

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL



TESIS DE GRADO
DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE FUGAS
PARA FALLAS LONGITUDINALES Y EN CONEXIONES
DOMICILIARIAS EN TUBERÍAS DE PVC

PREPARADO POR:
ING. HUMBERTO FABIÁN AVILA RANGEL

ASESOR DE TESIS:
ING. JUAN GUILLERMO SALDARRIAGA

Bogotá, Febrero 11 de 2003

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.

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 relacionarse con alguna dimensión de la falla que pueda medirse en la práctica y con las características de la tubería o el accesorio dañado, o en dado caso de no poder medir un componente geométrico de la falla, 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 longitudinales en tuberías y fallas en collares de derivación para conexiones domiciliarias en tuberías plásticas de PVC de 2", 2,5", 3" y 4". Para el caso de fallas longitudinales en tuberías, se plantea una ecuación general que relaciona la longitud de la falla, el diámetro de la tubería y la presión en la red, de manera que pueda determinarse el caudal de fuga caracterizando la falla, y conociendo ciertas características geométricas de la falla y la tubería, adicionalmente a la presión. Para el caso de las fallas en conexiones domiciliarias, se presenta una ecuación para cada tipo de falla, teniendo en cuenta únicamente la característica de la falla.

Capítulo 2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de esta investigación es estudiar el comportamiento de las fugas en tuberías de agua potable sometidas a presión, con el objeto de tener un acercamiento real de los parámetros que expliquen el comportamiento hidráulico de distintos tipos de falla. Para el estudio de las fugas se utilizaron tuberías de plásticas de PVC. Sin embargo, se tiene como propósito general, proporcionar también las bases del procedimiento experimental y el análisis de resultados para ensayar a futuro en otras investigaciones, otros tipos de tuberías comerciales con distintos tipos de falla.

El alcance de esta investigación es determinar los parámetros y ecuaciones que logren explicar con una confiabilidad adecuada, el comportamiento hidráulico de fallas longitudinales reales en tuberías de PVC de 2", 2,5", 3" y 4" con una relación diámetro espesor (*RDE*) equivalente a 21. También se analizarán fallas típicas en conexiones domiciliarias, calibrando los parámetros que expliquen el comportamiento hidráulico medido experimentalmente.

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. Determinar los parámetros de la ecuación de fuga para ranuras longitudinales con geometría controlada. Es decir, con dimensiones específicas de ancho 1 mm y longitud variable. Estas fallas se realizan con el fin de obtener un primer acercamiento a las fallas longitudinales reales generadas con cierto grado de aleatoriedad.
3. Calibrar los parámetros de la ecuación de fuga (coeficiente de descarga y exponente), para cada uno de los resultados experimentales obtenidos con las fallas longitudinales reales realizadas en diámetros de 2", 2,5", 3" y 4", así como también para fallas en conexiones domiciliarias.
4. Determinar la tendencia de cada uno de los parámetros calibrados para las fallas longitudinales y su dependencia con las variables geométricas de la tubería (Diámetro y espesor) y la falla (longitud de la falla).
5. Deducir una ecuación general que explique el comportamiento hidráulico de las fallas longitudinales reales en tuberías plásticas de PVC de diámetros 2", 2,5", 3" y 4" y un *RDE* = 21, con un grado de ajuste confiable para todos los resultados obtenidos experimentalmente.

Capítulo 3 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 y 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 pueden presentar durante la instalación de otras redes de servicio público o remodelaciones urbanas, en las cuales ocurren golpes y ralladuras causadas 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 la cual existe una diferencia de presiones entre el interior y el exterior de la tubería.

3.1 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 3.1 en el punto 1 la presión atmosférica, sobre el punto 2, donde se encuentra el orificio, una altura de agua H y nuevamente la presión atmosférica.

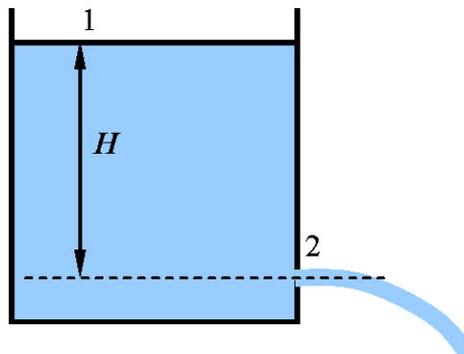


Figura 3.1: Detalle de un orificio en un embalse.

A partir de la Figura 3.1, al igualar las presiones en los puntos 1 y 2, se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \quad [3-1]$$

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 [3-1] queda expresada de la siguiente manera:

$$V_2 = \sqrt{2gH} \quad [3-2]$$

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:

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

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 [3-2] 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 [3-2] 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 .

$$c_v = \frac{V_r}{V_t} \quad [3-4]$$

donde,

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:

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

$$c_c = \frac{A_{ch}}{A_o} \quad [3-5]$$

donde,

c_c es el coeficiente de contracción

A_{ch} es el área del chorro, (L^2)

A_o es el área del orificio, (L^2)

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

$$c_d = c_c \cdot c_v \quad [3-6]$$

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

$$Q = c_d \cdot A \cdot \sqrt{2gH} \quad [3-7]$$

Expresando la ecuación [3-7] en otros términos, se tiene que:

$$Q = c_d \cdot A \cdot \sqrt{2gH}^{0,5} \quad [3-8]$$

Los valores para c_d se encuentran entre 0,6 y 0,8 dependiendo de las características del orificio [1].

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

Para el caso de fugas en tuberías sometidas a presión, la ecuación [3-7] 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 muchas 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:

$$c = c_d \cdot A \cdot \sqrt{2g} \quad [3-9]$$

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 3.2). Además, el exponente 0,5 presenta variaciones de acuerdo al tipo de falla, por lo tanto se generaliza como el término b .

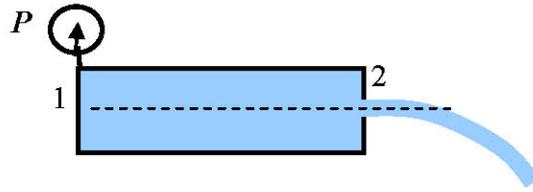


Figura 3.2: Detalle de una falla en una tubería.

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

$$Q = c \cdot P^b \quad [3-10]$$

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

Capítulo 4 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE DEL CIRCUITO PARA PRUEBAS

4.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Para la realización de las pruebas, se diseñó y construyó un montaje en el 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 aquieten 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 perdidas 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 4.1: Motobomba y sistema de distribución del circuito de pruebas.



Figura 4.2: Válvulas y manómetros ubicados en la entrada de cada canal.



Figura 4.3: Canal No. 2 para pruebas, condicionado con los sistemas de aquietamiento.



Figura 4.4: Sistema de purga para la evacuación del aire acumulado en la tubería fallada.



Figura 4.5: Vertedero triangular de 60° condicionado con su limnómetro.

Capítulo 5 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 describen a continuación:

5.1 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

5.1.1 CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS

Se calibraron cada uno de los vertederos de los cuatro canales aforándolos mediante una probeta graduada de 500 mL, un beaker 1000 mL y un cronómetro. Las ecuaciones calibradas para cada uno de los vertederos numerados del 1 al 4, son las siguientes:

Vertedero 1	$Q = 8.7 \times 10^{-6} h^{2.50}$
Vertedero 2	$Q = 7.99 \times 10^{-6} h^{2.50}$
Vertedero 3	$Q = 4.49 \times 10^{-6} h^{2.67}$
Vertedero 4	$Q = 8.88 \times 10^{-6} h^{2.40}$

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 para cada uno de los vertederos.

