

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN
ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS
CIACUA**



**Universidad
de los Andes**

PAVCO S.A.
Una empresa AMANCO



CÁTEDRA PAVCO

**Determinación de parámetros de fugas para fallas
en conexiones domiciliarias en tuberías de PVC de
2", 3" y 4".**

Bogotá, Enero de 2004

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

Como parte del funcionamiento óptimo de una red de distribución de agua potable, es importante tener conocimiento del comportamiento hidráulico de los distintos tipos de falla en tuberías y accesorios. Dentro de las estadísticas del inventario de los activos bajo tierra de una empresa de acueducto, la función de pérdidas de agua para cada una de las fallas, es tan importante como la cuantificación y caracterización de los distintos tipos de falla que presenta una red de distribución.

Las fugas representan un importante factor agravante de las pérdidas debido a su naturaleza y a su gran participación porcentual en las mismas. Representan una pérdida efectiva de líquido, con impactos sociales y económicos importantes en la población, ya que se trata de agua captada, bombeada, tratada, almacenada, distribuida y en el instante en que está lista para ser consumida se presentan pérdidas debido a fallas en el sistema de abastecimiento.

Por lo general, las fugas en tuberías y accesorios se relacionan con fugas en orificios. Sin embargo, cada tipo de falla presenta características particulares en cuanto al exponente y al coeficiente de descarga y no necesariamente son los mismos parámetros que presenta la ecuación de un orificio en un embalse. También, aunque el caudal de fuga generalmente está relacionado con el área de la falla, muchas veces no es posible determinar este componente geométrico. Entonces, la ecuación para el cálculo del caudal de fuga debe relacionar alguna dimensión de la falla que pueda medirse en la práctica, con las características de la tubería o el accesorio dañado. En dado caso de no poder medir un componente geométrico de la falla, se debe determinar el caudal de fuga simplemente con el tipo y las condiciones de la falla, dada una ecuación determinada experimentalmente.

En este documento, se presentan los resultados de una investigación relacionada con los parámetros de fuga para fallas en conexiones domiciliarias en tuberías plásticas de PVC de 2", 3" y 4" de diámetro. Se presenta una ecuación para cada tipo de falla, teniendo en cuenta si el collar de derivación de la acometida se encuentra desplazado longitudinalmente o transversalmente, además si la acometida cuenta con empaque hermético. También se realizó una agregación de todas las fallas para un solo diámetro, en donde el caudal de fuga es función del desplazamiento del collar y la presión de servicio.

1.1 ANTECEDENTES

Dentro de las actividades realizadas por la Cátedra PAVCO en el período de julio del 2002 a diciembre de 2003, se incluyen dos investigaciones referentes al tema: "Determinación de los parámetros de fugas para fallas en conexiones domiciliarias en tuberías de PVC".

La primera investigación fue el proyecto de grado "Calibración de fugas no detectables en uniones de tuberías en redes de acueducto" desarrollada durante el segundo semestre del año

2002 por Carolina González. En este proyecto de grado se intentó cuantificar y clasificar las pérdidas generadas por fugas en las uniones de las tuberías de acuerdo con las características particulares de cada una. Estas pérdidas presentan una tendencia matemática de tipo potencial. Con los datos experimentales, las gráficas de los mismos y las regresiones realizadas se hallaron coeficientes y exponentes que caracterizan estas fugas. Los resultados en este caso se ajustaron a lo esperado en cuanto a la tendencia potencial de las gráficas. Se simularon tres tipos de pruebas con tuberías de 3 pulgadas y 4 pulgadas: tubería sin empaque, empaque adherido y tubería flectada; para esto fue necesario realizar un montaje, que consistió además, de tomas domiciliarias adecuadas para cada diámetro, para así evitar que fallara el montaje por exceso de presiones.

Los resultados permitieron establecer parámetros de caracterización de fugas tales como los coeficientes y los exponentes que generan resultados de caudales de fuga en L/s según la falla que se tenga en la unión de las tuberías. Para las pruebas realizadas con las tuberías flectadas de 3" y 4" de PVC, se encontró que el caudal de fuga es inversamente proporcional a la longitud de traslape en la unión. Es decir, cuando la longitud disminuye el caudal aumenta, esto se debe a que el empaque cubre un porcentaje menor del diámetro, permitiendo un caudal de fuga mayor.

La segunda investigación fue la tesis de maestría "Determinación de parámetros de fugas para fallas longitudinales y en conexiones domiciliarias en tuberías de PVC" desarrollada durante el año 2002 por Humberto Ávila. Como conclusión del trabajo de investigación se determinó que para las ranuras longitudinales reales se presenta un incremento en los valores del exponente b, entre 1.49 y 2.01 para longitudes de falla entre 5 cm y 23 cm en diámetros de 2" a 4" en la ecuación de caudal de fuga, $Q = cP^b$. Debido a que no existe una pérdida del material de la tubería al producirse la falla, inicialmente la falla posee un ancho equivalente a cero, el cual incrementa rápidamente en función de la presión hasta llegar a un valor aproximadamente constante en función de la longitud de la falla y el diámetro de la tubería. Se simplificó la expresión $b = 1.678(L/d)^{0.03}$, a $b = 1.70$, implicando esto una disminución en el ajuste de la ecuación general calibrada y los datos experimentales medidos, el cual a nivel práctico se puede considerar como una solución aceptable.

El coeficiente global de descarga c tiene una tendencia creciente en función de la longitud de falla y una tendencia a la disminución del valor del coeficiente en función del diámetro o del espesor de la tubería al mantener una relación diámetro – espesor constante. El coeficiente global de descarga está definido como $c = 1300 d^{-0.70} L^{2.65}$ para b en función del diámetro y la longitud de la falla, o $c = 850 d^{-0.90} L^{2.70}$ para b = 1.70. Se midieron caudales de hasta 5,50 L/s para una falla longitudinal real de 23,0 cm. Este caudal representa una pérdida de agua del orden de los 475 m³/día.

Para las fallas en conexiones domiciliarias, el exponente b tiene valores inferiores a 0.52, lo cual representa la tendencia a comportarse como una falla en orificio estrangulada por el elastómero o el collar de derivación.

Capítulo 2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de esta investigación es estudiar el comportamiento de fallas típicas en conexiones domiciliarias, calibrando los parámetros de comportamiento hidráulico medidos experimentalmente.

El alcance de esta investigación es determinar los parámetros y ecuaciones que logren explicar con una confiabilidad adecuada, el comportamiento hidráulico de desplazamientos longitudinales y transversales en tuberías de PVC de 2", 3" y 4" de diámetro con una relación diámetro espesor (*RDE*) equivalente a 21.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos de esta investigación son:

1. Calibrar y comprobar el buen comportamiento hidráulico del montaje para la realización de ensayos, mediante el análisis de resultados de fugas en orificios.
2. Calibrar los parámetros de la ecuación de fuga (coeficiente de descarga y exponente), para cada uno de los resultados experimentales obtenidos con las fallas en conexiones domiciliarias realizadas en diámetros de 2", 3" y 4".
3. Determinar la tendencia de cada uno de los parámetros calibrados para las fallas en conexiones domiciliarias y su dependencia con las variables geométricas de la tubería (Diámetro), diámetro de la acometida (conexión domiciliaria de 1/2") y la falla (longitud de desplazamiento del collar).
4. Deducir una ecuación general que explique el comportamiento hidráulico de las fallas en conexiones domiciliarias con tuberías plásticas de PVC de diámetros 2", 3" y 4" y un $RDE = 21$, con un grado de ajuste confiable para todos los resultados obtenidos experimentalmente.

Capítulo 3 PERSONAL QUE PARTICIPÓ EN LA INVESTIGACIÓN

Director Cátedra PAVCO: Juan Saldarriaga Valderrama

Asistentes Graduados: Mario Enrique Moreno Castiblanco
Edgar Javier Guevara Garzón

Capítulo 4 MARCO TEÓRICO

La generación de fallas en las tuberías de una red de distribución de agua potable se presenta permanentemente. Los daños en las tuberías pueden ser provocados por problemas en el transporte y en la instalación pero no necesariamente estos daños en las tuberías y accesorios son visibles fácilmente. Otra causa de daños en las tuberías y accesorios de una red de distribución de agua potable, se presentan durante la instalación de otras redes de servicio público o remodelaciones urbanas, en las cuales ocurren golpes y desplazamientos causados por herramientas y maquinaria de construcción.

El estudio del comportamiento hidráulico de fugas generadas en las tuberías y accesorios, está basado en el principio de Bernoulli, en el cual existe una diferencia de presiones entre el interior y el exterior de la tubería.

4.1 Comportamiento de la hidráulica de un orificio en un embalse

A partir del análisis de un orificio en un embalse, se tiene en la Figura 4.1, en el punto 1, la presión atmosférica y sobre el punto 2, donde se encuentra el orificio, una altura de agua H y nuevamente la presión atmosférica.

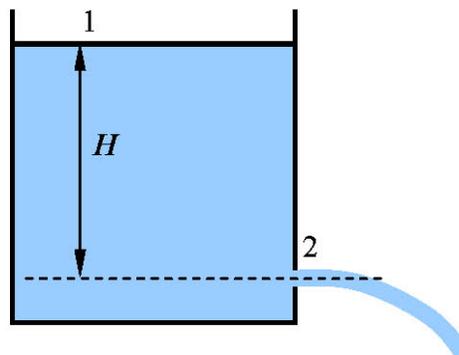


Figura 4.1: Detalle de un orificio en un embalse.

A partir de la Figura 4.1, al igualar las presiones en los puntos 1 y 2, se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \quad [4-1]$$

donde,

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

$\frac{p}{\gamma}$ es la cabeza de presión, (m)

z es la cabeza de posición, (m)

Teniendo en cuenta, que en el punto 1 la cabeza de velocidad es cero y que las presiones atmosféricas en los puntos 1 y 2 se eliminan, la ecuación [4-1] queda expresada de la siguiente manera:

$$V_2 = \sqrt{2gH} \quad [4-2]$$

El término V_2 representa la velocidad teórica de salida del agua a través del orificio.

Teniendo en cuenta que el caudal está dado por el producto de la velocidad de salida y el área del orificio ($Q = A \cdot V_2$), se tiene la siguiente ecuación:

$$Q = A \cdot \sqrt{2gH} \quad [4-3]$$

donde,

Q es el caudal que sale a través del orificio, (L^3T^{-1})¹

A es el área del orificio, (L^2).

g es la aceleración de la gravedad (LT^{-2}).

H es la altura de agua sobre el orificio (L).

La ecuación [4-2] representa el caudal teórico que sale a través del orificio. Sin embargo, como en la salida del chorro se genera un efecto de pérdida de velocidad y de contracción del chorro, la expresión [4-2] debe multiplicarse por un coeficiente de descarga c_d .

El coeficiente de descarga c_d , depende de la relación entre la velocidad real y teórica del chorro, así como también de la relación entre el área del orificio y el área del chorro. La relación entre la velocidad real y teórica del chorro viene dada por el coeficiente de velocidad c_v .

$$c_v = \frac{V_r}{V_t} \quad [4-4]$$

donde,

¹ Unidades de longitud (L), unidades de tiempo (T).

c_v es el coeficiente de velocidad
 V_r es la velocidad real del chorro, (L/T)
 V_t es la velocidad teórica del chorro, (L/T)

La relación entre el área del chorro y el área del orificio viene dada por el coeficiente de contracción c_c , dado en la siguiente ecuación:

$$c_c = \frac{A_{ch}}{A_o} \quad [4-5]$$

donde,

c_c es el coeficiente de contracción
 A_{ch} es el área del chorro, (L²)
 A_o es el área del orificio, (L²)

Entonces se tiene que el coeficiente de descarga (c_d) está dado por:

$$c_d = c_c \cdot c_v \quad [4-6]$$

Y la ecuación general de caudal para un orificio en un embalse, está dado por la siguiente ecuación:

$$Q = c_d \cdot A \cdot \sqrt{2gH} \quad [4-7]$$

Expresando la ecuación [4-7] en otros términos, se tiene que:

$$Q = c_d \cdot A \cdot \sqrt{2gH}^{0,5} \quad [4-8]$$

Los valores para c_d se encuentran entre 0,6 y 0,8 dependiendo de las características del orificio [4].

4.2 Aplicación de la hidráulica de un orificio para fugas en tuberías

Para el caso de fugas en tuberías sometidas a presión, la ecuación [4-7] presenta ciertas variaciones para el análisis de esta investigación. Estas variaciones tienen que ver con el coeficiente de descarga, la altura de agua sobre el orificio y el exponente 0,5.

Para la mayoría de fallas en tuberías y accesorios, no es posible medir con certeza el área por la cual sale el agua, motivo por el cual se integra en un coeficiente global de descarga (c), los

términos c_d , A y $\sqrt{2g}$, obteniéndose que el coeficiente global de descarga c_d está expresado como:

$$c = c_d \cdot A \cdot \sqrt{2g} \quad [4-9]$$

Por otro lado, la altura de agua sobre la falla viene representada ahora por la presión del agua en la tubería (P) y expresada en metros de agua (Ver Figura 4.2). Además, el exponente 0,5 presenta variaciones de acuerdo con el tipo de falla, por lo tanto se generaliza como el término b .

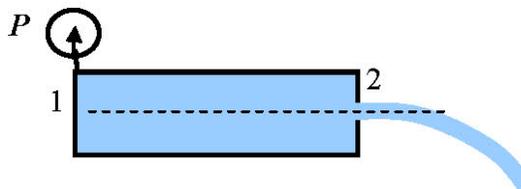


Figura 4.2: Detalle de una falla en una tubería.

Finalmente la expresión de caudales de fuga viene dada de la siguiente forma:

$$Q = c \cdot P^b \quad [4-10]$$

donde c y b serán los términos a calibrar para cada una de las pruebas.

Capítulo 5 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE DEL CIRCUITO PARA PRUEBAS

5.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Para la realización de las pruebas, se utilizó el montaje del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Los Andes, que permite evaluar las fallas modeladas bajo distintas condiciones de presión y caudal. El circuito de pruebas tiene la capacidad de modelar cuatro tipos de fallas simultáneas, cada una de ellas en canales independientes pero alimentados con la misma motobomba.

El circuito está constituido por los siguientes componentes:

- Cuatro canales independientes y totalmente impermeabilizados internamente, para evitar la pérdida de agua durante los ensayos, teniendo en cuenta que se manejarán caudales relativamente pequeños.
- Motobomba de 6,0 L/s de caudal y 56 m de cabeza dinámica.
- Vertederos triangulares de 60° adaptados en cada uno de los canales.
- Sistema de alimentación general en tubería de PVC de 50.8 mm (2") de diámetro.
- Válvulas de compuerta localizadas en la entrada de cada uno de los canales e inmediatamente en la salida de la tubería de impulsión. Estas válvulas son necesarias para regular las presiones y los caudales.
- Manómetros con lectura hasta de 112 metros de cabeza de agua (160 psi) y con graduación a cada 3.5 metros de cabeza de agua (5 psi).
- Adaptadores machos de 50.8 mm (2") necesarios para el acople de las tuberías simples a ensayar.
- Limnómetro de aguja para medir el nivel del agua en el vertedero.

A cada una de las tuberías a ensayar, se les acoplaba un collar de derivación en un extremo con el objeto de purgar la tubería y expulsar el aire que pudiera quedar dentro de la tubería. Una vez purgada la tubería se tapaba el collar para iniciar la prueba.

Se utilizaron dos sistemas de quietamiento para aportar mayor precisión en la medida del caudal, debido a que las altas presiones en las fugas generan altas velocidades de salida del agua y por ende una alta turbulencia en el canal. El primer sistema es una división en cada canal donde el agua circula solo a través de una tubería de 4" de diámetro. La segunda pantalla consiste en ladrillos colocados manera que quieten el flujo en la salida de la tubería de 4" de diámetro.

El caudal y la presión fueron suministradas por una motobomba con capacidad máxima de caudal de 6,0 L/s y 56 m de cabeza de agua.

Las cuatro válvulas localizadas en cada uno de los canales respectivamente, se ubicaron antes de los manómetros para medición de presión, con el fin de no tener en cuenta las pérdidas menores generadas por este accesorio. Sin embargo, debido a que los caudales medidos son bajos, el efecto de las pérdidas menores es prácticamente insignificante.

El circuito es totalmente cerrado e independiente al sistema de distribución del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Los Andes.

En el Anexo 1 se ilustra el esquema del circuito de pruebas vistas en planta y perfil.

En las siguientes figuras se muestran los distintos componentes del circuito de pruebas para la modelación de fugas en tuberías simples y accesorios.



Figura 5.1: Motobomba y sistema de distribución del circuito de pruebas.



Figura 5.2: Válvulas y manómetros ubicados en la entrada de cada canal.



Figura 5.3: Canal No. 2 para pruebas, condicionado con los sistemas de quietamiento.



Figura 5.4: Sistema de purga para la evacuación del aire acumulado en la tubería fallada.



Figura 5.5: Vertedero triangular de 60° condicionado con su limnómetro.

Capítulo 6 METODOLOGÍA GENERAL

La metodología general para la calibración de parámetros de fugas está compuesta por tres etapas fundamentales, las cuales se repiten en cada una de las pruebas. Estas etapas son:

1. Pruebas experimentales y registro de datos.
2. Calibración de parámetros de fuga.
3. Análisis de resultados.

Cada una de las tres etapas anteriores contiene procedimientos específicos necesarios para mantener la confiabilidad en la toma de datos experimentales, debido a que la generación de fallas reales contiene un grado de aleatoriedad que requiere de un control riguroso en cuanto a las características típicas que definen un tipo de falla.

Cada una de las tres etapas se describe a continuación:

6.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES

Las pruebas experimentales tienen tres procedimientos básicos necesarios para la óptima realización de los ensayos. Estas son:

1. Calibración de vertederos
2. Generación de fallas
3. Realización de los ensayos

6.1.1 CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS

Se emplearon las ecuaciones calibradas para cada uno de los vertederos en ÁVILA 2003 [1].

Tabla 6-1: Ecuaciones calibradas de los vertederos triangulares de 60°	
Vertedero 1	$Q = 8.7 \times 10^{-6} h^{2.50}$
Vertedero 2	$Q = 7.99 \times 10^{-6} h^{2.50}$

donde,

Q es el caudal, en m³/s.

h es la altura de la lámina de agua sobre el vertedero, en cm.

En el Anexo 2 se muestran las curvas calibradas de los dos vertederos utilizados.

6.1.2 GENERACIÓN DE LAS FALLAS

Durante las instalaciones de redes de distribución de agua potable, se pueden presentar distintos tipos de fallas en tuberías y accesorios. La mayor parte de los daños ocurren durante el transporte, manipulación, instalación y reparación de las redes. Los daños provocados por golpes pueden generar fallas que visiblemente no son detectables si no hay presión en la red o provocar también el debilitamiento de la zona golpeada de la tubería, generándose el daño posteriormente durante la operación.

En esta investigación, el proceso de generación de fallas depende del tipo de daño que se desea modelar en la conexión. En cada una de ellas requiere de la experimentación de distintos métodos para lograr el mejor ajuste a las características típicas de la falla debido al grado de aleatoriedad que se maneja.

Se experimentaron fallas en las cuales se producía un desplazamiento transversal del collar de derivación en tuberías de 2", 3" y 4" con una relación diámetro espesor (*RDE*) de 21. Las pruebas se realizaban con empaque y sin empaque. Igualmente se produjeron fallas con las mismas características de las anteriores, pero con un desplazamiento longitudinal del collar.

En la Figura 6.1 se ilustra una falla en la acometida de una conexión domiciliaria.



Figura 6.1: Falla en la acometida de una tubería de 3" de diámetro.

6.1.3 EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS

6.1.3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS MEDICIONES

Las pruebas consisten en determinar los caudales generados en función de distintas presiones ensayadas en cada una de las fallas modeladas. Cada uno de los pares presión – caudal equivalen a un punto experimental en la curva de gasto en función de la presión.

Una vez fallado el accesorio, se acopla al sistema de alimentación de cada canal, asegurando una total hermeticidad en la rosca y manteniendo abierto el sistema de purga localizado en el extremo de la tubería. Se abren totalmente la válvula de control del canal donde se realizará la prueba y la válvula de control general, manteniendo las demás válvulas de control de canal cerradas. Posteriormente, se enciende la motobomba y se somete inicialmente el sistema a una presión baja con el fin de evacuar por el sistema de purga el aire acumulado en la tubería fallada y evitar una fatiga súbita de la falla. Una vez evacuado el aire de la tubería, se sella el sistema de purga y se cierra parcialmente la válvula de control general para generar un aumento en la presión en el sistema. Finalmente, al equilibrarse la presión, se espera un tiempo de estabilización entre 5 y 10 minutos y se toma la lectura del limnómetro para la determinación del caudal.

Una vez finalizada la lectura para una presión específica, se manipulan la válvula de control general o la válvula de control del canal para variar la presión, repitiendo el procedimiento anterior.

A continuación se muestra una secuencia esquematizada del procedimiento para la realización de las pruebas:

1. Generación de la falla en el accesorio.
2. Instalación del sistema de purga y accesorios para el acople en el circuito de pruebas.
3. Acople de la tubería o accesorio fallado en cualquiera de los cuatro canales, asegurando un total sello en la rosca de alimentación.
4. Apertura del sistema de purga instalado en la tubería fallada.
5. Apertura total de la válvula de control del canal respectivo y la válvula de control general del sistema.
6. Cierre de las válvulas de control de los demás canales. Si en los otros canales se realizaran pruebas, se pueden dejar totalmente abiertas las válvulas.
7. Encendido de la motobomba. Si la válvula de control general está totalmente abierta, se asegura que la presión inicial en el sistema sea baja, permitiendo la suave evacuación del aire y evitando la fatiga súbita de la falla.

8. Cierre del sistema de purga.
9. Cierre parcial de la válvula de control general para generar un aumento inicial en la presión igual a 10 psi (7.1 m de cabeza de agua). Si en el circuito de pruebas se están ensayando cuatro tuberías simultáneamente y con el cierre total de la válvula de control general no se logra un aumento considerable de la presión en el sistema, quiere decir que una o varias de las fallas son lo suficientemente grandes para generar una caída de presión que supera la capacidad de la motobomba. Si esto ocurre, es necesario cerrar las válvulas de las tuberías que generan la caída de presión y ensayarlas individualmente. Si el problema continúa, quiere decir que se requiere una motobomba adicional instalada en serie para incrementar la presión en el sistema.
10. Medición permanente del limnómetro en el vertedero triangular de 60° con el fin de determinar el momento en el cual el flujo en el canal se ha estabilizado. Este tiempo tiene una duración entre 5 y 10 min.
11. Medición del nivel del limnómetro para la determinación del caudal.
12. Cierre parcial adicional de la válvula de control general para incrementar la presión en el sistema. También es posible modificar la presión en cada canal manipulando las válvulas de control de cada canal. Si al cerrar totalmente la válvula de control general y abrir la válvula de control del canal no se logra elevar la presión a la necesidad del investigador, es necesario instalar una motobomba adicional.

6.2 CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS

La calibración consiste en la búsqueda de los parámetros de la ecuación de fuga. Esta ecuación tiene la forma básica de la expresión para el flujo a través de orificios ([6-1]).

$$Q = cP^b \quad [6-1]$$

donde,

Q es el caudal que sale por el orificio. [m^3/s]

P es la presión expresada en altura de agua. [m]

c es el coeficiente global de descarga de la ecuación de fuga, el cual está relacionado con el área y el término $\sqrt{2g}$; donde g es la gravedad en m^2/s y el coeficiente

$$c_1 = \frac{\text{Área del chorro}}{\text{Área del orificio}} \cdot \frac{\text{Velocidad real del chorro}}{\text{Velocidad teórica del chorro}} \cdot c = c_1 \cdot A \cdot \sqrt{2g}$$

b es el exponente de la ecuación de fuga, el cual está relacionado con el tipo de falla.



Para determinar los parámetros de la ecuación [6-1], se empleó el método de simulación de Monte-Carlo [2]. Este método consiste básicamente en la búsqueda por simulaciones, de la combinación de parámetros que logre aproximar el fenómeno físico a la ecuación teórica. Se realizaron 2000 simulaciones por prueba, encontrando la combinación de parámetros c y b , evaluando el ajuste entre los datos experimentales y teóricos mediante el criterio de R^2 , el criterio $1 - R^2$ y el Error cuadrático medio (ECM) y determinando adicionalmente la sensibilidad de los parámetros calibrados.

Para determinar los parámetros de la ecuación de fuga que agrega toda las fallas para un solo diámetro se utilizó el programa DataFit. Este es un programa estadístico que se fundamenta en el análisis de regresiones con múltiples variables para diferentes tipos de ecuaciones. Mediante una ecuación que represente de manera apropiada las condiciones de caudal de fuga para una presión determinada, se encuentran los parámetros de la ecuación (ver 0)

Capítulo 7 FALLAS EN CONEXIONES DOMICILIARIAS

Según estudios de las empresas de acueducto de Latinoamérica, la gran mayoría de las fugas de agua de los sistemas de distribución ocurren en las conexiones domiciliarias. Estas fugas se deben a la inadecuada instalación de las conexiones domiciliarias, ya sea por desplazamientos longitudinales o transversales del collar de derivación con respecto al orificio de salida del agua (acometida) y por la ausencia del empaque hermético.

Estos problemas ocurren muy a menudo en las ciudades y en especial en las zonas populares, porque la mayoría de las conexiones domiciliarias son realizadas por los mismos habitantes de la vivienda, siendo personas sin experiencia que hacen la conexión bajo su criterio sin tener en cuenta la calidad y eficiencia del trabajo realizado. Como consecuencia, la empresa de acueducto tiene que tener que identificar estos problemas y repararlos.

Las conexiones domiciliarias evaluadas consisten en collares de derivación de PVC de $\frac{1}{2}$ " de diámetro para tuberías plásticas de PVC de 2", 3" y 4" de diámetro con una relación diámetro espesor (*RDE*) equivalente a 21.

En la Figura 7.1 se observa en detalle el acople del collar de derivación con y sin empaque hermético, para una conexión domiciliar de $\frac{1}{2}$ " de diámetro para tuberías plásticas de PVC de 2", 3" y 4" de diámetro.



Figura 7.1: Detalle del acople del collar de derivación con y sin empaque hermético.

El orificio de salida mostrado con líneas segmentadas (color azul) en la Tabla 7-1 y Tabla 7-2), tiene un diámetro de 1,25 cm, aproximadamente equivalente al diámetro interno del collar de derivación, que para las pruebas realizadas fue una acometida de ½". Adicionalmente, las fallas se evaluaron manteniendo abierta la salida hacia el contador de agua que se ubica en los registros como se observa en la Figura 7.2. Se probaron las siguientes fallas:



Figura 7.2: Montaje de las fallas evaluadas en conexiones domiciliarias.

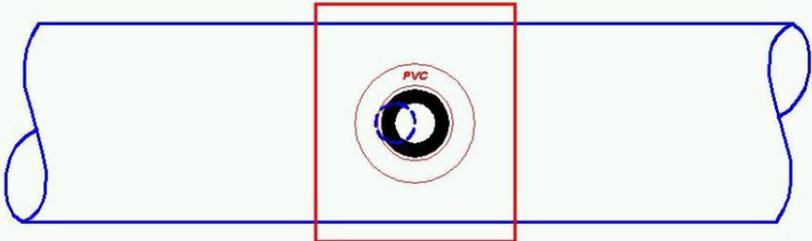
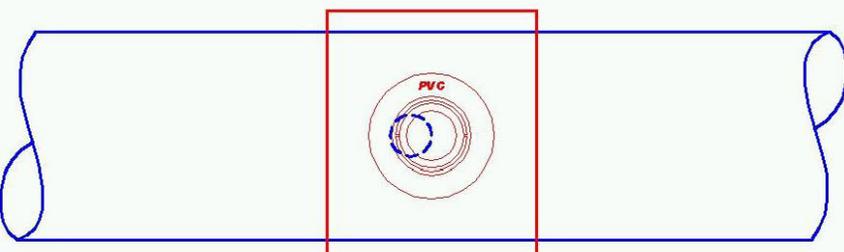
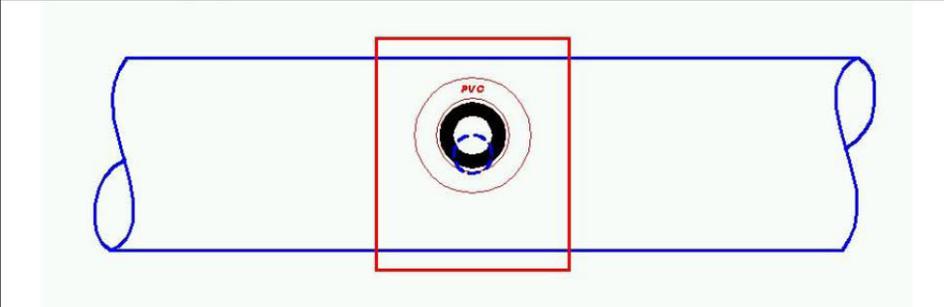
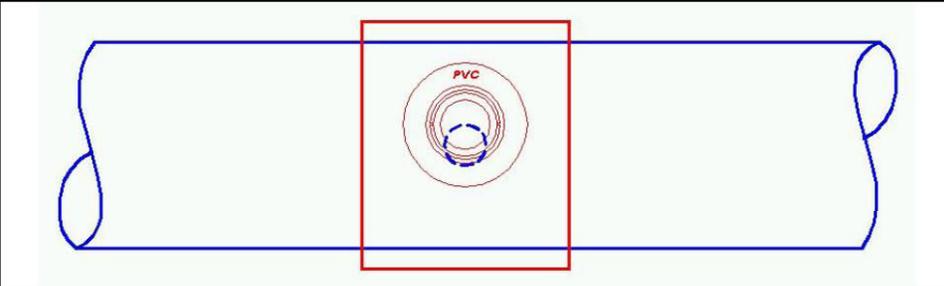
Tabla 7-1: Fallas evaluadas en conexiones domiciliarias (desplazamiento longitudinal)	
Tipo de falla	Descripción
Con empaque (1)	Desplazamiento longitudinal del collar de derivación con respecto al orificio de salida (con empaque hermético).
	
Sin empaque (2)	Desplazamiento longitudinal del collar de derivación con respecto al orificio de salida (sin empaque hermético).
	

Tabla 7-2: Fallas evaluadas en conexiones domiciliarias (desplazamiento transversal)	
Tipo de falla	Descripción
Con empaque (3)	Desplazamiento transversal del collar de derivación con respecto al orificio de salida (con empaque hermético).
	
Sin empaque (4)	Desplazamiento transversal del collar de derivación con respecto al orificio de salida (sin empaque hermético).
	

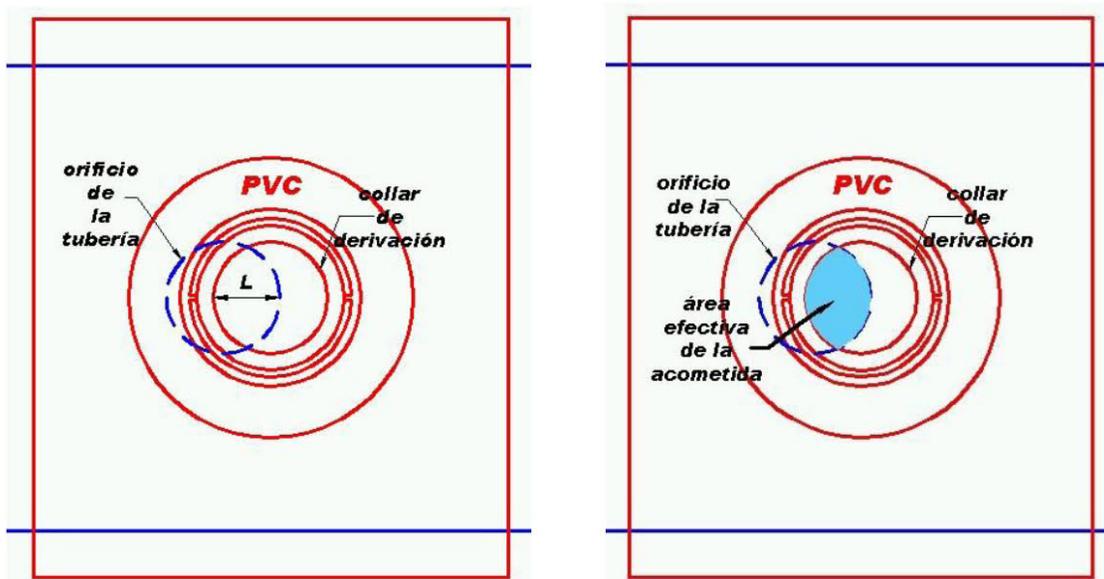


Figura 7.3: Esquema del desplazamiento del collar de derivación con respecto al orificio de la tubería.

En la parte izquierda de la Figura 7.3 se observa la longitud L que hace referencia a la longitud de la falla. Esta longitud es la distancia medida para cada prueba por medio de un calibrador. Si la longitud de la falla medida es cero quiere decir que el collar de derivación se encontraba totalmente desplazado, mientras que si la longitud de la falla es cercana al diámetro del orificio (diámetro de la acometida) el collar se encuentra centrado y su desplazamiento es casi cero.

