo se utilizaron aquellos perfiles que tuvieran al menos una parte presurizada. La escogencia de los perfiles que iban a ser calibrados se realizó gracias al paso 2; es decir, a través de la visualización de los datos experimentales.

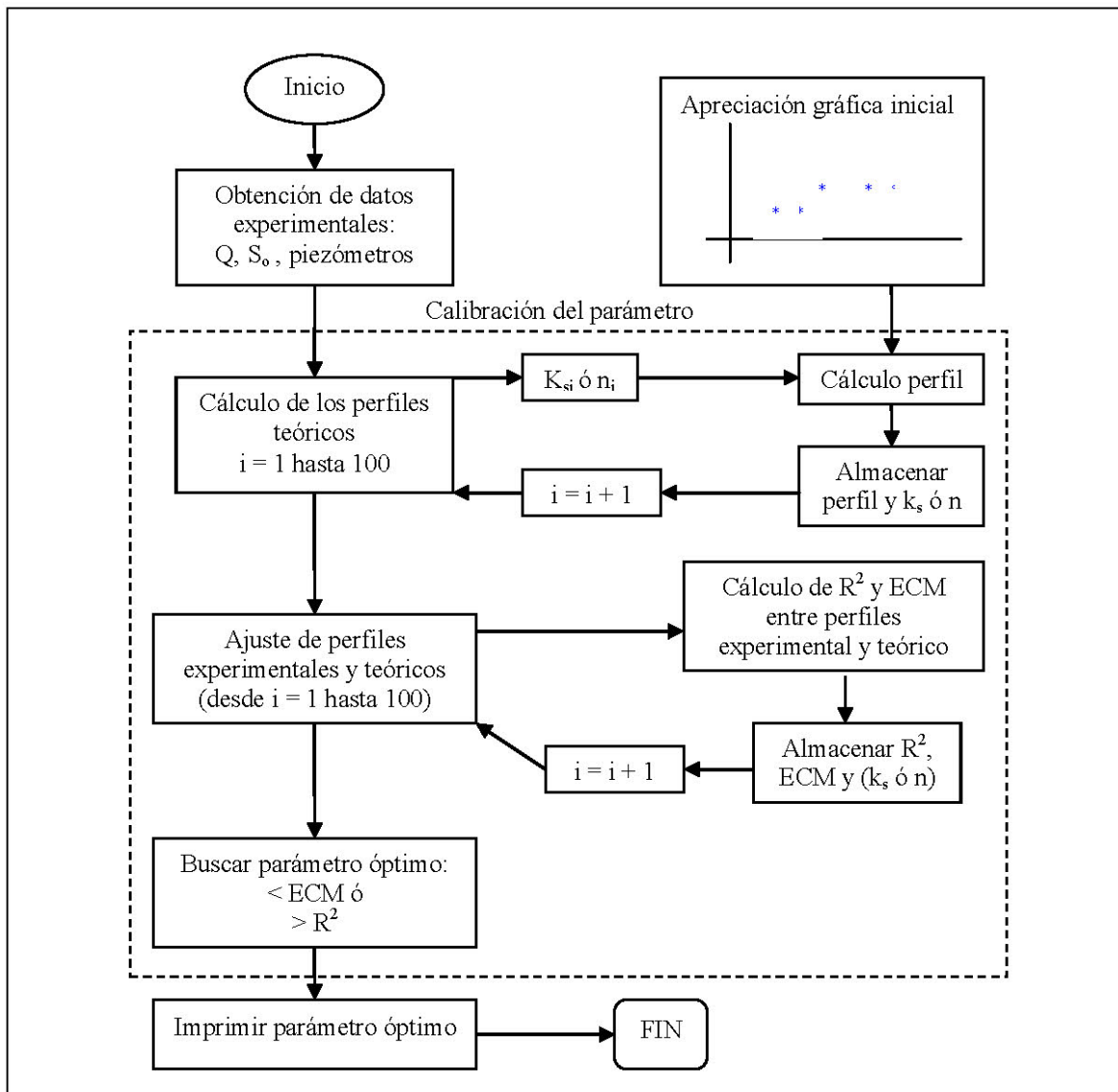


Figura 3-2 Procedimiento general de calibración para cada prueba

3.2.1.1 Visualización de los perfiles de flujo

Teniendo los datos experimentales, es decir, las medidas de caudal, pendiente y lecturas de los piezómetros a lo largo de la tubería, es posible graficar el perfil experimental del flujo, relacionando todos los datos con un mismo nivel de referencia o *datum*.

En la Figura 3-3 se observa un perfil piezométrico típico utilizado para el análisis de los resultados, en donde las alturas piezométricas superan la cota clave de la tubería, lo que significa que la tubería se encuentra presurizada. Cerca de la salida de la tubería, el flujo se despresuriza formando un pequeño perfil de caída. Estos últimos datos por lo tanto no fueron utilizados para la determinación del perfil teórico y el posterior ajuste con el experimental.

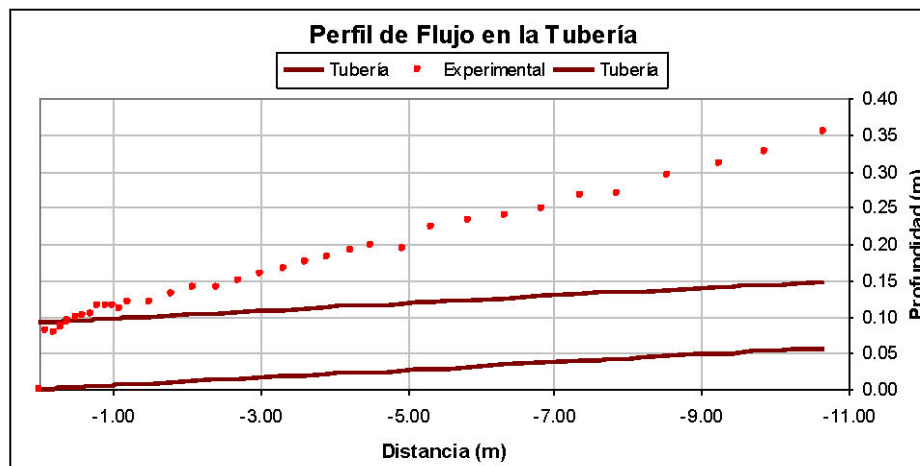


Figura 3-3 Perfil de flujo presurizado para pendiente de 5%

Como se explicó anteriormente, las pruebas que formaron un perfil a flujo libre (Flujo Gradualmente Variado) dentro de la tubería no pudieron ser utilizadas, debido a que la precisión con la que se leían los piezómetros no fue la adecuada. Adicionalmente, el perfil de flujo generado fue un perfil poco común, influenciado por una gran pérdida a la entrada de la tubería, como se muestra en la Figura 3-4.

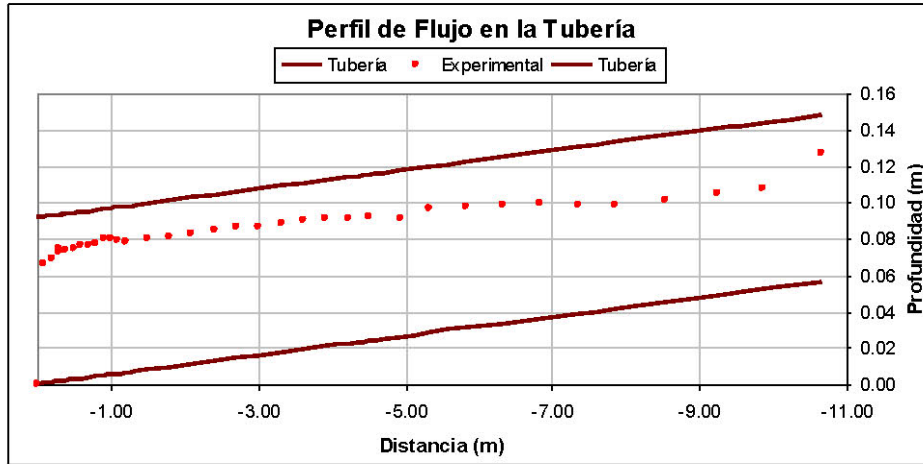


Figura 3-4 Perfil de flujo libre para la pendiente del 5%

A través de la visualización de los perfiles es posible descartar aquellos que tengan una forma similar al de la Figura 3-4, mientras que se puede determinar a partir de qué piezómetro se utiliza el perfil presurizado como el que se muestra en la Figura 3-3.

3.2.1.2 Indicadores de Ajuste

Error Cuadrático Medio: Es una medida media de la diferencia entre los valores calculados y los valores observados. Su formulación es:

$$ECM_k = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad [3-1]$$

donde

Y_i es la profundidad observada en el piezómetro i de la prueba k .

\hat{Y}_i es la profundidad calculada en el piezómetro i de la prueba k .

P es el total de piezómetros utilizados en la prueba k .

Eficiencia: Es la medida del porcentaje de explicación del parámetro sobre los datos observados, es una versión normalizada del Error Cuadrático Medio, se define como:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^P (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^P (Y_i - Y_i^*)^2} \quad [3-2]$$

donde

Y_i es la profundidad observada en el piezómetro i de la prueba k .

\hat{Y}_i es la profundidad calculada en el piezómetro i de la prueba k .

Y_i^* es la profundidad promedio de los datos experimentales de la prueba k .

P es el total de piezómetros utilizados en la prueba k .

Así el problema de la calibración se formula como sigue:

$$\text{Max } R^2 \text{ (Min ECM)}$$

3.2.1.3 Resumen de la calibración de un coeficiente bajo una condición Caudal – Pendiente

La metodología para la determinación del valor óptimo del Coeficiente por prueba (Prueba: Combinación Caudal – Pendiente), se resume de la siguiente manera:

1. Obtención de datos experimentales. En este primer paso se registran los datos de caudal, pendiente y lectura de profundidad de agua en los piezómetros que determinarán el perfil experimental.
2. Cálculo del perfil teórico para la tubería con un método de solución ya sea para determinar k_s , mediante las ecuaciones de Darcy – Weisbach y Colebrook – White, ó para calcular el n mediante la ecuación de Manning y un rango de 100 valores para cada uno de los coeficientes. Cada combinación de Caudal – Pendiente – Coeficiente de Rugosidad, describe un perfil; entonces se tiene para cada prueba y cada coeficiente 100 perfiles teóricos.
3. Comparación de cada perfil teórico con el perfil experimental, teniendo como indicadores de ajuste el Error cuadrático medio (ECM) y la Eficiencia media (R^2).

4. Escogencia del Coeficiente de Rugosidad que genere el mejor ajuste entre el perfil teórico y el experimental.

3.2.2 Proceso de Agregación de los coeficientes para cada pendiente

Para la escogencia de los coeficientes globales, que presentaran un mejor ajuste con todas las pruebas analizadas, se utilizó cada uno de los perfiles teóricos pero esta vez comparándolo con todos los perfiles experimentales a la vez.

Se cuantificaron medidas de bondad y ajuste ponderadas de cada uno de los perfiles teóricos generados con respecto a todos los perfiles experimentales utilizados en cada una de las pendientes. Los criterios de agregación son el promedio muestral de los indicadores y el promedio ponderado de los mismos. Como resultado de este segundo proceso se obtiene un único valor óptimo que ajusta de manera más adecuada a todas las pruebas de una misma pendiente.

4 RESULTADOS OBTENIDOS

Luego de realizar la metodología de análisis descrita en el capítulo anterior, se encontraron valores óptimos de n de Manning y de la rugosidad absoluta k_s de la tubería de drenaje de 4" sin huecos, para las pendientes analizadas. Estos valores son:

- n de Manning = 0.0127
- $k_s = 1.45$ mm

Para realizar los cálculos de los perfiles teóricos, se utilizó el diámetro interno mayor, es decir, la distancia entre los valles internos de la tubería de drenaje, con el fin de representar la curvatura del material como una macro rugosidad explicada a través de los dos coeficientes anteriores.

A continuación se describen con más detalle los resultados encontrados para cada uno de los coeficientes.

4.1 N DE MANNING

Cada una de las pruebas de laboratorio fue calibrada con el fin encontrar un valor óptimo de n de Manning que ajustara el perfil teórico al experimental con el mínimo error cuadrático medio o lo que es lo mismo, con la máxima correlación o R^2 . En el ANEXO 1 se presentan los resultados de la calibración del n de Manning para la pendiente del 0.5%. En el ANEXO 2 por su parte se presentan los resultados para la pendiente del 1%.