5.1.2 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, manipuleo, 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 tubería o en el accesorio. 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.

Inicialmente se experimentaron fallas con geometría controlada y combinada en tuberías, con el fin de determinar una tendencia entre cada una de ellas. Luego se ensayó la falla longitudinal real aleatoria en tuberías de 2", 2.5", 3" y 4" con una relación diámetro espesor (*RDE*) de 21, para compararlas con las fallas de geometría controlada y determinar una tendencia relacionada con los diámetros. Finalmente, se experimentaron fallas en roscas y conexiones domiciliarias relacionadas con el empaque de los collares de derivación.

En cuanto a las fallas longitudinales reales aleatorias, se contaron con ciertos inconvenientes relacionados con su generación y con la capacidad de la motobomba. Debido a que las fallas fueron aleatorias, hubo necesidad de experimentar varios métodos para lograr obtener uno que las produjera de manera similar en las distintas tuberías ensayadas, para tener un alto grado de confiabilidad en la comparación. De igual manera, debido a que la capacidad de la motobomba del circuito de pruebas es de 56.33 m de presión de agua, la longitud máxima ensayada fue de 30 cm, puesto que al generar una falla de dimensiones mayores, se producía una pérdida de presión mayor de 56.33 m, imposibilitando las mediciones. En la Figura 5.1 se ilustra una falla longitudinal real realizada en una tubería de 3" de diámetro y *RDE* = 21.



Figura 5.1: Falla longitudinal real realizada en una tubería de 3" de diámetro.

5.1.3 EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS

5.1.3.1 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 una de las duplas presión – caudal equivale a un punto experimental en la curva de gasto en función de la presión.

Una vez fallada la tubería o el accesorio, se acopla al sistema de alimentación de cada canal, asegurando una total hermeticidad en la rosca y manteniendo abierta 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 la tubería o 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 realizarán 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 es 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 se 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 maniobrando 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.

5.2 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 ([5-1]).

$$Q = cP^b \quad [5-1]$$

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 exponentes de la ecuación de fuga, la cual está relacionada con el tipo de falla.

Para el caso de las fallas longitudinales reales, no es posible determinar experimentalmente las variables que determinan el coeficiente c_1 . Por lo cual se determina solo con el coeficiente global de descarga en función de las variables geométricas de la tubería y de la falla.

Para determinar los parámetros de la ecuación [5-1], 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.

Capítulo 6 FALLAS CON GEOMETRÍA CONTROLADA

Inicialmente se ensayaron las fallas con geometría definida con el fin de comprobar el comportamiento hidráulico del modelo de pruebas, mediante el análisis de fallas de orificio circular, a los cuales se les conoce su geometría y su coeficiente de descarga. También se analizaron fallas longitudinales con un ancho controlado de 1.0 mm para establecer las tendencias que presentan y obtener una primera aproximación al comportamiento de las fallas longitudinales reales para su posterior análisis, que es el objetivo principal de esta investigación.

Las ranuras tienen la característica de poseer un espesor inicial de 1.0 mm dado por el instrumento con el cual se realizó (segueta). La ventaja de realizar ensayos en fallas con geometría definida y controlada, es la posibilidad de determinar el área directamente y así permitir un análisis completo del valor del coeficiente de descarga c . En la Tabla 6-1 se muestran los tipos de falla ensayados.

Tabla 6-1: Fallas ensayadas con geometría definida		
Tipo de falla	Longitud característica	Magnitud (mm)
Orificio	Diámetro	5,0
Orificio	Diámetro	7,7
Ranura longitudinal de 1 mm de ancho	Longitud	1,2
Ranura longitudinal de 1 mm de ancho	Longitud	3,7
Ranura longitudinal de 1 mm de ancho	Longitud	6,0

6.1 Orificios

Se ensayaron orificios de diámetro 5,0 mm y 7,70 mm en tuberías de 3" de diámetro. El valor mínimo de 5,0 mm de diámetro se tomó bajo el criterio de que en situaciones reales, este sería la mínima dimensión aplicable, pues por lo general las fallas de orificios se generan por impactos de picas o impactos por caídas durante la instalación. El valor máximo de 7,70 mm fue limitado por la capacidad de la motobomba. El análisis de las fugas en orificios circulares, se realizó con el objeto de calibrar y comprobar el buen funcionamiento del montaje. Esto se obtiene determinando los coeficientes experimentales de descarga c y comparándolos con los coeficientes teóricos. En la Figura 6.1 se muestra la curva de ajuste y el resultado de la calibración con los parámetros de la ecuación de fuga para un orificio de 5,0 mm y en la Figura 6.2 la curva para un orificio de 7,70 mm. En el Anexo 3 se muestran los resultados de la generales de la calibración.

El coeficiente de descarga experimental para cada orificio, se determina calibrando el coeficiente global de descarga, el cual contiene implícito el área del orificio, la raíz cuadrada de dos veces la aceleración de la gravedad y el coeficiente de descarga, el cual se despeja finalmente. El coeficiente global de descarga se calibra manteniendo el exponente teórico de 0,50. Los resultados de la calibración se muestran en la Tabla 6-1.

Tabla 6-2: Resultados de la calibración de la ecuación de fugas para orificios

Diámetro del orificio (mm)	Ecuación calibrada	R ²
5,0	$Q = 52 \cdot P^{0.50}$	0,986
7,70	$Q = 146,6 \cdot P^{0.50}$	0,984

Los parámetros de las ecuaciones determinadas de las figuras anteriores tienen características similares a los parámetros de la ecuación teórica, así como también la forma de la curva.

Los coeficientes 52 para el orificio de 5,0 mm de diámetro y 146,6 para el orificio de 7,70 mm de diámetro, se comparan con los coeficientes calculados teóricamente mediante la expresión $c = c_1 \cdot A \cdot \sqrt{2g}$. Teóricamente, el coeficiente de descarga (c_1) se encuentra en un rango entre 0,6 y 0,8, [3].

Para el orificio de diámetro 5,0 mm se tiene que el área es equivalente a $A = \pi \cdot \left(\frac{0.005}{2}\right)^2 = 1.96 \times 10^{-5} m^2$. Al despejar el coeficiente de descarga, manteniendo las unidades de longitud en metros y de tiempo en segundos y multiplicando por un factor de convención de mL a m³, se tiene:

$$c_1 = \frac{52}{1.96 \times 10^{-5} (\sqrt{2g})} \cdot \frac{1}{1.000.000} = 0.60$$

De igual manera Para el orificio de diámetro 7,70 mm se tiene que el área es equivalente a $A = \pi \cdot \left(\frac{0.0077}{2}\right)^2 = 4.65 \times 10^{-5} m^2$. Al despejar el coeficiente de descarga, manteniendo las unidades de longitud en metros y de tiempo en segundos y multiplicando por un factor de convención de mL a m³, se tiene:

$$c_1 = \frac{146.6}{4.65 \times 10^{-5} (\sqrt{2g})} \cdot \frac{1}{1.000.000} = 0.71$$

De los resultados anteriores, se aprecia que los coeficientes de descarga están en el rango de valores teóricos, teniendo en cuenta las áreas medidas en laboratorio. Adicionalmente, el ajuste de las curvas calibradas refleja la consistencia de los datos experimentales tomados para distintas presiones.