En la parte derecha de la Figura 7.3 se observa el área efectiva de la acometida. Esta área es función de la longitud de falla y del diámetro de la acometida. Para la calibración agrupada de todos los diámetros de un mismo tipo de falla (0) se utilizó una relación que involucra la longitud de la falla como función del área por la que se encuentra saliendo el caudal de fuga de la conexión domiciliaria.

A continuación se presentan los resultados de las pruebas individuales para cada una de las fallas antes mencionada. Para cada prueba se tienen 10 puntos de la curva caudal – presión y mediante un análisis de MonteCarlo se pretende encontrar los parámetros óptimos de la ecuación de fuga (coeficiente y exponente) que mejor se ajusten a los datos experimentales. Para tal fin se realizaron 2000 simulaciones con rangos de los parámetros que estuvieran dentro de los valores admisibles.

Para las ecuaciones resultantes de la calibración que relacionan el caudal de fuga con la presión de servicio en la acometida, las unidades son las siguientes:

El caudal se encuentra dado en mililitros por segundo y la presión en metros de columna de agua.

7.1 DESPLAZAMIENTO LONGITUDINAL

Para las pruebas de desplazamiento longitudinal se ensayaron tuberías de 2", 3" y 4" de diámetro con y sin empaque hermético. Para cada tubería se realizaron 7 pruebas con diferentes longitudes de falla.

7.1.1 Desplazamiento longitudinal con empaque

Para el desplazamiento longitudinal con empaque se realizaron pruebas en tuberías de 2" y 4" de diámetro para diferentes longitudes de falla, desde 0.0 mm que corresponde a un desplazamiento del 100% del collar de derivación de la acometida hasta 12.5 mm que corresponde a un desplazamiento cercano al 0% del collar de derivación, es decir que se encontraba totalmente centrado.

7.1.1.1 Tubería de 2"

A continuación se presentan los resultados de la calibración para cada falla evaluada, donde se especifica el valor del coeficiente y el exponente de la ecuación de fuga, así mismo como el coeficiente de correlación R^2 que representa que tan buenos son los resultados de la calibración.

Tabla 7-3: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento longitudinal con empaque para una tubería de 2"				
Diámetro	Longitud de la falla (mm)	% del área efectiva de la acometida	Ecuación	R^2
2" 50.8 mm	0.0 mm	0.00 %	$Q = 320.77 P^{0.6017}$	0.99827
	3.0 mm	14.33 %	$Q = 225.49 P^{0.5836}$	0.99736
	6.0 mm	36.95 %	$Q = 193.89 P^{0.5609}$	0.99616
	8.0 mm	54.73 %	$Q = 128.20 P^{0.5839}$	0.99814
	9.5 mm	69.21 %	$Q = 84.67 P^{0.5827}$	0.99460
	11.0 mm	84.56 %	$Q = 40.98 P^{0.6577}$	0.99361
	12.5 mm	100.0 %	$Q = 15.04 P^{0.7820}$	0.99544



Figura 7.4: Fuga a través de un collar de derivación con empaque desplazado un 75 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 2".

Para la falla 1, correspondiente a un desplazamiento longitudinal del collar de derivación con empaque, del 75 % del diámetro del orificio de salida, para un diámetro de 2" (Ver Figura 7.4), se obtiene un coeficiente global de descarga de 225,49 y un exponente $b = 0,5836$ con un ajuste $R^2 = 0,99736$. La Figura 7.6 muestra que el exponente b es muy cercano al valor teórico para orificios circulares y en la Figura 7.5 se aprecia una pérdida del orden de 2,2 L/s para una presión de 50 m de cabeza de agua. La correlación y el análisis de sensibilidad se muestran en la Figura 7.6.

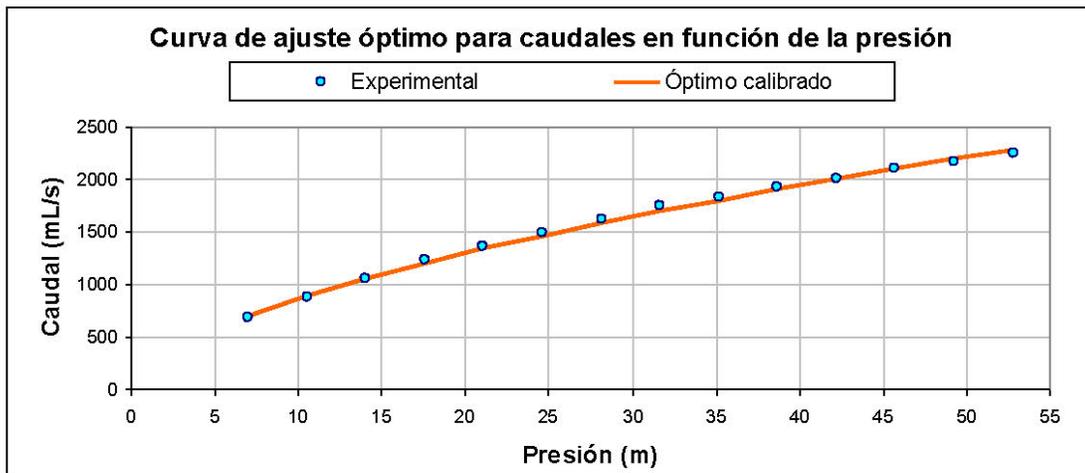
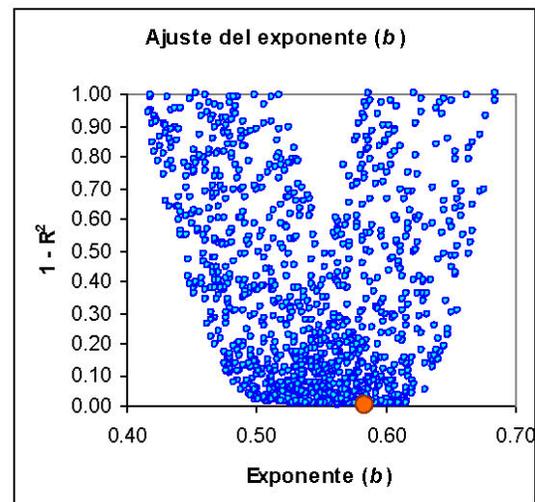
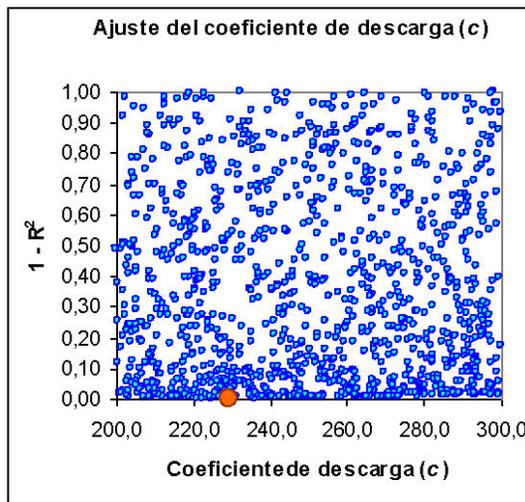


Figura 7.5: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación con empaque desplazado un 75 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 2".



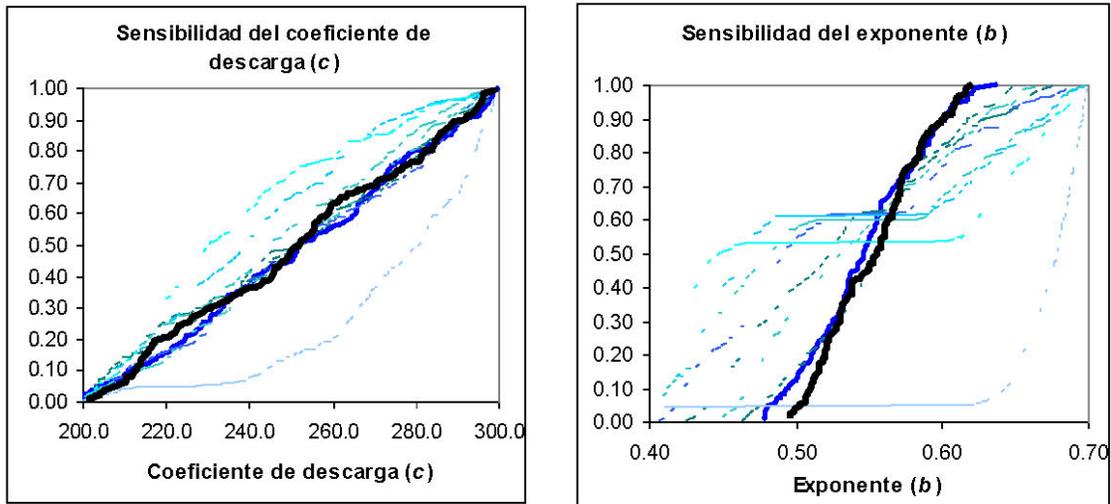


Figura 7.6: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación con empaque desplazado un 75 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 2”.

En el Anexo 3 se muestran los resultados de la calibración para las diferentes longitudes de falla.

7.1.1.2 Tubería de 4”

A continuación se presentan los resultados de la calibración para cada falla evaluada, donde se especifica el valor del coeficiente y el exponente de la ecuación de fuga, así mismo como el coeficiente de correlación R^2 que representa que tan buenos son los resultados de la calibración.

Tabla 7-4: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento longitudinal con empaque para una tubería de 4”				
Diámetro	Longitud de la falla (mm)	% del área efectiva de la acometida	Ecuación	R^2
4” 101.6 mm	0.0 mm	0.00 %	$Q = 372.21P^{0.5579}$	0.99796
	2.5 mm	11.04 %	$Q = 342.72P^{0.5794}$	0.99923
	4.5 mm	24.78 %	$Q = 353.13P^{0.5721}$	0.99671
	7.0 mm	45.49 %	$Q = 316.92P^{0.5379}$	0.99655
	9.0 mm	64.27 %	$Q = 206.19P^{0.5640}$	0.99555
	10.5 mm	79.45 %	$Q = 151.50P^{0.5954}$	0.99619
	12.0 mm	95.46 %	$Q = 25.04P^{0.6595}$	0.99414



Figura 7.7: Fuga a través de un collar de derivación con empaque desplazado un 44 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 4”.

Para la falla 1, correspondiente a un desplazamiento longitudinal del collar de derivación con empaque, del 44 % del diámetro del orificio de salida, para un diámetro de 4” (Ver Figura 7.7), se obtiene un coeficiente global de descarga de 316,92 y un exponente $b = 0,5379$ con un ajuste $R^2 = 0,99655$. La Figura 7.9 muestra que el exponente b es muy cercano al valor teórico para orificios circulares y en la Figura 7.8 se aprecia una pérdida del orden de 2,6 L/s para una presión de 50 m de cabeza de agua. La correlación y el análisis de sensibilidad se muestran en la Figura 7.9.

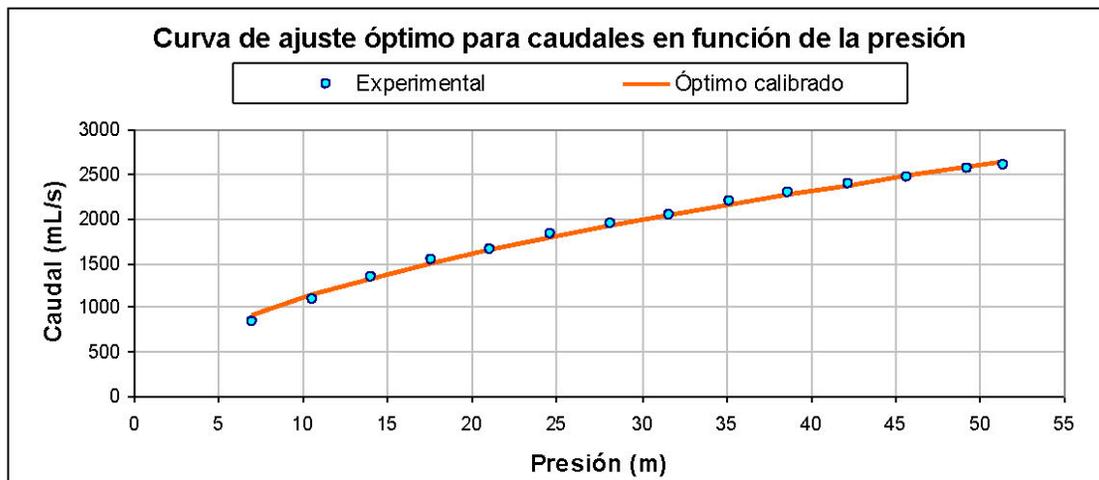


Figura 7.8: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación con empaque desplazado un 44 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 4”.

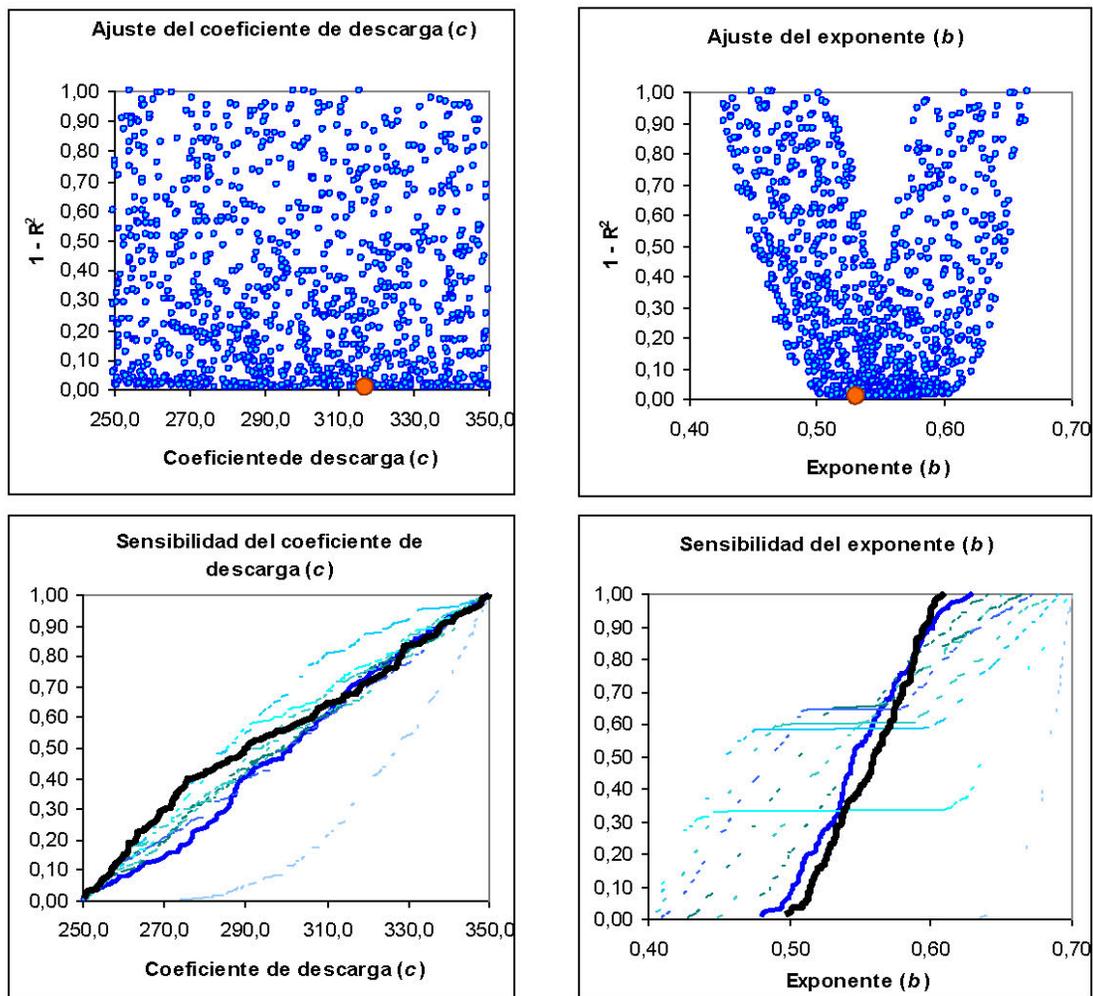


Figura 7.9: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación con empaque desplazado un 44 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 4".

En el Anexo 3 se muestran los resultados de la calibración para las diferentes longitudes de falla.

7.1.2 Desplazamiento longitudinal sin empaque

Para el desplazamiento longitudinal sin empaque se realizaron pruebas en tuberías de 2", 3" y 4" de diámetro para diferentes longitudes de falla, desde 0.0 mm que corresponde a un desplazamiento del 100% del collar de derivación de la acometida hasta 12.5 mm que corresponde a un desplazamiento cercano al 0% del collar de derivación, es decir que se encontraba totalmente centrado.

7.1.2.1 Tubería de 2"

A continuación se presentan los resultados de la calibración para cada falla evaluada, donde se especifica el valor del coeficiente y el exponente de la ecuación de fuga, así mismo como el coeficiente de correlación R^2 que representa que tan buenos son los resultados de la calibración.

Tabla 7-5: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque para una tubería de 2"				
Diámetro	Longitud de la falla (mm)	% del área efectiva de la acometida	Ecuación	R^2
2" 50.8 mm	0.0 mm	0.00 %	$Q = 352.42 P^{0.5514}$	0.99921
	3.0 mm	14.33 %	$Q = 281.52 P^{0.5090}$	0.99362
	6.0 mm	36.95 %	$Q = 155.13 P^{0.5708}$	0.99602
	8.0 mm	54.73 %	$Q = 113.38 P^{0.5953}$	0.99289
	9.5 mm	69.21 %	$Q = 104.17 P^{0.5823}$	0.99636
	11.0 mm	84.56 %	$Q = 60.77 P^{0.5954}$	0.99173
	12.5 mm	100.0 %	$Q = 40.29 P^{0.6062}$	0.99348



Figura 7.10: Fuga a través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 52 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 2".

Para la falla 2, correspondiente a un desplazamiento longitudinal del collar de derivación sin empaque, del 52 % del diámetro del orificio de salida, para un diámetro de 2" (Ver Figura 7.10), se obtiene un coeficiente global de descarga de 155,13 y un exponente $b = 0,5708$ con un ajuste $R^2 = 0,99602$. La Figura 7.12 muestra que el exponente b es muy cercano al valor teórico para orificios circulares y en la Figura 7.11 se aprecia una pérdida del orden de 1,4 L/s para una presión de 50 m de cabeza de agua. La correlación y el análisis de sensibilidad se muestran en la Figura 7.12.

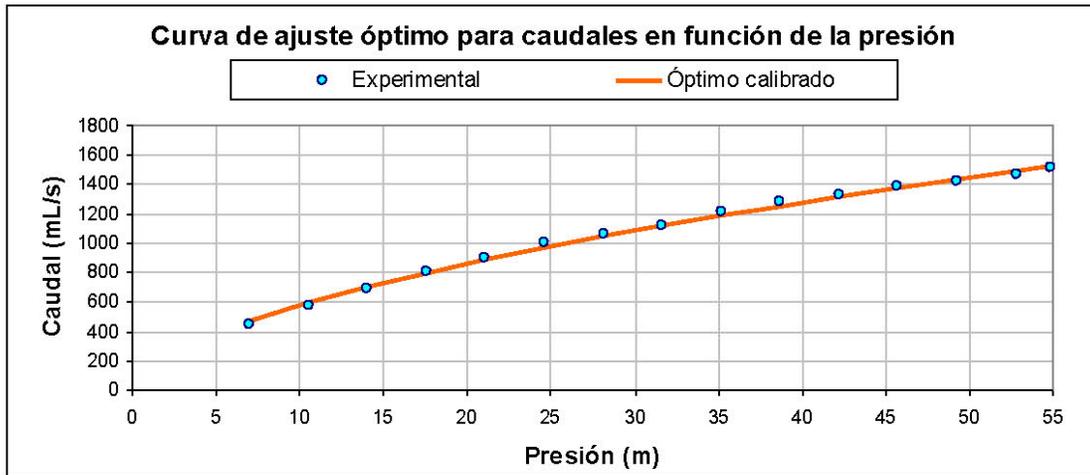
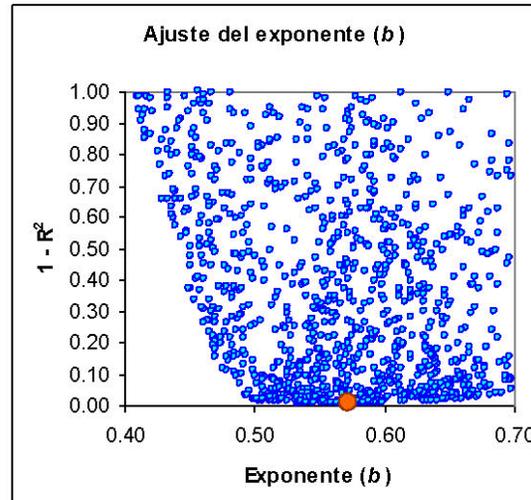
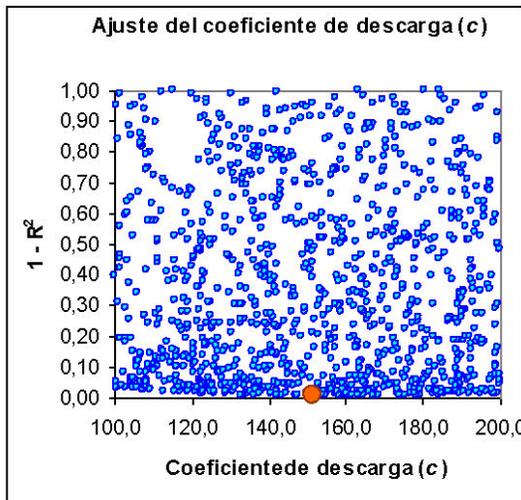


Figura 7.11: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 52 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 2”.



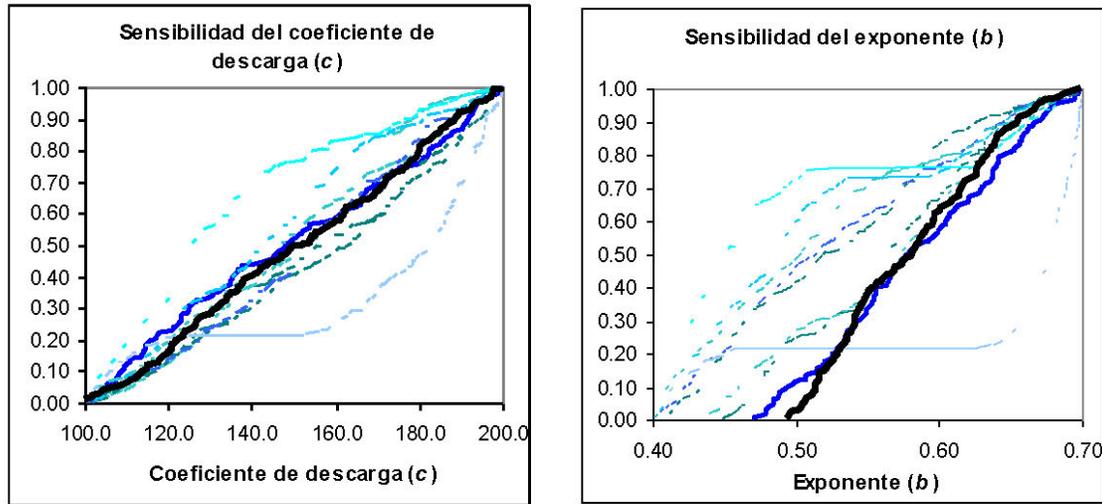


Figura 7.12: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación sin empaque desplazado un 52 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 2”.

En el Anexo 4 se muestran los resultados de la calibración para las diferentes longitudes de falla.

7.1.2.2 Tubería de 3”

A continuación se presentan los resultados de la calibración para cada falla evaluada, donde se especifica el valor del coeficiente y el exponente de la ecuación de fuga, así mismo como el coeficiente de correlación R^2 que representa que tan buenos son los resultados de la calibración.

Tabla 7-6: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque para una tubería de 3”				
Diámetro	Longitud de la falla (mm)	% del área efectiva de la acometida	Ecuación	R^2
3” 76.2 mm	0.0 mm	0.00 %	$Q = 351.42 P^{0.4957}$	0.98517
	2.5 mm	11.17 %	$Q = 252.46 P^{0.6533}$	0.99774
	5.6 mm	33.62 %	$Q = 285.62 P^{0.5779}$	0.99588
	7.3 mm	48.30 %	$Q = 294.94 P^{0.5173}$	0.99508
	9.3 mm	67.23 %	$Q = 237.68 P^{0.5275}$	0.98139
	10.5 mm	79.35 %	$Q = 167.75 P^{0.5686}$	0.99178
	12.0 mm	95.23%	$Q = 120.45 P^{0.6490}$	0.99481



Figura 7.13: Fuga a través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 26 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 3”.

Para la falla 2, correspondiente a un desplazamiento longitudinal del collar de derivación sin empaque, del 26 % del diámetro del orificio de salida, para un diámetro de 3” (Ver Figura 7.13), se obtiene un coeficiente global de descarga de 237,68 y un exponente $b = 0,5275$ con un ajuste $R^2 = 0,98139$. La Figura 7.15 muestra que el exponente b es muy cercano al valor teórico para orificios circulares y en la Figura 7.14 se aprecia una pérdida del orden de 1,9 L/s para una presión de 50 m de cabeza de agua. La correlación y el análisis de sensibilidad se muestran en la Figura 7.15.

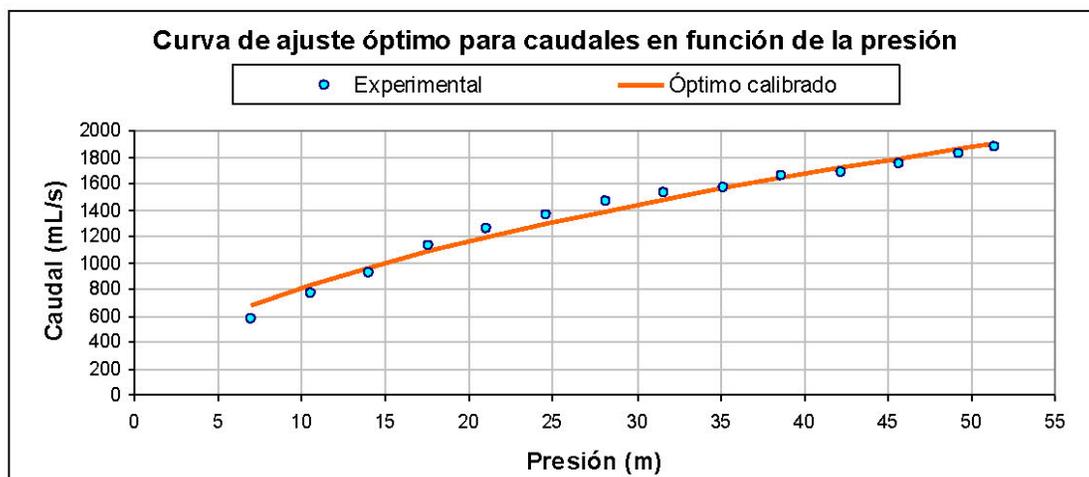


Figura 7.14: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 26 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 3”.

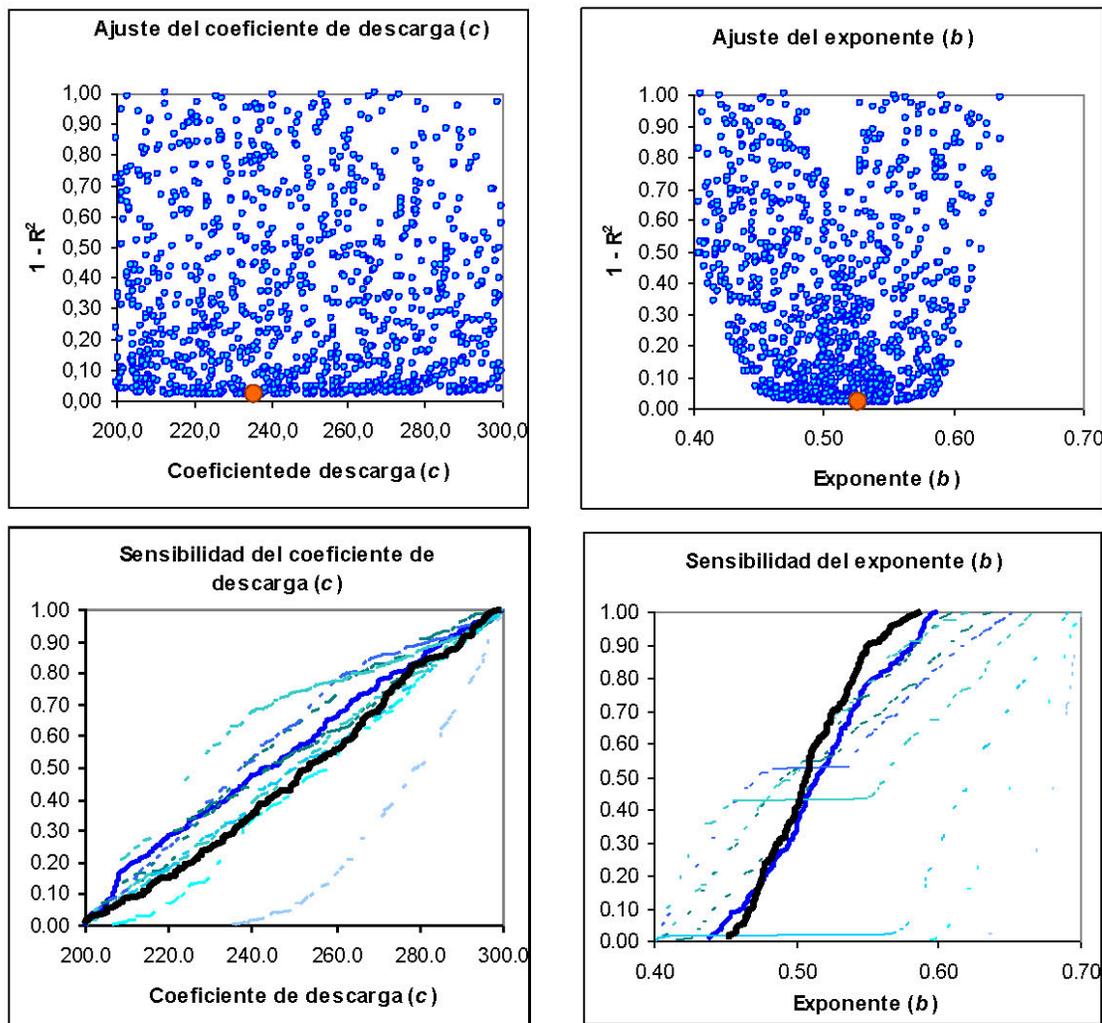


Figura 7.15: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación sin empaque desplazado un 26 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 3".

En el Anexo 4 se muestran los resultados de la calibración para las diferentes longitudes de falla.

7.1.2.3 Tubería de 4"

A continuación se presentan los resultados de la calibración para cada falla evaluada, donde se especifica el valor del coeficiente y el exponente de la ecuación de fuga, así mismo como el coeficiente de correlación R^2 que representa que tan buenos son los resultados de la calibración.

Tabla 7-7: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque para una tubería de 4"				
Diámetro	Longitud de la falla (mm)	% del área efectiva de la acometida	Ecuación	R ²
4" 101.6 mm	0.0 mm	0.00 %	$Q = 239.80 P^{0.5782}$	0.99194
	1.0 mm	3.20 %	$Q = 271.93 P^{0.5216}$	0.99891
	3.0 mm	14.33 %	$Q = 295.33 P^{0.5191}$	0.99275
	5.0 mm	28.80 %	$Q = 286.49 P^{0.5214}$	0.99725
	7.2 mm	47.39 %	$Q = 253.48 P^{0.5237}$	0.99231
	9.5 mm	69.21 %	$Q = 209.57 P^{0.5397}$	0.99024
	11.0 mm	84.56 %	$Q = 154.81 P^{0.4630}$	0.98112



Figura 7.16: Fuga a través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 60 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 4".

Para la falla 2, correspondiente a un desplazamiento longitudinal del collar de derivación sin empaque, del 60 % del diámetro del orificio de salida, para un diámetro de 4" (Ver Figura 7.16), se obtiene un coeficiente global de descarga de 286,49 y un exponente $b = 0,5214$ con un ajuste $R^2 = 0,99725$. La Figura 7.18 muestra que el exponente b es muy cercano al valor teórico para orificios circulares y en la Figura 7.17 se aprecia una pérdida del orden de 2.2 L/s para una presión de 50 m de cabeza de agua. La correlación y el análisis de sensibilidad se muestran en la Figura 7.18.

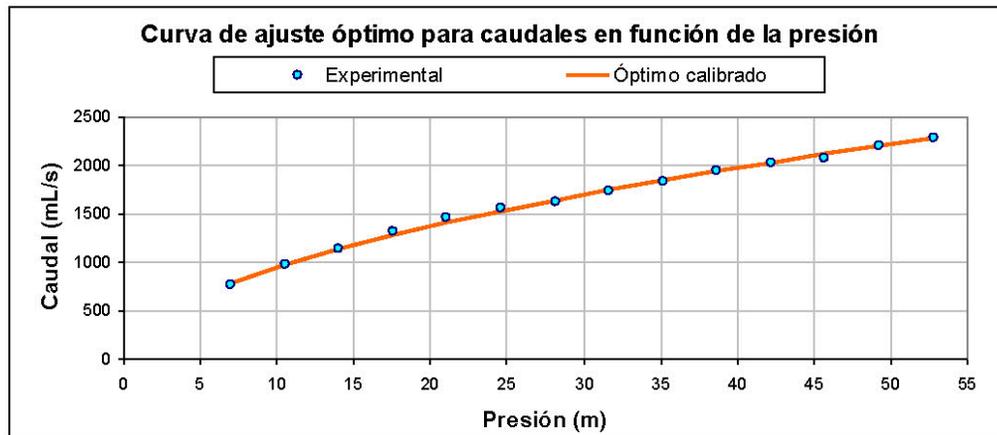


Figura 7.17: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 60 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 4".