En una prueba típica se obtienen los resultados que se observan en la Figura 4-1, en donde se generan dos tipos de gráficas: La primera de ellas corresponde al perfil que se forma utilizando el n de Manning óptimo, y cómo éste representa de manera muy precisa el perfil experimental. En la segunda gráfica se esquematizan las medidas de bondad y ajuste para los 100 n de Manning evaluados. En esta segunda gráfica se

detecta fácilmente el valor de n óptimo, que corresponde al pico de la curva roja (máximo R^2), que coincide con el punto más bajo de la curva azul (mínimo ECM).

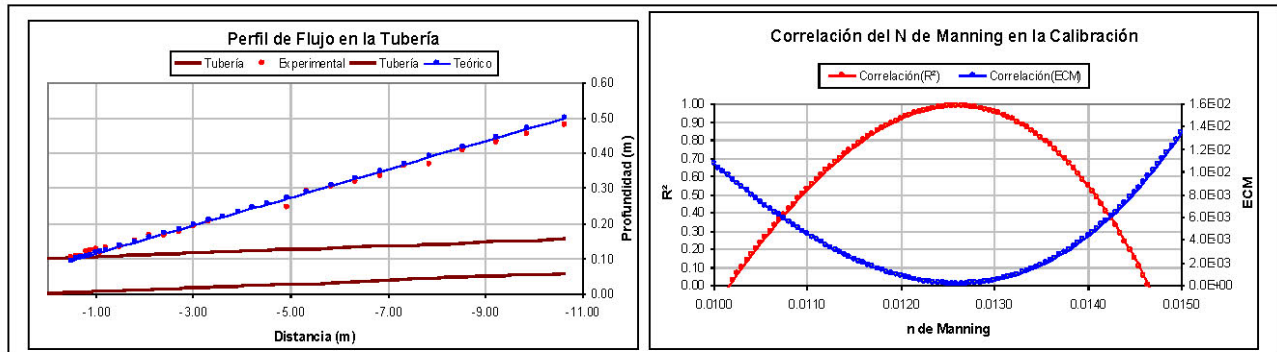


Figura 4-1 Prueba típica para determinación del n de Manning

En la Tabla 4-1 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para las pruebas presurizadas de las dos pendientes, 0.5% y 1%. Como se dijo anteriormente, estos resultados y sus gráficas correspondientes se encuentran en los anexos 1 y 2.

Tabla 4-1 Resumen de los valores de n de Manning óptimos para cada una de las pruebas

Prueba No.	Pendiente	
	0.5%	1%
1	0.0126	0.0133
2	0.0135	0.0122
3	0.0122	0.0116
4	0.0125	0.0118
5	0.0117	-----

Con el fin de encontrar un valor único de n de Manning que sea representativo de la tubería evaluada para cualquier condición de caudal y pendiente, se realizó un nuevo proceso de calibración, pero el valor que se escogió fue el que tuviera el mínimo ECM ponderado. Para esto, se evaluó el perfil teórico que se forma con cada uno de los valores del coeficiente dentro del rango esperado, con respecto a todos los perfiles de una misma pendiente.

En la Figura 4-2 se muestra la gráfica ponderada para las 5 pruebas de la pendiente de 0.5%, calculando el ECM de dos maneras: Calculando la eficiencia media ó calculando la eficiencia ponderada. Las dos curvas de la gráfica muestran aproximadamente un mismo valor óptimo de n de Manning, que es $n = 0.01275$

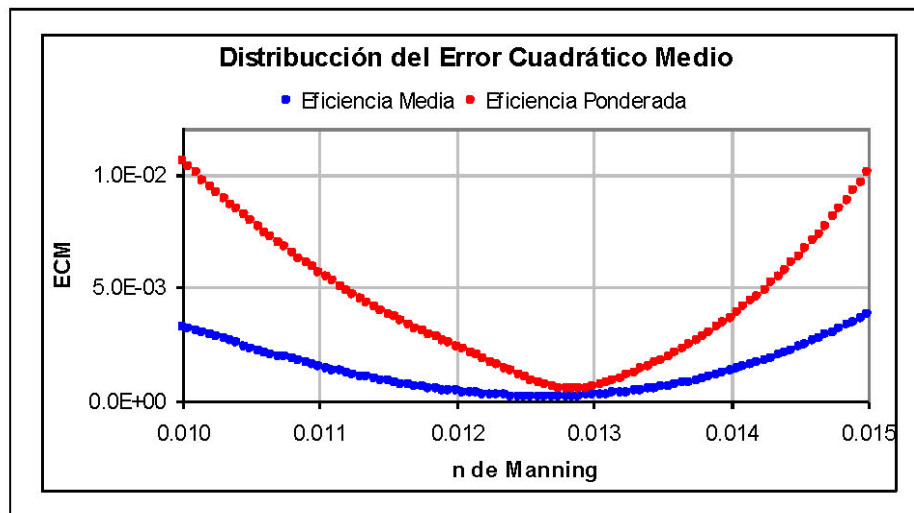


Figura 4-2 Resultados ponderados para la pendiente de 0.5%

De igual forma, en la Figura 4-3 se presenta la gráfica de ECM para la pendiente del 1%, tanto para la eficiencia media como para la ponderada. En este caso, el valor que mejor se ajustó a las 4 pruebas de esta pendiente fue $n = 0.01273$

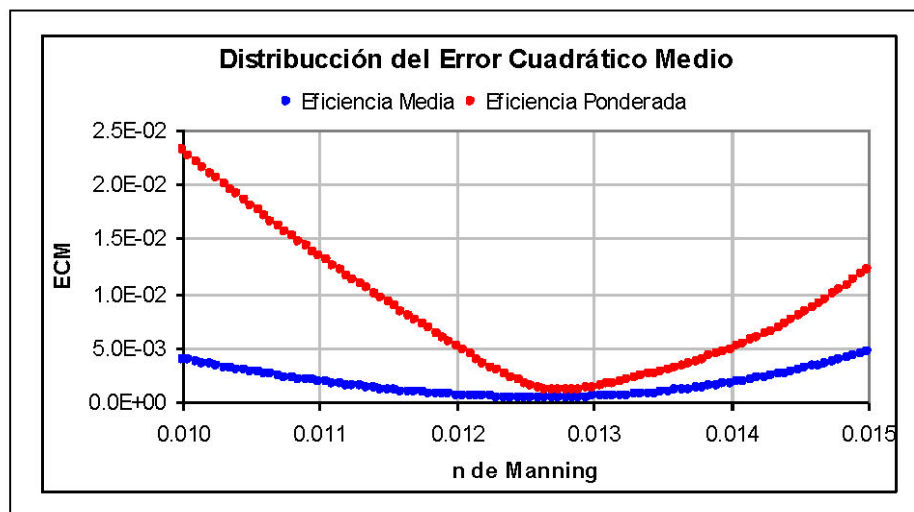


Figura 4-3 Resultados ponderados para la pendiente del 1%

Es importante notar que a pesar de que los valores óptimos individuales de cada prueba son más bajos que los encontrados al ponderar cada pendiente, éstos últimos son más representativos ya que se ajustan con una buena confiabilidad a la totalidad de las pruebas. Por otro lado, se puede ver que los resultados ponderados para las dos pendientes son muy similares, por lo que el valor del n de Manning para la tubería de drenaje sin huecos se puede calcular como el promedio aritmético de estos dos resultados, dando como valor único un n de Manning igual a 0.01274.

4.2 RUGOSIDAD ABSOLUTA K_s

La determinación de la rugosidad absoluta de la tubería de drenaje es análoga a la descrita anteriormente para el n de Manning. La única diferencia es la ecuación que se utiliza para calcular el perfil teórico.

En el ANEXO 3 se muestran los resultados de las cuatro pruebas presurizadas para la determinación de la rugosidad absoluta de la tubería con una pendiente de 0.5%. En el ANEXO 4 por su parte se presentan los resultados de la pendiente del 1%.

En la Tabla 4-2 se presentan los valores de k_s óptimos encontrados para cada una de las pruebas presurizadas de las dos pendientes. Como se observa, los resultados obtenidos son del orden de 10^{-3} lo que garantiza que la tubería es bastante rugosa obligando a que el flujo sea turbulento hidráulicamente en transición o rugoso. Esto valida el uso de la ecuación completa de Colebrook – White, pues tanto el valor del número de Reynolds como la rugosidad del material afectan las pérdidas de energía que se producen en la tubería.

Tabla 4-2 Resumen de los valores de rugosidad absoluta k_s en mm para las dos pendientes

Prueba No.	Pendiente	
	0.5%	1%
1	1.36×10^{-3}	1.85×10^{-3}
2	1.94×10^{-3}	1.13×10^{-3}
3	1.09×10^{-3}	7.70×10^{-4}
4	1.27×10^{-3}	9.11×10^{-4}

Nuevamente, con el fin de obtener un único valor de k_s que sea representativo para la mayor cantidad de pruebas se realizó una prueba de calibración conjunta por pendiente. Los resultados se muestran en la Figura 4-4 para la pendiente de 0.5%, y en la Figura 4-5 para la pendiente del 1%.

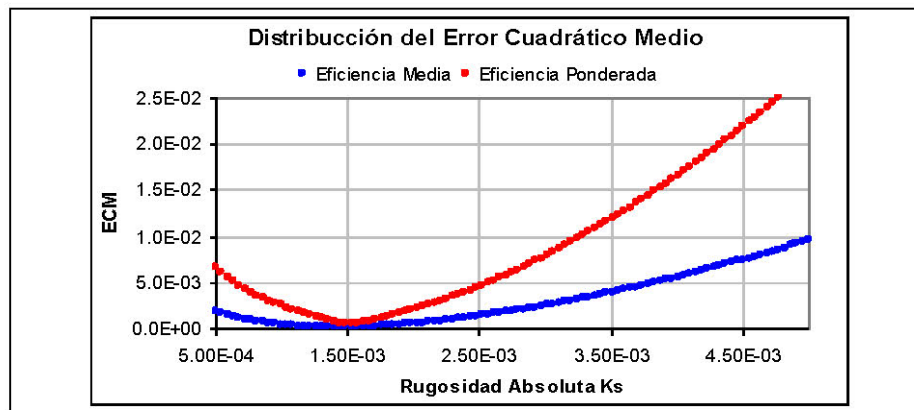


Figura 4-4 Resultados ponderados de k_s para la pendiente del 0.5%

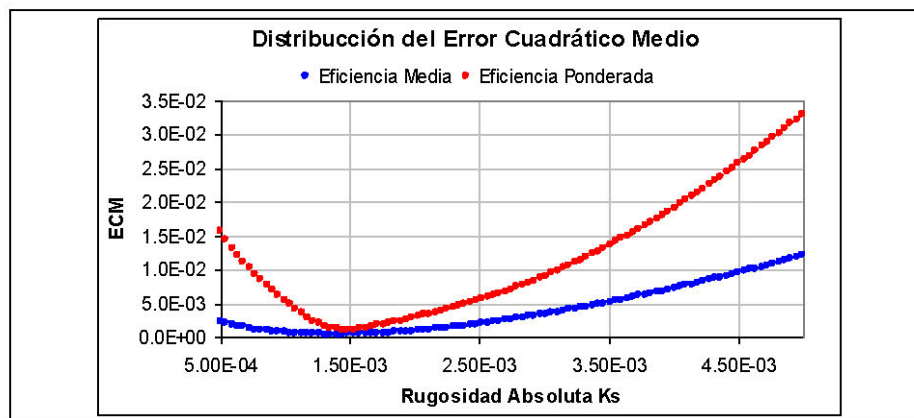


Figura 4-5 Resultados ponderados de k_s para la pendiente del 1%

El valor de k_s óptimo para las dos pendientes es $k_s = 1.45 \times 10^{-3}$. Nuevamente, a pesar de que los valores individuales fueron más dispersos presentando valores desde 7.7×10^{-4} hasta 1.94×10^{-3} , los valores ponderados para las dos pendientes fueron iguales. Por lo tanto, el valor único de la rugosidad absoluta de la tubería de drenaje sin huecos obtenido es $k_s = 1.45 \times 10^{-3}$ m lo que es equivalente a 1.45 mm.