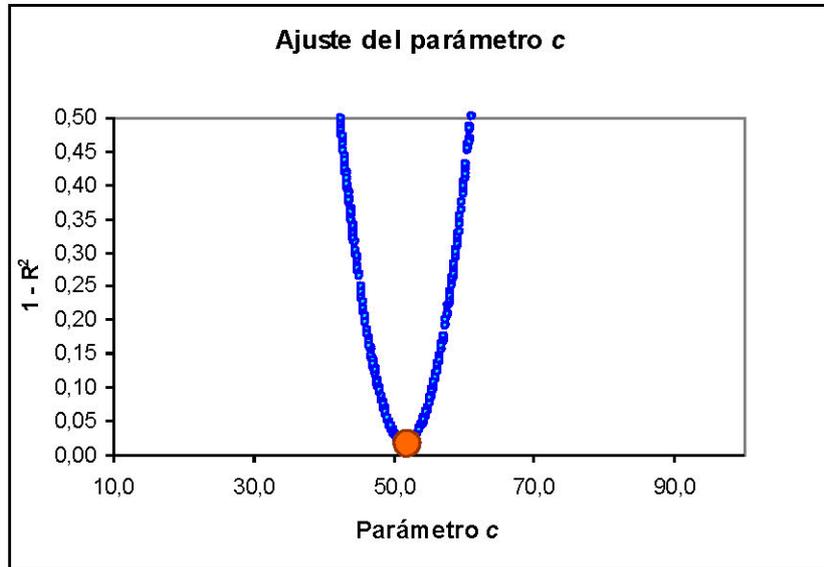
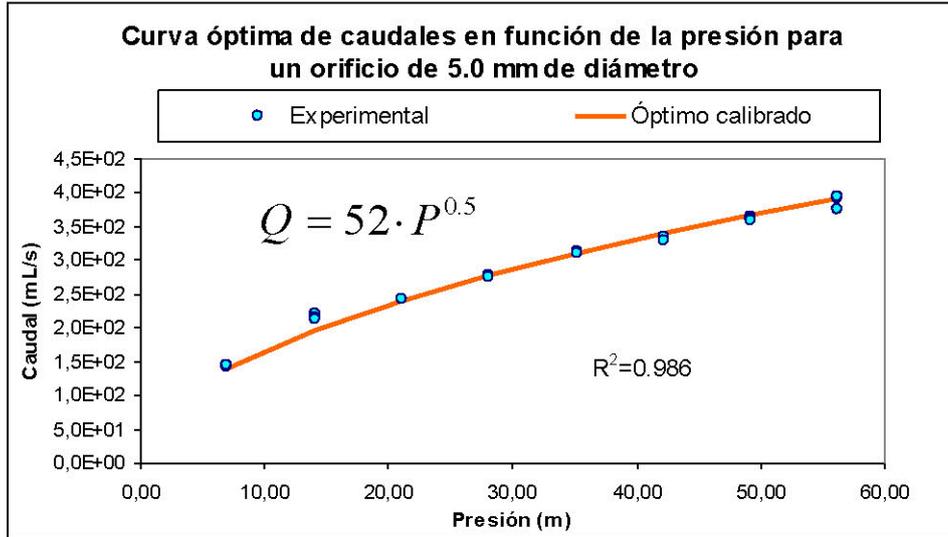


Figura 6.1: Ajuste entre puntos experimentales y teóricos para una tubería de 3" de diámetro con una falla en orificio de 5,0 mm (Arriba). Ajuste del R² del coeficiente (Abajo)

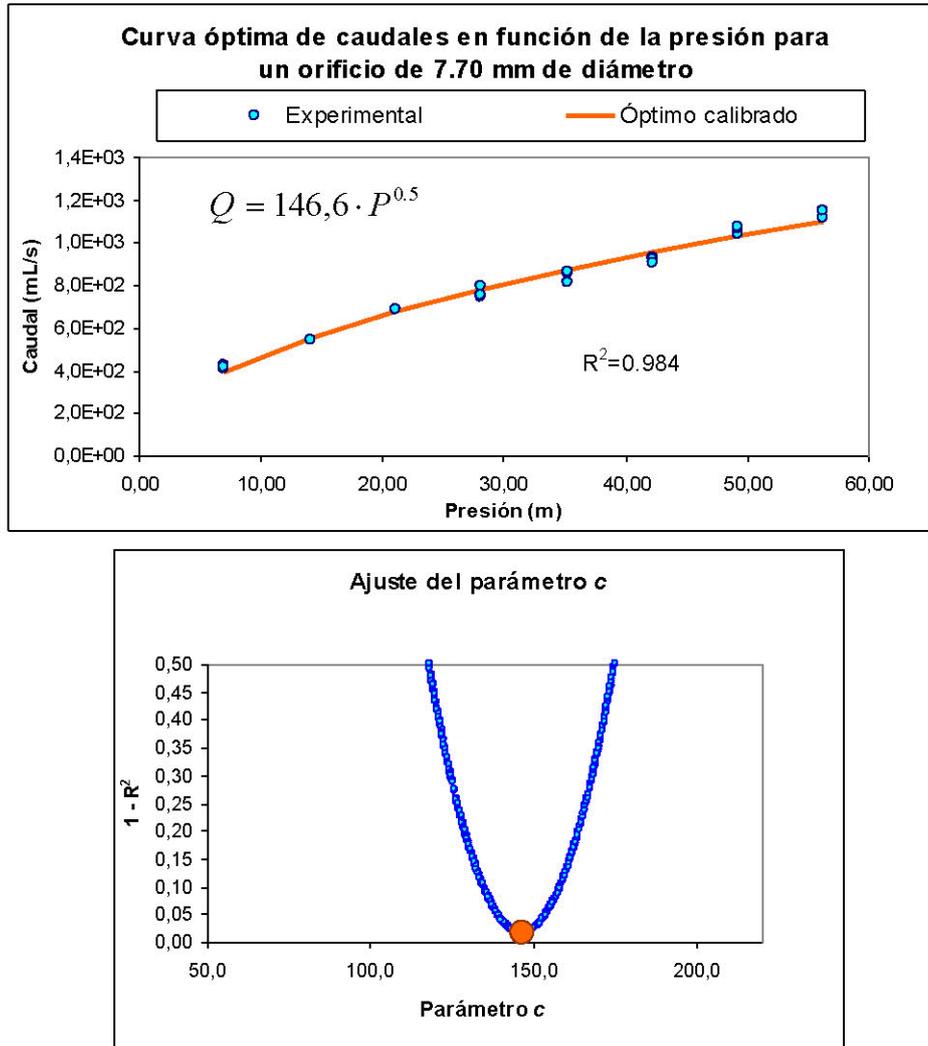


Figura 6.2: Ajuste entre puntos experimentales y teóricos para una tubería de 3" de diámetro con una falla en orificio de 7,70 mm (Arriba). Ajuste del R^2 del coeficiente (Abajo).

Se concluye entonces, que el montaje hidráulico tiene un buen comportamiento y garantiza la veracidad de los datos experimentales para cualquier tipo de falla que se quiera ensayar.

6.2 Ranuras

Se ensayaron ranuras de 1,225 cm, 3,72 cm y 6,0 cm en tuberías de 3" de diámetro. Las ranuras de más de 6,0 cm de longitud no arrojaron resultados satisfactorios debido a que la capacidad de motobomba no permitía aportar presiones suficientes para obtener resultados concluyentes. Sin embargo, se tiene un rango mínimo, medio y máximo que permite obtener una buena aproximación de la tendencia general de los parámetros de la ecuación de fugas para ranuras longitudinales con dimensiones controladas.