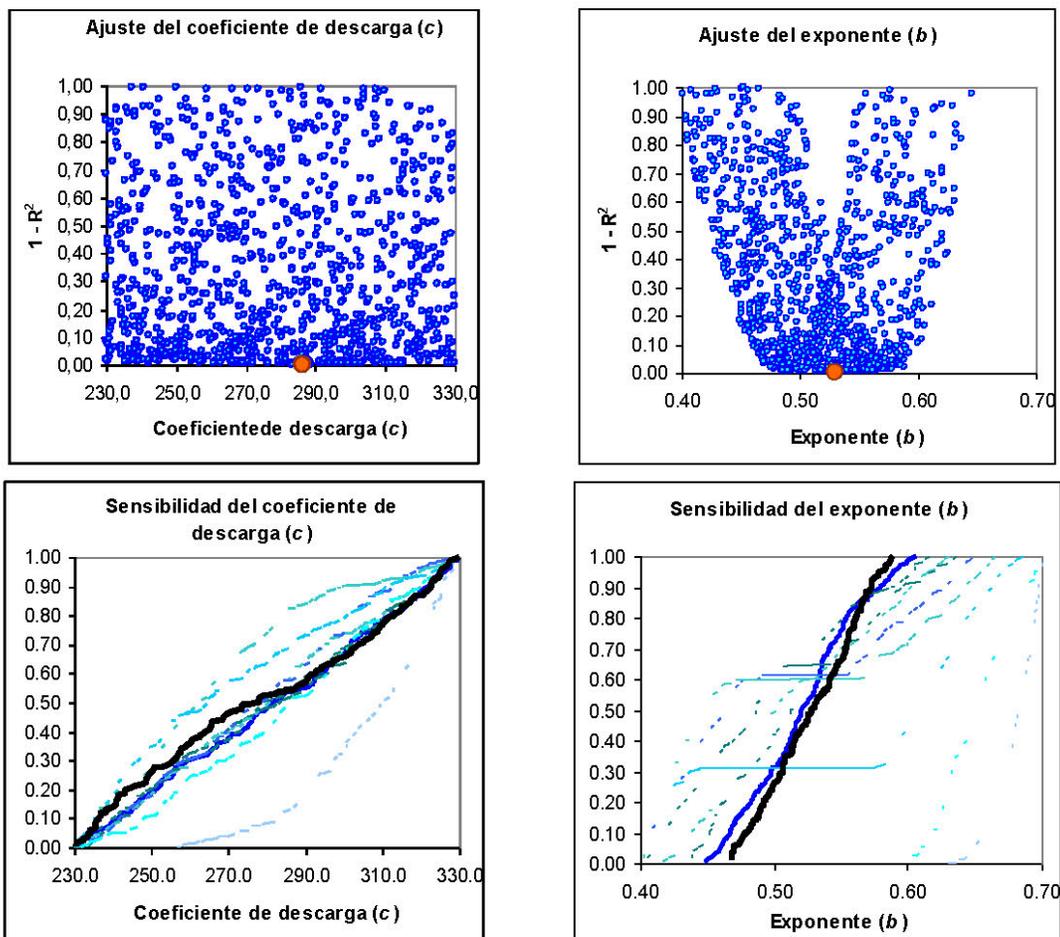


Figura 7.18: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación sin empaque desplazado un 60 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 4".

En el Anexo 4 se muestran los resultados de la calibración para las diferentes longitudes de falla.

7.2 DESPLAZAMIENTO TRANSVERSAL

Para las pruebas de desplazamiento transversal se ensayaron tuberías de 2", 3" y 4" de diámetro con y sin empaque hermético. Para cada tubería se realizaron 7 pruebas con diferentes longitudes de falla.

7.2.1 Desplazamiento transversal con empaque

Para el desplazamiento transversal con empaque se realizaron pruebas en tuberías de 2" y 4" de diámetro para diferentes longitudes de falla, desde 0.0 mm que corresponde a un desplazamiento del 100% del collar de derivación de la acometida hasta 12.5 mm que corresponde a un desplazamiento cercano al 0% del collar de derivación, es decir que se encontraba totalmente centrado.

7.2.1.1 Tubería de 2"

A continuación se presentan los resultados de la calibración para cada falla evaluada, donde se especifica el valor del coeficiente y el exponente de la ecuación de fuga, así mismo como el coeficiente de correlación R^2 que representa que tan buenos son los resultados de la calibración.

Tabla 7-8: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento transversal con empaque para una tubería de 2"				
Diámetro	Longitud de la falla (mm)	% del área efectiva de la acometida	Ecuación	R^2
2" 50.8 mm	0.0 mm	0.00 %	$Q = 116.65 P^{0.5163}$	0.99530
	3.0 mm	14.33 %	$Q = 82.29 P^{0.6239}$	0.98337
	6.0 mm	36.95 %	$Q = 71.83 P^{0.5695}$	0.99663
	8.0 mm	54.73 %	$Q = 55.59 P^{0.5308}$	0.99667
	9.5 mm	69.21 %	$Q = 46.74 P^{0.6181}$	0.99246
	11.0 mm	84.56 %	$Q = 56.68 P^{0.4970}$	0.99277
	12.5 mm	100.0 %	$Q = 34.86 P^{0.6884}$	0.99784



Figura 7.19: Fuga a través de un collar de derivación con empaque desplazado un 100 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 2”.

Para la falla 3, correspondiente a un desplazamiento transversal del collar de derivación con empaque, del 100 % del diámetro del orificio de salida, para un diámetro de 2” (Ver Figura 7.19), se obtiene un coeficiente global de descarga de 116,65 y un exponente $b = 0,5163$ con un ajuste $R^2 = 0,99246$. La Figura 7.21 muestra que el exponente b es muy cercano al valor teórico para orificios circulares y en la Figura 7.20 se aprecia una pérdida del orden de 0,9 L/s para una presión de 50 m de cabeza de agua. La correlación y el análisis de sensibilidad se muestran en la Figura 7.21.

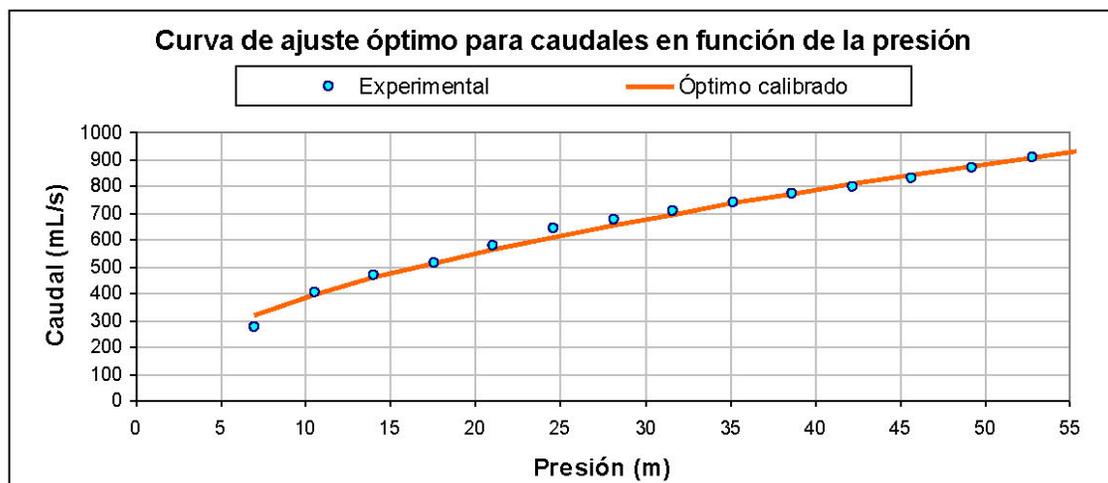


Figura 7.20: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación con empaque desplazado un 100 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 2”.

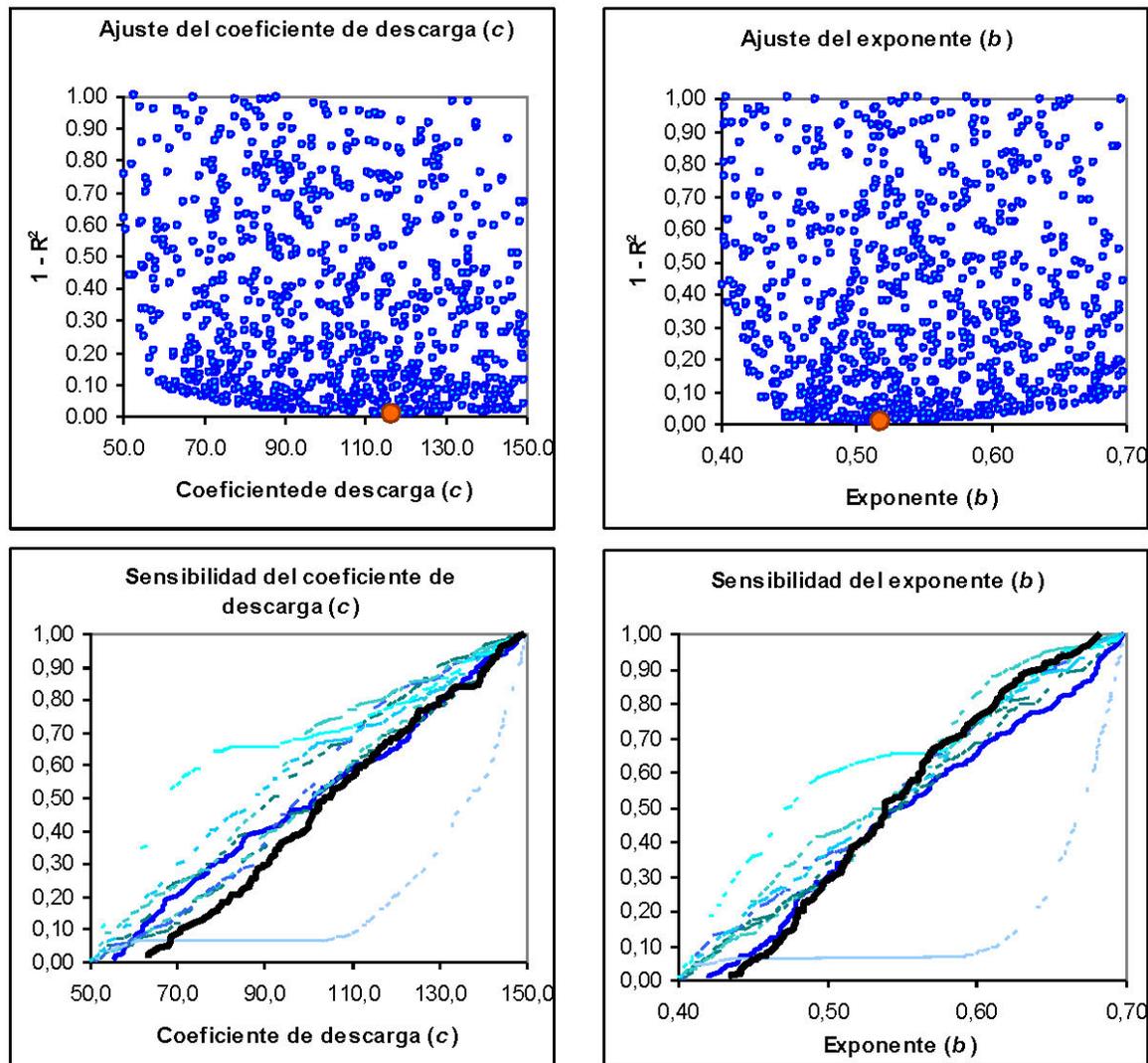


Figura 7.21: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación con empaque desplazado un 100 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 2".

En el Anexo 5 se muestran los resultados de la calibración para las diferentes longitudes de falla.

7.2.1.2 Tubería de 4"

A continuación se presentan los resultados de la calibración para cada falla evaluada, donde se especifica el valor del coeficiente y el exponente de la ecuación de fuga, así mismo como el coeficiente de correlación R^2 que representa que tan buenos son los resultados de la calibración.

Tabla 7-9: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento transversal con empaque para una tubería de 4"				
Diámetro	Longitud de la falla (mm)	% del área efectiva de la acometida	Ecuación	R ²
4" 101.6 mm	0.0 mm	0.00 %	$Q = 309.39 P^{0.5988}$	0.99877
	2.5 mm	11.17 %	$Q = 288.09 P^{0.5910}$	0.99797
	5.0 mm	28.80 %	$Q = 212.97 P^{0.5774}$	0.99788
	7.5 mm	50.11 %	$Q = 192.34 P^{0.5875}$	0.99752
	9.0 mm	64.28 %	$Q = 171.26 P^{0.5740}$	0.99594
	10.5 mm	79.35 %	$Q = 109.24 P^{0.5337}$	0.98488
	12.0 mm	95.23 %	$Q = 22.57 P^{0.7212}$	0.99220



Figura 7.22: Fuga a través de un collar de derivación con empaque desplazado un 80 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 4".

Para la falla 3, correspondiente a un desplazamiento transversal del collar de derivación con empaque, del 80 % del diámetro del orificio de salida, para un diámetro de 4" (Ver Figura 7.22), se obtiene un coeficiente global de descarga de 288,09 y un exponente $b = 0,5910$ con un ajuste $R^2 = 0,99797$. La Figura 7.24 muestra que el exponente b es muy cercano al valor teórico para orificios circulares y en la Figura 7.23 se aprecia una pérdida del orden de 2,9 L/s para una presión de 50 m de cabeza de agua. La correlación y el análisis de sensibilidad se muestran en la Figura 7.24.

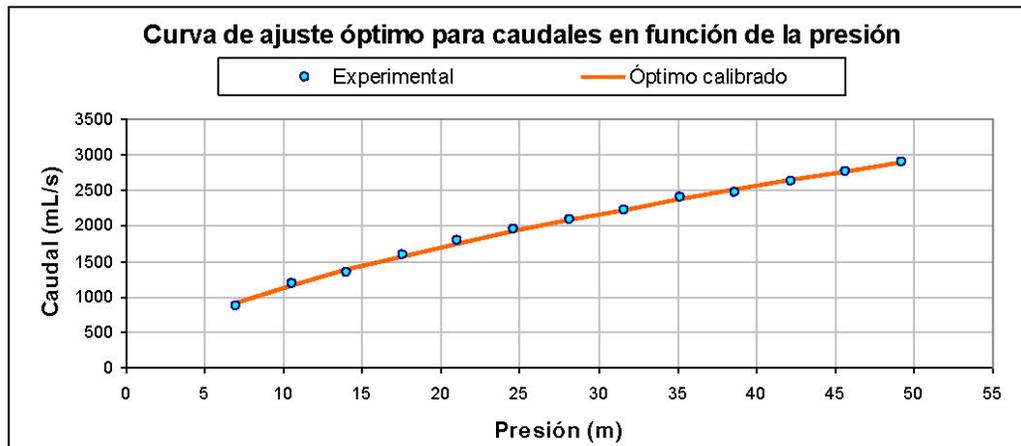


Figura 7.23: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación con empaque desplazado un 80 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 4".

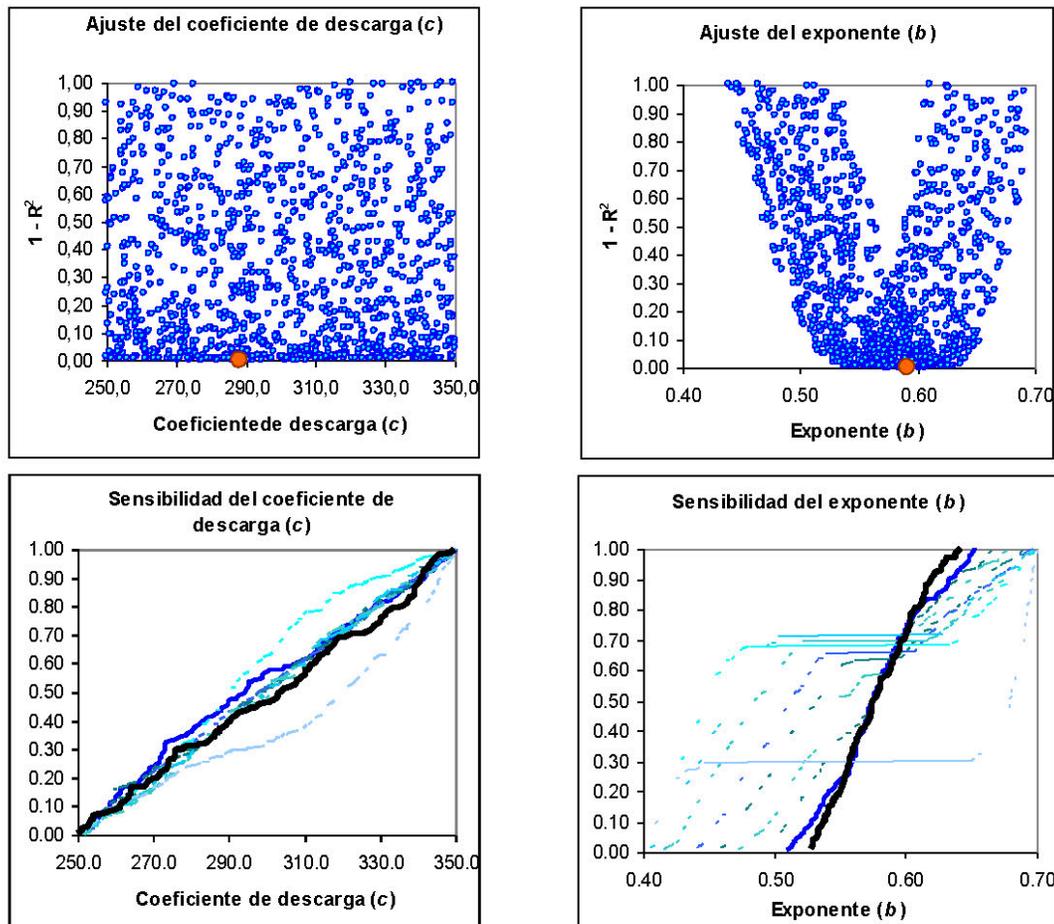


Figura 7.24: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación con empaque desplazado un 80 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 4".

En el Anexo 5 se muestran los resultados de la calibración para las diferentes longitudes de falla.

7.2.2 Desplazamiento transversal sin empaque

Para el desplazamiento transversal sin empaque se realizaron pruebas en tuberías de 2", 3" y 4" de diámetro para diferentes longitudes de falla, desde 0.0 mm que corresponde a un desplazamiento del 100% del collar de derivación de la acometida hasta 12.5 mm que corresponde a un desplazamiento cercano al 0% del collar de derivación, es decir que se encontraba totalmente centrado.

7.2.2.1 Tubería de 2"

A continuación se presentan los resultados de la calibración para cada falla evaluada, donde se especifica el valor del coeficiente y el exponente de la ecuación de fuga, así mismo como el coeficiente de correlación R^2 que representa que tan buenos son los resultados de la calibración.

Tabla 7-10: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento transversal sin empaque para una tubería de 2"				
Diámetro	Longitud de la falla (mm)	% del área efectiva de la acometida	Ecuación	R^2
2" 50.8 mm	0.0 mm	0.00 %	$Q = 122.07P^{0.5517}$	0.99814
	3.0 mm	14.33 %	$Q = 76.65P^{0.6692}$	0.99724
	6.0 mm	36.95 %	$Q = 69.10P^{0.6925}$	0.99712
	8.0 mm	54.73 %	$Q = 79.72P^{0.5593}$	0.98908
	9.5 mm	69.21 %	$Q = 83.28P^{0.5831}$	0.99188
	11.0 mm	84.56 %	$Q = 63.34P^{0.6765}$	0.99435
	12.5 mm	100.0 %	$Q = 56.92P^{0.6857}$	0.99803



Figura 7.25: Fuga a través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 36 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 2”.

Para la falla 4, correspondiente a un desplazamiento transversal del collar de derivación sin empaque, del 36 % del diámetro del orificio de salida, para un diámetro de 2” (Ver Figura 7.25), se obtiene un coeficiente global de descarga de 79,72 y un exponente $b = 0,5593$ con un ajuste $R^2 = 0,98908$. La Figura 7.27 muestra que el exponente b es muy cercano al valor teórico para orificios circulares y en la Figura 7.26 se aprecia una pérdida del orden de 0,7 L/s para una presión de 50 m de cabeza de agua. La correlación y el análisis de sensibilidad se muestran en la Figura 7.27.

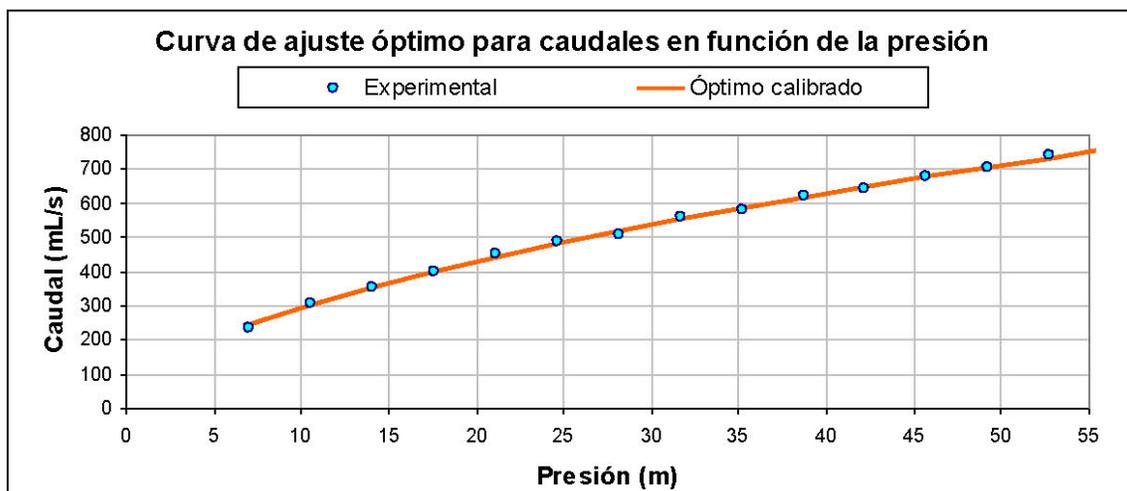


Figura 7.26: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 36 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 2”.

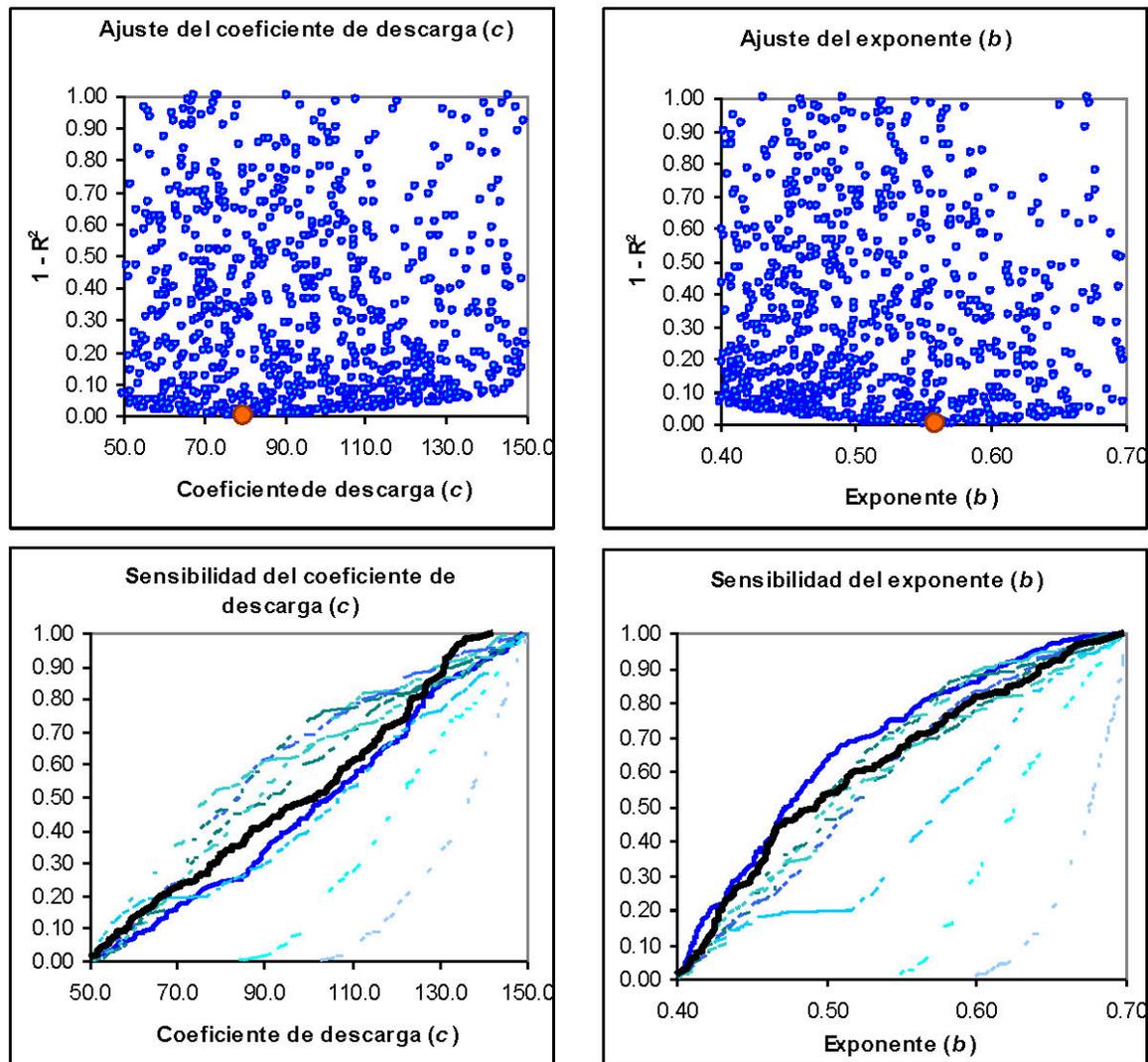


Figura 7.27: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación sin empaque desplazado un 36 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 2”.

En el Anexo 6 se muestran los resultados de la calibración para las diferentes longitudes de falla.

7.2.2.2 Tubería de 3”

A continuación se presentan los resultados de la calibración para cada falla evaluada, donde se especifica el valor del coeficiente y el exponente de la ecuación de fuga, así mismo como el coeficiente de correlación R^2 que representa que tan buenos son los resultados de la calibración.

Tabla 7-11: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento transversal sin empaque para una tubería de 3"				
Diámetro	Longitud de la falla (mm)	% del área efectiva de la acometida	Ecuación	R ²
3" 76.2 mm	0.0 mm	0.00 %	$Q = 208.49 P^{0.5643}$	0.98061
	4.6 mm	25.70 %	$Q = 188.44 P^{0.6044}$	0.99048
	6.0 mm	36.95 %	$Q = 266.25 P^{0.5097}$	0.99047
	7.5 mm	50.11 %	$Q = 204.10 P^{0.5414}$	0.99528
	9.0 mm	64.28 %	$Q = 97.96 P^{0.6654}$	0.99001
	10.5 mm	79.35 %	$Q = 186.86 P^{0.4614}$	0.99330



Figura 7.28: Fuga a través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 52 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 3".

Para la falla 4, correspondiente a un desplazamiento transversal del collar de derivación sin empaque, del 52 % del diámetro del orificio de salida, para un diámetro de 3" (Ver Figura 7.28), se obtiene un coeficiente global de descarga de 266,25 y un exponente $b = 0,5097$ con un ajuste $R^2 = 0.99047$. La Figura 7.30 muestra que el exponente b es muy cercano al valor teórico para orificios circulares y en la Figura 7.29 se aprecia una pérdida del orden de 2,0 L/s para una presión de 50 m de cabeza de agua. La correlación y el análisis de sensibilidad se muestran en la Figura 7.30.

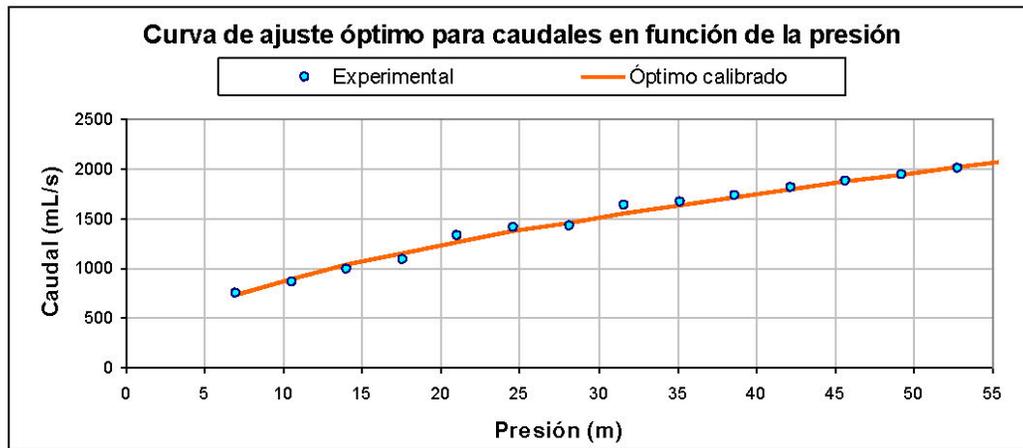


Figura 7.29: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 52 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 3”.

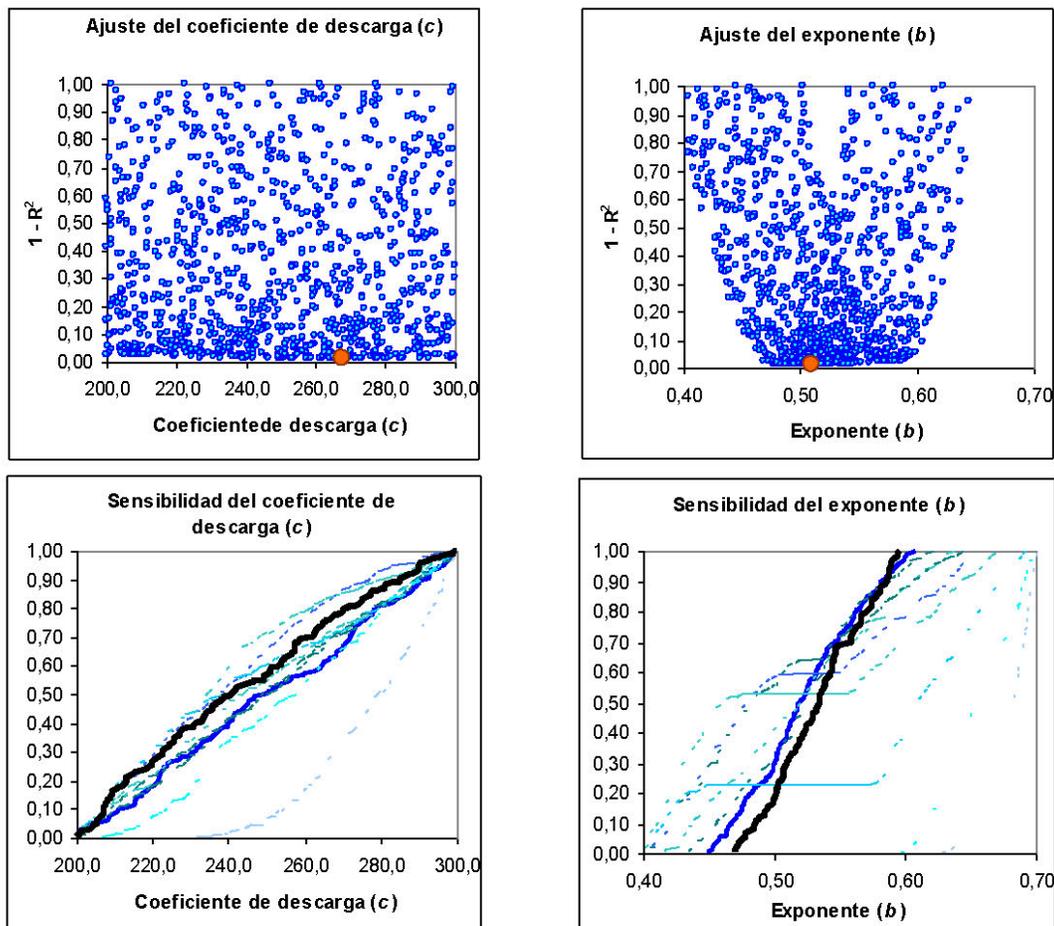


Figura 7.30: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación sin empaque desplazado un 52 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 3”.

En el Anexo 6 se muestran los resultados de la calibración para las diferentes longitudes de falla.

7.2.2.3 Tubería de 4"

A continuación se presentan los resultados de la calibración para cada falla evaluada, donde se especifica el valor del coeficiente y el exponente de la ecuación de fuga, así mismo como el coeficiente de correlación R^2 que representa que tan buenos son los resultados de la calibración.