4.3 CAPACIDAD MÁXIMA DE LA TUBERÍA

4.3.1 Utilizando el valor del n de Manning

Utilizando el valor de n de Manning obtenido mediante esta investigación, se puede calcular el caudal máximo que puede circular por la tubería siendo éste un caudal a flujo lleno sin que ésta se presurice y bajo flujo uniforme.

Siendo así, utilizando la ecuación de Manning se obtienen los siguientes resultados:

- Para la pendiente de 0.5%:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad [4-1]$$

$$Q = \frac{1}{0.01274} \left(\frac{\pi}{4} (0.0987^2) \right) \cdot \left(\frac{0.0987}{4} \right)^{2/3} \cdot (0.005)^{1/2}$$

$$Q = 0.00359 \text{ m}^3 / \text{s} = 3.60 \text{ Lps}$$

- Para la pendiente del 1%:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad [4-2]$$

$$Q = \frac{1}{0.01274} \left(\frac{\pi}{4} (0.0987^2) \right) \cdot \left(\frac{0.0987}{4} \right)^{2/3} \cdot (0.01)^{1/2}$$

$$Q = 0.00509 \text{ m}^3 / \text{s} = 5.10 \text{ Lps}$$

4.3.2 Utilizando la rugosidad absoluta k_s

Utilizando las ecuaciones de Darcy – Weisbach y Colebrook – White, se puede encontrar una ecuación explícita para determinar el caudal como sigue:

$$Q = \frac{-2 \cdot A \cdot \sqrt{2gdh_f}}{\sqrt{l}} \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51v\sqrt{l}}{d\sqrt{2gdh_f}} \right) \quad [4-3]$$

Bajo la suposición de flujo uniforme se tiene que la pendiente de fricción es igual a la pendiente del terreno, es decir:

$$S_o = S_f = \frac{h_f}{l} \quad [4-4]$$

Reemplazando esta última ecuación en la ecuación [4.3] se tiene una expresión para el caudal como función de la pendiente, es decir:

$$Q = -2 \cdot A \cdot \sqrt{2gdS_o} \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51v}{d\sqrt{2gdS_o}} \right) \quad [4-5]$$

Con la ecuación anterior se puede calcular la capacidad máxima de la tubería utilizando el valor del k_s encontrado para cada una de las pendientes:

- Para la pendiente de 0.5%:

$$Q = -2 \cdot A \cdot \sqrt{2gdS_o} \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51v}{d\sqrt{2gdS_o}} \right)$$

$$Q = -2 \cdot \left(\frac{\pi(0.0987^2)}{4} \right) \cdot \sqrt{2(9.81)(0.0987)(0.005)} \log_{10} \left(\frac{1.45 \times 10^{-3}}{3.7(0.0987)} + \frac{2.51(1.14 \times 10^{-6})}{(0.0987)^{1.5} \sqrt{2(9.81)(0.005)}} \right) \quad [4-6]$$

$$Q = 0.00357 \text{ m}^3 / \text{s} = 3.57 \text{ Lps}$$

- Para la pendiente del 1%:

$$Q = -2 \cdot A \cdot \sqrt{2gdS_o} \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51\nu}{d\sqrt{2gdS_o}} \right)$$

$$Q = -2 \cdot \left(\frac{\pi(0.0987^2)}{4} \right) \cdot \sqrt{2(9.81)(0.0987)(0.01)} \log_{10} \left(\frac{1.45 \times 10^{-3}}{3.7(0.0987)} + \frac{2.51(1.14 \times 10^{-6})}{(0.0987)^{1.5} \sqrt{2(9.81)(0.01)}} \right) \quad [4-7]$$

$$Q = 0.00507 \text{ m}^3 / \text{s} = 5.07 \text{ Lps}$$

5 CONCLUSIONES

La capacidad máxima de conducción de una tubería, para una pendiente específica, corresponde al caso en el cual ésta se encuentra a flujo lleno o muy cerca de este nivel, operando bajo condiciones de flujo uniforme; es decir, en donde no hay cambio en la profundidad de flujo a través del tiempo o el espacio. El cálculo del caudal por lo tanto, se limita a resolver una de las ecuaciones de resistencia fluida como es el caso de la ecuación de Manning, o la ecuación de Darcy – Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook – White. Para esto, es necesario determinar los coeficientes que representan la rugosidad del material en cada una de estas ecuaciones: n de Manning y k_s respectivamente.

En la presente investigación se encontraron valores para estos dos coeficientes, siendo estos:

- n de Manning = 0.0127
- k_s = 1.45 mm

Estos valores corresponden a una tubería de drenaje de 4" fabricada sin huecos. Con los resultados obtenidos en esta investigación, y bajo las condiciones experimentales que se utilizaron, no es posible determinar la rugosidad de una tubería normal de drenaje con huecos, y por consiguiente no es posible extrapolar los resultados de capacidad máxima encontrados.

Utilizando los coeficientes anteriores, para las pendientes de 0.5% y 1%, se obtienen los siguientes caudales máximos en Lps:

Coeficiente Utilizado	Pendiente	
	0,50%	1%
n	3,60	5,10
k_s	3,57	5,07

Comparando la capacidad máxima calculada utilizando los dos coeficientes por separado, se puede concluir que utilizando la ecuación de Colebrook – White en conjunto con la ecuación de Darcy – Weisbach, se obtiene un caudal ligeramente menor al encontrado mediante la ecuación de Manning; sin embargo, esta diferencia no es considerable, lo que valida el uso de uno u otro coeficiente.

Por último, se puede concluir que los coeficientes de rugosidad encontrados, n de Manning y k_s , no pueden ser utilizados para el diseño de tuberías de drenaje para carreteras u otras aplicaciones ya que no representan la realidad de una tubería que va a funcionar para las aplicaciones típicas de drenaje.

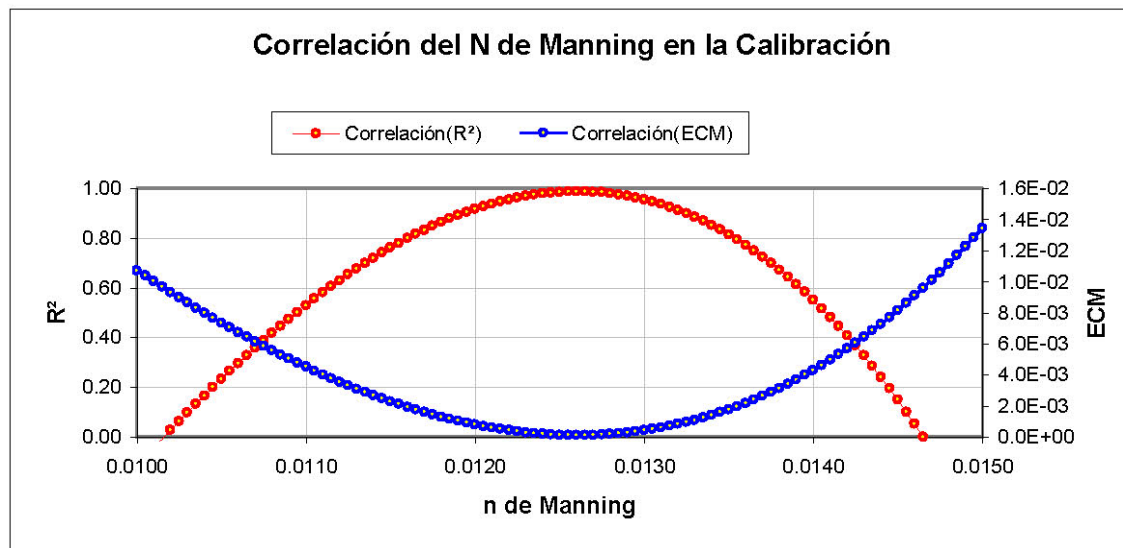
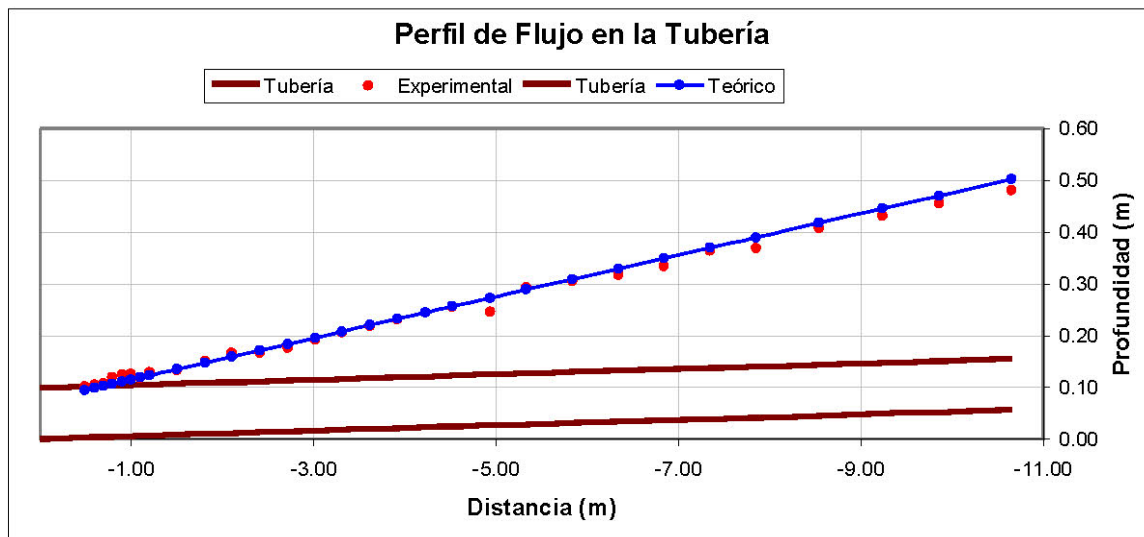
ANEXO 1

Resultados n de Manning

Pendiente 0.5%

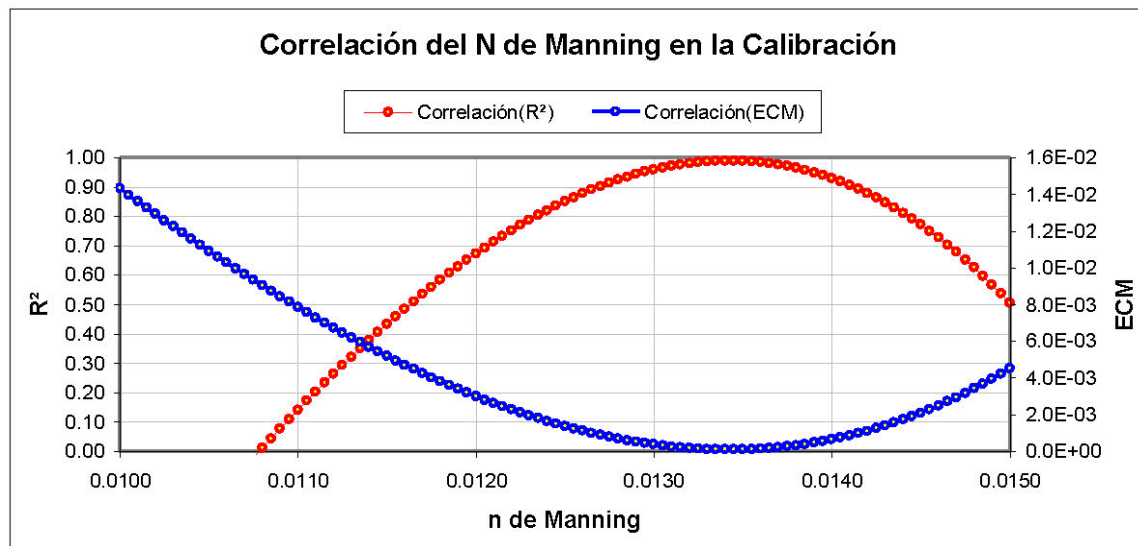
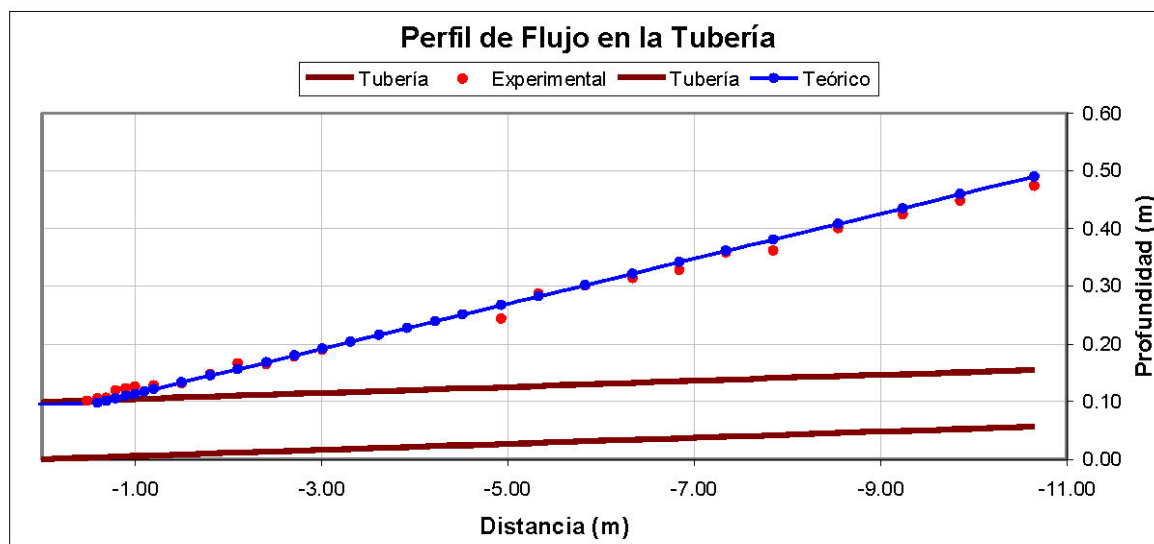
PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL n DE MANNING DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 1
FECHA	15/07/2005
CAUDAL (m^3/s)	0.0097
PENDIENTE	0.00528
n de Manning	0.012600
ECM	1.16E-04