El primer caso ensayado, correspondiente a la ranura de 1,225 cm, en el cual se observa una tendencia similar a la obtenida en los ensayos con orificios, teniendo para la ranura un coeficiente $c = 26,90$ y exponente $b = 0.480$ con un ajuste $R^2 = 0.976$.

Tabla 6-3: Ecuación calibrada para una ranura de 1,225 cm de longitud y 1,0 mm de ancho	
Ranura (mm)	Ecuación
12,25	$Q = 26,90 \cdot P^{0.480}$

Esta tendencia similar en el exponente puede atribuirse al hecho de que la relación entre la longitud y el espesor de la falla no alcanza a describir totalmente una falla longitudinal. En la Figura 6.3 se ilustra la curva óptima de ajuste de los datos experimentales de caudales en función de la presión para una ranura longitudinal de 1,225 cm de largo y 1,0 mm de ancho. De igual manera, se muestra en la Figura 6.4 los ajustes y la sensibilidad de los parámetros c y b de la ecuación mostrada en la Tabla 6-3.

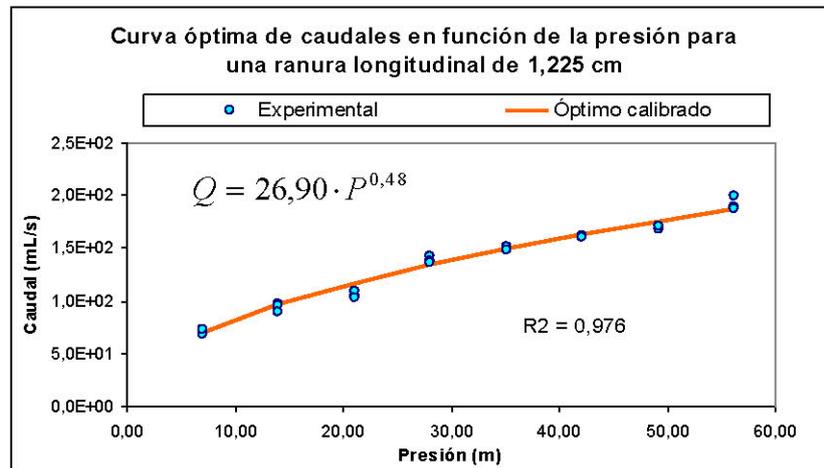


Figura 6.3: Ajuste entre puntos experimentales y teóricos para una tubería de 3" de diámetro con una falla longitudinal de 1,225 cm y ancho 1 mm.

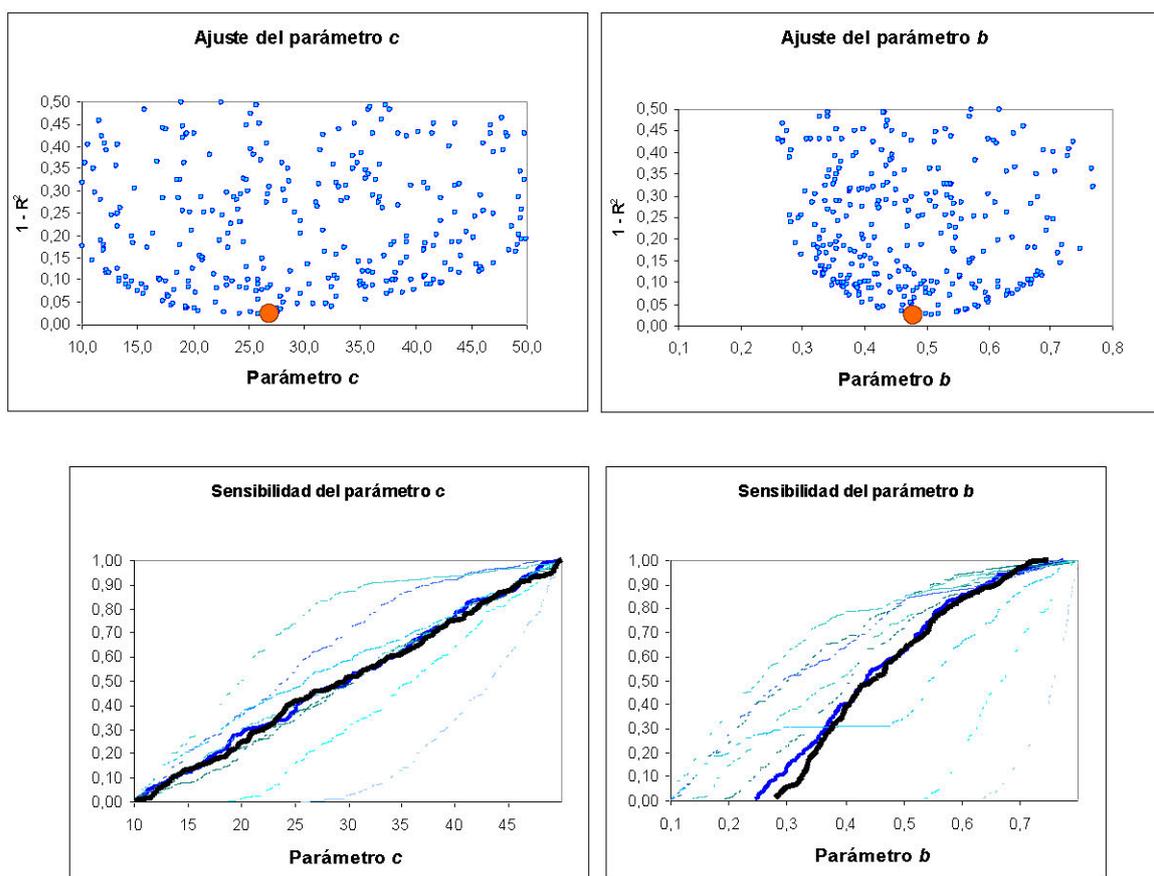


Figura 6.4: Ajuste 1-R2 para los parámetros c y b (Arriba). Sensibilidad de los parámetros c y b (Abajo). Para una ranura de 3,72 cm de longitud y 1 mm de ancho.

Los resultados para la ranura de 3,72 cm empiezan a evidenciar un incremento del valor del exponente b , que alcanza un valor de 0.64, mostrando una tendencia creciente de ese término. Se obtiene para este caso un coeficiente de descarga $c = 52,92$ con un ajuste $R^2 = 0.998$. En la Figura 6.5 se ilustra la tendencia de la curva de gasto de la falla. También se muestran en la Figura 6.6 los resultados de ajuste y sensibilidad de los parámetros c y b .

Tabla 6-4: Ecuación calibrada para una ranura de 3,72 cm de longitud y 1,0 mm de ancho	
Ranura (mm)	Ecuación
37,20	$Q = 52,92 \cdot P^{0,64}$

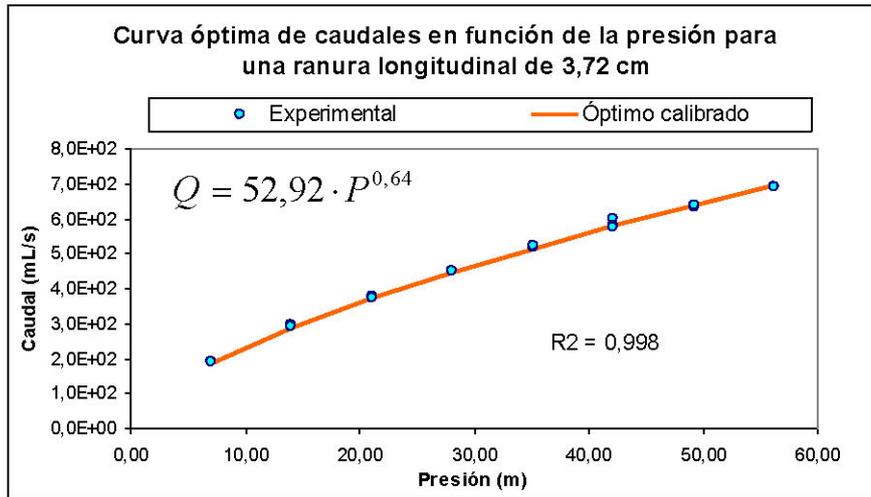


Figura 6.5: Ajuste entre puntos experimentales y teóricos para una tubería de 3" de diámetro con una falla longitudinal de 3,72 cm y 1 mm de ancho.