Tabla 7-12: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento transversal sin empaque para una tubería de 4"				
Diámetro	Longitud de la falla (mm)	% del área efectiva de la acometida	Ecuación	R^2
4" 101.6 mm	0.0 mm	0.00 %	$Q = 192.22P^{0.5339}$	0.99660
	3.0 mm	14.33 %	$Q = 167.65P^{0.5424}$	0.99056
	5.0 mm	28.80 %	$Q = 172.62P^{0.5019}$	0.99223
	7.0 mm	45.61 %	$Q = 133.38P^{0.5516}$	0.99691
	9.0 mm	64.28 %	$Q = 139.51P^{0.5358}$	0.99361
	11.0 mm	84.56 %	$Q = 96.68P^{0.6158}$	0.99283
	12.5 mm	100.0 %	$Q = 78.82P^{0.6402}$	0.99721



Figura 7.31: Fuga a través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 100 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 4".

Para la falla 4, correspondiente a un desplazamiento transversal del collar de derivación sin empaque, del 100 % del diámetro del orificio de salida, para un diámetro de 4" (Ver Figura Determinación de parámetros de fugas para fallas en conexiones domiciliarias en tuberías de PVC de 2", 3" y 4").

7.31), se obtiene un coeficiente global de descarga de 192,22 y un exponente $b = 0,5339$ con un ajuste $R^2 = 0,99660$. La Figura 7.33 muestra que el exponente b es muy cercano al valor teórico para orificios circulares y en la Figura 7.32 se aprecia una pérdida del orden de 1,6 L/s para una presión de 50 m de cabeza de agua. La correlación y el análisis de sensibilidad se muestran en la Figura 7.33.

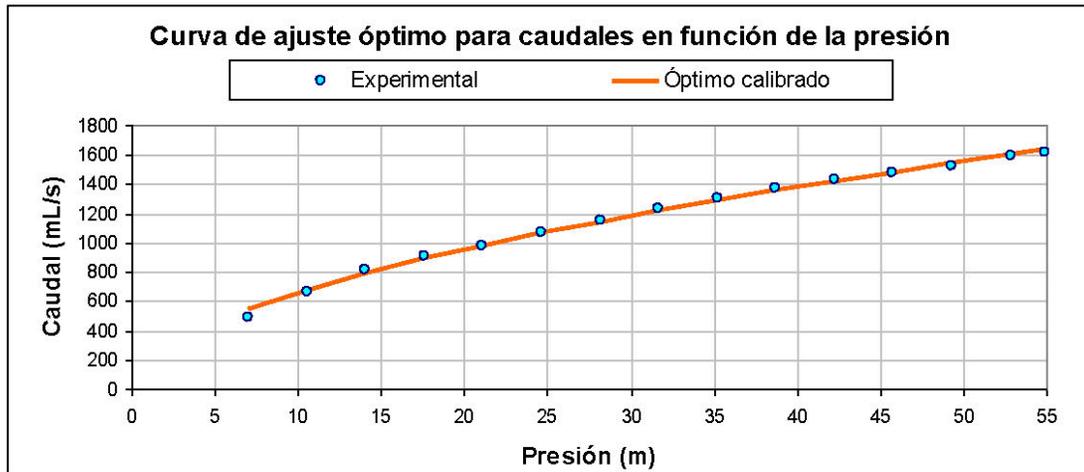
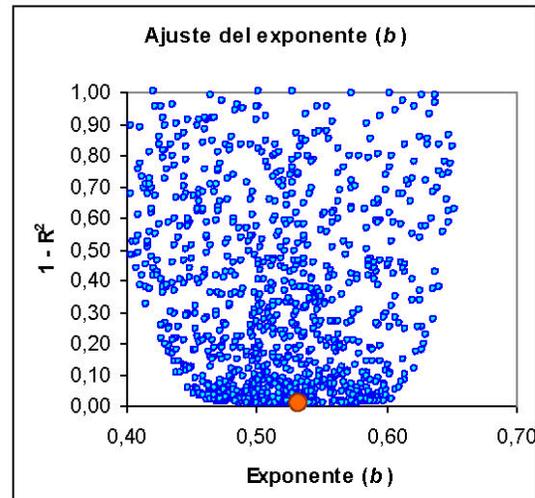
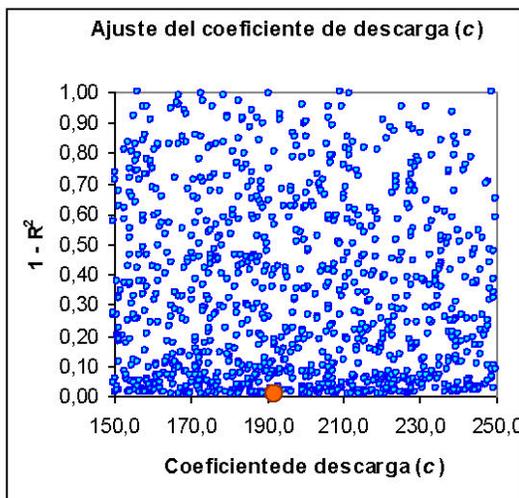


Figura 7.32: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación con empaque desplazado un 100 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 4".



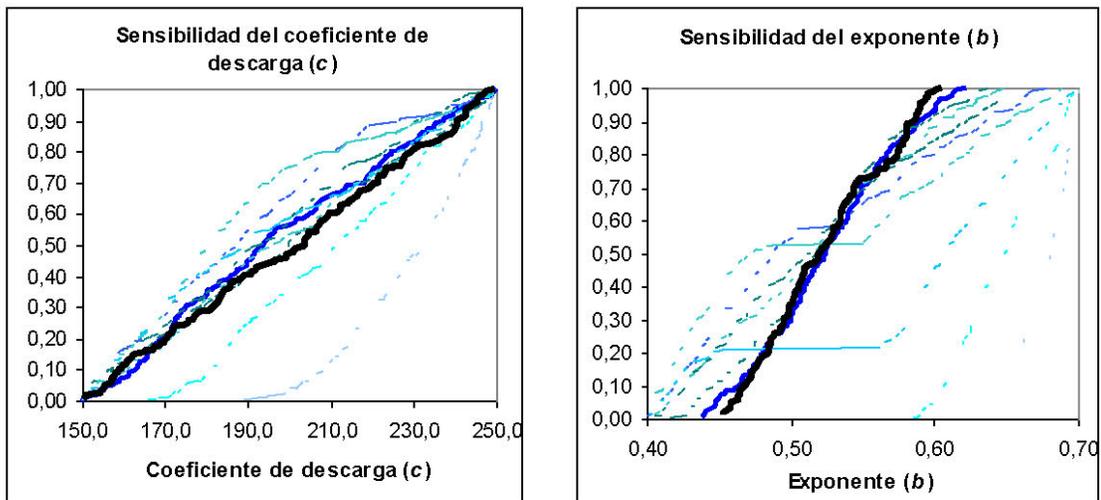


Figura 7.33: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación sin empaque desplazado un 100 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 4".

Capítulo 8 CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FUGA EN CONEXIONES DOMICILIARIAS

A partir de los resultados obtenidos para cada tipo de desplazamiento, se estimó una ecuación para cada diámetro dependiendo de la longitud de desplazamiento del collar de derivación y del diámetro del orificio, es decir $\frac{1}{2}$ " que es el diámetro de la conexión domiciliar utilizada en estas pruebas.

En el Capítulo 4 se realizó un análisis de cómo debe ser la forma de la ecuación para fugas en tuberías, dando como resultado las siguientes expresiones:

$$Q = c \cdot p^b \quad [8-1]$$

$$c = c_d \cdot A \cdot \sqrt{2g} \quad [8-2]$$

Al reemplazar la ecuación 8-2 en la ecuación 8-1 se obtiene la ecuación más general que describe el caudal de fuga de un orificio.

$$Q = c_d \cdot A \cdot \sqrt{2g} \cdot p^b \quad [8-3]$$

Para poder establecer cómo varía el área de flujo de la fuga con respecto al área del orificio, se realizó una calibración de la relación área de flujo – área del orificio con respecto a la relación longitud de la falla – diámetro del orificio de la acometida. Refiriéndose a longitud de la falla como la diferencia entre el diámetro del orificio y la longitud de desplazamiento del collar de derivación de la acometida de $\frac{1}{2}$ ".

En la Figura 8.1 se puede observar la curva de calibración para las relaciones antes mencionadas, con su respectiva ecuación.

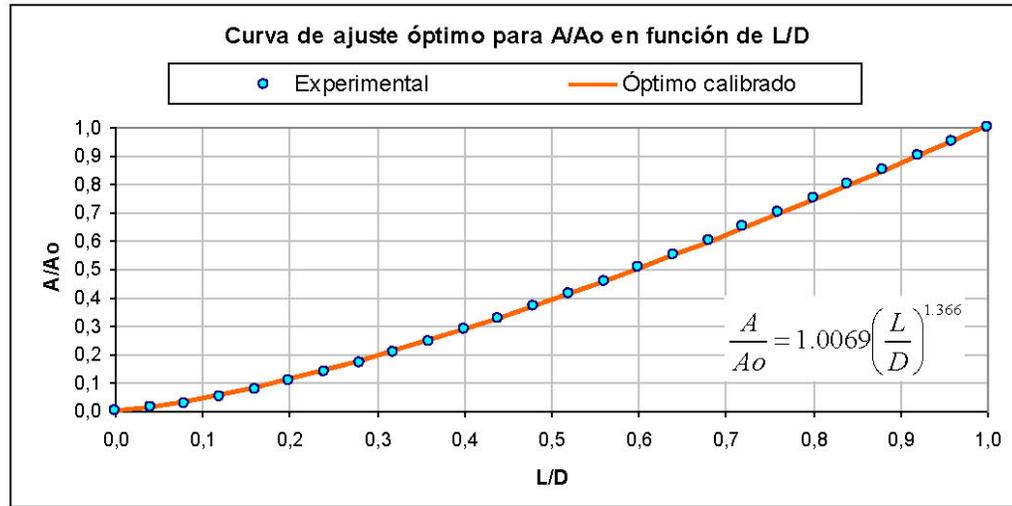


Figura 8.1: Relación del área de fuga con la longitud de la falla

De la figura anterior se puede establecer la relación del área del orificio dependiendo de la longitud de la falla con la siguiente ecuación:

$$A = 1.0069 A_o \left(\frac{L}{d} \right)^{1.366} \quad [8-4]$$

donde,

L es la longitud de la falla, (en las mismas unidades del diámetro)

d es el diámetro del orificio (collar de derivación)

A es el área del chorro, (L^2)

A_o es el área del orificio, (L^2)

Reemplazando la ecuación 8-4 en la ecuación 8-3 se obtiene la siguiente expresión, que relaciona el caudal de fuga por un orificio cuando este se encuentra desplazado longitudinal o verticalmente con respecto al centro del orificio:

$$Q = 1.0069 A_o \cdot \left(\frac{L}{d} \right)^{1.366} \cdot c_d \cdot \sqrt{2g} \cdot p^b \quad [8-5]$$

De la ecuación 8-5 se puede decir que el área del orificio (A_o) es constante y el término de la raíz de dos veces la gravedad también es constante, por lo tanto estos dos términos al igual que el coeficiente 1.0069 se pueden reagrupar con el coeficiente c_d en un nuevo coeficiente c de la siguiente forma:

$$Q = c \cdot \left(\frac{L}{d} \right)^{1.366} \cdot p^b \quad [8-6]$$

Al momento de realizar la calibración de las siete pruebas de cada diámetro para cada tipo de falla, se encontró que la ecuación no era apropiada porque para la longitud de falla de 0.0 mm, es decir totalmente desfasado el collar de derivación, se presentaba un caudal de fuga, haciendo que la ecuación no se cumpliera ya que para $L = 0$ en la ecuación 8-5 el caudal es cero. Por lo tanto se decidió modificar la forma de la ecuación para que cumpliera con el requisito antes mencionado.

La siguiente expresión es la que mejor representa el caudal de fuga para conexiones domiciliarias dependiendo de la longitud de falla y el diámetro del orificio:

$$Q = \left[c \left(\frac{L}{d} \right)^a + e \right] \cdot p^b \quad [8-7]$$

Para encontrar los valores óptimos de cada uno de los parámetros que componen la ecuación 8-7 se utilizó el programa estadístico DataFit, que es un programa especializado en resolver ecuaciones con múltiples variables. A continuación se realiza una descripción detallada del programa.

8.1 PROGRAMA ESTADÍSTICO DATAFIT

DataFit es una herramienta de ingeniería que simplifica las tareas de análisis de datos, análisis por regresiones (curva de ajuste) y el análisis estadístico. Lo que hace que DataFit sea diferente a los demás programas de análisis de regresión y curvas de ajuste es su facilidad de manejo. Con la combinación de una interfaz intuitiva, ayuda en línea y todo el rango de presentación, esta es una herramienta que es utilizada efectivamente tanto por principiantes como por expertos.

8.1.1 Características principales

1. Interfaz gráfica:

La mayoría de los paquetes de software especializados en regresiones y curvas de ajuste tienen un enfoque dependiendo del tipo de programación con que fue desarrollado el programa, lo cual significa que el usuario le dice al programa lo que debe hacer por medio de pseudo códigos en el lenguaje de programación que fue desarrollado. Este enfoque obliga al usuario a recordar muchas órdenes, y la sintaxis apropiada de la orden. Con DataFit no se tiene este problema, porque el programa fue diseñado para ser manejado por una buena interfaz gráfica, que lo hace mucho más fácil de aprender y utilizar.

2. Ejecución no gráfica:

DataFit se puede ejecutar, también de forma no gráfica, desde otros programas. Se debe crear simplemente una plantilla de configuración (en el programa del usuario o mediante la interfaz de DataFit), se guarda la plantilla, y se llama DataFit desde el propio programa del usuario. El usuario puede escoger las opciones de intercambio de información, tal como el cambio de los datos dinámicos, los indicadores de avance de la regresión, y la visualización de los mensajes del programa. Permite la creación de macros para procesar rápidamente centenares de datos en una sola corrida.

3. Entrada de datos:

Los datos pueden ser entrados directamente en una hoja de cálculo en la interfaz del programa, importando los datos desde archivos ASCII creados en otras aplicaciones, o cortando y pegando desde las aplicaciones de Windows.

4. Regresiones multivariantes lineal y no lineal:

DataFit es capaz de resolver modelos de regresión lineal y no lineal con 20 variables independientes.

5. Modelos predefinidos de regresión:

Este programa cuenta con 298 modelos bidimensionales de regresión no lineal y 242 modelos tridimensionales de regresión no lineal. Los modelos de regresión no lineal predefinidos en el programa DataFit son comúnmente usados en aplicaciones científicas, estadísticas y de ingeniería.

6. Modelos de regresión definidos por el usuario:

Si los modelos de regresión que el usuario necesita no se encuentran predefinidos en el programa, el usuario puede definir su propio modelo. Se pueden definir modelos de regresión con un máximo de 100 parámetros apropiados, o variables, y el usuario puede nombrar cualquiera de las variables a utilizar en los modelos de regresión. Esto se realiza definiendo el propio modelo de regresión, simplemente con escribir la ecuación. El usuario también puede asignar los valores iniciales de las variables utilizadas en el modelo de regresión para no tener problemas en la convergencia de la ecuación (modelo de regresión). Una característica adicional es la habilidad de especificar las derivadas analíticas para los modelos definidos por el usuario.

7. Solución robusta:

DataFit utiliza el método de Levenberg-Marquardt que usa una estrategia combinada de aproximación lineal y el método del gradiente para determinar el mínimo local de la función a evaluar.

8. Opción del método de solución:

El usuario puede realizar modelos de regresión lineales o no lineales a la vez que puede escoger uno de los modelos predefinidos en el programa, además puede definir grupos de modelos (grupos predefinidos de los modelos, o la definición del propio modelo), o seleccionar todos los modelos disponibles del programa simultáneamente. La predefinición de los modelos se encuentra asociada con el número de parámetros y la

forma general de las curvas. Si el usuario resuelve continuamente los mismos modelos una y otra vez, puede crear su propio grupo definido por los modelos que el usuario escoge.

9. Presentación de los resultados:

DataFit reporta la siguiente información acerca de cada modelo de regresión resuelto automáticamente sin la intervención adicional de usuario

- Número de observaciones
- Número de observaciones faltantes
- Número de iteraciones no lineales realizadas
- Suma de los residuos
- Promedio Residual
- Suma de residuos cuadráticos
- Error estándar de la estimación
- Coeficiente de determinación múltiple (R^2)
- Proporción de la varianza explicada
- Coeficiente de ajuste de determinación múltiple (Ra^2)
- Valores de los coeficientes, error estándar, prueba t de probabilidad
- Intervalo de confianza (68, 90, 95 y 99 niveles de porcentaje)
- Análisis de varianza (ANOVA)
- Tabla de datos, incluyendo los datos de entrada, datos calculados.
- Porcentaje de error, residuo mínimo y máximo.
- Formato gráfico de modelos de regresión
- Formato gráfico de la probabilidad residual
- Formato gráfico de la dispersión residual

10. Ranking automático de la solución:

Cuando los modelos de regresión se resuelven, estos son clasificados automáticamente según la bondad de los criterios que el usuario especifica (la suma residual de cuadrados, coeficiente de correlación, ajuste del coeficiente de correlación o el error estándar). Si el usuario no es un experto y no está seguro de cuál ecuación se debe utilizar para modelar los datos, DataFit lo ayuda a tomar esta decisión.

11. Presentación de los resultados:

DataFit crea gráficas en 2D y 3D de las ecuaciones, datos y/o modelos de regresión fácilmente. Cada gráfica se puede personalizar, incluyendo tipos de letra, los rangos de las variables, los colores de las líneas y los estilos, las barras de error, la visibilidad, etc. El usuario también puede comparar gráficamente los resultados de los diferentes modelos y/o datos en la misma ventana de la gráfica. Las gráficas se pueden salvar junto con toda su personalización, o ser copiadas a otras aplicaciones de Windows. Las plantillas de las gráficas se pueden salvar y pueden ser aplicadas instantáneamente a otras gráficas para mantener siempre la misma apariencia.

8.1.2 Interfaz gráfica

A continuación se presentan algunas de las características básicas de ejecución del programa DataFit mencionadas en el numeral anterior.

En la Figura 8.2 se puede visualizar la ventana principal del programa, en donde se encuentran todas las funciones básicas. En la Figura 8.3 se encuentra la ventana donde se define el modelo a utilizar y la forma de su ecuación. En la Figura 8.4 se observa la tabla de resumen de las características de análisis de cada uno de los modelos probados en una corrida. En la Figura 8.5 se puede ver en detalle todas las características estadísticas de un modelo en particular. En la Figura 8.6 se muestra la gráfica en 2D de un modelo bidimensional, es decir de dos variables, una dependiente y la otra independiente. En la Figura 8.7 se encuentra una gráfica en 3D que representa un modelo tridimensional, es decir de tres variables, una independiente y dos dependientes. Y por último, en la Figura 8.8 se observa la gráfica de dispersión de los residuos del modelo utilizado.

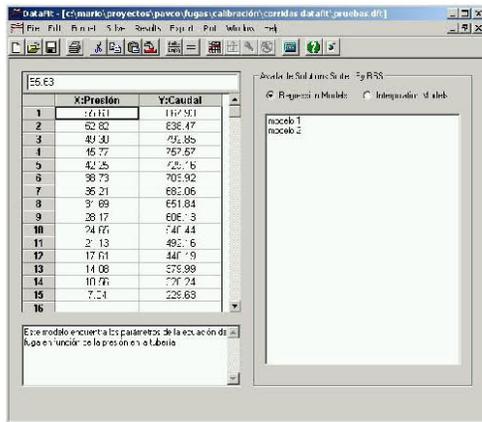


Figura 8.2: Ventana de menú del programa DataFit

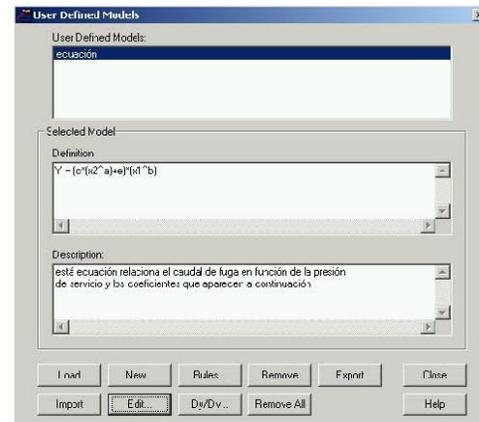


Figura 8.3: Ventana de definición del modelo a utilizar del programa DataFit.

Rank	Model	StdError	Residual Sum	Residual Avg.	RSS
1	exp(a*(b^x+c^y)^2)	388.31126526	212.238779	6.75481943	3.8861349e-9
2	a^2*(b^x)^c	11.5729704	-3.22631624E-012	-8.91058099E-014	4.803410954
3	a*b^c*(x^y)^2	55.7226077	-5.623102009E-012	-5.2240104E-011	0.025274259
4	a^x*b	16.1772794	-0.417077987E-012	-2.77327674E-011	9.07406527111
5	a^x*(b)	62.8572794	-8.640199667E-012	-2.395189039E-011	9.066265758
6	a*b*x	568.6758351	-1.125489873E-011	-3.041891033E-011	1.199820.27
7	a^x*b*(x)	642.4098897	111.8834581	3.223877193	1.462471127
8	a^x*y	675.6210478	25.42089889	60.82366689	1.6161209.5
9	a^x*b*(y)	675.6210478	-2.401859488	-80.82366689	1.6161209.5
10	exp(a*(x^y))	67.42110478	-2.401859488	-80.82366689	1.6161209.5
11	a^x*(b+x)	791.2042702	19900.31520	577.0464077	219.4570.2
12	a^x*(y+(x^y))	791.2042702	19900.31520	577.0464077	219.4570.2
13	(a^x)^y	791.2847762	19900.31520	577.0464077	219.4570.2
14	a^2*(x^y+b^x)^n	852.1878632	29031.58221	754.6377395	262.7846.59
15	a*(1/x)	864.6628577	28691.43227	776.7252833	33600888.39
16	(1/x)^y	872.2466898	28908.265.5	72.3046717	34099621.28
17	(x+y)^2	974.1745616	28948.734.4	723.7486843	34164437.76
18	exp(a^x)	1055.581383	27518.00043	56.75677433	40187500.4
19	x/a*(b^x*y^2)	1845.201814	21688.5654	525.6350028	15898977.7
20	a^x*(b^y)	1979.9000005	20076.26110	542.061113	19743974.0
21	(a+b)^x	1979.9888888	20089.26118	542.061113	19743974.0
22	exp(b^x)	2277.046939	22684.65018	-726.5999537	86675330.9

Figura 8.4: Resumen de los resultados del programa DataFit.

Variable	Value	Standard Error	t-ratio	Prob(t)
b	0.5231505181	0.14525471435	36.22754752	0.0
c	82.27604306	1.218247622	18.03165397	0.0

Figura 8.5: Detalle de los resultados numéricos del programa DataFit.

	X:Presión	Y:Caudal	Calc Y	Residual	% Error	Abs Residual	Min Residual
1	55.63	367.93	667.55626	0.373744	0.0430615	0.373743987	-30.25569663
2	52.02	300.47	041.72552	-0.2552019	-0.3002291	0.2552019694	
3	49.5	793.85	806.54625	16.65235	1.975599	16.65235327	
4	46.77	757.57	774.26291	-16.68291	-2.203458	16.68291052	
5	42.25	729.16	736.96093	-8.83093	-1.34414	9.800930365	
6	38.73	703.92	716.41972	12.51102	1.2145522	12.511025113	
7	35.21	382.06	664.44478	17.315215	2.5826489	17.31521539	
8	31.69	351.84	624.86036	26.379037	4.1389048	26.37903728	
9	20.17	306.13	300.35044	22.730502	2.7506002	22.730506171	
10	24.65	546.44	636.70738	5.7323249	1.2320397	6.732324939	
11	21.13	492.16	493.3276	-1.167838	-0.2373	1.167837713	
12	17.61	446.19	443.5934	2.5966968	0.5819491	2.596696774	
13	14.08	379.99	386.33919	-9.349195	-2.460377	9.349196406	
14	10.56	328.24	325.20775	-0.967751	-0.29493	0.9677510229	
15	7.04	229.63	259.8657	-30.2357	-13.75936	30.23559663	
16							
17							
18							
19							
20							

Figura 8.6: Tabla de datos del programa DataFit.

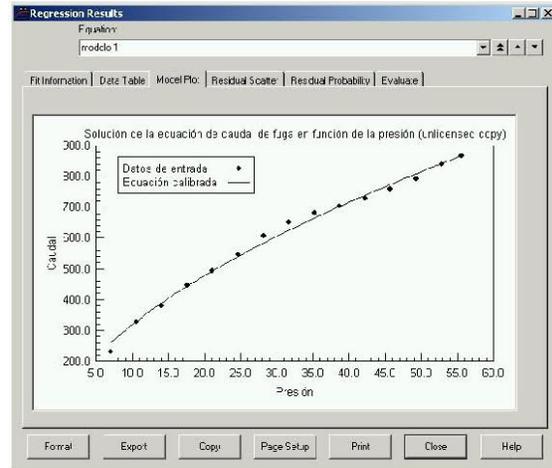


Figura 8.7: Ventana de gráficas en 2D del programa DataFit.

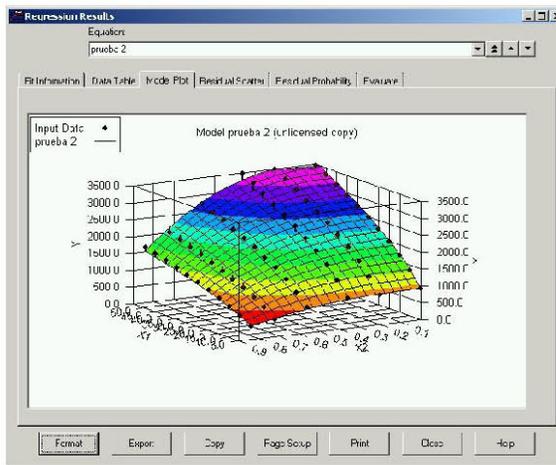


Figura 8.8: Ventana de gráficas en 3D del programa DataFit.

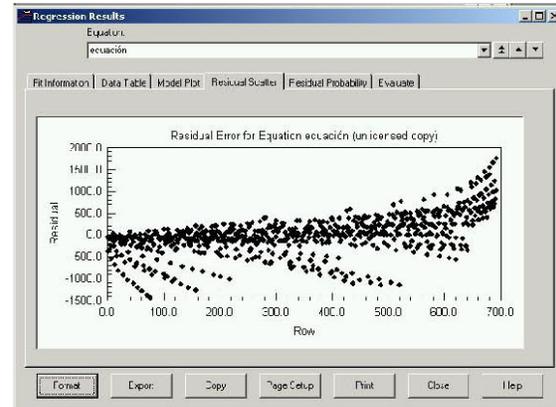


Figura 8.9: Dispersión de los residuos del programa DataFit

8.2 DESPLAZAMIENTO LONGITUDINAL CON EMPAQUE

Después de analizar los resultados obtenidos para cada una de las pruebas de desplazamiento longitudinal con empaque para las tuberías plásticas de 2" y 4" de diámetro hechas en PVC, se encontraron los coeficientes de la ecuación que mejor describe los datos experimentales, en función de la presión y la relación entre la longitud de falla y el diámetro de la acometida. Para esta calibración se agruparon todas las pruebas realizadas para cada tubería en una sola ecuación, es decir, que por cada diámetro se obtuvo una ecuación.

8.2.1 Tubería de 2"

En la Figura 8.10 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las pruebas realizadas en el numeral 7.1.1.1; cada serie de la figura representa una relación entre la longitud de falla y el diámetro de la acometida ($\frac{1}{2}$ ").

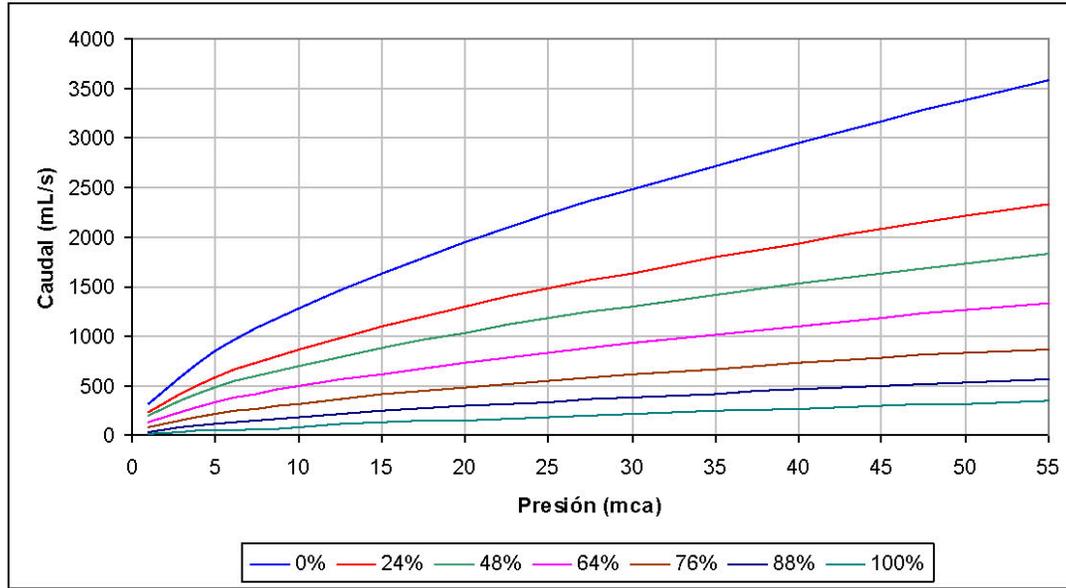


Figura 8.10: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación con empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 2" con diferentes relaciones de L/d.

Con la información contenida en la figura anterior de caudal, presión y la relación L/d se procede a la calibración de la ecuación 8-7, para encontrar los coeficientes que mejor se ajusten a la ecuación. En la Tabla 8-1 se presentan los resultados de la calibración, donde se muestra el valor óptimo de cada coeficiente, con su error estándar y los valores de los límites inferior y superior para un intervalo de confianza del 99%.

Resultados de la Regresión Variable			Intervalo de Confianza del 99%		
Variable	Valor	Error estándar	99% (+/-)	Limite inferior	Limite Superior
a	0.788	0.023	0.060	0.727	0.848
b	0.591	0.013	0.035	0.556	0.626
c	-303.29	14.67	38.98	-342.27	-264.31
e	331.21	15.75	41.86	289.36	373.07

$$Q = \left[-303.29 \left(\frac{L}{d} \right)^{0.788} + 331.21 \right] \cdot p^{0.591} \quad [8-8]$$

La ecuación 8-8 se obtiene con un coeficiente de determinación múltiple de 0.99357, por lo tanto la ecuación explica el 99.36% de los datos medidos. A continuación se presenta la gráfica que relaciona los datos experimentales con la ecuación calibrada.

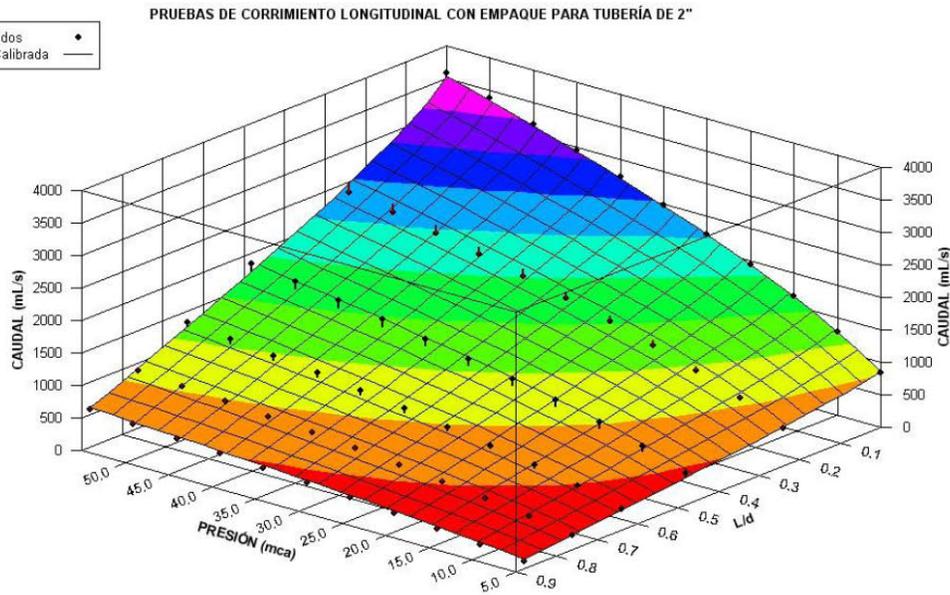


Figura 8.11: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación con empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 2".

Posterior a la calibración de la ecuación en el programa DataFit se realizó un análisis de MonteCarlo para determinar la confiabilidad de los coeficientes de la ecuación 8-8. Para este procedimiento se tomó el rango de los coeficientes obtenidos para un intervalo de confianza del 99%. En la Figura 8.12 se puede visualizar que el ajuste de los coeficientes es bueno para el rango del intervalo de confianza.