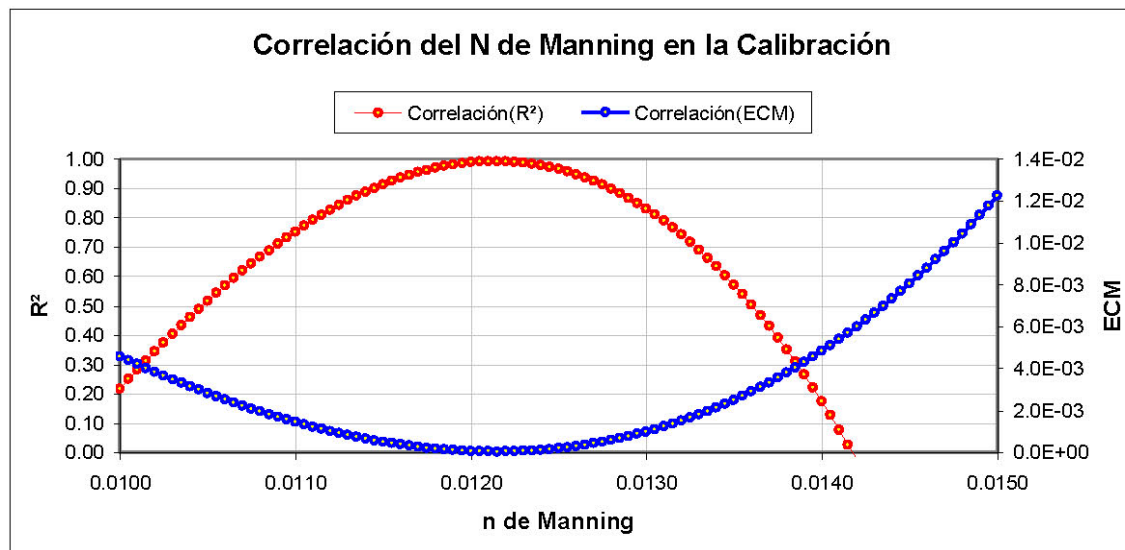
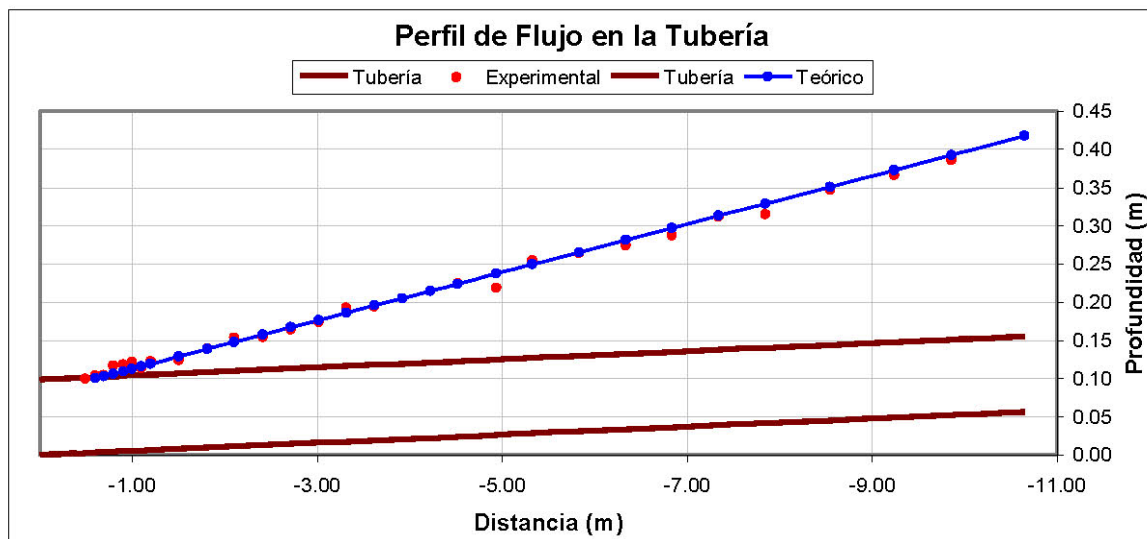
PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL n DE MANNING DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 2
FECHA	15/07/2005
CAUDAL (m ³ /s)	0.0089
PENDIENTE	0.00528
n de Manning	0.013450
ECM	8.93E-05



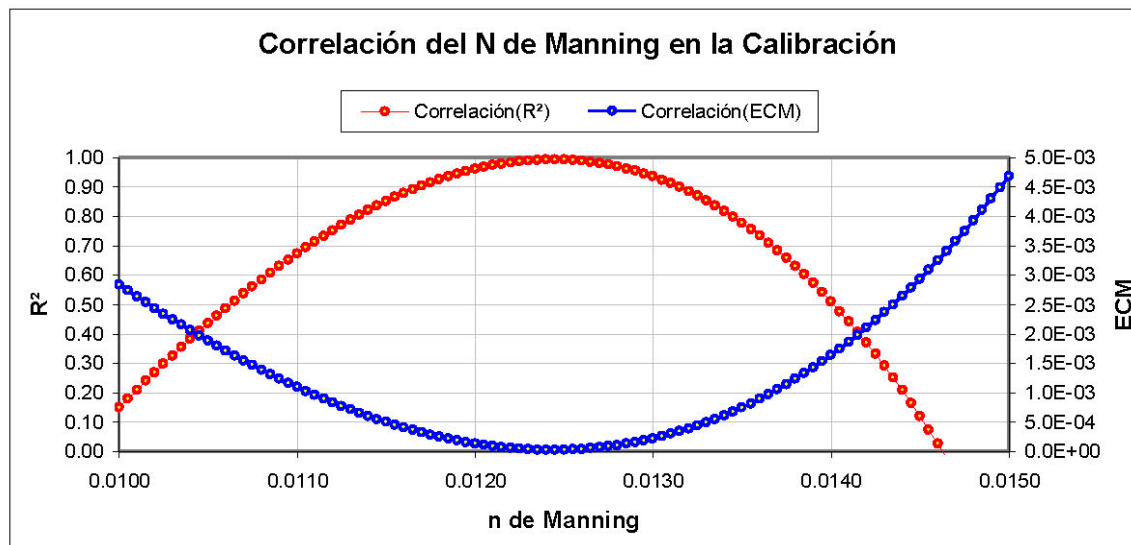
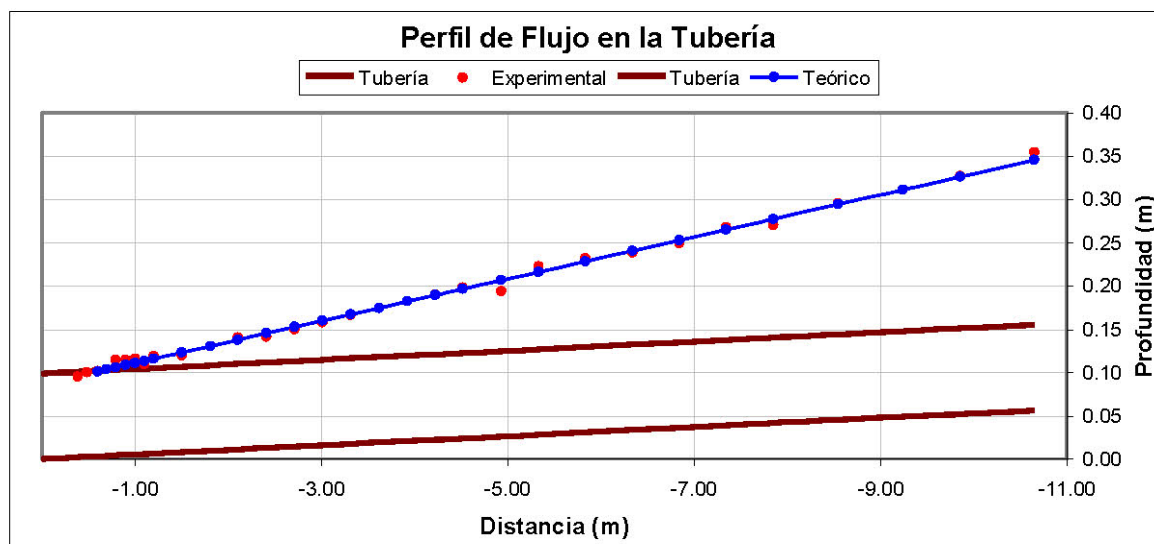
PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL n DE MANNING DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 3
FECHA	15/07/2005
CAUDAL (m^3/s)	0.0087
PENDIENTE	0.00528
n de Manning	0.012150
ECM	4.35E-05



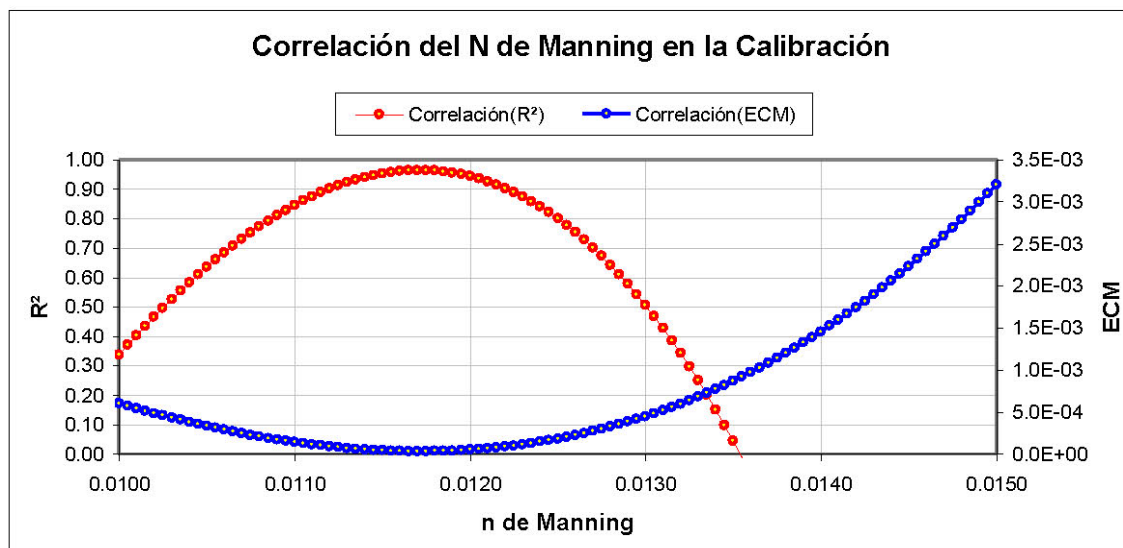
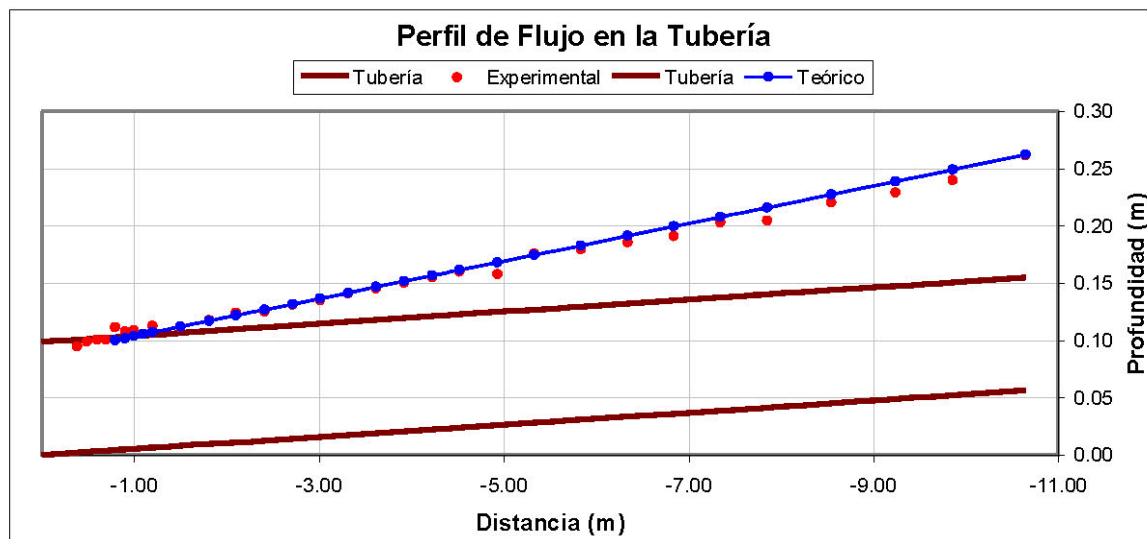
PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL n DE MANNING DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 4
FECHA	15/07/2005
CAUDAL (m³/s)	0.0073
PENDIENTE	0.00528
n de Manning	0.012450
ECM	2.13E-05



PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL n DE MANNING DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 5
FECHA	15/07/2005
CAUDAL (m³/s)	0.0060
PENDIENTE	0.00528
n de Manning	0.011700
ECM	3.19E-05



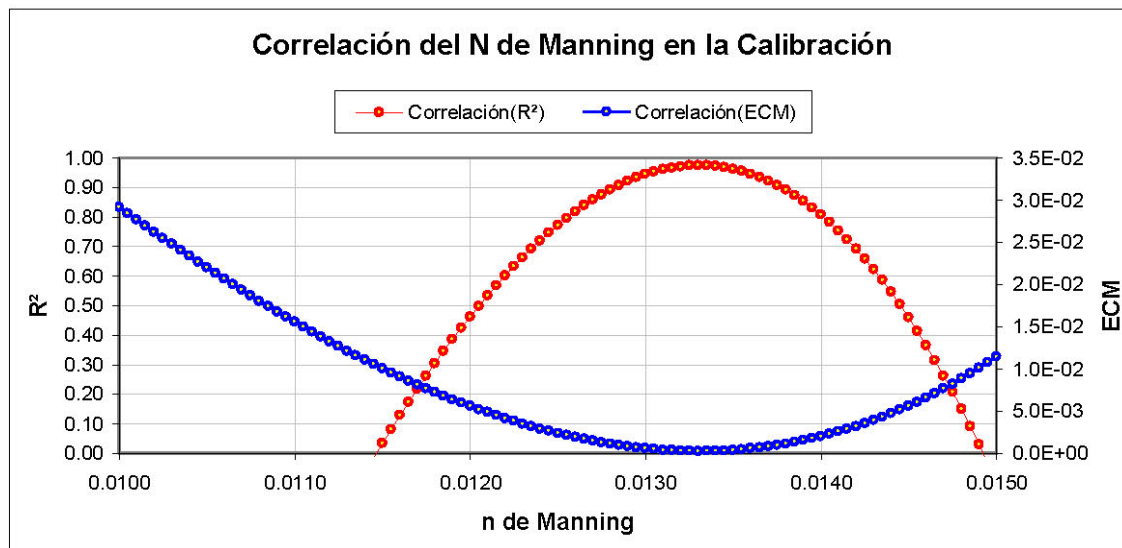
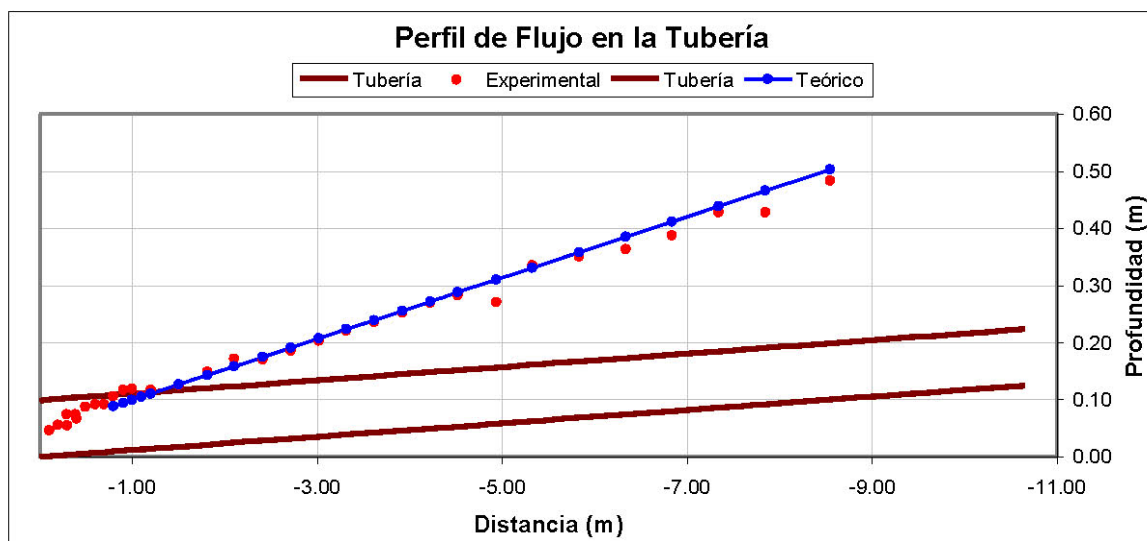
ANEXO 2

Resultados n de Manning

Pendiente 1%

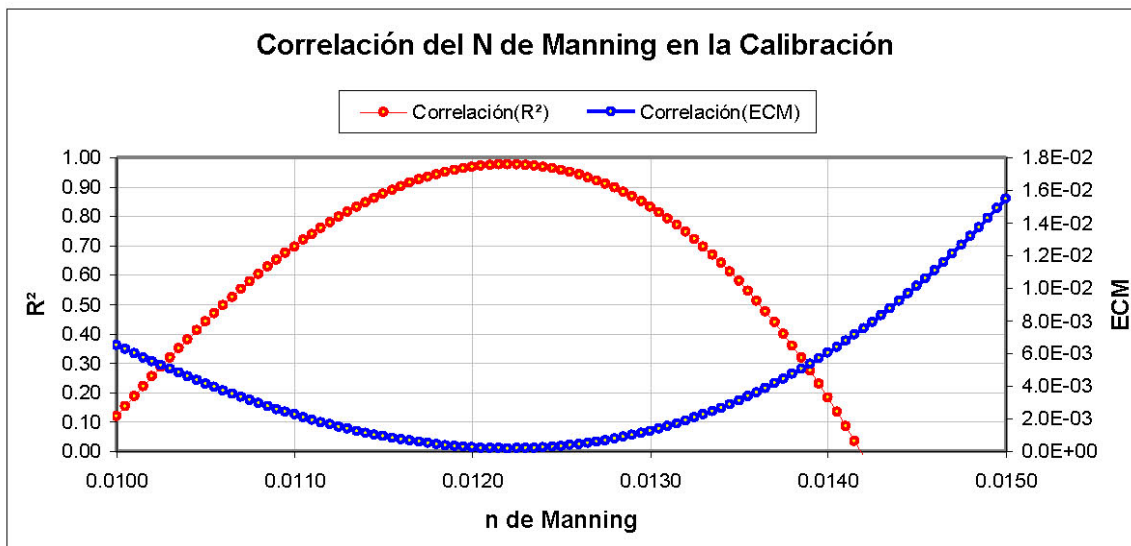
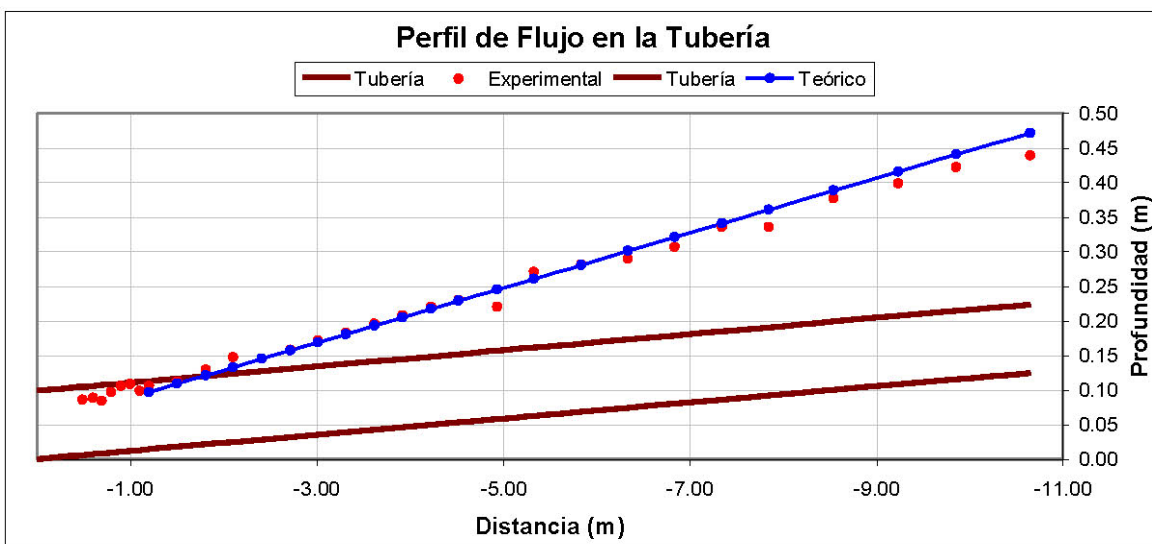
PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL n DE MANNING DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 1
FECHA	15/07/2005
CAUDAL (m^3/s)	0.0108
PENDIENTE	0.01170
n de Manning	0.013300
ECM	2.57E-04