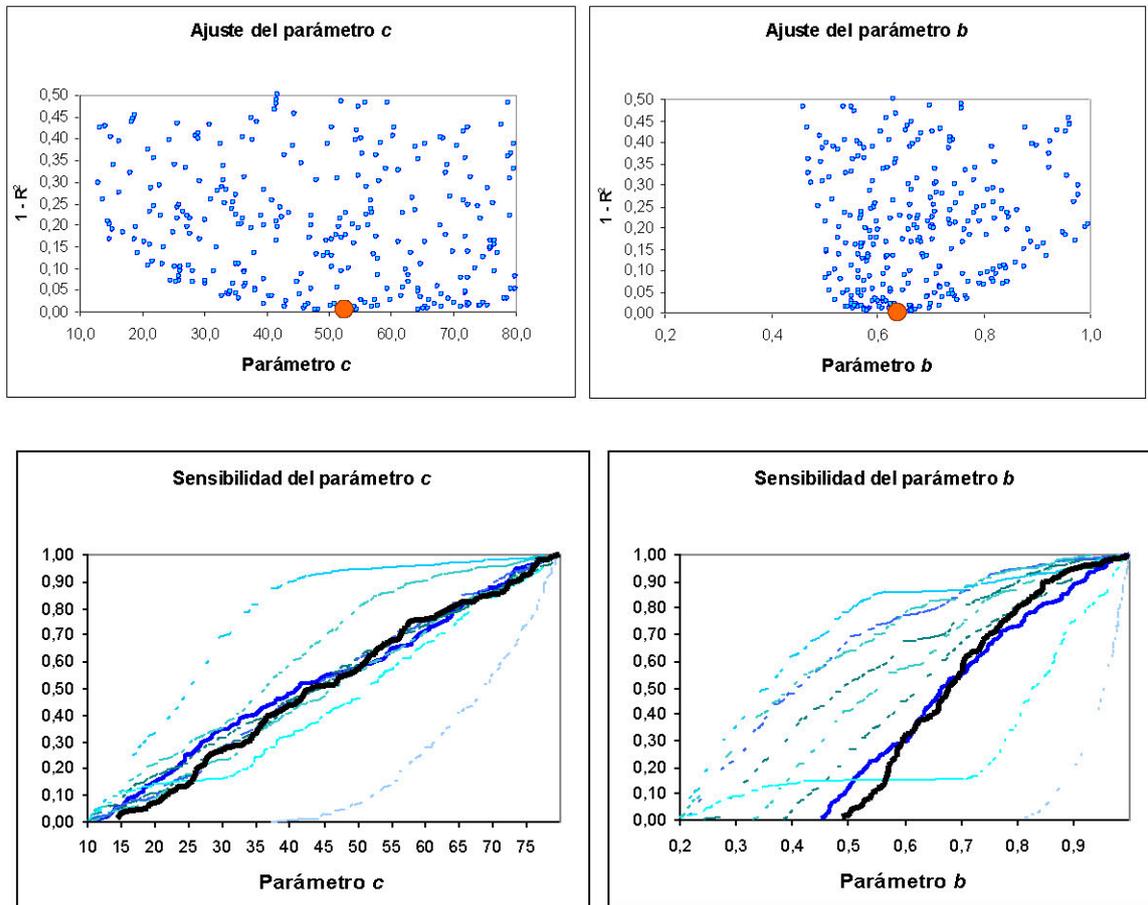


Figura 6.6: Ajuste 1-R2 para los parámetros *c* y *b* (Arriba). Sensibilidad de los parámetros *c* y *b* (Abajo). Para una ranura de longitud 3,72 cm de largo y 1 mm de ancho.

Para la ranura de 6,0 cm se confirma la tendencia del incremento del valor del exponente *b*. Este término se incrementa a $b = 0.755$, mostrando claramente una

dependencia directa con la longitud de la falla. Se determinó un coeficiente de descarga $c = 82,82$ con un ajuste $R^2 = 0,996$. En la Figura 6.7 se observa la curva de ajuste para una ranura de 6,00 cm. De igual manera se muestra en la Figura 6.8 los resultados del ajuste y la sensibilidad de los parámetros c y b .

Tabla 6-5: Ecuación calibrada para una ranura de 6,0 cm de longitud y 1,0 mm de ancho	
Ranura (mm)	Ecuación
60,0	$Q = 82,82 \cdot P^{0,758}$

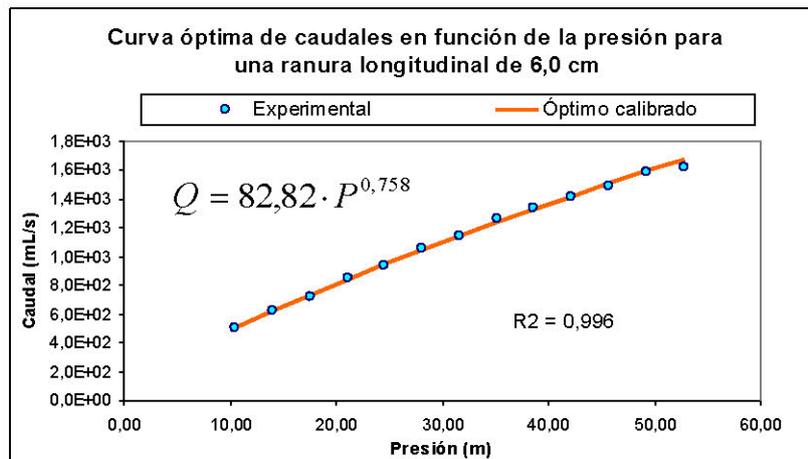


Figura 6.7: Ajuste entre puntos experimentales y teóricos para una tubería de 3" de diámetro con una falla longitudinal de 6,0 cm y 1 mm de ancho.