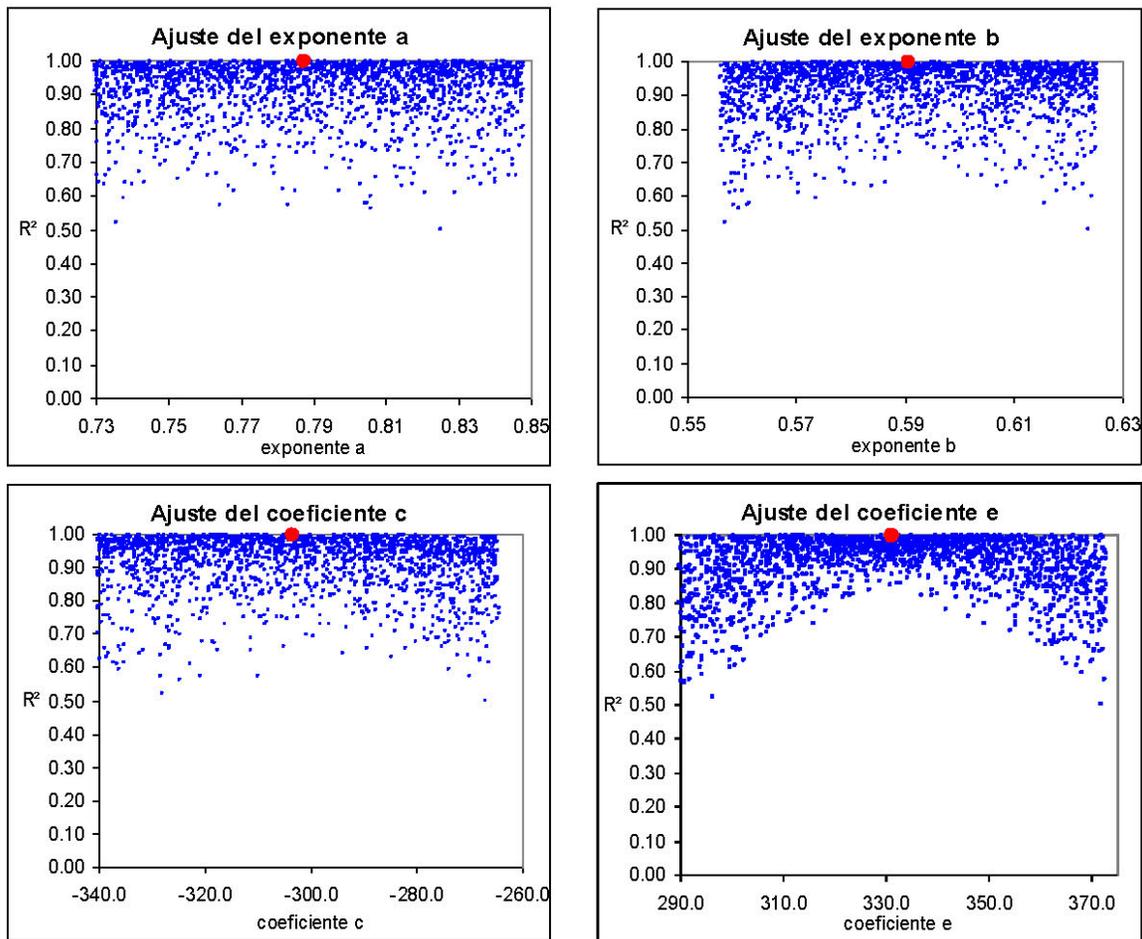


Figura 8.12: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación con empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 2”.

8.2.2 Tubería de 4”

En la Figura 8.13 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las pruebas realizadas en el numeral 7.1.1.2; cada serie de la figura representa una relación entre la longitud de falla y el diámetro de la acometida ($\frac{1}{2}$ ”).

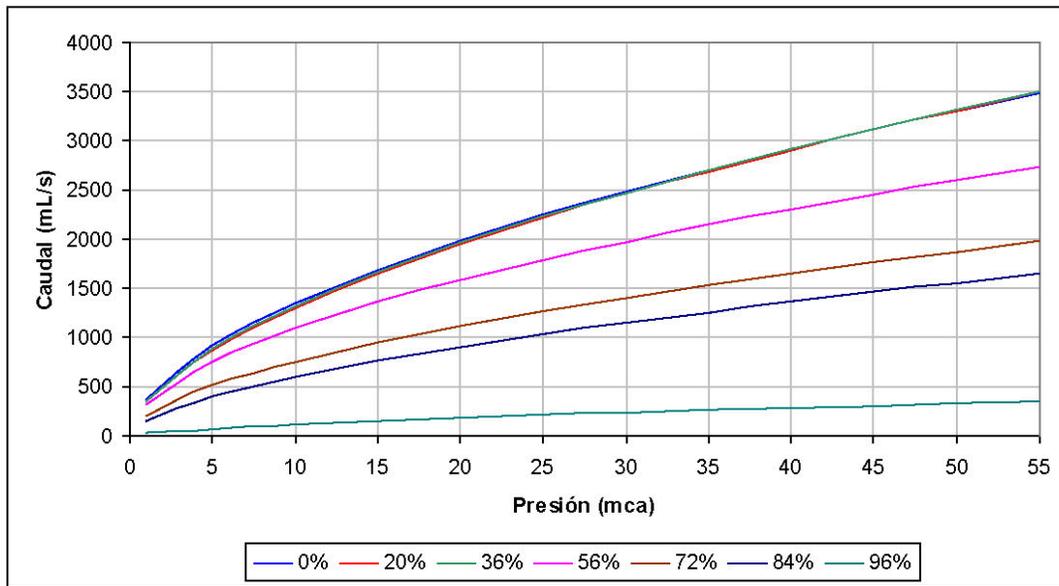


Figura 8.13: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación con empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 4” con diferentes relaciones de L/d.

Con la información contenida en la figura anterior de caudal, presión y la relación L/d se procede a la calibración de la ecuación 8-7, para encontrar los coeficientes que mejor se ajusten a la ecuación. En la Tabla 8-2 se presentan los resultados de la calibración, donde se muestra el valor óptimo de cada coeficiente, con su error estándar y los valores de los límites inferior y superior para un intervalo de confianza del 99%.

Tabla 8-2: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento longitudinal con empaque para la tubería de 4”					
Resultados de la Regresión Variable			Intervalo de Confianza del 99%		
Variable	Valor	Error estándar	99% (+/-)	Limite inferior	Limite Superior
a	2.357	0.126	0.335	2.021	2.692
b	0.566	0.012	0.031	0.535	0.596
c	-319.80	16.13	42.86	-362.66	-276.93
e	370.31	15.57	41.39	328.92	411.70

$$Q = \left[-319.80 \left(\frac{L}{d} \right)^{2.357} + 370.31 \right] \cdot p^{0.566} \quad [8-9]$$

La ecuación 8-9 se obtiene con un coeficiente de determinación múltiple de 0.98954, por lo tanto la ecuación explica el 98.95% de los datos medidos. A continuación se presenta la gráfica que relaciona los datos experimentales con la ecuación calibrada.

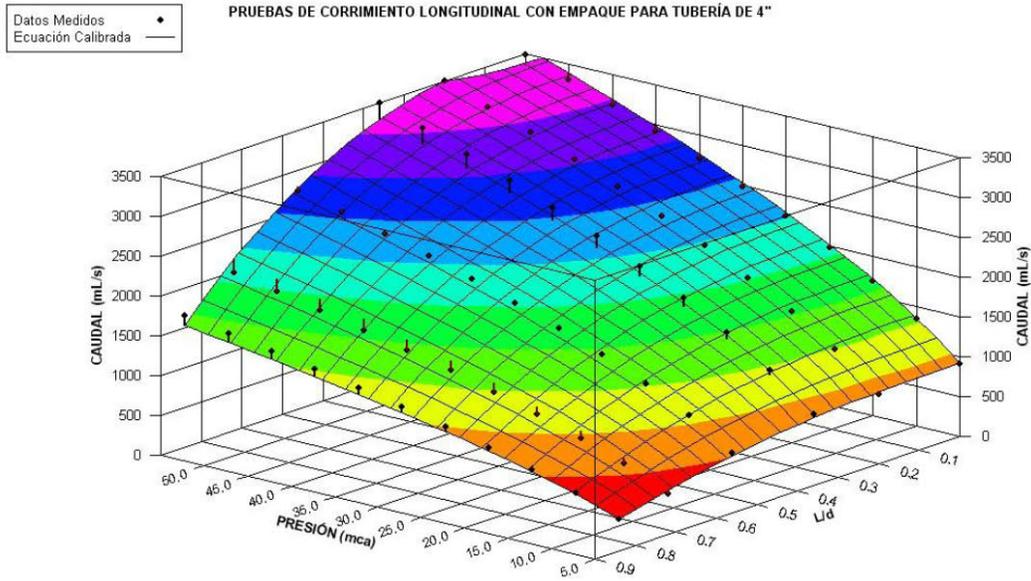
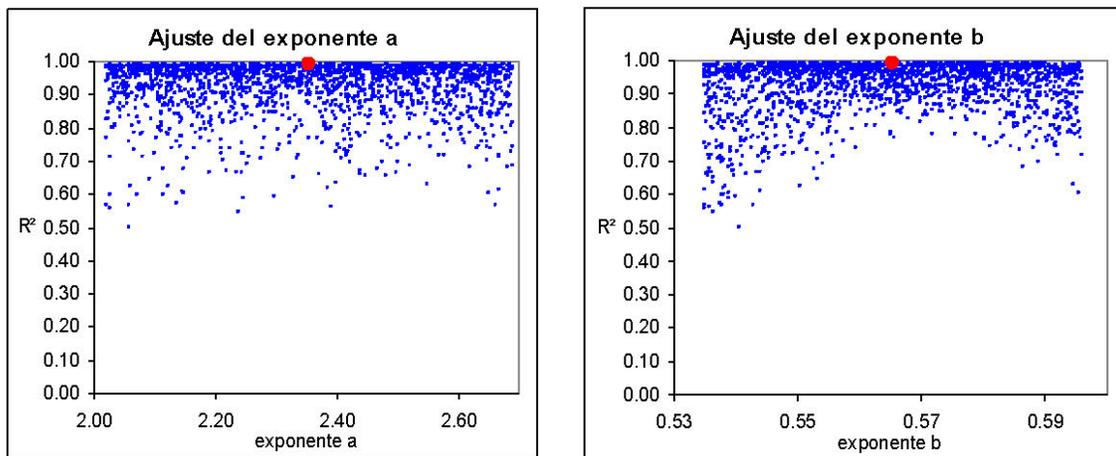


Figura 8.14: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación con empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 4".

Posterior a la calibración de la ecuación en el programa DataFit se realizó un análisis de MonteCarlo para determinar la confiabilidad de los coeficientes de la ecuación 8-8. Para este procedimiento se tomó el rango de los coeficientes obtenidos para un intervalo de confianza del 99%. En la Figura 8.15 se puede visualizar que el ajuste de los coeficientes es bueno para el rango del intervalo de confianza.



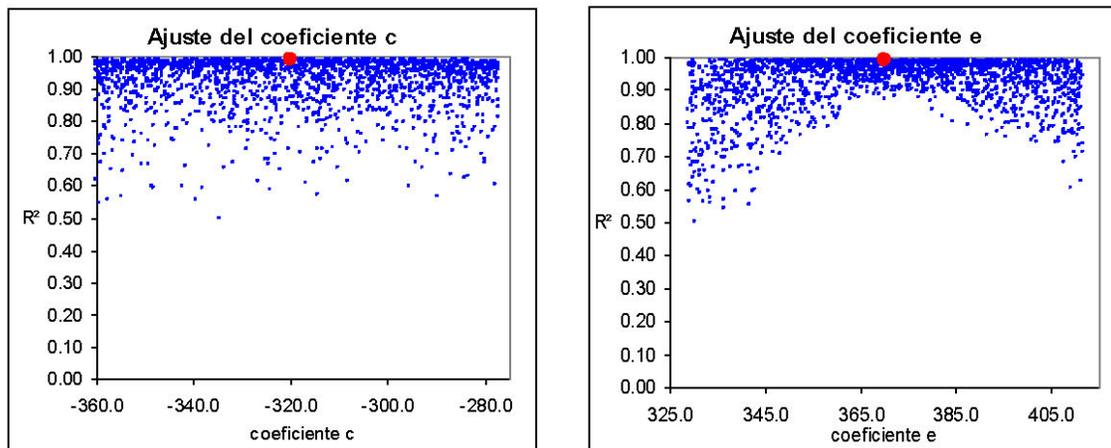


Figura 8.15: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación con empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 4”.

8.3 DESPLAZAMIENTO LONGITUDINAL SIN EMPAQUE

Después de analizar los resultados obtenidos para cada una de las pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque para las tuberías plásticas de 2”, 3” y 4” de diámetro hechas en PVC, se encontraron los coeficientes de la ecuación que mejor describe los datos experimentales, en función de la presión y la relación entre la longitud de falla y el diámetro de la acometida. Para esta calibración se agruparon todas las pruebas realizadas para cada tubería en una sola ecuación, es decir, que por cada diámetro se obtuvo una ecuación.

8.3.1 Tubería de 2”

En la Figura 8.16 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las pruebas realizadas en el numeral 7.1.2.1; cada serie de la figura representa una relación entre la longitud de falla y el diámetro de la acometida ($\frac{1}{2}$ ”).

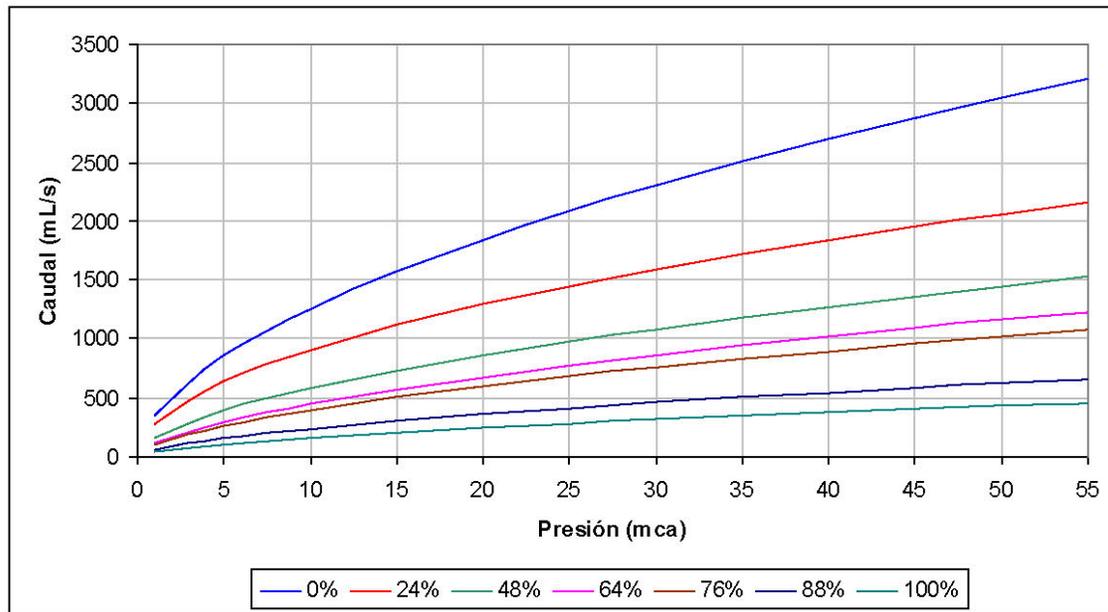


Figura 8.16: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 2” con diferentes relaciones de L/d.

Con la información contenida en la figura anterior de caudal, presión y la relación L/d se procede a la calibración de la ecuación 8-7, para encontrar los coeficientes que mejor se ajusten a la ecuación. En la Tabla 8-3 se presentan los resultados de la calibración, donde se muestra el valor óptimo de cada coeficiente, con su error estándar y los valores de los límites inferior y superior para un intervalo de confianza del 99%.

Tabla 8-3: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque para la tubería de 2”					
Resultados de la Regresión Variable			Intervalo de Confianza del 99%		
Variable	Valor	Error estándar	99% (+/-)	Limite inferior	Limite Superior
a	0.690	0.007	0.019	0.671	0.709
b	0.550	0.005	0.013	0.537	0.563
c	-302.37	5.50	14.56	-316.92	-287.81
e	354.80	6.36	16.83	337.97	371.64

$$Q = \left[-302.37 \left(\frac{L}{d} \right)^{0.690} + 354.80 \right] \cdot p^{0.550} \quad [8-10]$$

La ecuación 8-10 se obtiene con un coeficiente de determinación múltiple de 0.99889, por lo tanto la ecuación explica el 99.89% de los datos medidos. A continuación se presenta la gráfica que relaciona los datos experimentales con la ecuación calibrada.

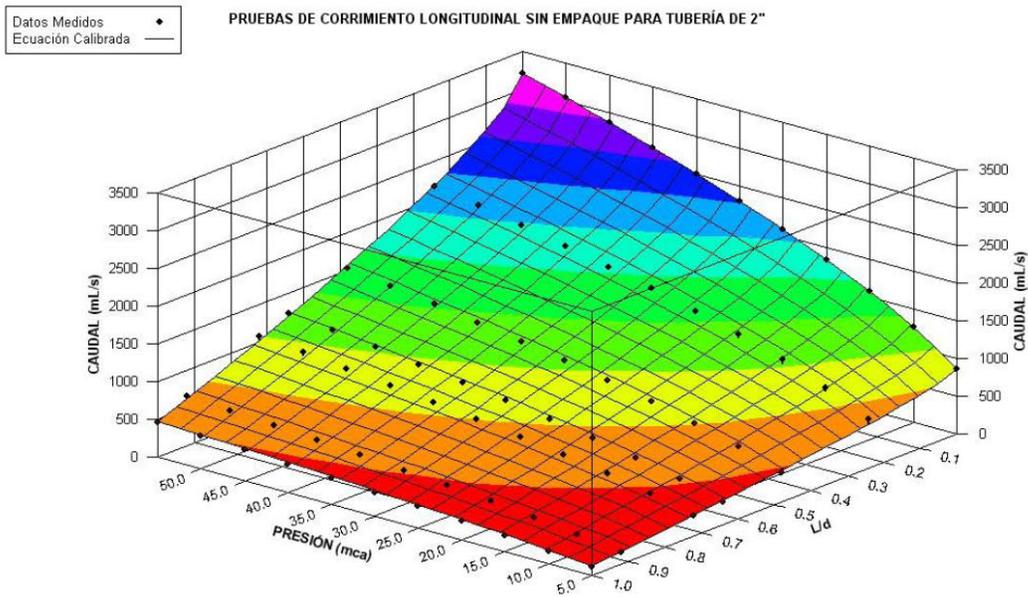
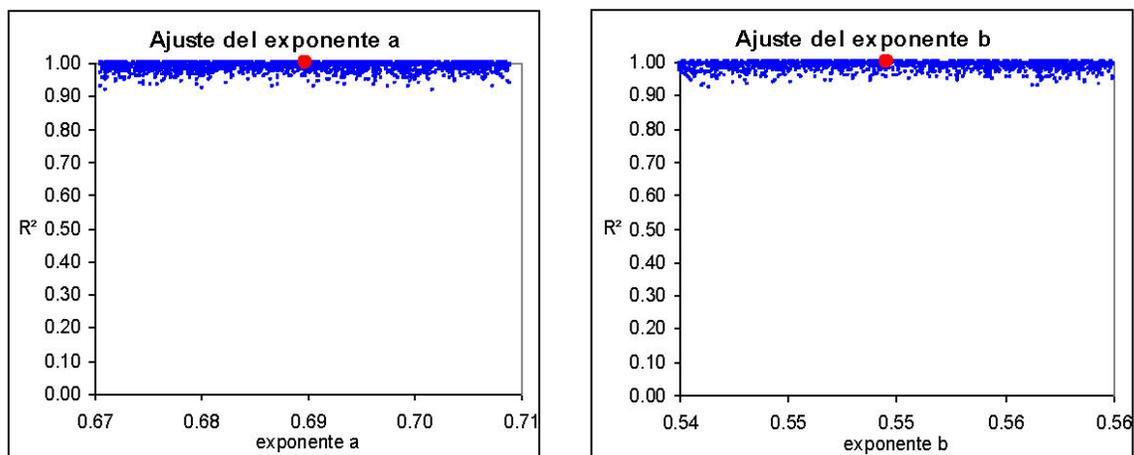


Figura 8.17: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 2".

Posterior a la calibración de la ecuación en el programa DataFit se realizó un análisis de MonteCarlo para determinar la confiabilidad de los coeficientes de la ecuación 8-8. Para este procedimiento se tomó el rango de los coeficientes obtenidos para un intervalo de confianza del 99%. En la Figura 8.18 se puede visualizar que el ajuste de los coeficientes es bueno para el rango del intervalo de confianza.



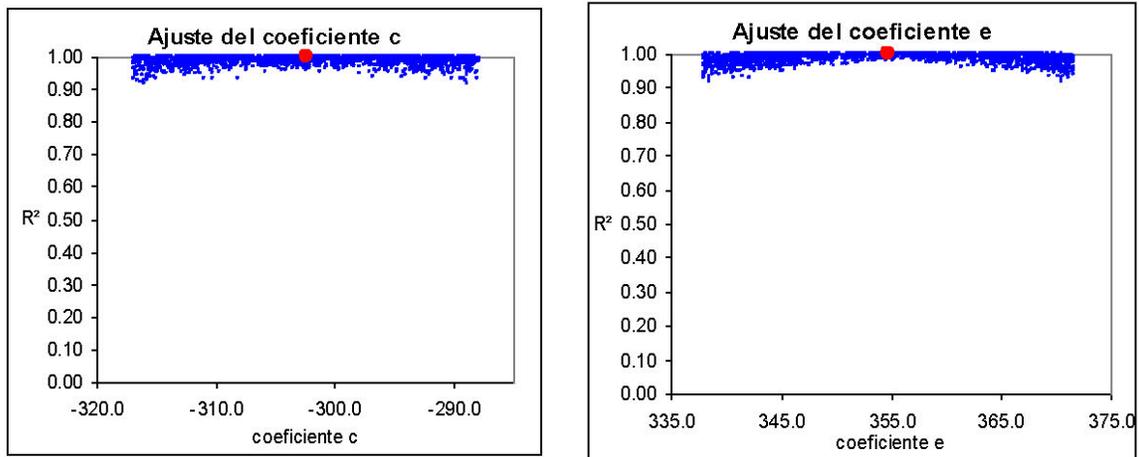


Figura 8.18: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 2”.

8.3.2 Tubería de 3”

En la Figura 8.19 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las pruebas realizadas en el numeral 7.1.2.2; cada serie de la figura representa una relación entre la longitud de falla y el diámetro de la acometida (1/2”).

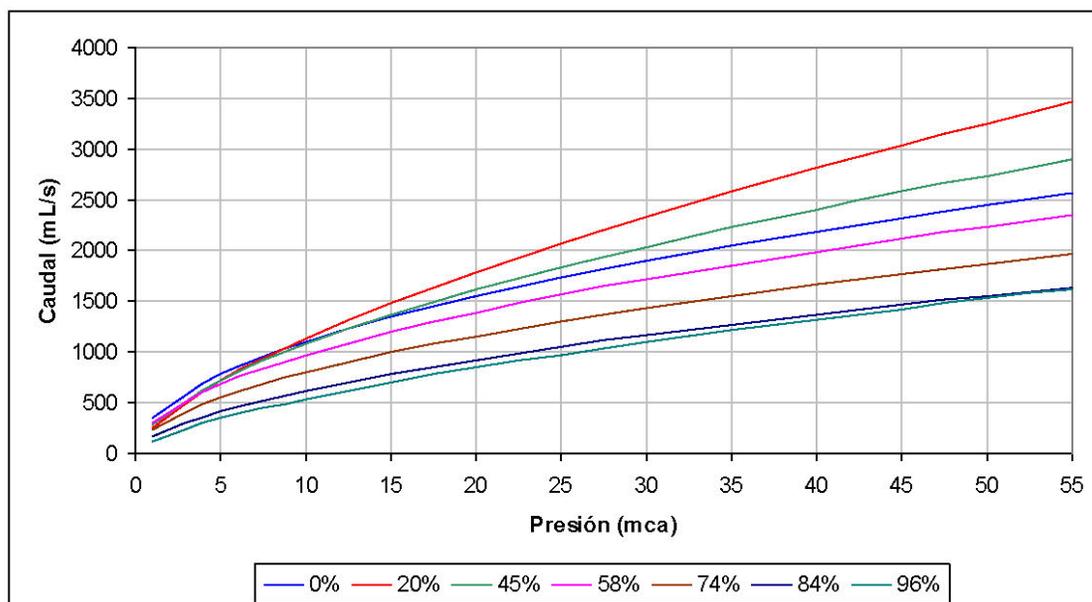


Figura 8.19: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 3” con diferentes relaciones de L/d.

Con la información contenida en la figura anterior de caudal, presión y la relación L/d se procede a la calibración de la ecuación 8-7, para encontrar los coeficientes que mejor se ajusten a la ecuación. En la Tabla 8-4 se presentan los resultados de la calibración, donde se muestra el valor óptimo de cada coeficiente, con su error estándar y los valores de los límites inferior y superior para un intervalo de confianza del 99%.

Tabla 8-4: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque para la tubería de 3"					
Resultados de la Regresión Variable			Intervalo de Confianza del 99%		
Variable	Valor	Error estándar	99% (+/-)	Limite inferior	Limite Superior
a	2.964	0.421	1.120	1.844	4.083
b	0.564	0.025	0.067	0.497	0.630
c	-244.13	31.28	83.12	-327.25	-161.01
e	312.59	28.64	76.10	236.49	388.69

$$Q = \left[-244.13 \left(\frac{L}{d} \right)^{2.964} + 312.59 \right] \cdot p^{0.564} \quad [8-11]$$

La ecuación 8-11 se obtiene con un coeficiente de determinación múltiple de 0.94405, por lo tanto la ecuación explica el 94.41% de los datos medidos. A continuación se presenta la gráfica que relaciona los datos experimentales con la ecuación calibrada.

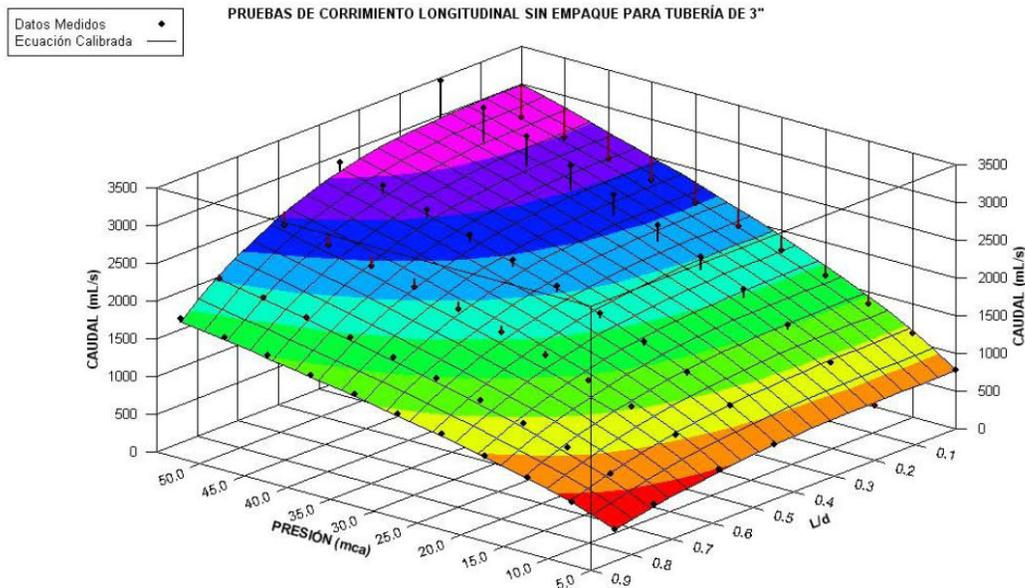


Figura 8.20: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 3".

Posterior a la calibración de la ecuación en el programa DataFit se realizó un análisis de MonteCarlo para determinar la confiabilidad de los coeficientes de la ecuación 8-8. Para este procedimiento se tomó el rango de los coeficientes obtenidos para un intervalo de confianza del 99%. En la Figura 8.21 se puede visualizar que el ajuste de los coeficientes es bueno para el rango del intervalo de confianza.

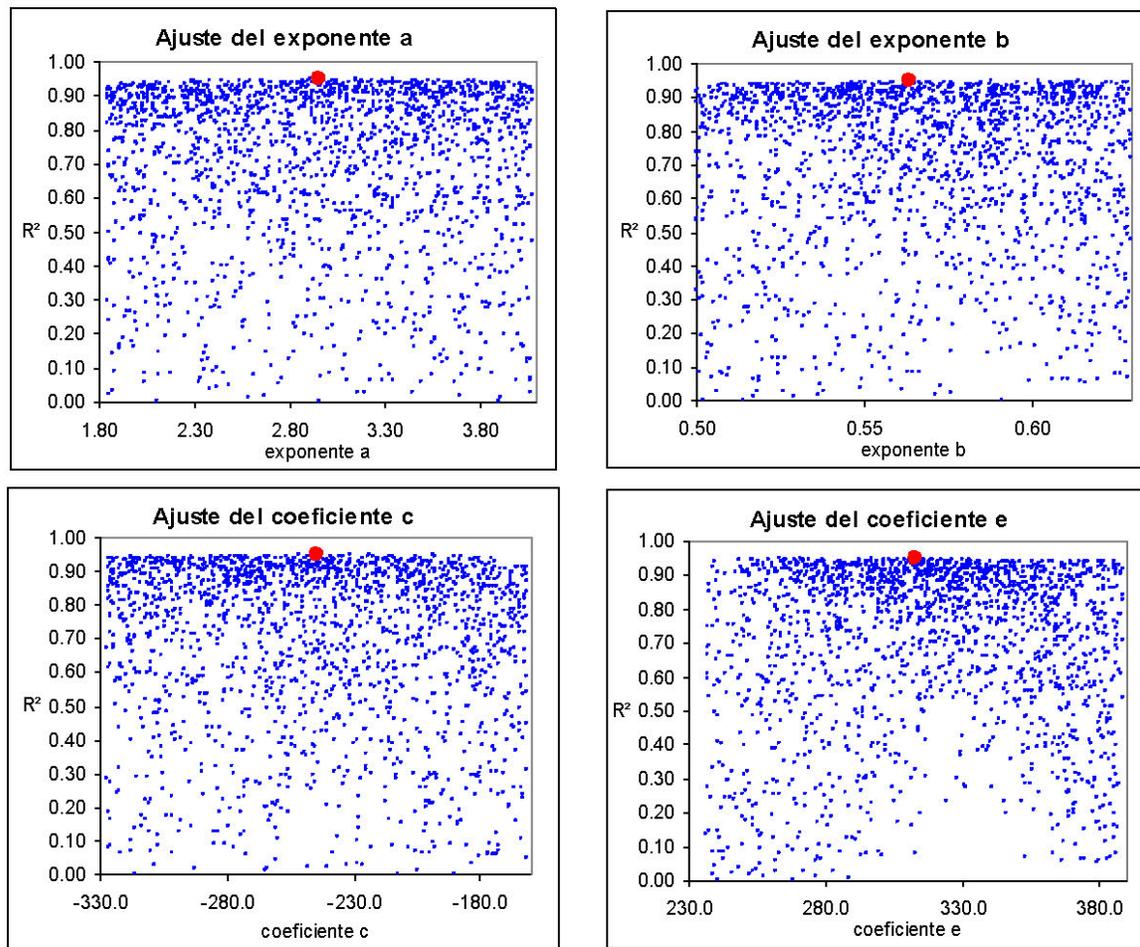


Figura 8.21: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 3”.

8.3.3 Tubería de 4”

En la Figura 8.22 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las pruebas realizadas en el numeral 7.1.2.3; cada serie de la figura representa una relación entre la longitud de falla y el diámetro de la acometida ($\frac{1}{2}$ ”).

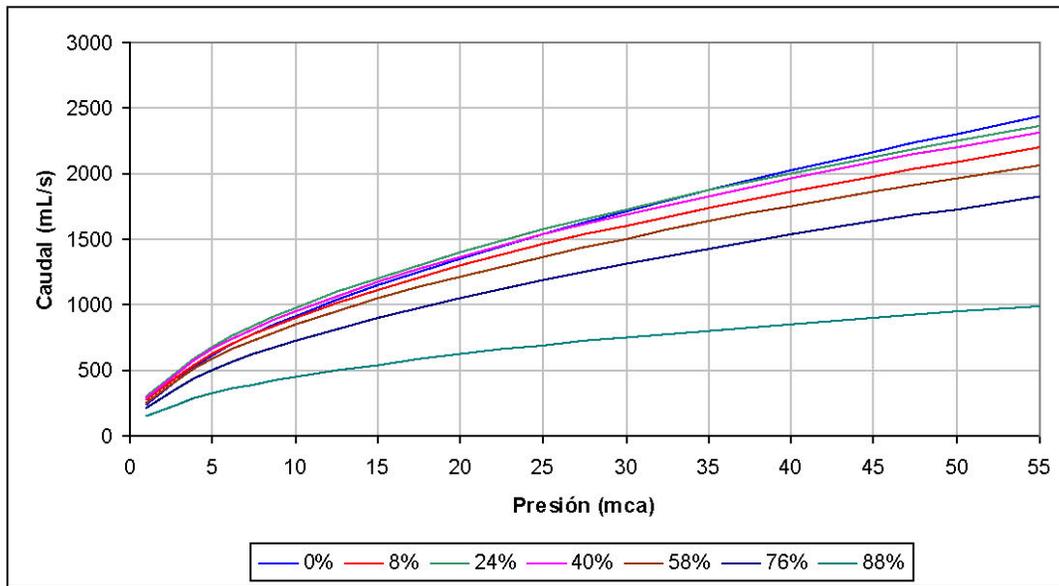


Figura 8.22: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 4” con diferentes relaciones de L/d.