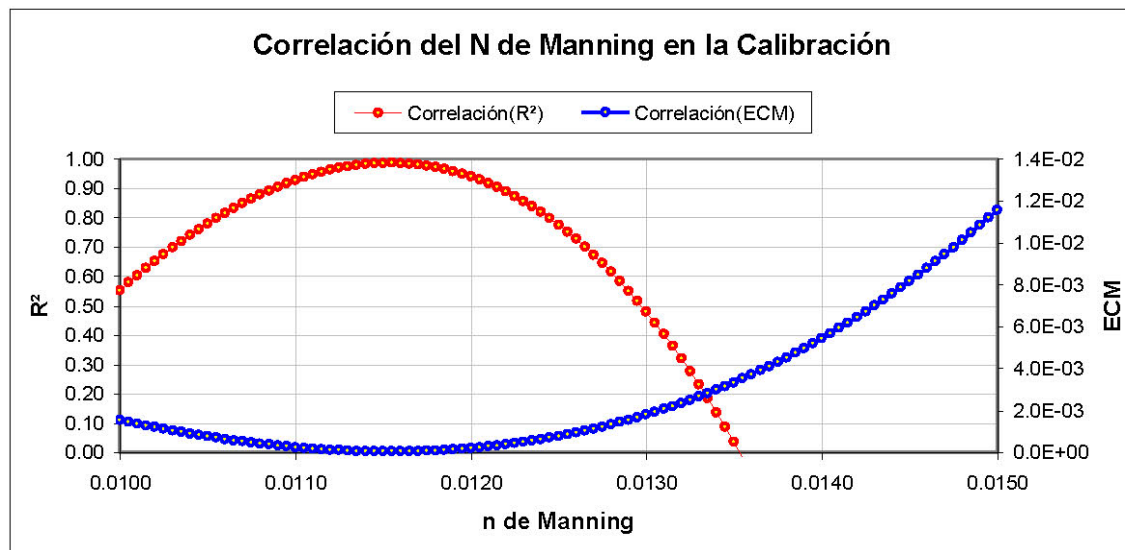
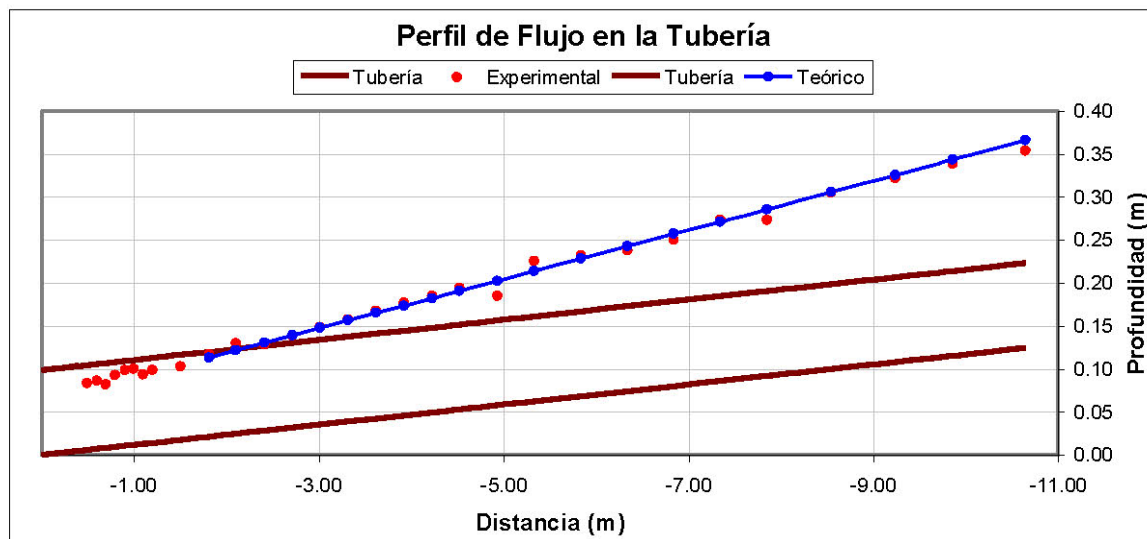
PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL n DE MANNING DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 2
FECHA	15/07/2005
CAUDAL (m³/s)	0.0099
PENDIENTE	0.01170
n de Manning	0.012200
ECM	1.71E-04



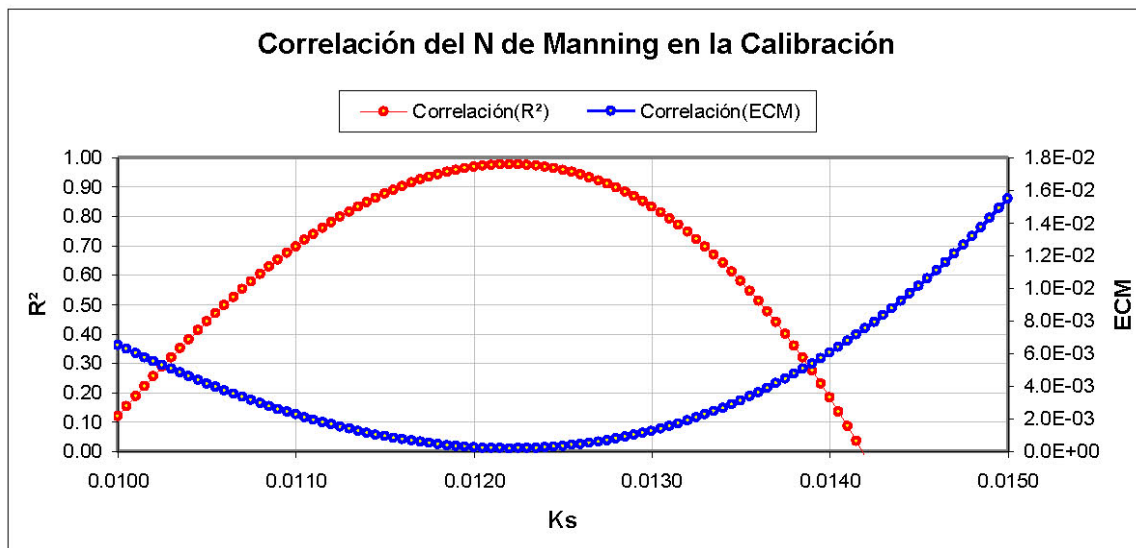
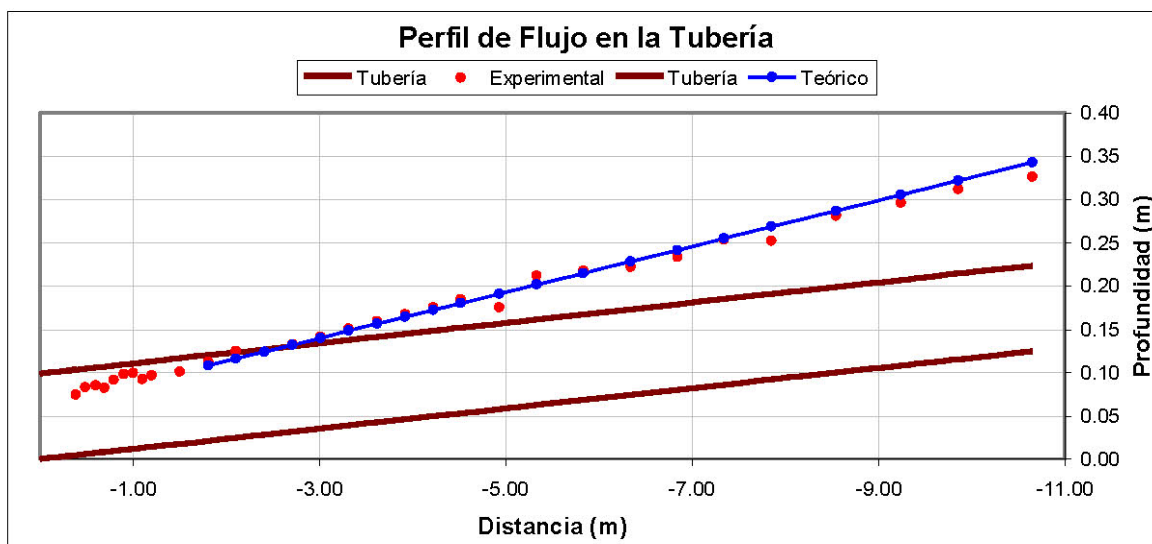
PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL n DE MANNING DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 3
FECHA	15/07/2005
CAUDAL (m^3/s)	0.0087
PENDIENTE	0.01170
n de Manning	0.011550
ECM	4.70E-05



PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL n DE MANNING DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 4
FECHA	15/07/2005
CAUDAL (m³/s)	0.0081
PENDIENTE	0.01170
n de Manning	0.011800
ECM	6.61E-05



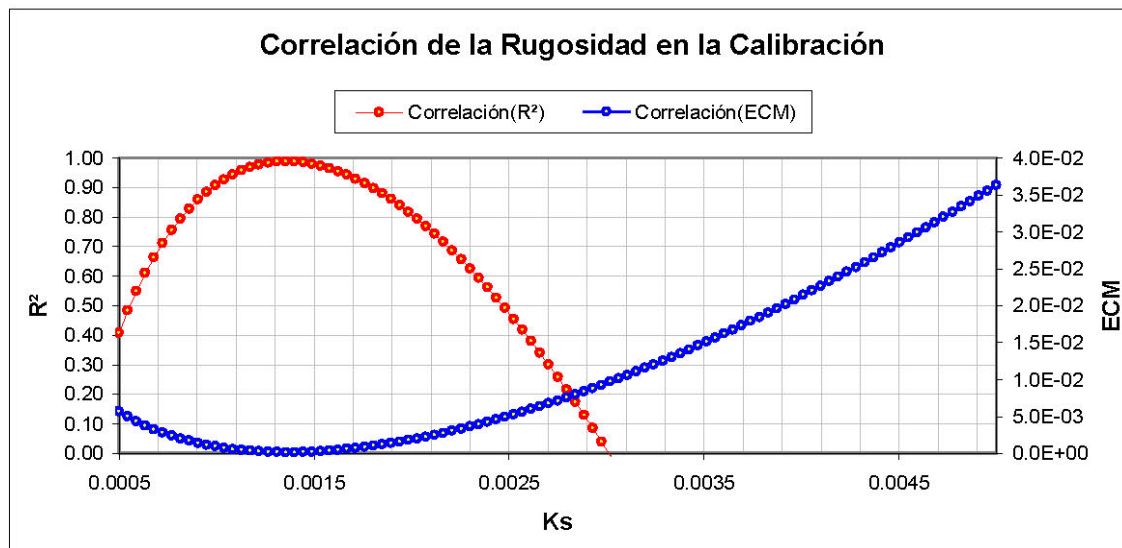
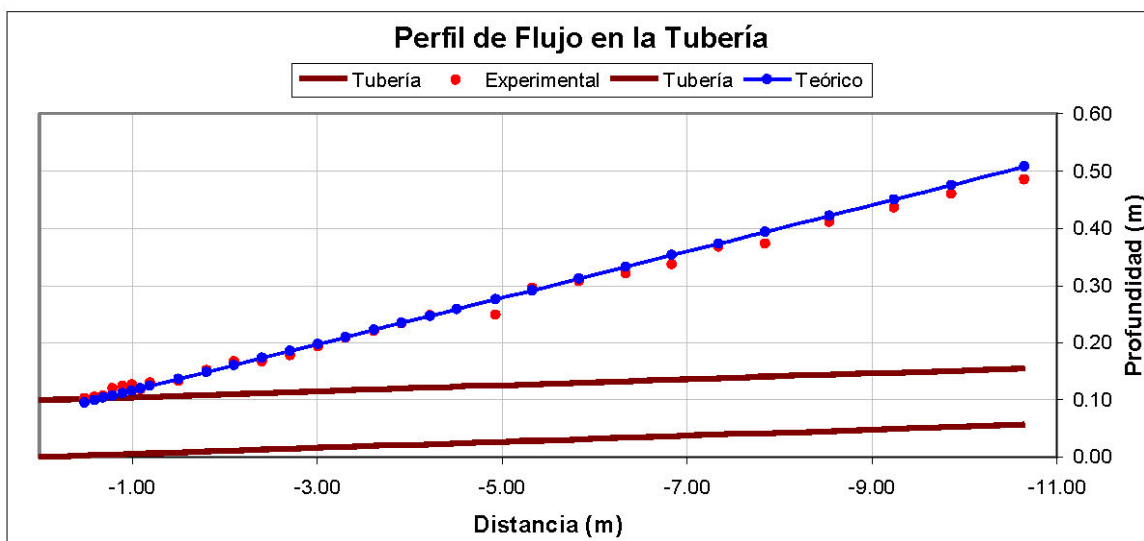
ANEXO 3