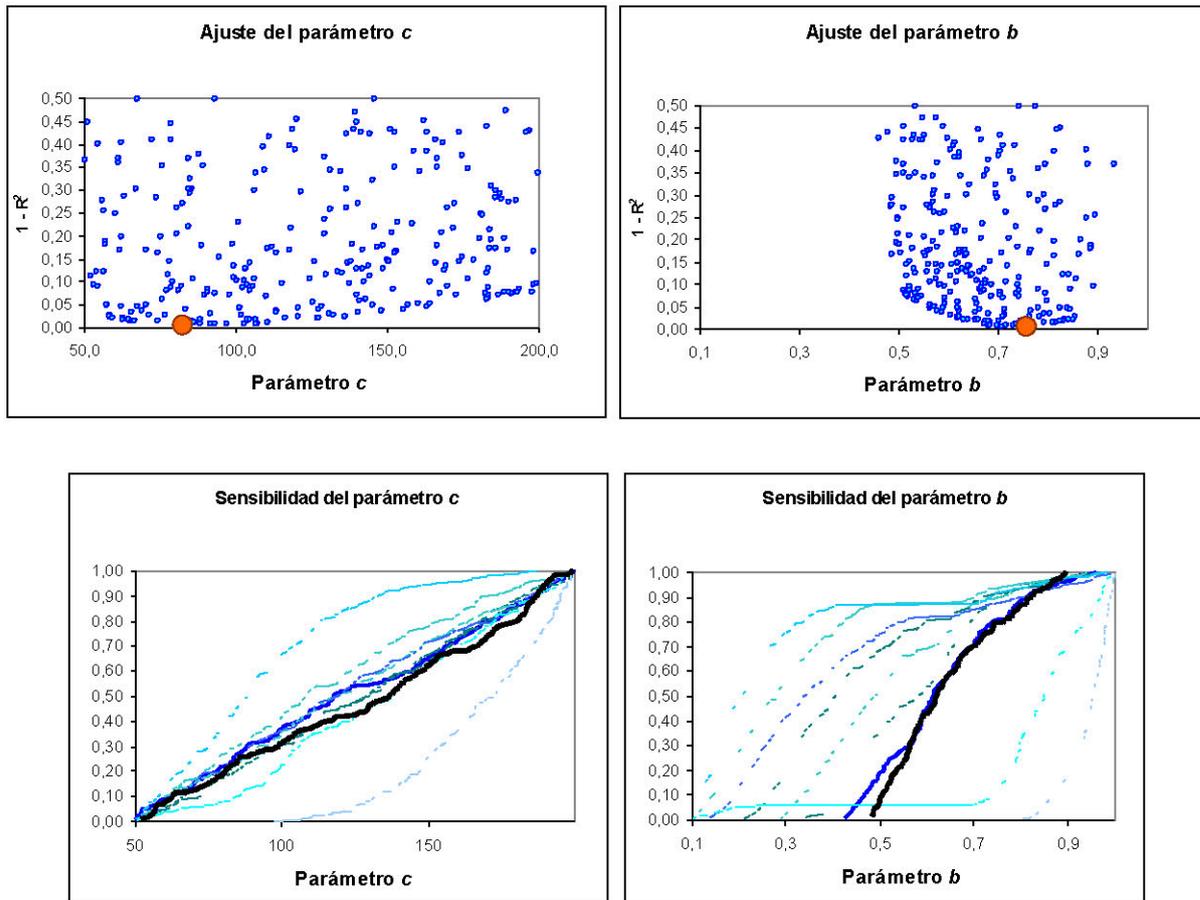


Figura 6.8: Ajuste $1-R^2$ para los parámetros c y b (Arriba). Sensibilidad de los parámetros c y b (Abajo). Para una ranura de longitud 6,0 cm de largo y 1 mm de ancho.

En la Tabla 6-6 se resumen los resultados obtenidos para las tres ranuras ensayadas.

Tabla 6-6: Resultados de la calibración de ranuras longitudinales con dimensiones controladas. (Ancho de 1,0 mm).					
Longitud (mm)	Ecuación	Área (mm ²)	c	b	R^2
12,25	$Q = 26,90 \cdot P^{0,480}$	12,25	26,90	0,480	0.976
37,20	$Q = 52,92 \cdot P^{0,64}$	37,20	52,92	0,640	0.998
60,00	$Q = 82,82 \cdot P^{0,758}$	60,00	82,82	0,758	0.996

Como se mencionó anteriormente, en las ecuaciones se observa un incremento en el exponente b , resultando una dependencia directa de este término con la longitud de la falla con un alto grado de sensibilidad. La falla, al poseer una longitud mayor, tiene la tendencia a expandirse a medida que la presión aumenta. Es decir, la forma de la falla tiende a variar en función de la presión y por ende el exponente.

Por otro lado, el coeficiente global de descarga aunque se aprecie una tendencia creciente dependiente del área de la falla, posee una baja sensibilidad en la calibración, a pesar de encontrarse un valor óptimo que represente el comportamiento hidráulico de la falla. Por lo tanto, se requiere analizar en mayor detalle los coeficientes encontrados para las fallas longitudinales reales.

Estos resultados confirman la necesidad de analizar las fallas longitudinales reales, para las cuales se espera un comportamiento similar, pero con mayores rangos de variación en los valores de los exponentes y coeficientes globales de descarga, debido a que en las fallas reales, al no perder material de la tubería, existe un claro fenómeno de expansión del ancho de la falla en función de la presión, la rigidez de la tubería, el diámetro o espesor y la longitud de la falla, lo cual le modifica la forma y las dimensiones continuamente. Los resultados de la calibración se muestran en el Anexo 4.

Capítulo 7 FALLAS LONGITUDINALES REALES

Las fallas longitudinales reales se realizaron en tuberías de PVC para agua potable de 2", 2.5", 3" y 4" de diámetro, con relación diámetro – espesor $RDE^2 = 21$. En la Tabla 7-1 se muestran las características de las tuberías ensayadas.

Diámetro (mm / pulgadas)	RDE	Espesor de pared (mm)
50.8 (2)	21	2.42
63.5 (2.5)	21	3.02
76.2 (3)	21	3.63
101.6 (4)	21	4.84

La longitud máxima ensayada en las tuberías fue de 0.23 m. Esta longitud está limitada por la capacidad de la motobomba del circuito de pruebas, debido a que al ensayar longitudes mayores, la pérdida de presión generada era superior a la altura dinámica disponible de la bomba. En la Figura 7.1 se observa la fuga generada por una falla longitudinal real de 23 cm de largo. En la Figura 7.2 se muestra la ejecución de una prueba para una falla longitudinal de 15,0 cm en una tubería de 3" de diámetro.

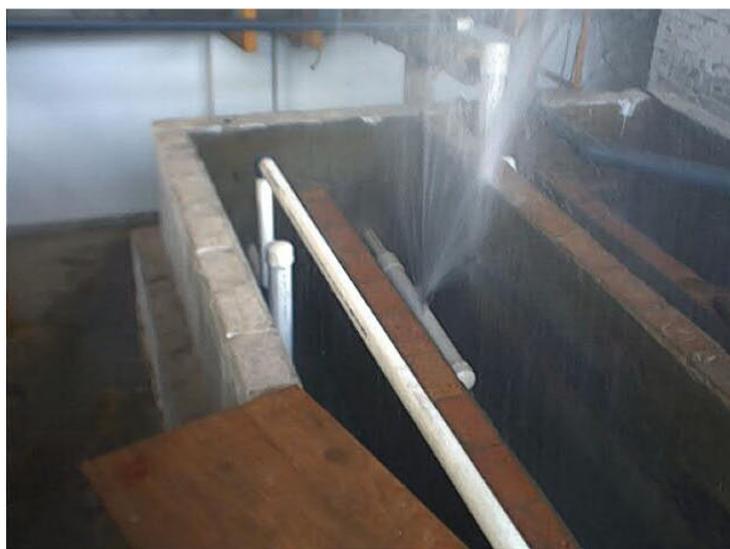


Figura 7.1: Fuga generada por una falla de 23,0 cm de longitud sometida a una presión de 8,1 m de cabeza de agua.

² RDE corresponde a la relación entre el diámetro y el espesor. $RDE = \text{Diámetro/espesor}$.



Figura 7.2: Ejecución de la prueba para una ranura real de 15.0 cm de longitud en una tubería de 3" de diámetro.