Con la información contenida en la figura anterior de caudal, presión y la relación L/d se procede a la calibración de la ecuación 8-7, para encontrar los coeficientes que mejor se ajusten a la ecuación. En la Tabla 8-5 se presentan los resultados de la calibración, donde se muestra el valor óptimo de cada coeficiente, con su error estándar y los valores de los límites inferior y superior para un intervalo de confianza del 99%.

Tabla 8-5: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque para la tubería de 4”					
Resultados de la Regresión Variable			Intervalo de Confianza del 99%		
Variable	Valor	Error estándar	99% (+/-)	Limite inferior	Limite Superior
a	3.161	0.381	1.013	2.148	4.174
b	0.534	0.009	0.024	0.510	0.558
c	-144.99	16.75	44.53	-189.51	-100.46
e	274.85	8.94	23.74	251.11	298.60

$$Q = \left[-144.99 \left(\frac{L}{d} \right)^{3.161} + 274.85 \right] \cdot p^{0.534} \quad [8-12]$$

La ecuación 8-12 se obtiene con un coeficiente de determinación múltiple de 0.98924, por lo tanto la ecuación explica el 98.92% de los datos medidos. A continuación se presenta la gráfica que relaciona los datos experimentales con la ecuación calibrada.

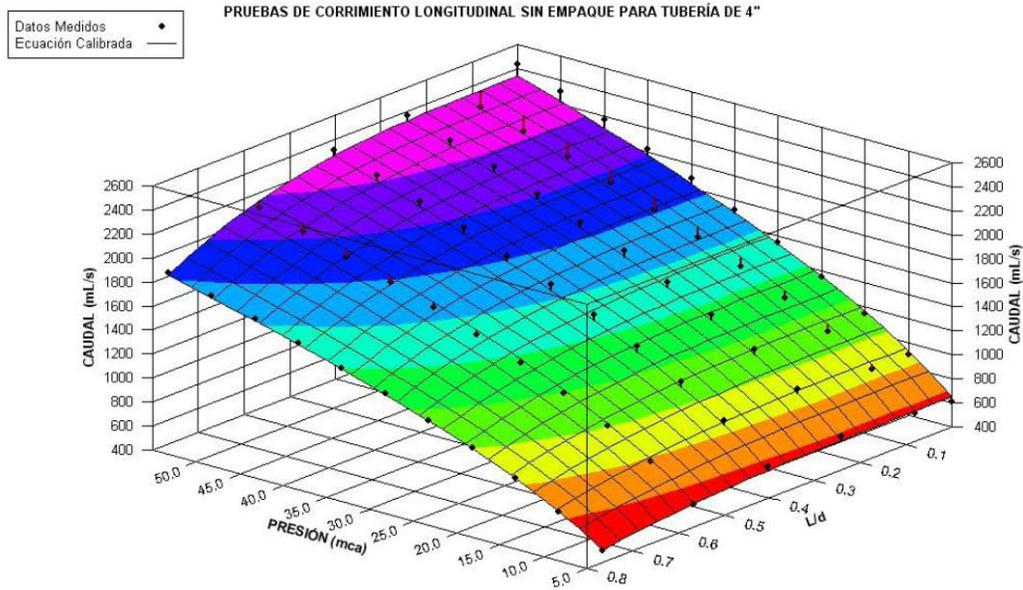
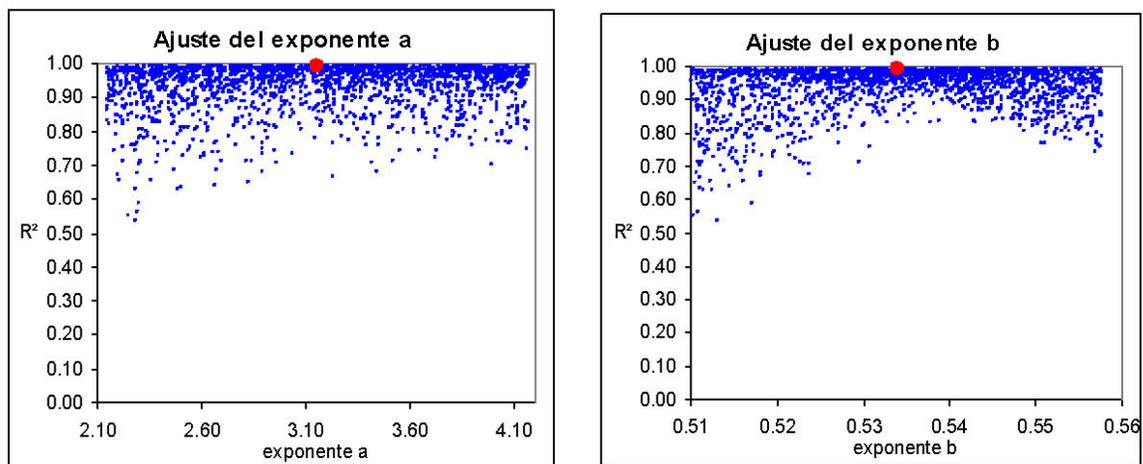


Figura 8.23: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 4".

Posterior a la calibración de la ecuación en el programa DataFit se realizó un análisis de MonteCarlo para determinar la confiabilidad de los coeficientes de la ecuación 8-8. Para este procedimiento se tomó el rango de los coeficientes obtenidos para un intervalo de confianza del 99%. En la Figura 8.24 se puede visualizar que el ajuste de los coeficientes es bueno para el rango del intervalo de confianza.



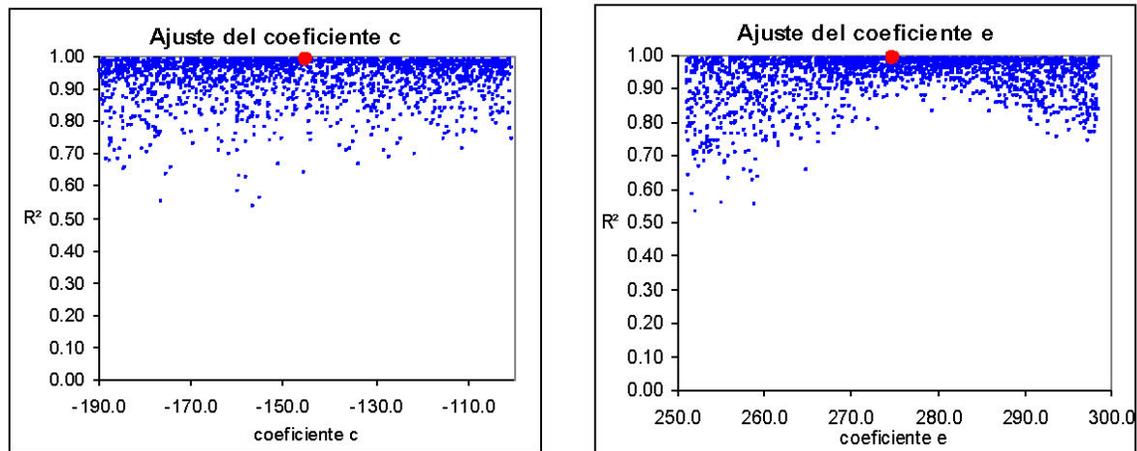


Figura 8.24: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 4”.

8.4 DESPLAZAMIENTO TRANSVERSAL CON EMPAQUE

Después de analizar los resultados obtenidos para cada una de las pruebas de desplazamiento transversal con empaque para las tuberías plásticas de 2” y 4” de diámetro hechas en PVC, se encontraron los coeficientes de la ecuación que mejor describe los datos experimentales, en función de la presión y la relación entre la longitud de falla y el diámetro de la acometida. Para esta calibración se agruparon todas las pruebas realizadas para cada tubería en una sola ecuación, es decir, que por cada diámetro se obtuvo una ecuación.

8.4.1 Tubería de 2”

En la Figura 8.25 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las pruebas realizadas en el numeral 7.2.1.1; cada serie de la figura representa una relación entre la longitud de falla y el diámetro de la acometida ($\frac{1}{2}$ ”).

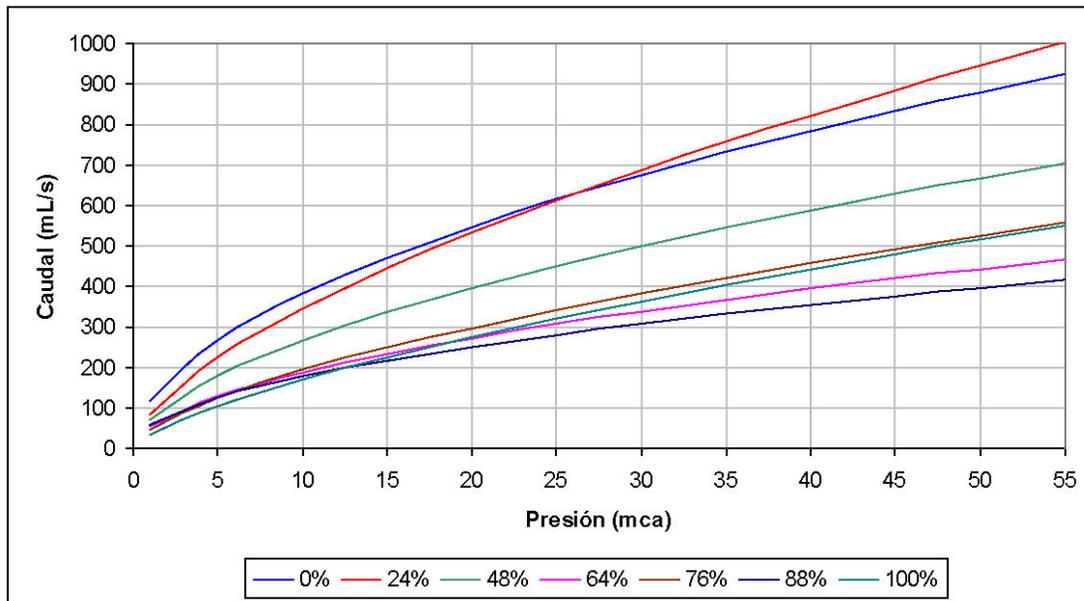


Figura 8.25: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación con empaque desplazado transversalmente para la tubería de 2” con diferentes relaciones de L/d.

Con la información contenida en la figura anterior de caudal, presión y la relación L/d se procede a la calibración de la ecuación 8-7, para encontrar los coeficientes que mejor se ajusten a la ecuación. En la Tabla 8-6 se presentan los resultados de la calibración, donde se muestra el valor óptimo de cada coeficiente, con su error estándar y los valores de los límites inferior y superior para un intervalo de confianza del 99%.

Tabla 8-6: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento transversal con empaque para la tubería de 2”					
Resultados de la Regresión Variable			Intervalo de Confianza del 99%		
Variable	Valor	Error estándar	99% (+/-)	Limite inferior	Limite Superior
a	0.967	0.130	0.343	0.624	1.310
b	0.571	0.034	0.090	0.481	0.661
c	-58.18	7.86	20.79	-78.97	-37.39
e	100.29	12.60	33.33	66.96	133.62

$$Q = \left[-58.18 \left(\frac{L}{d} \right)^{0.967} + 100.29 \right] \cdot p^{0.571} \quad [8-13]$$

La ecuación 8-13 se obtiene con un coeficiente de determinación múltiple de 0.90783, por lo tanto la ecuación explica el 90.78% de los datos medidos. A continuación se presenta la gráfica que relaciona los datos experimentales con la ecuación calibrada.

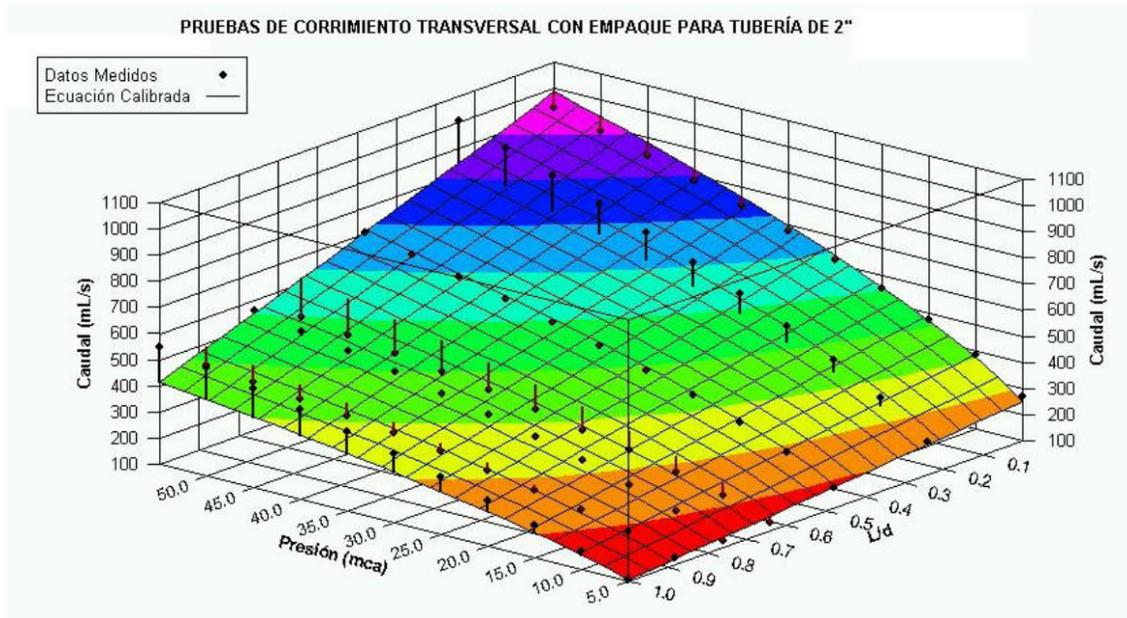
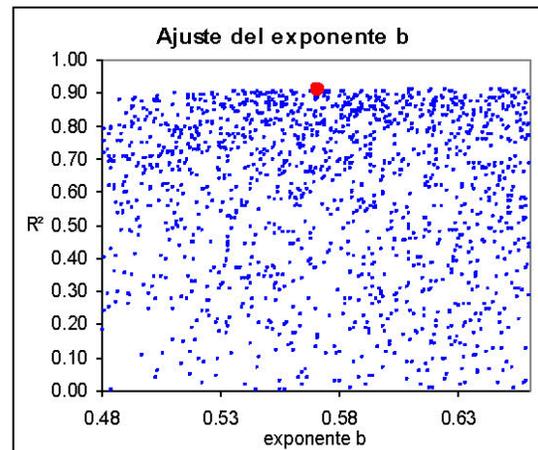
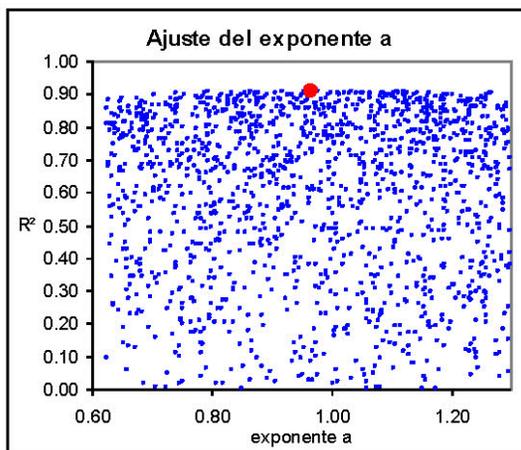


Figura 8.26: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación con empaque desplazado transversalmente para la tubería de 2”.

Posterior a la calibración de la ecuación en el programa DataFit se realizó un análisis de MonteCarlo para determinar la confiabilidad de los coeficientes de la ecuación 8-8. Para este procedimiento se tomó el rango de los coeficientes obtenidos para un intervalo de confianza del 99%. En la Figura 8.27 se puede visualizar que el ajuste de los coeficientes es bueno para el rango del intervalo de confianza.



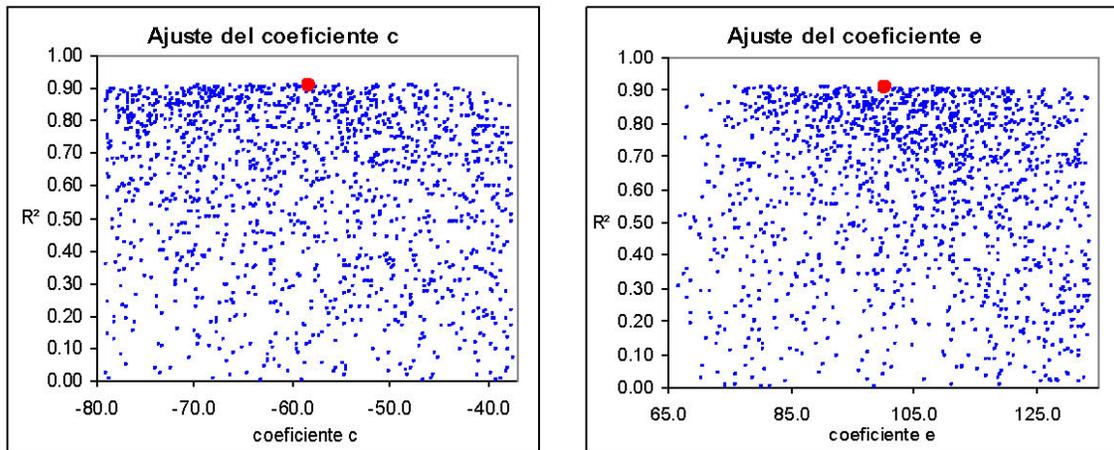


Figura 8.27: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación con empaque desplazado transversalmente para la tubería de 2".

8.4.2 Tubería de 4"

En la Figura 8.28 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las pruebas realizadas en el numeral 7.2.1.2; cada serie de la figura representa una relación entre la longitud de falla y el diámetro de la acometida ($\frac{1}{2}$ ").

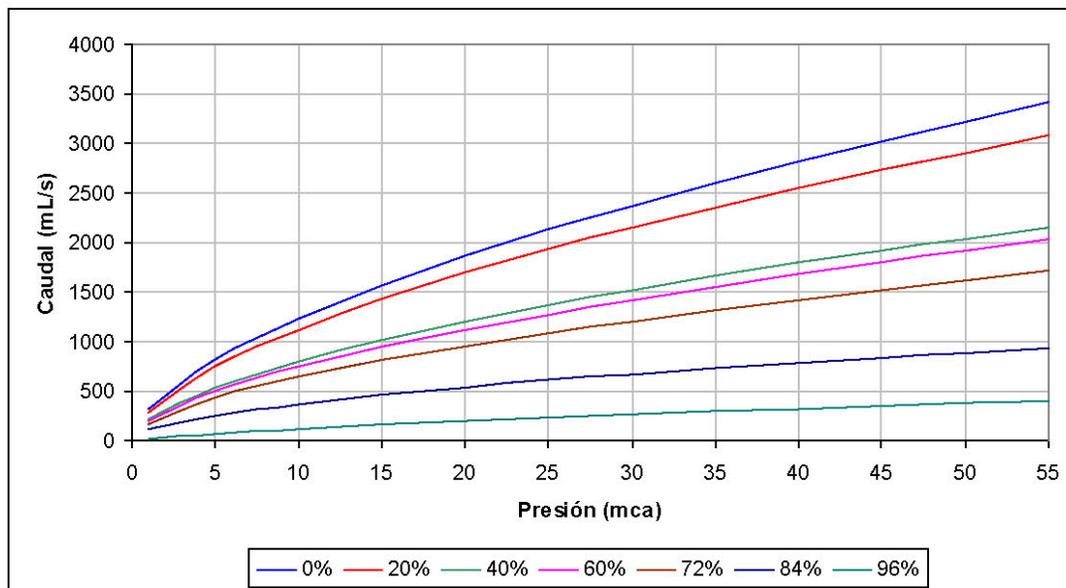


Figura 8.28: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación con empaque desplazado transversalmente para la tubería de 4" con diferentes relaciones de L/d.

Con la información contenida en la figura anterior de caudal, presión y la relación L/d se procede a la calibración de la ecuación 8-7, para encontrar los coeficientes que mejor se ajusten a la ecuación. En la Tabla 8-7 se presentan los resultados de la calibración, donde se muestra el valor óptimo de cada coeficiente, con su error estándar y los valores de los límites inferior y superior para un intervalo de confianza del 99%.

Tabla 8-7: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento transversal con empaque para la tubería de 4"					
Resultados de la Regresión Variable			Intervalo de Confianza del 99%		
Variable	Valor	Error estándar	99% (+/-)	Limite inferior	Limite Superior
a	1.178	0.084	0.223	0.955	1.400
b	0.588	0.022	0.057	0.530	0.645
c	-263.48	21.96	58.35	-321.84	-205.13
e	321.67	25.50	67.76	253.92	389.43

$$Q = \left[-263.48 \left(\frac{L}{d} \right)^{1.178} + 321.67 \right] \cdot p^{0.588} \quad [8-14]$$

La ecuación 8-14 se obtiene con un coeficiente de determinación múltiple de 0.97289, por lo tanto la ecuación explica el 97.29% de los datos medidos. A continuación se presenta la gráfica que relaciona los datos experimentales con la ecuación calibrada.

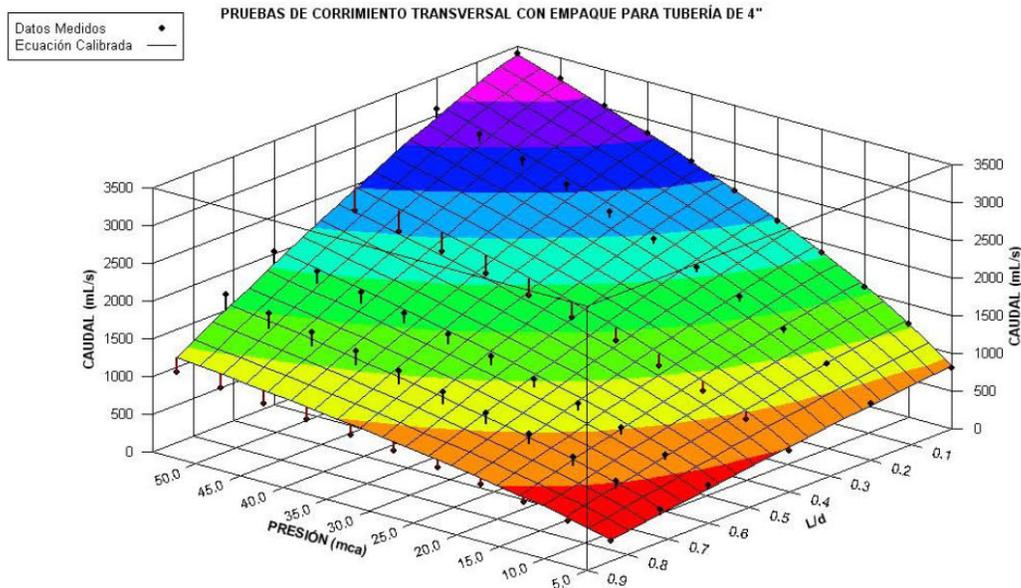


Figura 8.29: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación con empaque desplazado transversalmente para la tubería de 4".

Posterior a la calibración de la ecuación en el programa DataFit se realizó un análisis de MonteCarlo para determinar la confiabilidad de los coeficientes de la ecuación 8-8. Para este procedimiento se tomó el rango de los coeficientes obtenidos para un intervalo de confianza del 99%. En la Figura 8.30 se puede visualizar que el ajuste de los coeficientes es bueno para el rango del intervalo de confianza.

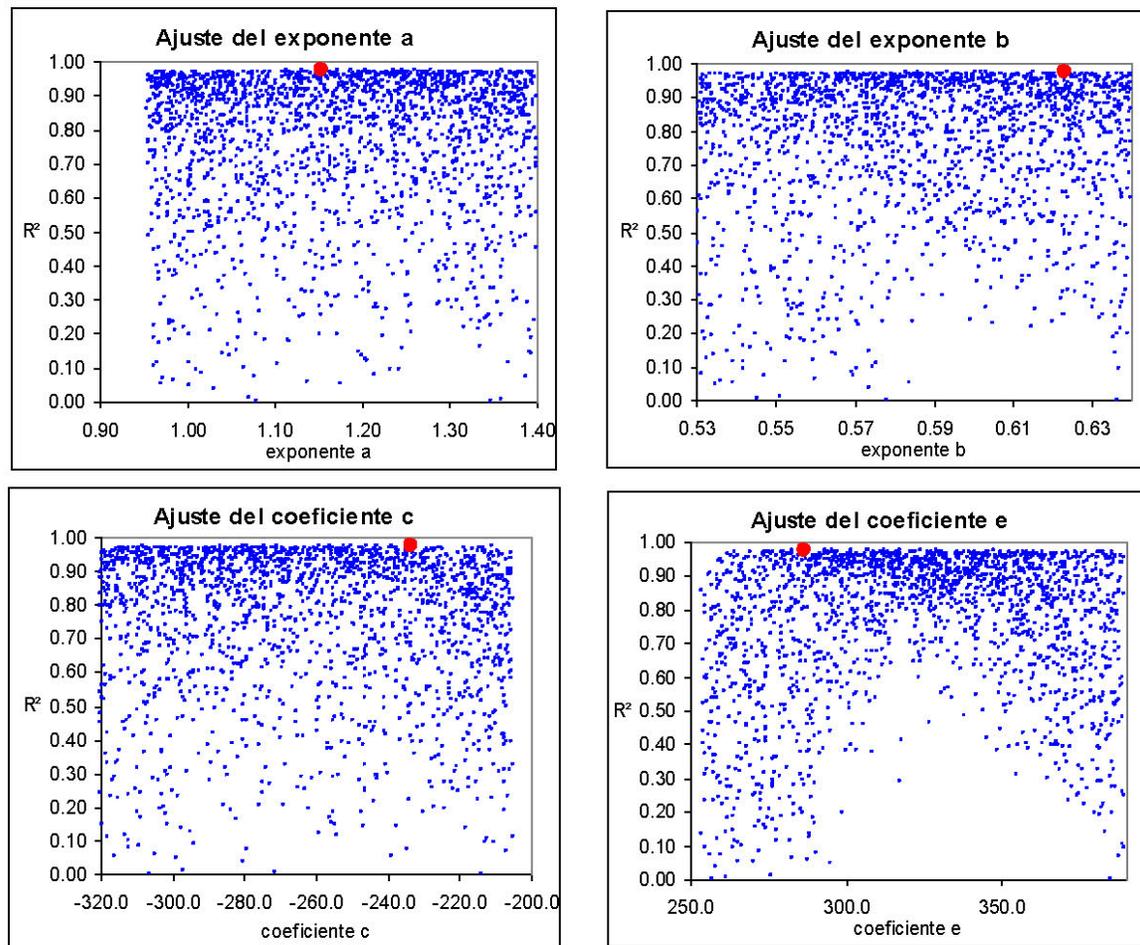


Figura 8.30: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación con empaque desplazado transversalmente para la tubería de 4".

8.5 DESPLAZAMIENTO TRANSVERSAL SIN EMPAQUE

Después de analizar los resultados obtenidos para cada una de las pruebas de desplazamiento transversal sin empaque para las tuberías plásticas de 2", 3" y 4" de diámetro hechas en PVC, se encontraron los coeficientes de la ecuación que mejor describe los datos experimentales, en función de la presión y la relación entre la longitud de falla y el diámetro de la acometida. Para esta calibración se agruparon todas las pruebas realizadas para cada tubería en una sola ecuación, es decir, que por cada diámetro se obtuvo una ecuación.

8.5.1 Tubería de 2"

En la Figura 8.31 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las pruebas realizadas en el numeral 7.2.2.1; cada serie de la figura representa una relación entre la longitud de falla y el diámetro de la acometida ($\frac{1}{2}$ ").

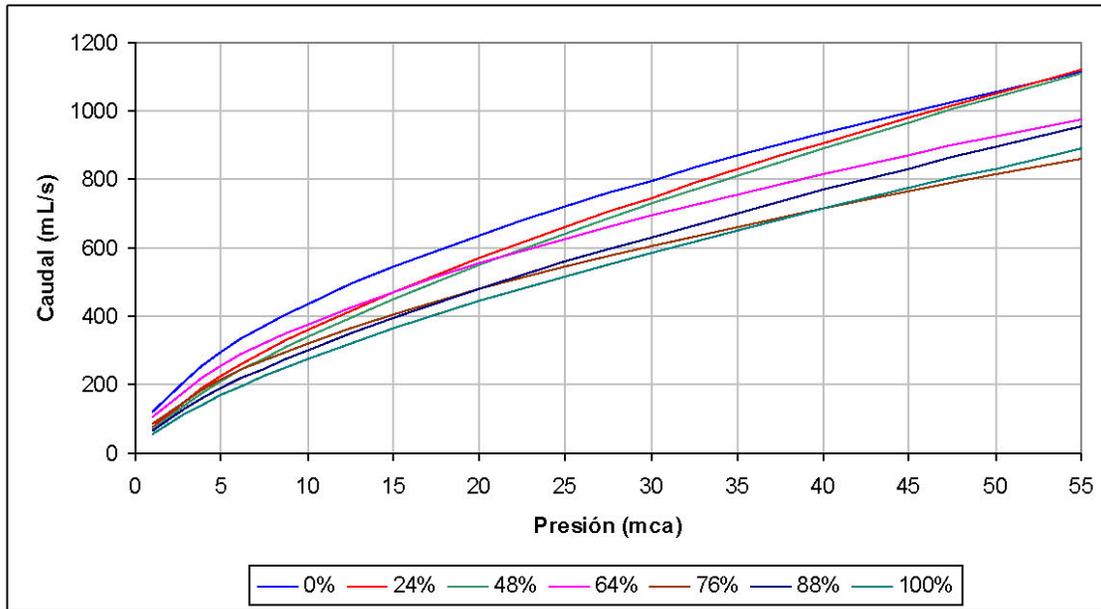


Figura 8.31: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 2" con diferentes relaciones de L/d.

Con la información contenida en la figura anterior de caudal, presión y la relación L/d se procede a la calibración de la ecuación 8-7, para encontrar los coeficientes que mejor se ajusten a la ecuación. En la Tabla 8-8 se presentan los resultados de la calibración, donde se muestra el valor óptimo de cada coeficiente, con su error estándar y los valores de los límites inferior y superior para un intervalo de confianza del 99%.

Tabla 8-8: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento transversal sin empaque para la tubería de 2"					
Resultados de la Regresión Variable			Intervalo de Confianza del 99%		
Variable	Valor	Error estándar	99% (+/-)	Limite inferior	Limite Superior
a	1.358	0.167	0.442	0.916	1.800
b	0.627	0.011	0.030	0.597	0.657
c	-23.66	1.55	4.10	-27.76	-19.56
e	93.41	3.96	10.47	82.94	103.88

$$Q = \left[-23.66 \left(\frac{L}{d} \right)^{1.358} + 93.41 \right] \cdot p^{0.627} \quad [8-15]$$

La ecuación 8-15 se obtiene con un coeficiente de determinación múltiple de 0.98618, por lo tanto la ecuación explica el 98.62% de los datos medidos. A continuación se presenta la gráfica que relaciona los datos experimentales con la ecuación calibrada.

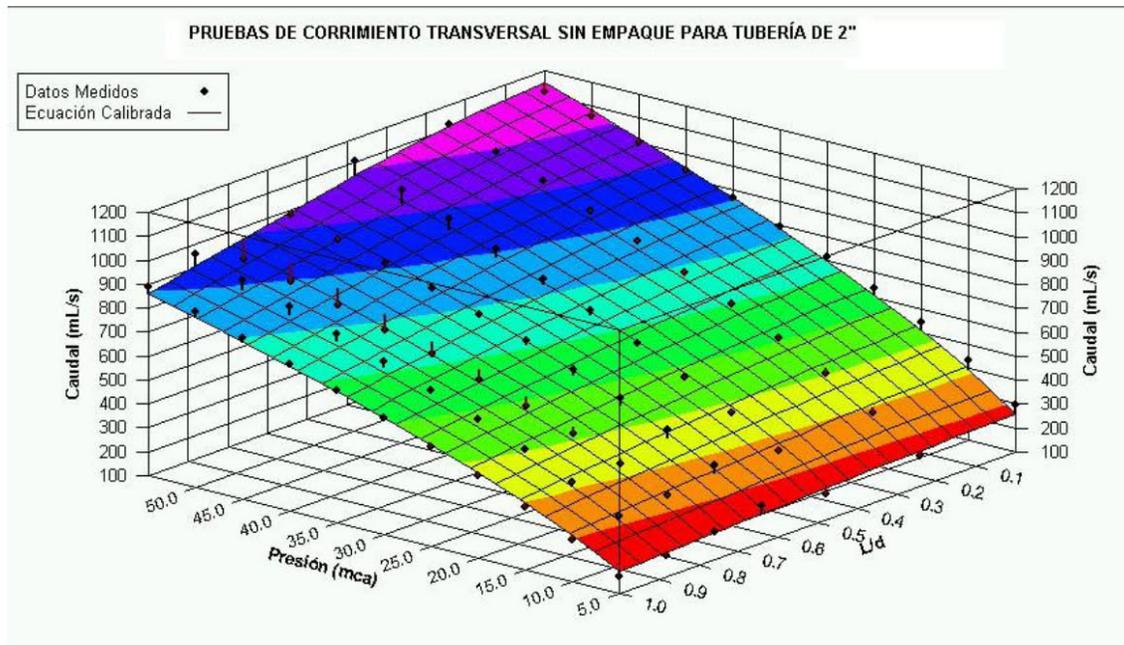


Figura 8.32: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 2\".