Resultados k_s

Pendiente 0.5%

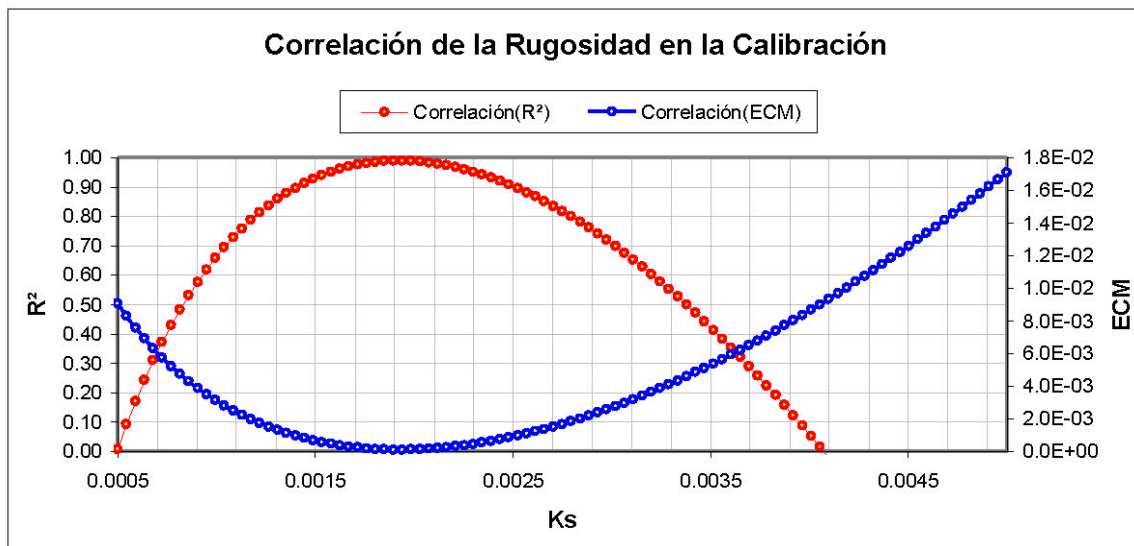
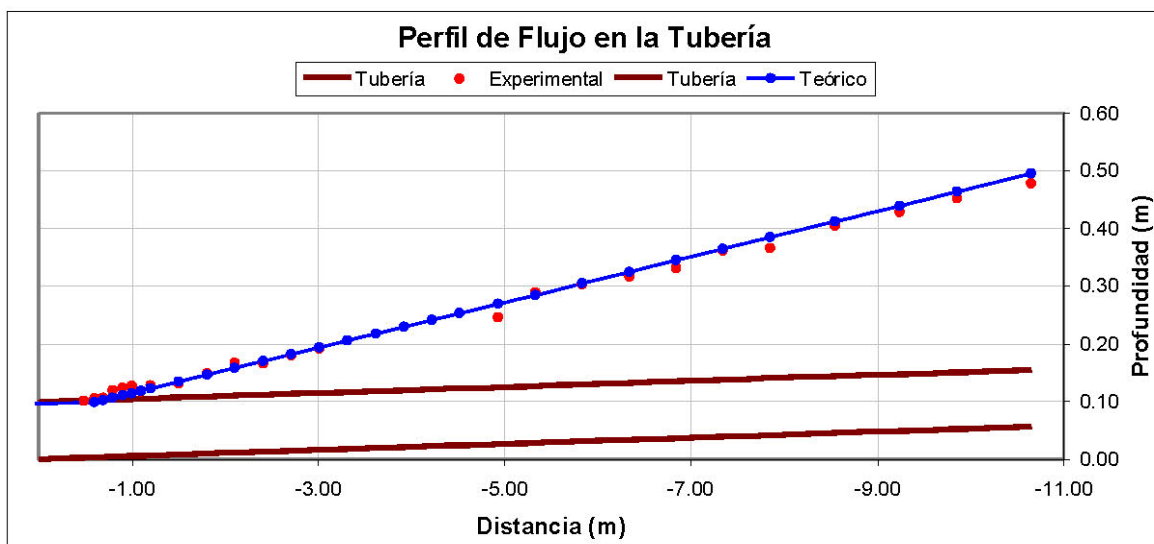
PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL K_s DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 1
FECHA	18/07/2005
CAUDAL (m^3/s)	0.0097
PENDIENTE	0.00528
K_s	0.001355
ECM	1.16E-04



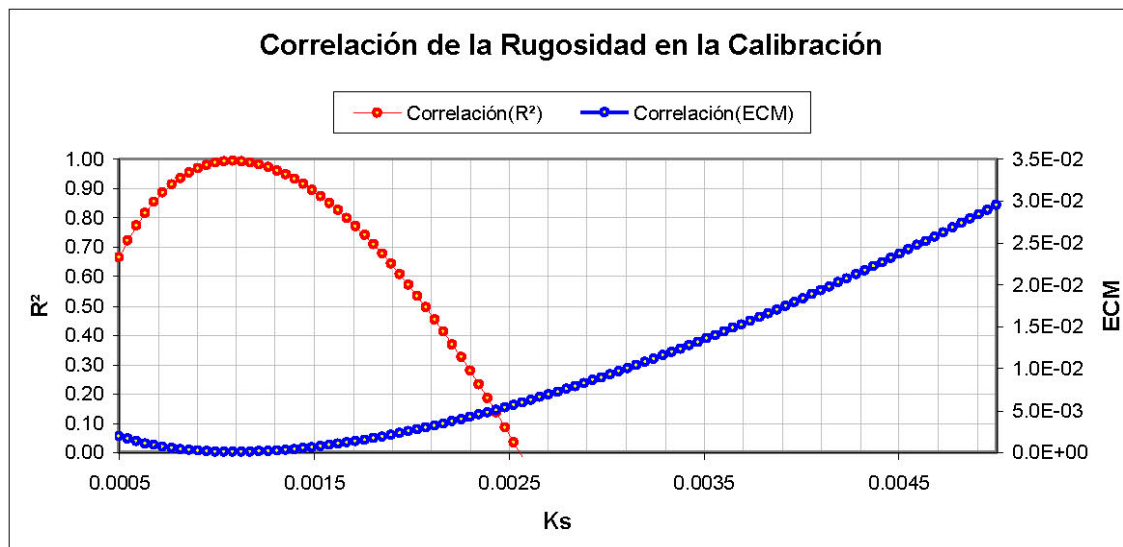
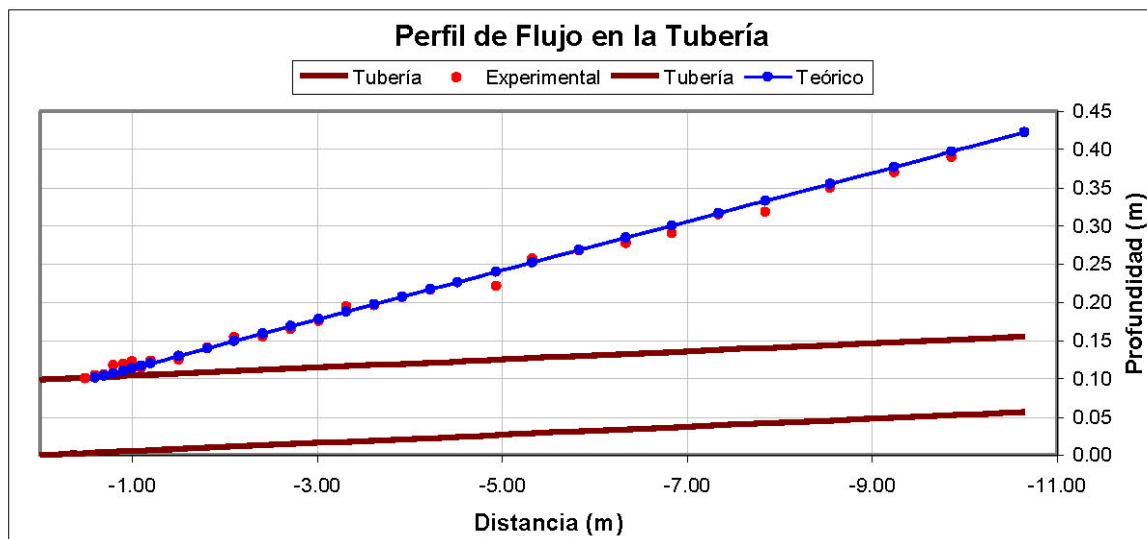
PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL K_s DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 2
FECHA	18/07/2005
CAUDAL (m^3/s)	0.0089
PENDIENTE	0.00528
K_s	0.001940
ECM	8.87E-05



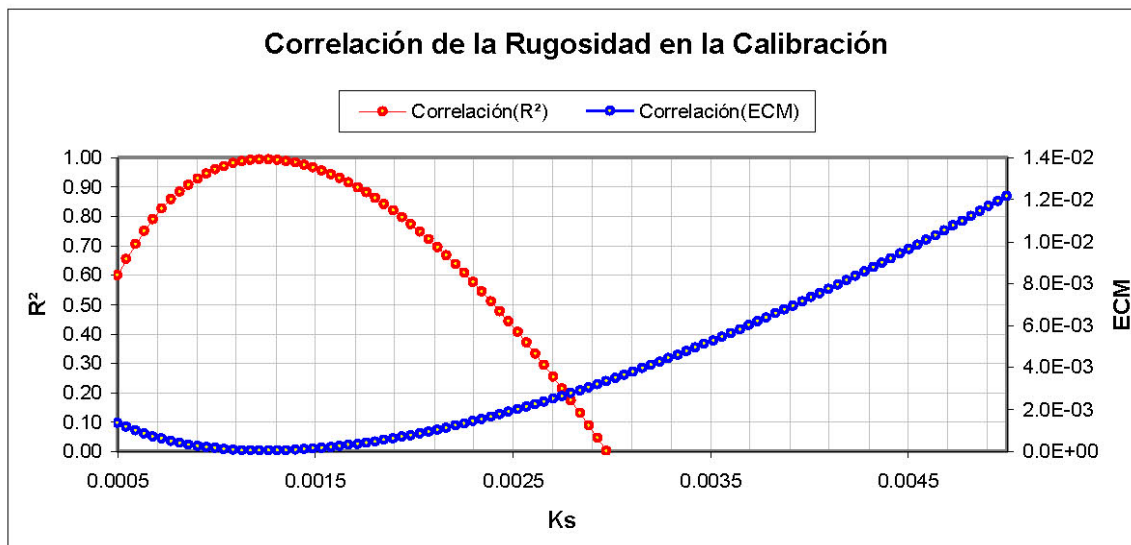
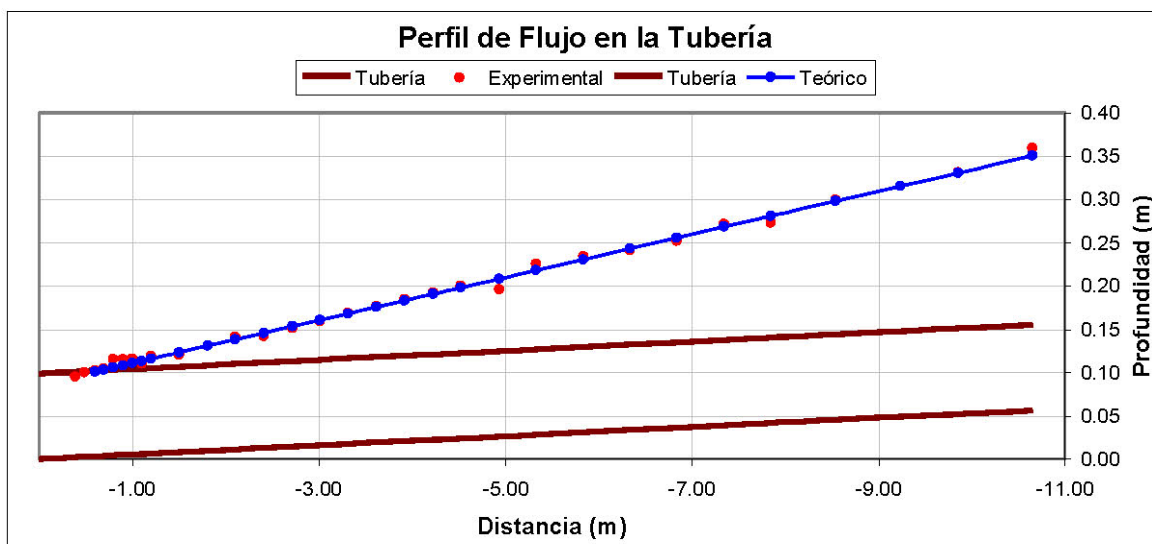
PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL K_s DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 3
FECHA	18/07/2005
CAUDAL (m^3/s)	0.0087
PENDIENTE	0.00528
K_s	0.001085
ECM	4.34E-05



PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL K_s DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 4
FECHA	18/07/2005
CAUDAL (m^3/s)	0.0073
PENDIENTE	0.00528
K_s	0.001265
ECM	2.19E-05