Cada prueba consiste en la determinación de una curva de caudal en función de la presión para ranuras reales de distintas longitudes realizada en cada diámetro en estudio. Teniendo los resultados experimentales, se realiza la calibración, utilizando la metodología de simulación de Monte-Carlo, teniendo el siguiente procedimiento de calibración:

1. *Calibración tipo I:* Determinación del coeficiente c y el exponente b de la ecuación [5-1] para todas las pruebas realizadas.
2. *Calibración tipo II:* Determinación de un coeficiente c y un exponente b global en función de la longitud de la falla para los resultados obtenidos en la calibración tipo I. Luego se determina una función adimensional para el exponente b . Nuevamente se calibrará el coeficiente c en función de la longitud de la ranura con la expresión adimensional encontrada para el exponente b .
3. *Calibración tipo III:* Determinación del coeficiente c manteniendo el exponente b con los criterios 2 y 3 obtenidos a partir de los resultados en la calibración tipo II.
4. *Calibración tipo IV:* Determinación de una ecuación para el coeficiente de descarga en función de la longitud de la falla para cada uno de los diámetros. Este análisis parte de la variación encontrada en los coeficientes de descarga para cada longitud de la falla.
5. *Calibración tipo V:* Determinación de una ecuación para el coeficiente en función del diámetro de la tubería. Esta última etapa de calibración parte de la variación existente de los coeficientes en función del diámetro.

7.1.1 Calibración tipo I

La calibración tipo I consiste en la determinación del coeficiente c y el exponente b para cada longitud de la falla ensayada en cada diámetro.

Este tipo de calibración da total libertad a los parámetros para obtener el mejor ajuste entre los datos experimentales y la ecuación calibrada. Esta primera aproximación

permite observar la tendencia de los parámetros c y b en función del diámetro de la tubería y de la longitud de la falla ensayada. Se puede observar en la Tabla 7-2 que el parámetro c tiende a aumentar proporcionalmente con la longitud de la falla, sin embargo se aprecia también una disminución de la magnitud del coeficiente c a medida que el diámetro aumenta. El exponente b tiene también una tendencia a incrementar en función de la longitud de la falla.

Tabla 7-2: Resultados de la calibración en pruebas de fallas longitudinales reales			
Diámetro (mm)	Longitud de la falla (mm)	Ecuación	R ²
50.8	50	$Q = 11.50 \cdot P^{1.49}$	0.995
50.8	70	$Q = 17.0 \cdot P^{1.55}$	0.999
50.8	90	$Q = 22.26 \cdot P^{1.60}$	0.999
50.8	100	$Q = 27.73 \cdot P^{1.70}$	0.999
50.8	130	$Q = 61.06 \cdot P^{1.67}$	0.998
50.8	160	$Q = 65.48 \cdot P^{1.86}$	0.999
50.8	167	$Q = 59.65 \cdot P^{1.94}$	0.999
63.5	60	$Q = 10.57 \cdot P^{1.40}$	0.998
63.5	90	$Q = 24.34 \cdot P^{1.43}$	0.998
63.5	120	$Q = 30.46 \cdot P^{1.71}$	0.998
63.5	150	$Q = 37.16 \cdot P^{1.82}$	0.998
76.2	80	$Q = 16.12 \cdot P^{1.56}$	0.997
76.2	110	$Q = 32.27 \cdot P^{1.59}$	0.999
76.2	150	$Q = 49.26 \cdot P^{1.79}$	0.999
76.2	221	$Q = 90.66 \cdot P^{1.93}$	0.998
76.2	230	$Q = 86.80 \cdot P^{2.01}$	0.999
101.6	60	$Q = 1.86 \cdot P^{1.88}$	0.997
101.6	90	$Q = 11.55 \cdot P^{1.65}$	0.999
101.6	131	$Q = 35.78 \cdot P^{1.62}$	0.999
101.6	170	$Q = 49.26 \cdot P^{1.79}$	0.997

Se puede observar en la Tabla 7-2 el alto grado de ajuste obtenido para cada una de las pruebas, con R² entre 0,995 y 0,999, lo cual brinda confiabilidad en los resultados experimentales obtenidos en los ensayos. En la Figura 7.3 se muestran agrupados los coeficientes globales de descarga para cada uno de los diámetros y longitudes de falla ensayadas. De igual manera se muestra para los exponentes en la Figura 7.4. En el Anexo 5 se ilustran los resultados generales obtenidos en la calibración.

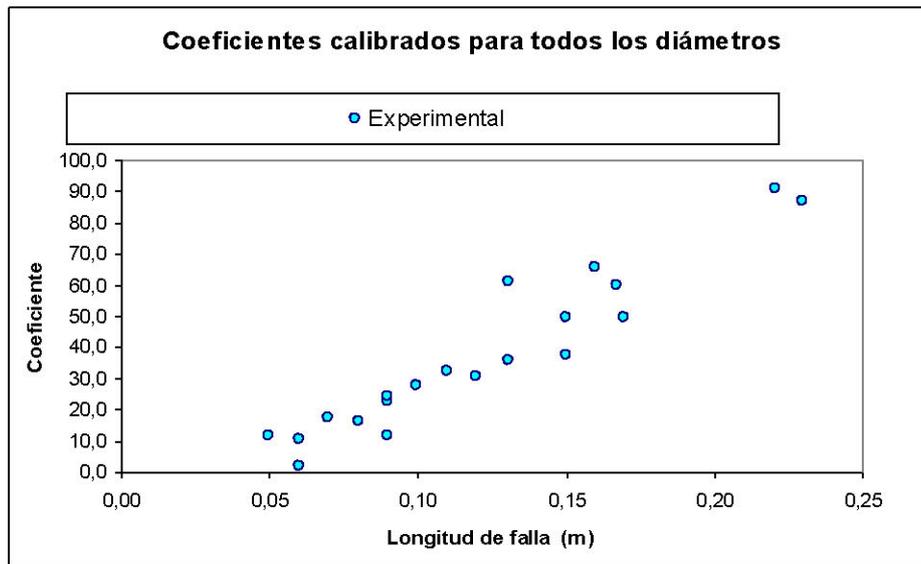


Figura 7.3: Coeficientes calibrados para todos los diámetros y longitudes de falla ensayados.

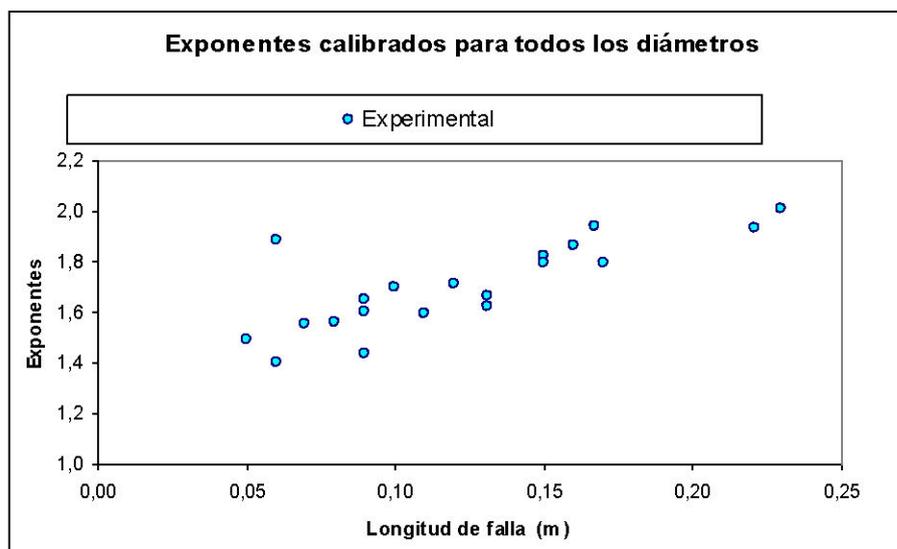


Figura 7.4: Exponentes calibrados para todos los diámetros y longitudes de falla ensayados.