Posterior a la calibración de la ecuación en el programa DataFit se realizó un análisis de MonteCarlo para determinar la confiabilidad de los coeficientes de la ecuación 8-8. Para este procedimiento se tomó el rango de los coeficientes obtenidos para un intervalo de confianza del 99%. En la Figura 8.33 se puede visualizar que el ajuste de los coeficientes es bueno para el rango del intervalo de confianza.

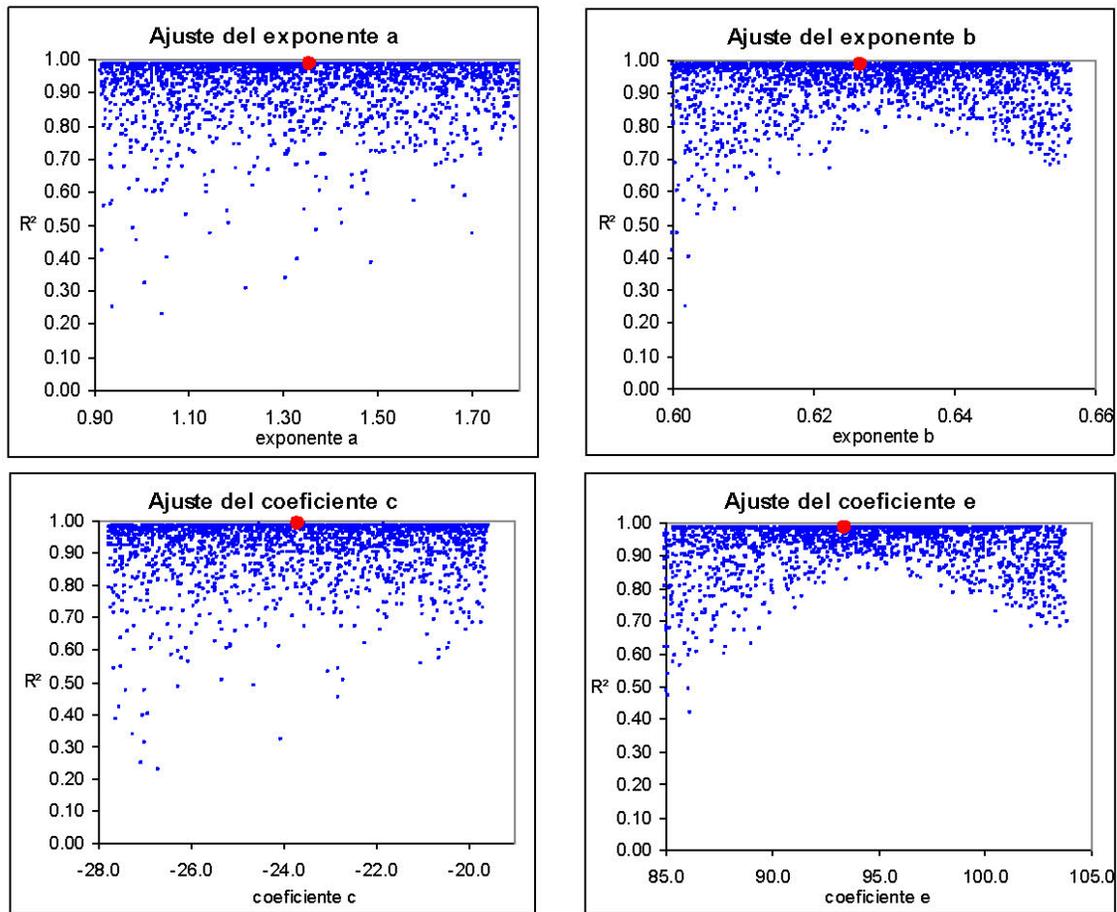


Figura 8.33: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 2”.

8.5.2 Tubería de 3”

En la Figura 8.34 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las pruebas realizadas en el numeral 7.2.2.2; cada serie de la figura representa una relación entre la longitud de falla y el diámetro de la acometida (½”).

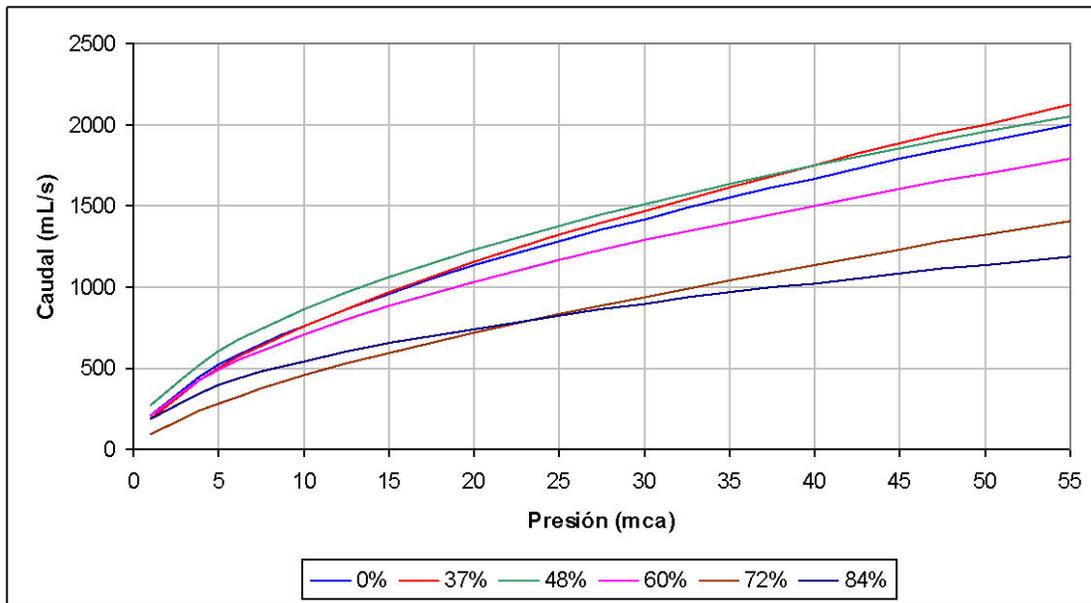


Figura 8.34: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 3” con diferentes relaciones de L/d.

Con la información contenida en la figura anterior de caudal, presión y la relación L/d se procede a la calibración de la ecuación 8-7, para encontrar los coeficientes que mejor se ajusten a la ecuación. En la Tabla 8-9 se presentan los resultados de la calibración, donde se muestra el valor óptimo de cada coeficiente, con su error estándar y los valores de los límites inferior y superior para un intervalo de confianza del 99%.

Tabla 8-9: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento transversal sin empaque para la tubería de 3”					
Resultados de la Regresión Variable			Intervalo de Confianza del 99%		
Variable	Valor	Error estándar	99% (+/-)	Limite inferior	Limite Superior
a	3.298	0.375	0.996	2.302	4.293
b	0.562	0.019	0.050	0.512	0.611
c	-175.80	17.61	46.81	-222.61	-129.00
e	221.08	15.18	40.35	180.72	261.43

$$Q = \left[-175.80 \left(\frac{L}{d} \right)^{3.298} + 221.08 \right] \cdot p^{0.562} \quad [8-16]$$

La ecuación 8-16 se obtiene con un coeficiente de determinación múltiple de 0.96616, por lo tanto la ecuación explica el 96.62% de los datos medidos. A continuación se presenta la gráfica que relaciona los datos experimentales con la ecuación calibrada.

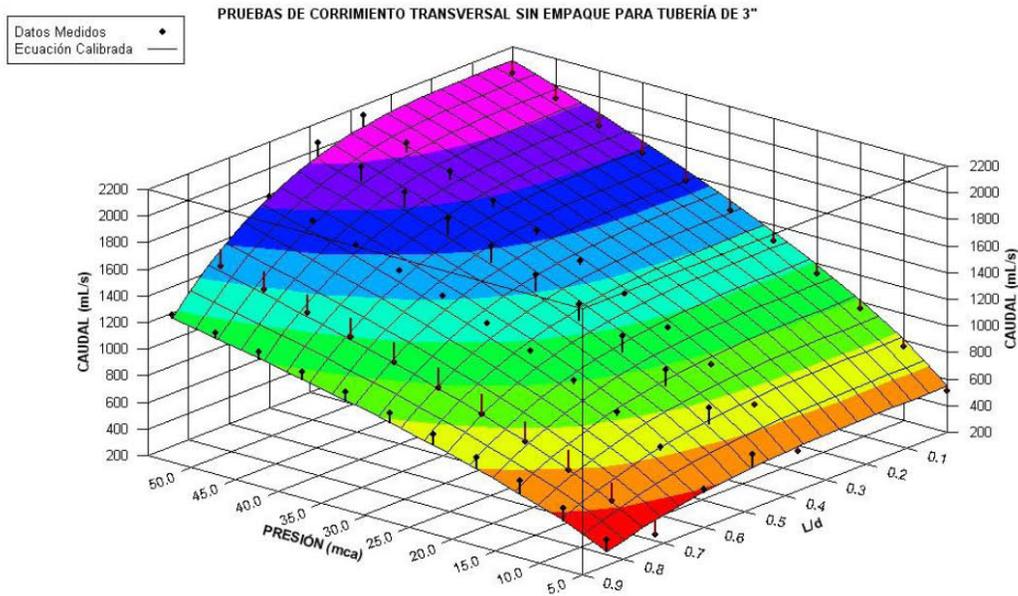
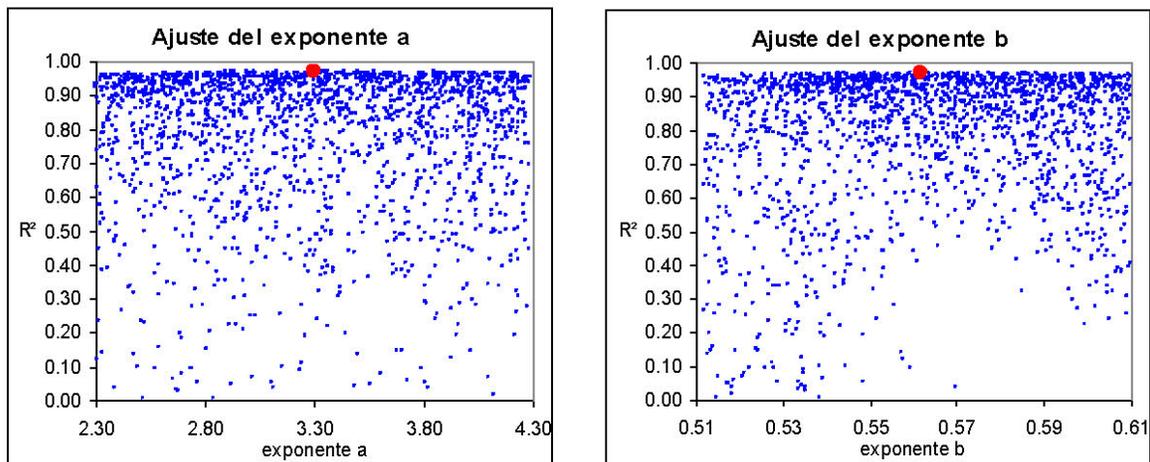


Figura 8.35: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 3".

Posterior a la calibración de la ecuación en el programa DataFit se realizó un análisis de MonteCarlo para determinar la confiabilidad de los coeficientes de la ecuación 8-8. Para este procedimiento se tomó el rango de los coeficientes obtenidos para un intervalo de confianza del 99%. En la Figura 8.36 se puede visualizar que el ajuste de los coeficientes es bueno para el rango del intervalo de confianza.



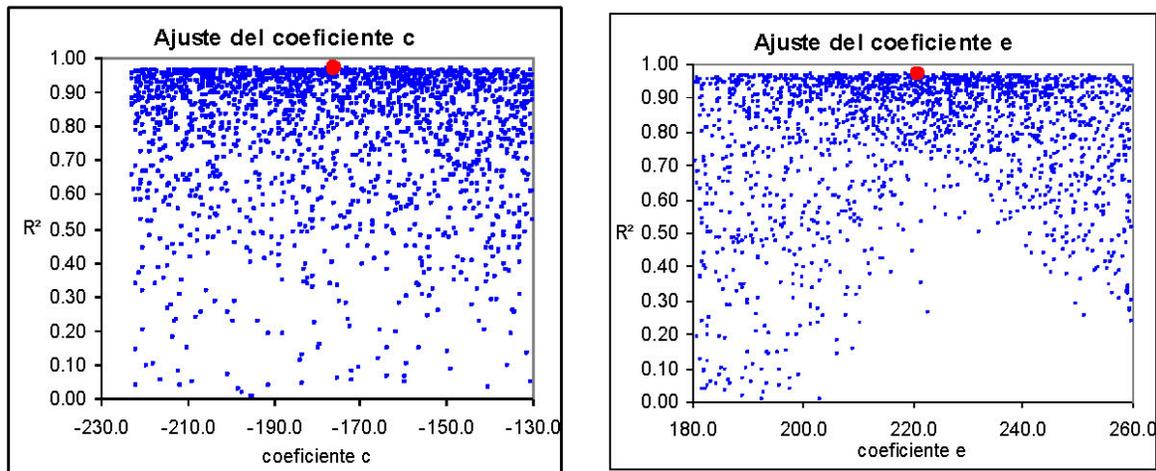


Figura 8.36: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 3”.

8.5.3 Tubería de 4”

En la Figura 8.37 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las pruebas realizadas en el numeral 7.2.2.3; cada serie de la figura representa una relación entre la longitud de falla y el diámetro de la acometida ($\frac{1}{2}$ ”).

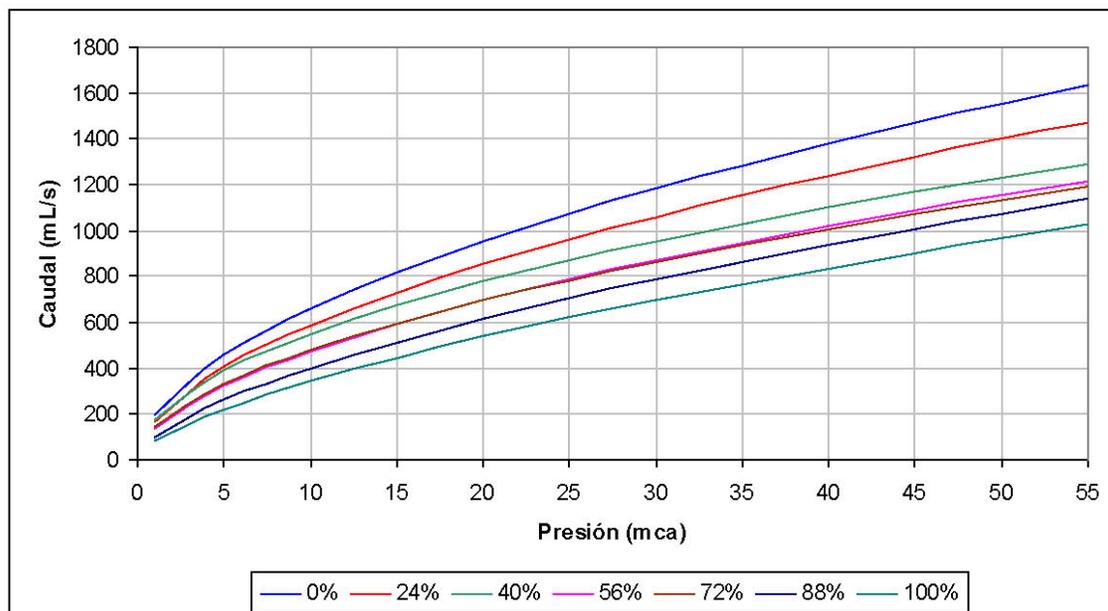


Figura 8.37: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 4” con diferentes relaciones de L/d.

Con la información contenida en la figura anterior de caudal, presión y la relación L/d se procede a la calibración de la ecuación 8-7, para encontrar los coeficientes que mejor se ajusten a la ecuación. En la Tabla 8-10 se presentan los resultados de la calibración, donde se muestra el valor óptimo de cada coeficiente, con su error estándar y los valores de los límites inferior y superior para un intervalo de confianza del 99%.

Tabla 8-10: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento transversal sin empaque para la tubería de 4"					
Resultados de la Regresión Variable			Intervalo de Confianza del 99%		
Variable	Valor	Error estándar	99% (+/-)	Limite inferior	Limite Superior
a	0.811	0.040	0.105	0.706	0.916
b	0.550	0.007	0.020	0.530	0.570
c	-69.66	2.42	6.39	-76.05	-63.27
e	181.81	5.03	13.28	168.54	195.09

$$Q = \left[-69.66 \left(\frac{L}{d} \right)^{0.811} + 181.81 \right] \cdot p^{0.550} \quad [8-17]$$

La ecuación 8-17 se obtiene con un coeficiente de determinación múltiple de 0.99289, por lo tanto la ecuación explica el 99.29% de los datos medidos. A continuación se presenta la gráfica que relaciona los datos experimentales con la ecuación calibrada.

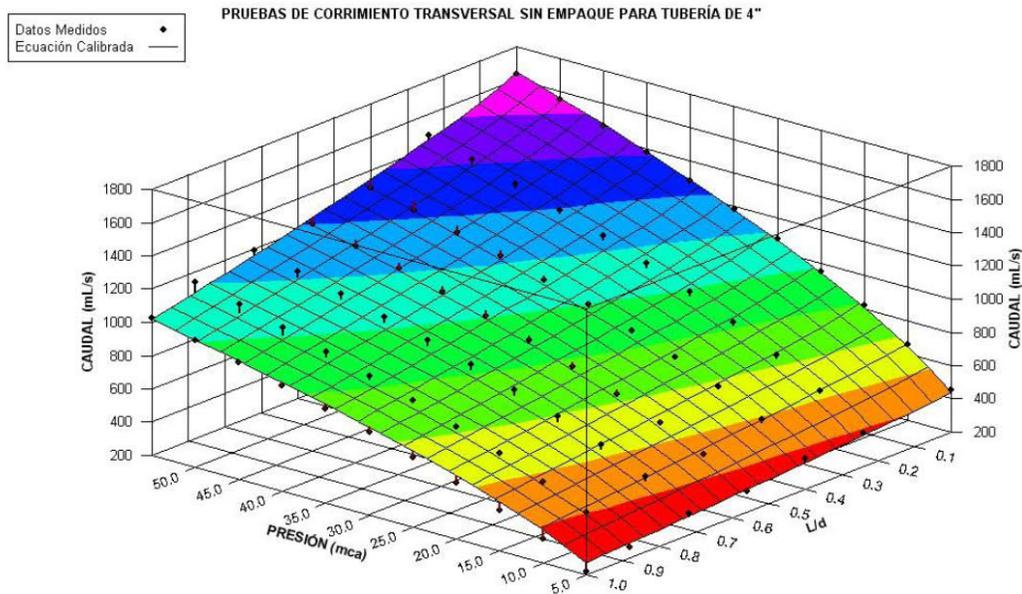


Figura 8.38: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 4".

Posterior a la calibración de la ecuación en el programa DataFit se realizó un análisis de MonteCarlo para determinar la confiabilidad de los coeficientes de la ecuación 8-8. Para este procedimiento se tomó el rango de los coeficientes obtenidos para un intervalo de confianza del 99%. En la Figura 8.39 se puede visualizar que el ajuste de los coeficientes es bueno para el rango del intervalo de confianza.

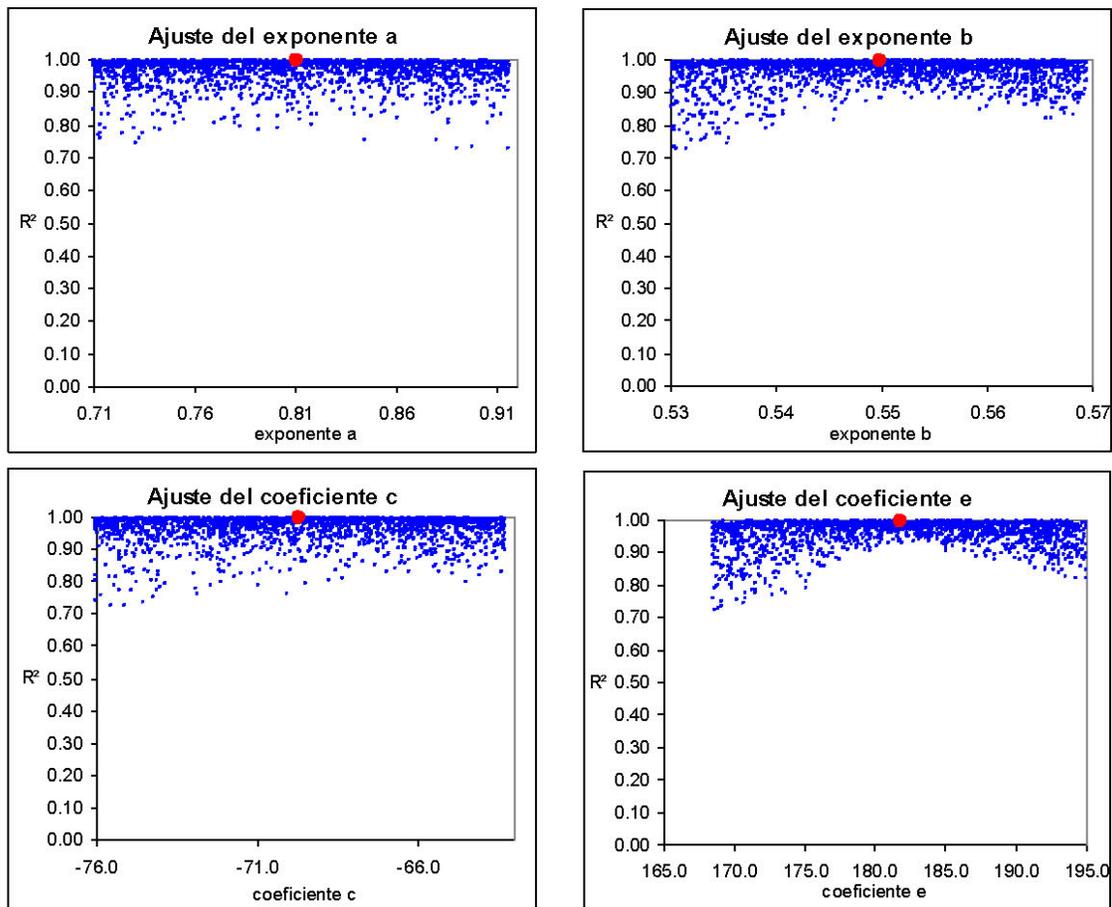


Figura 8.39: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 4”.

Capítulo 9 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos en la calibración de los parámetros de fugas, se tiene el siguiente análisis para las fallas en las conexiones domiciliarias:

9.1 Fallas en conexiones domiciliarias

Para los cuatro tipos de fallas en conexiones domiciliarias se observa que la forma de la curva de caudales es similar a la de un orificio, pues el exponente b se encuentra alrededor del valor teórico de 0.50, aumentando hasta valores cercanos a 0.7 para una longitud de falla igual a cero, es decir, cuando el collar de derivación se encontraba totalmente desplazado, para condiciones de hermeticidad y no hermeticidad. Este hecho se debe a que el caudal de fuga sale por medio de la dilatación del collar de derivación y la tubería principal; para este caso, la ecuación de orificio (exponente 0.5) no representa de manera apropiada las condiciones de flujo presentes en la tubería y por lo tanto el exponente tiende a aumentar.

Para todos los casos de análisis de fugas en el collar de derivación de las conexiones domiciliarias se encontró que el caudal fugado es función de la relación L/d , donde L es la longitud de la falla (diferencia entre el diámetro de la acometida y la longitud de desplazamiento del collar de derivación) y d es el diámetro interno de la acometida de la conexión domiciliar; además es función del diámetro de la tubería principal, es decir la tubería a la cual se le conecta la acometida.

9.2 Ecuaciones para los caudales de fuga.

En el Capítulo 8 se encontraron 10 ecuaciones que relacionan el caudal de fuga con la presión y la relación L/d . Pero cada ecuación hace referencia a un diámetro y tipo de falla en particular, por lo tanto, para la calibración final se agregaron las ecuaciones de un mismo tipo de falla en una sola ecuación que relaciona los parámetros antes descritos además del diámetro de la tubería, en donde se tendrán involucradas todas las características geométricas de la tubería y la acometida.

Para la calibración de cada tipo de falla se utilizó la ecuación 8-7, en donde se encontraban los coeficientes óptimos que mejor se ajustaban a los datos experimentales. Se observó que el coeficiente más relevante es el a , en donde se puede involucrar al diámetro de la tubería. Para la calibración final, se modificó el coeficiente por un factor adimensional que es la relación entre el diámetro de la acometida y el de la tubería, elevado a la potencia f ; para encontrar los nuevos coeficientes de la ecuación 9-1 se utilizó el programa DataFit.

$$Q = \left[c \left(\frac{L}{d} \right)^a \left(\frac{d}{D} \right)^f + e \right] \cdot p^b \quad [9-1]$$

donde,

Q es el caudal de fuga por la conexión domiciliaria, (mililitros por segundo)

L es la longitud de la falla, (centímetros)

d es el diámetro de la acometida, (centímetro)

D es el diámetro de la tubería, (centímetro)

p es la presión de servicio en la acometida, (mca)

9.2.1 Desplazamiento longitudinal con empaque

Con los resultados obtenidos para cada una de las pruebas de desplazamiento longitudinal con empaque, se realizó una calibración que agrupara todas estas pruebas. Se calibraron los coeficientes de la ecuación 9-1 que mejor se ajustaran al caudal de fuga en función de la presión, el diámetro de la tubería y la relación entre la longitud de la falla y el diámetro de la acometida. En la Tabla 9-1 se presentan los resultados de la calibración, donde se muestra el valor óptimo de cada coeficiente, con su error estándar y los valores de los límites inferior y superior para un intervalo de confianza del 99%.

Tabla 9-1: Resultados de la calibración para las pruebas de desplazamiento longitudinal con empaque					
Resultados de la Regresión Variable			Intervalo de Confianza del 99%		
Variable	Valor	Error estándar	99% (+/-)	Limite inferior	Limite Superior
a	0.067	0.005	0.013	0.053	0.080
b	0.574	0.009	0.023	0.551	0.596
c	-323.60	10.66	27.89	-351.48	-295.71
e	356.41	11.26	29.45	326.96	385.87
f	-1.754	0.039	0.102	-1.857	-1.652

$$Q = \left[-323.60 \left(\frac{L}{d} \right)^{0.067} \left(\frac{d}{D} \right)^{-1.754} + 356.41 \right] \cdot p^{0.574} \quad [9-2]$$

La ecuación 9-2 se obtiene con un coeficiente de determinación múltiple de 0.99254, por lo tanto la ecuación explica el 99.25% de los datos medidos. A continuación, se presenta la gráfica que relaciona los datos experimentales con la ecuación calibrada, donde la serie de color azul representa los datos experimentales, mientras que la serie de color rojo representa

la ecuación 9-2. Se observa que la ecuación calibrada representa bastante bien los datos experimentales y que la máxima diferencia entre las dos series ocurre para las longitudes de falla cercanas a cero, es decir que el collar se encontraba totalmente desplazado. Estas diferencias eran de esperarse ya que para estas longitudes de falla el caudal de fuga no se comporta como el caudal que sale por un orificio. Las diferencias son del orden de 0.18 L/s.

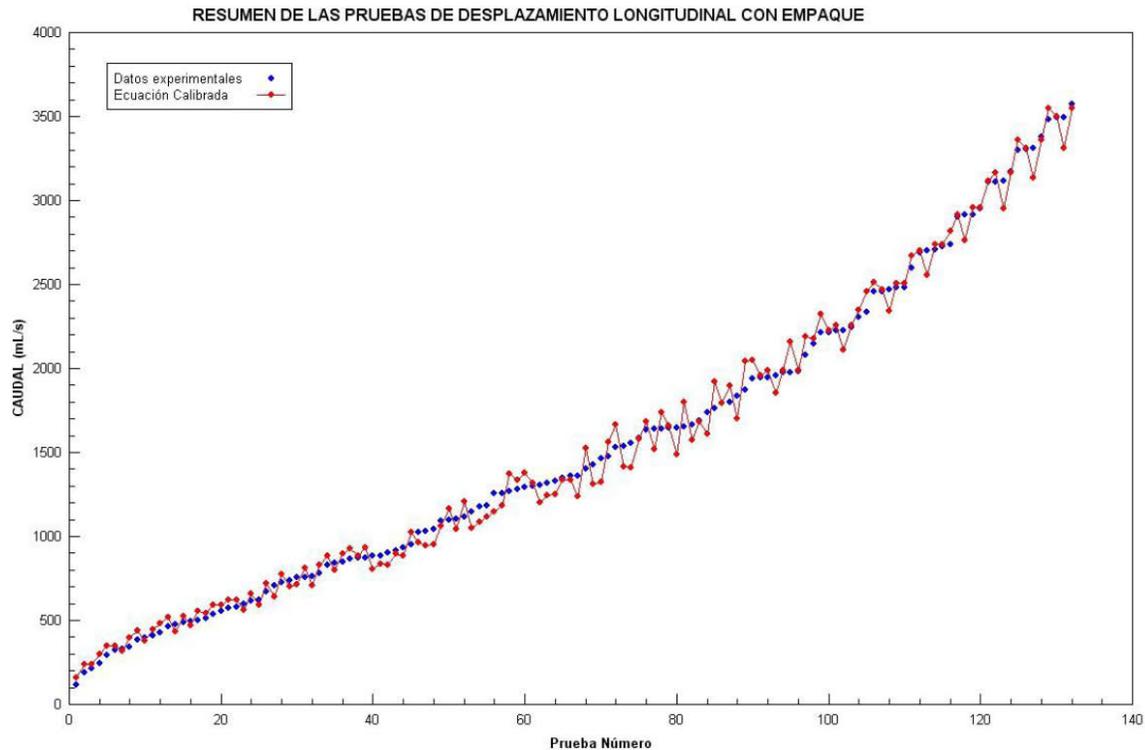


Figura 9.1: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión, la relación L/d y el diámetro de la tubería a través de un collar de derivación con empaque desplazado longitudinalmente.

9.2.2 Desplazamiento longitudinal sin empaque

Con los resultados obtenidos para cada una de las pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque se realizó una calibración que agrupara todas estas pruebas. Se calibraron los coeficientes de la ecuación 9-1 que mejor se ajustaran al caudal de fuga en función de la presión, el diámetro de la tubería y la relación entre la longitud de la falla y el diámetro de la acometida. En la Tabla 9-2 se presentan los resultados de la calibración, donde se muestra el valor óptimo de cada coeficiente, con su error estándar y los valores de los límites inferior y superior para un intervalo de confianza del 99%.

Tabla 9-2: Resultados de la calibración para las pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque					
Resultados de la Regresión Variable			Intervalo de Confianza del 99%		
Variable	Valor	Error estándar	99% (+/-)	Limite inferior	Limite Superior
a	0.007	0.001	0.004	0.003	0.011
b	0.503	0.011	0.029	0.474	0.531
c	-256.61	10.83	28.21	-284.82	-228.39
e	311.60	12.19	31.77	279.82	343.37
f	-3.759	0.136	0.353	-4.112	-3.406

$$Q = \left[-256.61 \left(\frac{L}{d} \right)^{0.007} \left(\frac{d}{D} \right)^{-3.759} + 311.60 \right] \cdot p^{0.503} \quad [9-3]$$

La ecuación 9-3 se obtiene con un coeficiente de determinación múltiple de 0.97450, por lo tanto la ecuación explica el 97.45% de los datos medidos. A continuación, se presenta la gráfica que relaciona los datos experimentales con la ecuación calibrada, donde la serie de color azul representa los datos experimentales, mientras que la serie de color rojo representa la ecuación 9-3. Se observa que la ecuación calibrada representa bastante bien los datos experimentales y que la máxima diferencia entre las dos series ocurre para las longitudes de falla cercanas a cero, es decir que el collar se encontraba totalmente desplazado. Estas diferencias eran de esperarse ya que para estas longitudes de falla el caudal de fuga no se comporta como el caudal que sale por un orificio. Las diferencias son del orden de 0.28 L/s.