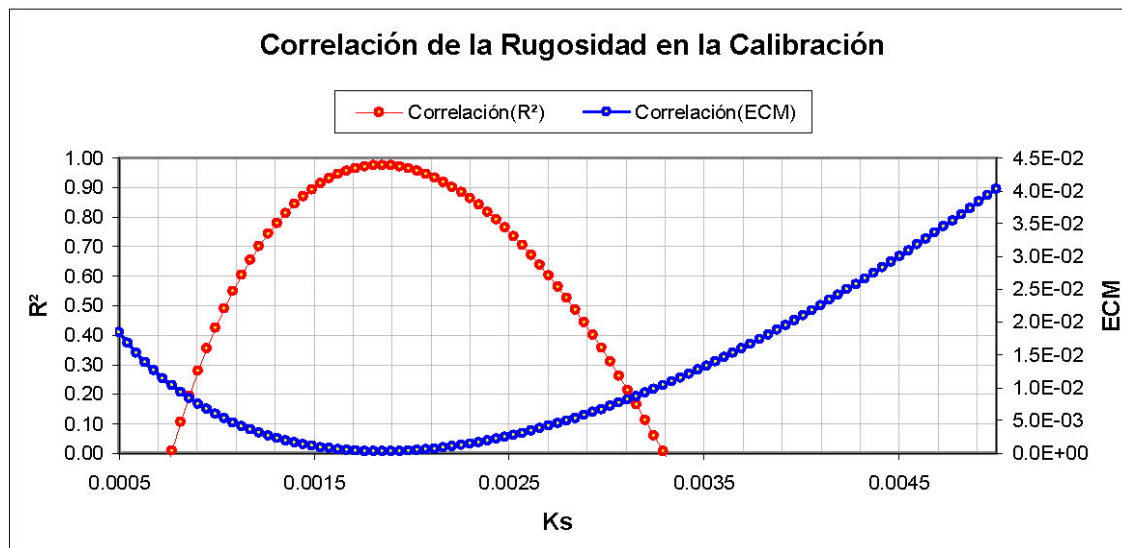
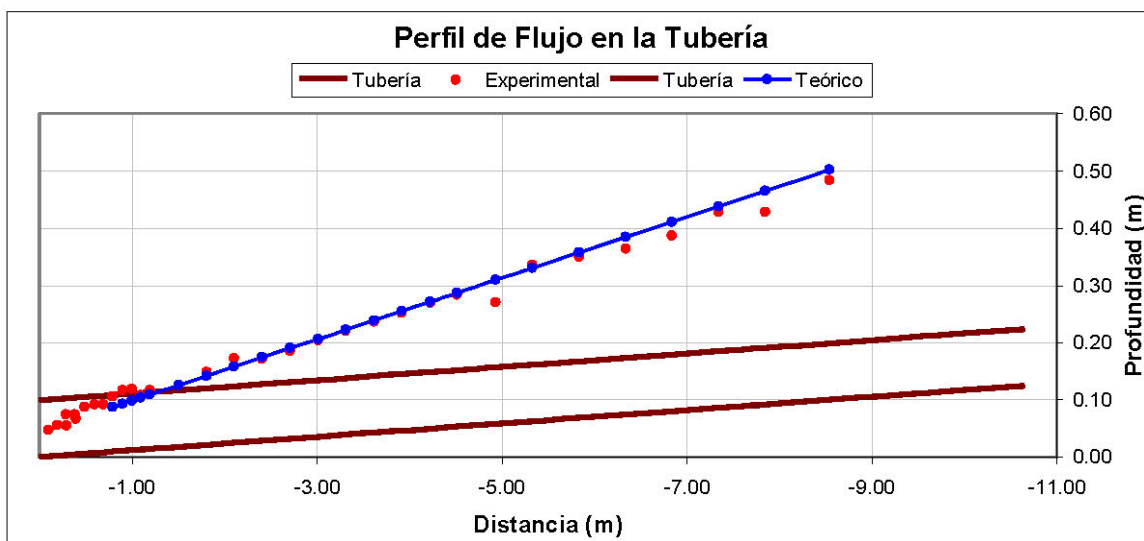
ANEXO 4

Resultados k_s

Pendiente 1%

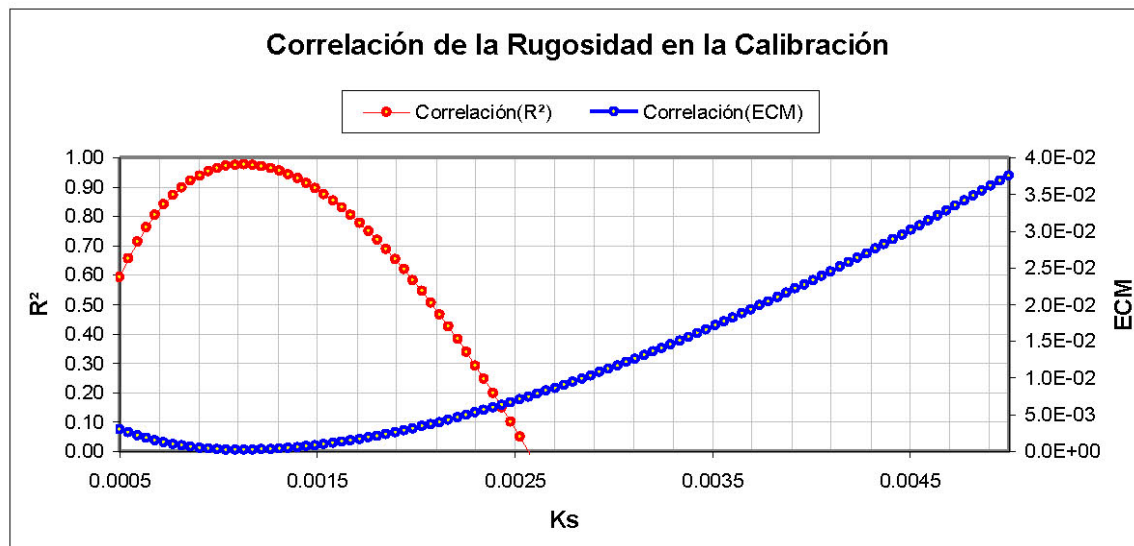
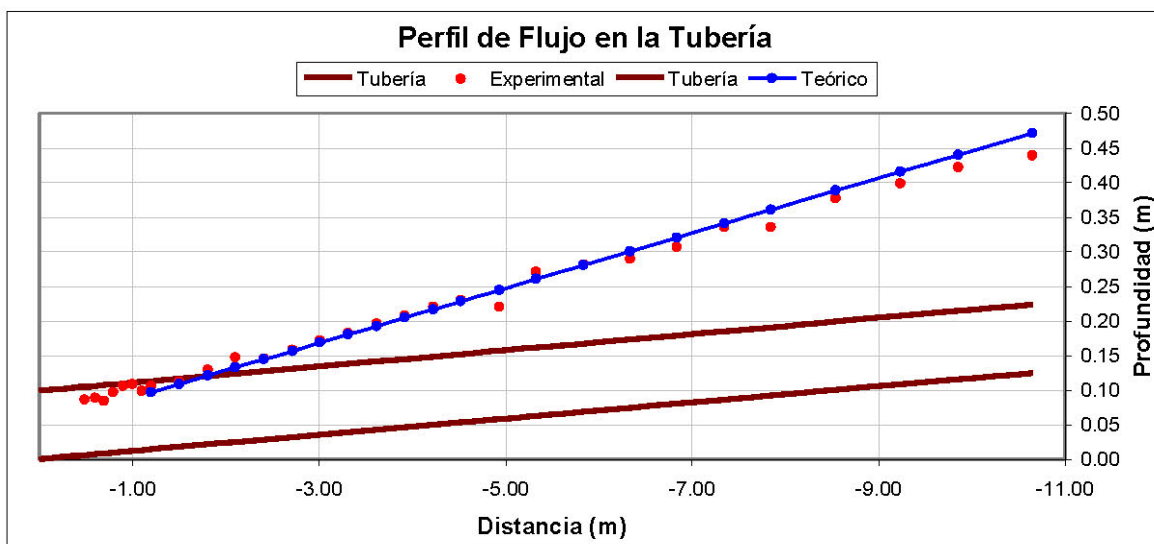
PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL K_s DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 1
FECHA	18/07/2005
CAUDAL (m^3/s)	0.0108
PENDIENTE	0.01170
K_s	0.001850
ECM	2.57E-04



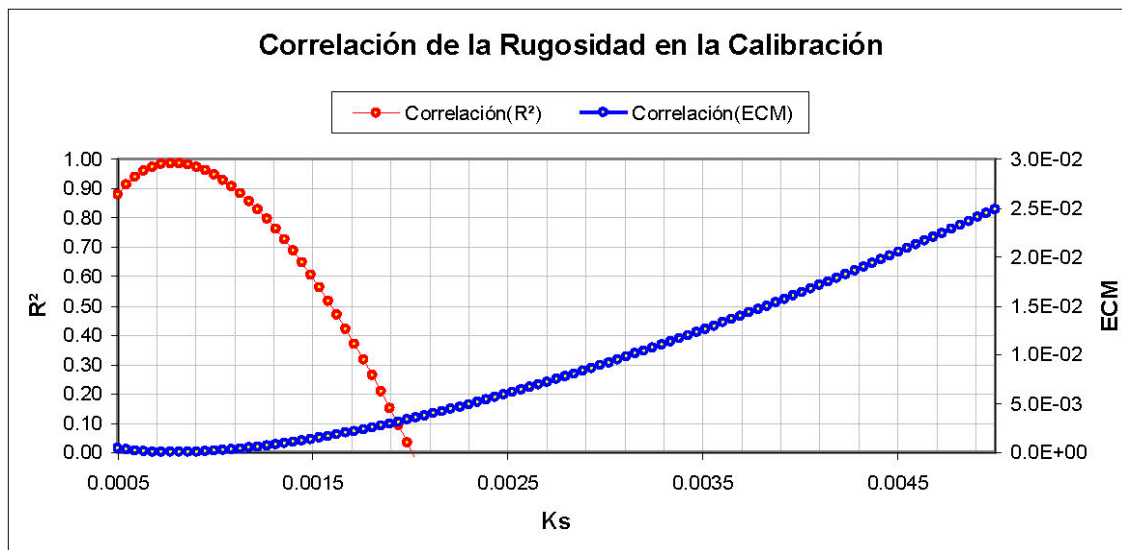
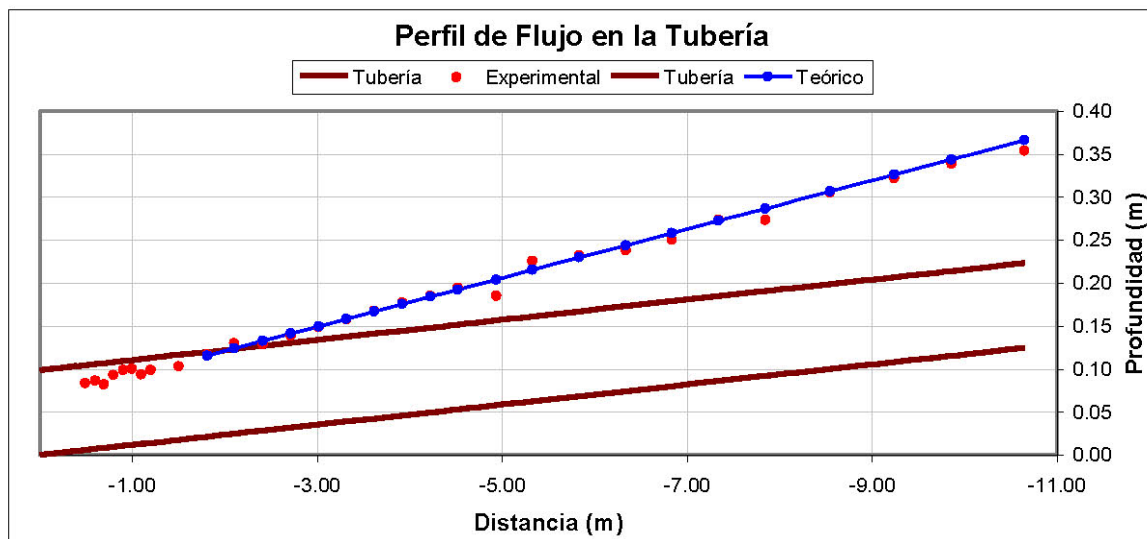
PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL K_s DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 2
FECHA	18/07/2005
CAUDAL (m^3/s)	0.0099
PENDIENTE	0.01170
K_s	0.001130
ECM	1.71E-04



PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL Ks DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 3
FECHA	18/07/2005
CAUDAL (m³/s)	0.0087
PENDIENTE	0.01170
Ks	0.000770
ECM	4.82E-05



PERFIL TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO - CORRELACIÓN DEL K_s DE LA TUBERÍA A FLUJO LLENO

PRUEBA No.	Prueba 4
FECHA	18/07/2005
CAUDAL (m^3/s)	0.0081
PENDIENTE	0.01170
K_s	0.000905
ECM	6.61E-05