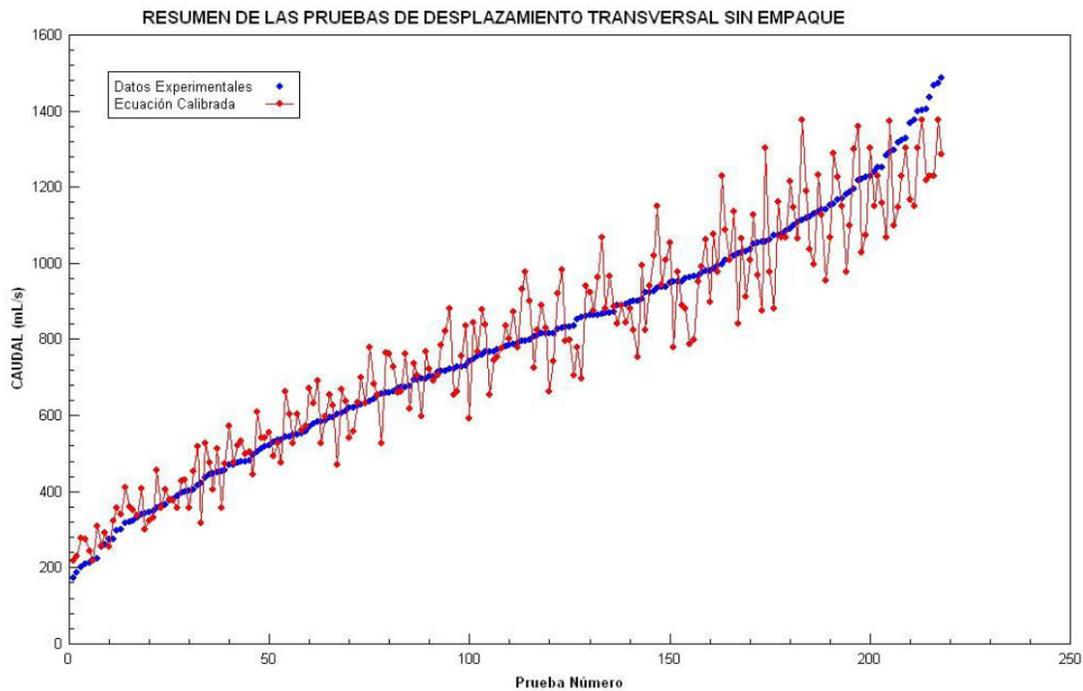


Figura 9.2: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión, la relación L/d y el diámetro de la tubería a través de un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente.

9.2.3 Desplazamiento transversal con empaque

Con los resultados obtenidos para cada una de las pruebas de desplazamiento transversal con empaque se realizó una calibración que agrupa todas estas pruebas. Se calibraron los coeficientes de la ecuación 9-1 que mejor se ajustaran al caudal de fuga en función de la presión, el diámetro de la tubería y la relación entre la longitud de la falla y el diámetro de la acometida. En la Tabla 9-3 se presentan los resultados de la calibración, donde se muestra el valor óptimo de cada coeficiente, con su error estándar y los valores de los límites inferior y superior para un intervalo de confianza del 99%.

Tabla 9-3: Resultados de la calibración para las pruebas de desplazamiento transversal con empaque					
Resultados de la Regresión Variable			Intervalo de Confianza del 99%		
Variable	Valor	Error estándar	99% (+/-)	Limite inferior	Limite Superior
a	421.473	321.618	321.007	100.466	742.480
b	0.582	0.063	0.164	0.418	0.746
c	-199.44	46.76	122.12	-321.56	-77.32
e	237.08	54.22	141.61	95.48	378.69
f	3.622	0.519	1.356	2.266	4.978

$$Q = \left[-199.44 \left(\frac{L}{d} \right)^{421.47} \left(\frac{d}{D} \right)^{3.662} + 237.08 \right] \cdot p^{0.582} \quad [9-4]$$

La ecuación 9-4 se obtiene con un coeficiente de determinación múltiple de 0.97737, por lo tanto la ecuación explica el 97.74% de los datos medidos. A continuación, se presenta la gráfica que relaciona los datos experimentales con la ecuación calibrada, donde la serie de color azul representa los datos experimentales, mientras que la serie de color rojo representa la ecuación 9-4. Se observa que la ecuación calibrada representa bastante bien los datos experimentales y que la máxima diferencia entre las dos series ocurre para las longitudes de falla cercanas a cero, es decir que el collar se encontraba totalmente desplazado. Estas diferencias eran de esperarse ya que para estas longitudes de falla el caudal de fuga no se comporta como el caudal que sale por un orificio. Las diferencias son del orden de 0.28 L/s.

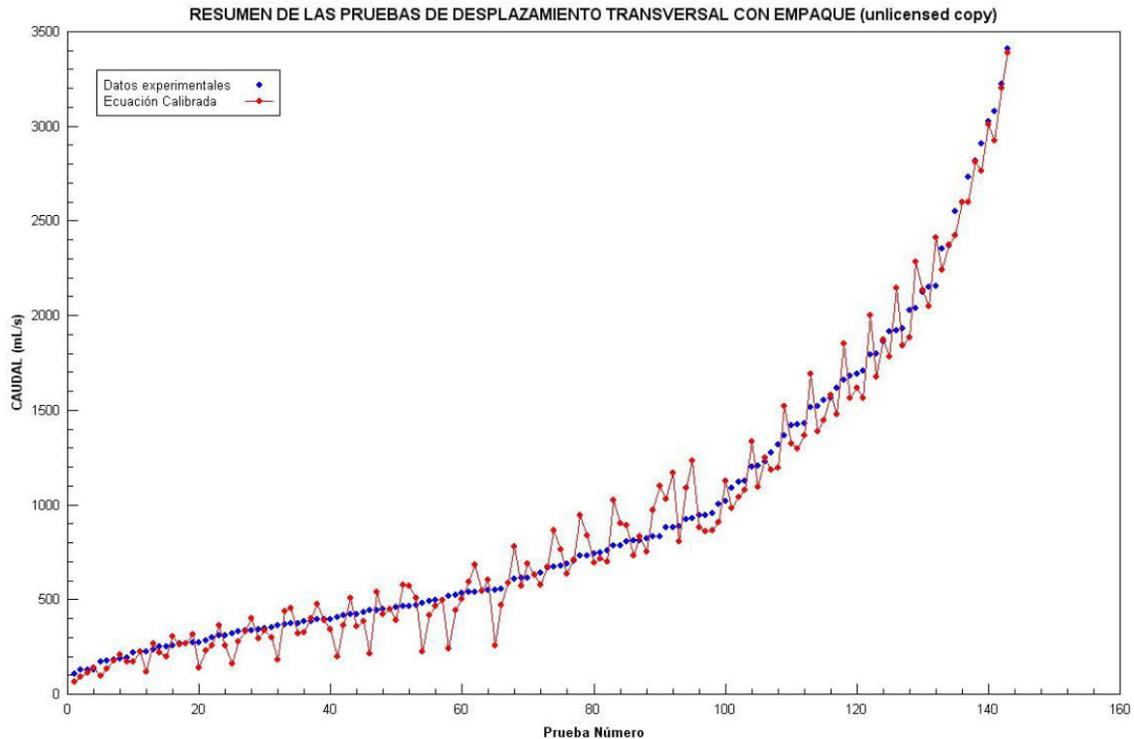


Figura 9.3: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión, la relación L/d y el diámetro de la tubería a través de un collar de derivación con empaque desplazado transversalmente.

9.2.4 Desplazamiento transversal sin empaque

Con los resultados obtenidos para cada una de las pruebas de desplazamiento transversal sin empaque se realizó una calibración que agrupara todas estas pruebas. Se calibraron los coeficientes de la ecuación 9-1 que mejor se ajustaran al caudal de fuga en función de la presión, el diámetro de la tubería y la relación entre la longitud de la falla y el diámetro de la acometida. En la Tabla 9-4 se presentan los resultados de la calibración, donde se muestra el valor óptimo de cada coeficiente, con su error estándar y los valores de los límites inferior y superior para un intervalo de confianza del 99%.

Tabla 9-4: Resultados de la calibración para las pruebas de desplazamiento transversal sin empaque					
Resultados de la Regresión Variable			Intervalo de Confianza del 99%		
Variable	Valor	Error estándar	99% (+/-)	Limite inferior	Limite Superior
a	395.529	230.924	230.185	165.345	625.714
b	0.564	0.017	0.045	0.519	0.608
c	-55.74	4.44	11.53	-67.27	-44.21
e	143.74	9.02	23.45	120.29	167.19
f	3.024	0.320	0.832	2.191	3.856

$$Q = \left[-55.74 \left(\frac{L}{d} \right)^{395.53} \left(\frac{d}{D} \right)^{3.024} + 143.74 \right] \cdot p^{0.564} \quad [9-5]$$

La ecuación 9-5 se obtiene con un coeficiente de determinación múltiple de 0.90378, por lo tanto la ecuación explica el 90.38% de los datos medidos. A continuación, se presenta la gráfica que relaciona los datos experimentales con la ecuación calibrada, donde la serie de color azul representa los datos experimentales, mientras que la serie de color rojo representa la ecuación 9-5. Se observa que la ecuación calibrada representa bastante bien los datos experimentales y que la máxima diferencia entre las dos series ocurre para las longitudes de falla cercanas a cero, es decir que el collar se encontraba totalmente desplazado. Estas diferencias eran de esperarse ya que para estas longitudes de falla el caudal de fuga no se comporta como el caudal que sale por un orificio. Las diferencias son del orden de 0.24 L/s.

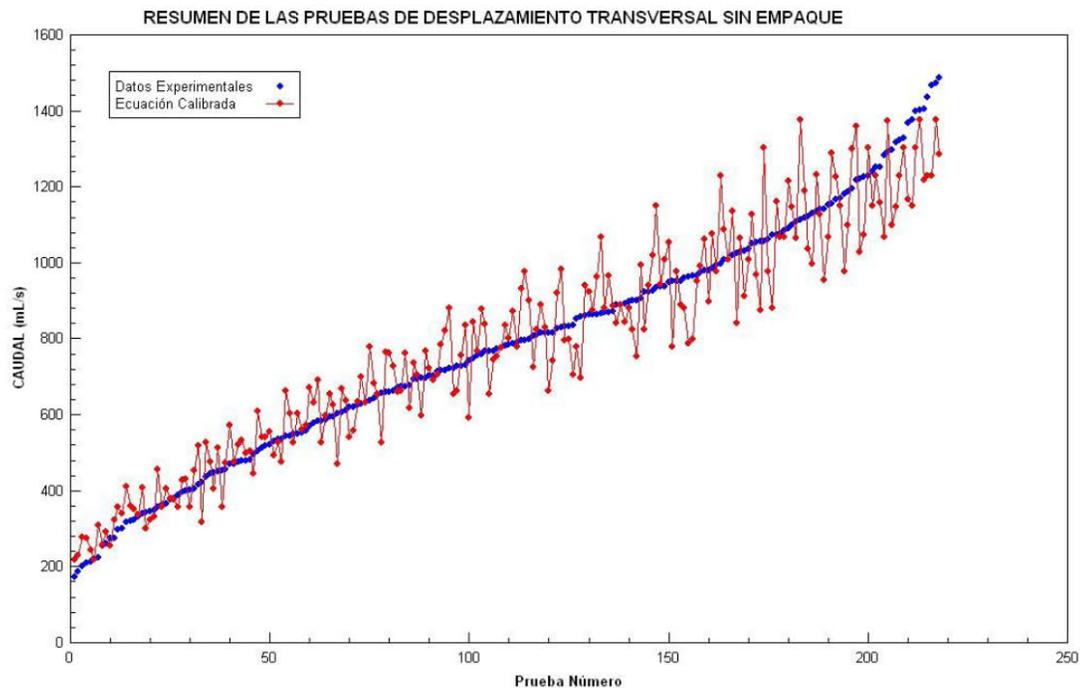


Figura 9.4: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión, la relación L/d y el diámetro de la tubería a través de un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente.

9.3 Magnitud de los caudales de fuga generados por las fallas.

Una observación importante, está relacionada con el orden de magnitud de los caudales de fuga, en función de la presión, para las fallas evaluadas en esta investigación. El objeto principal de obtener un rango de valores para los caudales de fuga, es determinar en términos aproximados, la cantidad de agua perdida en una red de distribución, teniendo una estadística de la cantidad y características de las fallas inventariadas en el tiempo.

En términos generales, se tiene que para fallas en las conexiones domiciliarias, los caudales de fuga con una presión constante de 15 m de altura de agua son de la siguiente magnitud:

- Para desplazamientos longitudinales con empaque, el caudal de fuga varía de 0.2 L/s hasta 1.6 L/s, equivalente a un rango de 17.3 m³/día hasta 138.3 m³/día.
- Para desplazamientos longitudinales sin empaque, el caudal de fuga varía de 0.4 L/s hasta 1.4 L/s, equivalente a un rango de 34.6 m³/día hasta 121.0 m³/día.
- Para desplazamientos transversales con empaque, el caudal de fuga varía de 0.2 L/s hasta 0.8 L/s, equivalente a un rango de 17.3 m³/día hasta 69.1 m³/día.
- Para desplazamientos transversales sin empaque, el caudal de fuga varía de 0.3 L/s hasta 0.9 L/s, equivalente a un rango de 25.9 m³/día hasta 77.8 m³/día.



Por otro lado, se está teniendo en cuenta que solamente hay una falla con caudal de fuga. Sin embargo al sumar todas las posibles fallas que pueden ocurrir en las conexiones domiciliarias de un sistema de distribución, la pérdida de agua sería considerable.

Capítulo 10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se concluyen los siguientes puntos:

10.1 Conclusiones relacionadas con el montaje y las mediciones experimentales.

1. Teniendo en cuenta que los resultados obtenidos por Ávila [1] para los caudales de fuga en función del tipo de falla, se encontró que los coeficientes y los exponentes son muy cercanos a los esperados teóricamente para flujo en orificios. Se concluye que el comportamiento del montaje para las pruebas experimentales, aporta la suficiente confiabilidad en los resultados obtenidos para las pruebas de conexiones domiciliarias.

10.2 Conclusiones relacionadas con los resultados de la calibración de parámetros de las ecuaciones de fuga.

1. El coeficiente global de descarga c de la ecuación $Q = c \cdot P^b$ tiene dos características fundamentales. La primera es una tendencia decreciente en función de la longitud de falla, la cual se explica por la disminución del área de flujo de la falla para las pruebas con desplazamiento longitudinal, mientras que para las pruebas de corrimiento transversal el coeficiente no sigue ninguna tendencia. La segunda característica es un aumento del valor del coeficiente en función del diámetro, es decir, que entre menor sea el diámetro menor es el coeficiente de descarga. Esto debido a que cuando se incrementa el diámetro, la velocidad de flujo en la tubería disminuye, por lo tanto es más fácil que exista fuga de agua en la conexión domiciliaria.
2. La forma de la curva de caudales para las fallas en conexiones domiciliarias tiene una tendencia de crecimiento potencial, reflejando un incremento de caudal para cada variación positiva de la presión. El exponente b de la ecuación $Q = c \cdot P^b$ tiene dos características fundamentales. La primera es una tendencia a ser constante para la mayoría de las pruebas realizadas con un valor promedio que se encontraba entre 0.5 y 0.6. El rango del exponente es concordante con el valor del exponente para flujos en orificios, cuando estos varían en función de la presión. La segunda característica es un aumento del valor del exponente para las pruebas en las cuales la longitud de falla se encontraba cercana al valor del diámetro de la acometida, es decir que el desplazamiento de la conexión domiciliaria era cercano a cero. Esto se debe a que para esta condición de flujo, la fuga en la conexión domiciliaria no se comporta como un flujo en orificio.

3. Con la calibración final de los coeficientes de la ecuación 9-1 para las pruebas con desplazamiento longitudinal, se encontró que los valores de los coeficientes de las dos ecuaciones (con empaque y sin empaque) son similares y del mismo orden de magnitud, como se puede apreciar a continuación:

$$Q = \left[-323.60 \left(\frac{L}{d} \right)^{0.067} \left(\frac{d}{D} \right)^{-1.754} + 356.41 \right] \cdot p^{0.574}$$

Desplazamiento longitudinal con empaque

$$Q = \left[-256.61 \left(\frac{L}{d} \right)^{0.007} \left(\frac{d}{D} \right)^{-3.759} + 311.60 \right] \cdot p^{0.503}$$

Desplazamiento longitudinal sin empaque

Por otro lado para las pruebas de desplazamiento transversal, el valor de los coeficientes cambia rotundamente con respecto a los valores de los coeficientes para las pruebas de desplazamiento longitudinal. El valor del exponente **a** cambia de 0.067 a 421, mientras que el valor del exponente **f** cambia de -1.75 a 1.66. Estos cambios se deben principalmente a que para las fugas en conexiones domiciliarias con desplazamientos longitudinales, la dirección del desplazamiento va en el mismo sentido de la dirección del flujo en la tubería, mientras que para los desplazamientos transversales la dirección del desplazamiento es perpendicular a la dirección del flujo. A continuación se presentan las ecuaciones de los desplazamientos transversales.

$$Q = \left[-199.44 \left(\frac{L}{d} \right)^{421.47} \left(\frac{d}{D} \right)^{3.662} + 237.08 \right] \cdot p^{0.582}$$

Desplazamiento transversal con empaque

$$Q = \left[-55.74 \left(\frac{L}{d} \right)^{395.53} \left(\frac{d}{D} \right)^{3.024} + 143.74 \right] \cdot p^{0.564}$$

Desplazamiento transversal sin empaque

4. Al tener la ecuación de fugas para los distintos tipos de fallas, es posible determinar la cantidad de agua perdida en una red, teniendo una estadística de los distintos tipos y cantidad de fallas presentes en un sector de la red de distribución de una ciudad.
5. Las fugas en las conexiones domiciliarias de las tuberías utilizadas en esta investigación se encuentran frecuentemente en las redes de acueducto. Estas fugas son causadas por la falta de vigilancia y calidad en los trabajos de conexión, por ejemplo el desplazamiento del empaque, la caída del mismo y los desplazamientos del collar de derivación en las conexiones domiciliarias de las tuberías principales. Estos defectos pueden ser controlados durante la construcción de la red de suministro de agua, pero una vez que la red se encuentre instalada y en funcionamiento, la mayoría de las fugas pasan a ser no detectables porque se desconoce su ubicación.

10.3 Recomendaciones

1. En lo posible, se sugiere la instalación en serie de una motobomba adicional que permita incrementar la presión en las tuberías para ensayar fallas de dimensiones mayores y con configuraciones compuestas.
2. Se recomienda hacia futuro, continuar con la investigación del comportamiento hidráulico de las fugas para distintos tipos de falla en tuberías de distintos materiales y diámetros. Esto permitirá recopilar suficiente información para tener un mejor conocimiento del comportamiento de las redes bajo el ambiente de fugas.
3. Una vez recopilada suficiente información sobre fugas en tuberías y accesorios, es posible ensayar en laboratorio, una red con diversas fallas para determinar el comportamiento hidráulico. Es decir, es posible analizar las pérdidas de agua en una red a partir de las estadísticas de los porcentajes y características de las fallas presentadas en una red de distribución y relacionarlas con la ecuación de fugas para cada una de ellas.
4. Realizar proyectos de catastro de las redes de distribución representa un apoyo indispensable para la operación y mantenimiento de las mismas y, particularmente, para el control de operación del sistema de abastecimiento, además de facilitar las tareas de detección, localización y reparación de fugas.

Capítulo 11 BIBLIOGRAFÍA

- [1] **ÁVILA, Humberto.** Determinación de parámetros de fugas para fallas longitudinales y en conexiones domiciliarias en tuberías de PVC. *Universidad de los Andes Colombia.* 2002
- [2] **LEES, Matthew, THORSTEN, Wagener.** Monte-Carlo Análisis (MCAT) v.2. *Department of Civil Engineering - Imperial Collage.* 2000
- [3] **MAKAR, J.M.** Investigating large gray cast iron pipe failures: a step by step approach. *National research council Canada.* 2001.
- [4] **STREET, Robert, WATTERS, Gary, VENNARD, John.** Elementary fluid Mechanics. Séptima edición. Editorial Hohn Wiley and Sons. Inc.
- [5] **STREETER, Victor, WYLIE, Benjamín, KERTH, Bedford.** Fluid Mechanics. Novena Edición. Editorial Mc Graw Hill. 1984.
- [6] **TRUEBA, Samuel.** Hidráulica. Editorial Compañía editorial continental S.A.1979.



Capítulo 12 ANEXOS



Anexo 1: Esquema del montaje para pruebas de fuga



Anexo 2: Calibración de vertederos triangulares de 60° para cada uno de los canales de pruebas



Anexo 3: Calibración de las ecuaciones de fuga en conexiones domiciliarias con desplazamiento longitudinal con empaque



Anexo 4: Calibración de las ecuaciones de fuga en conexiones domiciliarias con desplazamiento longitudinal sin empaque



Anexo 5: Calibración de las ecuaciones de fuga en conexiones domiciliarias con desplazamiento transversal con empaque



Anexo 6: Calibración de las ecuaciones de fuga en conexiones domiciliarias con desplazamiento transversal sin empaque

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES	1
Capítulo 2	OBJETIVOS	3
2.1	OBJETIVO GENERAL	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
Capítulo 3	PERSONAL QUE PARTICIPÓ EN LA INVESTIGACIÓN	3
Capítulo 4	MARCO TEÓRICO	4
4.1	Comportamiento de la hidráulica de un orificio en un embalse	4
4.2	Aplicación de la hidráulica de un orificio para fugas en tuberías	6
Capítulo 5	DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE DEL CIRCUITO PARA PRUEBAS ...	8
5.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	8
Capítulo 6	METODOLOGÍA GENERAL	11
6.1	PRUEBAS EXPERIMENTALES	11
6.1.1	CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS	11
6.1.2	GENERACIÓN DE LAS FALLAS	12
6.1.3	EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS	13
6.1.3.1	DESCRIPCIÓN DE LAS MEDICIONES	13
6.2	CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS	14
Capítulo 7	FALLAS EN CONEXIONES DOMICILIARIAS	16
7.1	DESPLAZAMIENTO LONGITUDINAL	19
7.1.1	Desplazamiento longitudinal con empaque	19
7.1.1.1	Tubería de 2"	20
7.1.1.2	Tubería de 4"	22
7.1.2	Desplazamiento longitudinal sin empaque	24
7.1.2.1	Tubería de 2"	25
7.1.2.2	Tubería de 3"	27
7.1.2.3	Tubería de 4"	29
7.2	DESPLAZAMIENTO TRANSVERSAL	32
7.2.1	Desplazamiento transversal con empaque	32
7.2.1.1	Tubería de 2"	32
7.2.1.2	Tubería de 4"	34
7.2.2	Desplazamiento transversal sin empaque	37
7.2.2.1	Tubería de 2"	37
7.2.2.2	Tubería de 3"	39
7.2.2.3	Tubería de 4"	42
Capítulo 8	CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FUGA EN CONEXIONES DOMICILIARIAS	45
8.1	PROGRAMA ESTADÍSTICO DATAFIT	47
8.1.1	Características principales	47
8.1.2	Interfaz gráfica	50
8.2	DESPLAZAMIENTO LONGITUDINAL CON EMPAQUE	51
8.2.1	Tubería de 2"	52
8.2.2	Tubería de 4"	54
8.3	DESPLAZAMIENTO LONGITUDINAL SIN EMPAQUE	57
8.3.1	Tubería de 2"	57
8.3.2	Tubería de 3"	60
8.3.3	Tubería de 4"	62



8.4	DESPLAZAMIENTO TRANSVERSAL CON EMPAQUE	65
8.4.1	Tubería de 2"	65
8.4.2	Tubería de 4"	68
8.5	DESPLAZAMIENTO TRANSVERSAL SIN EMPAQUE	70
8.5.1	Tubería de 2"	71
8.5.2	Tubería de 3"	73
8.5.3	Tubería de 4"	76
Capítulo 9	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	79
9.1	Fallas en conexiones domiciliarias.....	79
9.2	Ecuaciones para los caudales de fuga.....	79
9.2.1	Desplazamiento longitudinal con empaque.....	80
9.2.2	Desplazamiento longitudinal sin empaque.....	81
9.2.3	Desplazamiento transversal con empaque	83
9.2.4	Desplazamiento transversal sin empaque.....	85
9.3	Magnitud de los caudales de fuga generados por las fallas.	86
Capítulo 10	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
10.1	Conclusiones relacionadas con el montaje y las mediciones experimentales....	88
10.2	Conclusiones relacionadas con los resultados de la calibración de parámetros de las ecuaciones de fuga.....	88
10.3	Recomendaciones	90
Capítulo 11	BIBLIOGRAFÍA	91
Capítulo 12	ANEXOS.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1: Detalle de un orificio en un embalse.....	4
Figura 4.2: Detalle de una falla en una tubería.....	7
Figura 5.1: Motobomba y sistema de distribución del circuito de pruebas.....	9
Figura 5.2: Válvulas y manómetros ubicados en la entrada de cada canal.....	9
Figura 5.3: Canal No. 2 para pruebas, condicionado con los sistemas de aquietamiento..	10
Figura 5.4: Sistema de purga para la evacuación del aire acumulado en la tubería fallada.	10
Figura 5.5: Vertedero triangular de 60° condicionado con su limnómetro.....	10
Figura 6.1: Falla en la acometida de una tubería de 3" de diámetro.....	12
Figura 7.1: Detalle del acople del collar de derivación con y sin empaque hermético.....	16
Figura 7.2: Montaje de las fallas evaluadas en conexiones domiciliarias.....	17
Figura 7.3: Esquema del desplazamiento del collar de derivación con respecto al orificio de la tubería.....	18
Figura 7.4: Fuga a través de un collar de derivación con empaque desplazado un 75 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 2"....	20
Figura 7.5: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación con empaque desplazado un 75 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 2".	21
Figura 7.6: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación con empaque desplazado un 75 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 2".	22
Figura 7.7: Fuga a través de un collar de derivación con empaque desplazado un 44 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 4"....	23
Figura 7.8: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación con empaque desplazado un 44 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 4".	23
Figura 7.9: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación con empaque desplazado un 44 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 4".	24
Figura 7.10: Fuga a través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 52 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 2"....	25
Figura 7.11: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 52 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 2".	26
Figura 7.12: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación sin empaque desplazado un 52 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 2".	27
Figura 7.13: Fuga a través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 26 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 3"....	28
Figura 7.14: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 26 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 3".	28
Figura 7.15: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación sin empaque desplazado un 26 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 3".	29
Figura 7.16: Fuga a través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 60 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 4"....	30

Figura 7.17: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 60 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 4".	31
Figura 7.18: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación sin empaque desplazado un 60 % del diámetro del orificio de la acometida de forma longitudinal para la tubería de 4".	31
Figura 7.19: Fuga a través de un collar de derivación con empaque desplazado un 100 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 2".	33
Figura 7.20: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación con empaque desplazado un 100 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 2".	33
Figura 7.21: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación con empaque desplazado un 100 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 2".	34
Figura 7.22: Fuga a través de un collar de derivación con empaque desplazado un 80 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 4".	35
Figura 7.23: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación con empaque desplazado un 80 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 4".	36
Figura 7.24: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación con empaque desplazado un 80 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 4".	36
Figura 7.25: Fuga a través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 36 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 2".	38
Figura 7.26: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 36 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 2".	38
Figura 7.27: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación sin empaque desplazado un 36 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 2".	39
Figura 7.28: Fuga a través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 52 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 3".	40
Figura 7.29: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 52 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 3".	41
Figura 7.30: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación sin empaque desplazado un 52 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 3".	41
Figura 7.31: Fuga a través de un collar de derivación sin empaque desplazado un 100 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 4".	42
Figura 7.32: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión través de un collar de derivación con empaque desplazado un 100 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 4".	43
Figura 7.33: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla de un collar de derivación sin empaque desplazado un 100 % del diámetro del orificio de la acometida de forma transversal para la tubería de 4".	44

Figura 8.1: Relación del área de fuga con la longitud de la falla	46
Figura 8.2: Ventana de menú del programa DataFit.....	50
Figura 8.3: Ventana de definición del modelo a utilizar del programa DataFit.	50
Figura 8.4: Resumen de los resultados del programa DataFit.....	50
Figura 8.5: Detalle de los resultados numéricos del programa DataFit.	50
Figura 8.6: Tabla de datos del programa DataFit.	51
Figura 8.7: Ventana de gráficas en 2D del programa DataFit.....	51
Figura 8.8: Ventana de gráficas en 3D del programa DataFit.	51
Figura 8.9: Dispersión de los residuos del programa DataFit	51
Figura 8.10: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación con empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 2" con diferentes relaciones de L/d.	52
Figura 8.11: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación con empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 2".	53
Figura 8.12: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación con empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 2".	54
Figura 8.13: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación con empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 4" con diferentes relaciones de L/d.	55
Figura 8.14: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación con empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 4".	56
Figura 8.15: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación con empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 4".	57
Figura 8.16: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 2" con diferentes relaciones de L/d.	58
Figura 8.17: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 2".	59
Figura 8.18: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 2".	60
Figura 8.19: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 3" con diferentes relaciones de L/d.	60
Figura 8.20: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 3".	61
Figura 8.21: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 3".	62
Figura 8.22: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 4" con diferentes relaciones de L/d.	63

Figura 8.23: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 4".	64
Figura 8.24: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente para la tubería de 4".	65
Figura 8.25: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación con empaque desplazado transversalmente para la tubería de 2" con diferentes relaciones de L/d.	66
Figura 8.26: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación con empaque desplazado transversalmente para la tubería de 2".	67
Figura 8.27: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación con empaque desplazado transversalmente para la tubería de 2".	68
Figura 8.28: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación con empaque desplazado transversalmente para la tubería de 4" con diferentes relaciones de L/d.	68
Figura 8.29: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación con empaque desplazado transversalmente para la tubería de 4".	69
Figura 8.30: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación con empaque desplazado transversalmente para la tubería de 4".	70
Figura 8.31: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 2" con diferentes relaciones de L/d.	71
Figura 8.32: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 2".	72
Figura 8.33: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 2".	73
Figura 8.34: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 3" con diferentes relaciones de L/d.	74
Figura 8.35: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 3".	75
Figura 8.36: Ajustes de los coeficientes c y e, y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 3".	76
Figura 8.37: Pruebas de caudales en función de la presión a través de un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 4" con diferentes relaciones de L/d.	76
Figura 8.38: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión y la relación L/d a través de un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 4".	77

Figura 8.39: Ajustes de los coeficientes c y e , y los exponentes a y b para una falla en un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente para la tubería de 4".	78
Figura 9.1: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión, la relación L/d y el diámetro de la tubería a través de un collar de derivación con empaque desplazado longitudinalmente.	81
Figura 9.2: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión, la relación L/d y el diámetro de la tubería a través de un collar de derivación sin empaque desplazado longitudinalmente.	83
Figura 9.3: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión, la relación L/d y el diámetro de la tubería a través de un collar de derivación con empaque desplazado transversalmente.	84
Figura 9.4: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión, la relación L/d y el diámetro de la tubería a través de un collar de derivación sin empaque desplazado transversalmente.	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6-1: Ecuaciones calibradas de los vertederos triangulares de 60°	11
Tabla 7-1: Fallas evaluadas en conexiones domiciliarias (desplazamiento longitudinal) .	17
Tabla 7-2: Fallas evaluadas en conexiones domiciliarias (desplazamiento transversal) ...	18
Tabla 7-3: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento longitudinal con empaque para una tubería de 2”	20
Tabla 7-4: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento longitudinal con empaque para una tubería de 4”	22
Tabla 7-5: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque para una tubería de 2”	25
Tabla 7-6: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque para una tubería de 3”	27
Tabla 7-7: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque para una tubería de 4”	30
Tabla 7-8: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento transversal con empaque para una tubería de 2”	32
Tabla 7-9: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento transversal con empaque para una tubería de 4”	35
Tabla 7-10: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento transversal sin empaque para una tubería de 2”	37
Tabla 7-11: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento transversal sin empaque para una tubería de 3”	40
Tabla 7-12: Resultados de la calibración en pruebas de desplazamiento transversal sin empaque para una tubería de 4”	42
Tabla 8-1: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento longitudinal con empaque para la tubería de 2”	52
Tabla 8-2: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento longitudinal con empaque para la tubería de 4”	55
Tabla 8-3: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque para la tubería de 2”	58
Tabla 8-4: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque para la tubería de 3”	61
Tabla 8-5: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque para la tubería de 4”	63
Tabla 8-6: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento transversal con empaque para la tubería de 2”	66
Tabla 8-7: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento transversal con empaque para la tubería de 4”	69
Tabla 8-8: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento transversal sin empaque para la tubería de 2”	71
Tabla 8-9: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento transversal sin empaque para la tubería de 3”	74
Tabla 8-10: Resultados de la calibración final de las pruebas de desplazamiento transversal sin empaque para la tubería de 4”	77
Tabla 9-1: Resultados de la calibración para las pruebas de desplazamiento longitudinal con empaque	80
Tabla 9-2: Resultados de la calibración para las pruebas de desplazamiento longitudinal sin empaque	82



Tabla 9-3: Resultados de la calibración para las pruebas de desplazamiento transversal con empaque	83
Tabla 9-4: Resultados de la calibración para las pruebas de desplazamiento transversal sin empaque	85



ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo 1: Esquema del montaje para pruebas de fuga
- Anexo 2: Calibración de vertederos triangulares de 60° para cada uno de los canales de pruebas
- Anexo 3: Calibración de las ecuaciones de fuga en conexiones domiciliarias con desplazamiento longitudinal con empaque
- Anexo 4: Calibración de las ecuaciones de fuga en conexiones domiciliarias con desplazamiento longitudinal sin empaque
- Anexo 5: Calibración de las ecuaciones de fuga en conexiones domiciliarias con desplazamiento transversal con empaque
- Anexo 6: Calibración de las ecuaciones de fuga en conexiones domiciliarias con desplazamiento transversal sin empaque