En Figura 7.3 se observa una tendencia creciente de la magnitud del coeficiente c en función de la longitud de la falla. Sin embargo, existe también una dependencia de la magnitud del coeficiente global de descarga con el diámetro o el espesor, como se observa en la Tabla 7-2.

En la Figura 7.4 se aprecia también una tendencia creciente de los valores del exponente b en función de la longitud de la falla. Esta observación, permite suponer que existe una relación directa del exponente de la ecuación con respecto a la longitud de la ranura. Sin embargo, aunque esta relación exista, teóricamente el exponente de la ecuación de fugas debe ser adimensional. Entonces, es necesario determinar una ecuación adimensional que logre representar los resultados obtenidos para el exponente b . En la calibración tipo II se analizan estos casos.

7.1.2 Calibración tipo II

La calibración tipo II consiste en la determinación de una ecuación que represente el coeficiente de descarga c en función de la longitud de la falla, así como también para el exponente b agrupando todos los parámetros calculados para todos los diámetros. Además, en esta calibración se busca una expresión adimensional que permita calcular el exponente b , para ajustar los parámetros con los fundamentos teóricos.

La calibración del coeficiente global de descarga se rige por la ecuación [7-1] para determinar los parámetros m y n .

$$c = m \cdot L^n \quad [7-1]$$

En la calibración del coeficiente c en función de la longitud de la falla, agrupando todos los coeficientes calculados para todos los diámetros, se obtuvo la siguiente ecuación:

$$c = 875 \cdot L^{1.53} \quad [7-2]$$

donde,

c es el coeficiente global de descarga.

L es la longitud de la falla, (m).

En la Figura 7.5 se muestra el ajuste de la curva de calibración. En el Anexo 6 se presentan los resultados de la calibración.

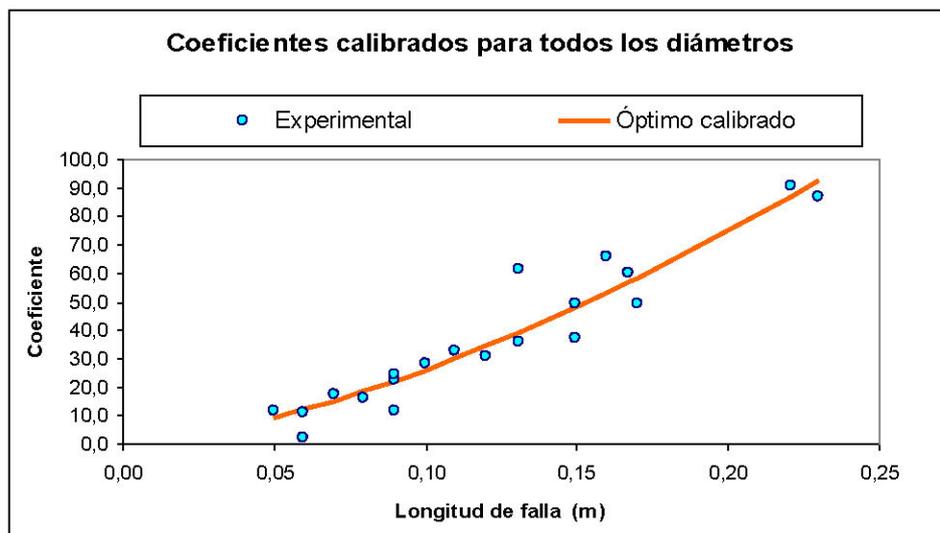


Figura 7.5: Ajuste de la curva de ajuste para los coeficientes globales de descarga en función de la longitud de la falla para todos los diámetros.

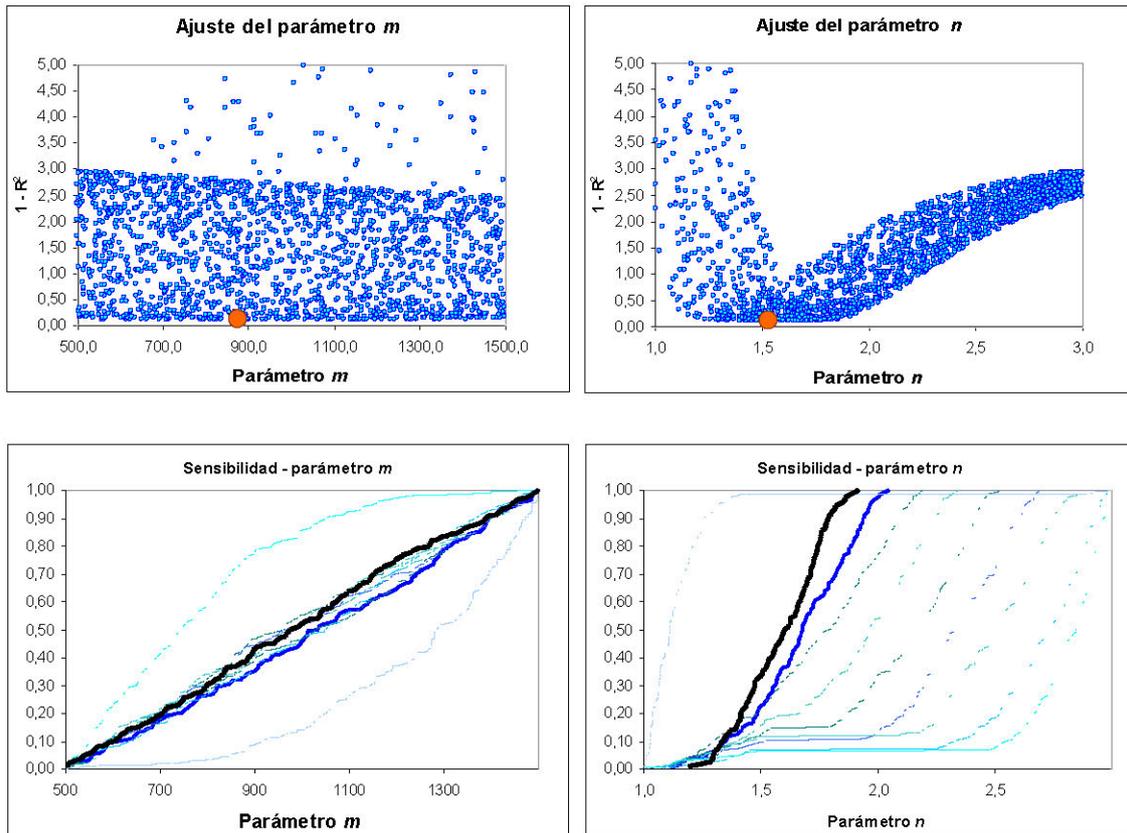


Figura 7.6: Ajuste 1-R2 para los parámetros m y n de la ecuación [7-1](Arriba). Sensibilidad de los parámetros m y n (Abajo). Para la determinación de una función para el parámetro c .

En la Figura 7.5 se muestra la curva de coeficientes ajustada a los coeficientes calibrados para las pruebas individuales por longitud de la falla y por diámetro. En esta figura se observa una gran dispersión de los puntos experimentales con respecto a la curva calibrada. Esto se debe a que no se tuvo en cuenta en la calibración, el efecto que tiene el diámetro en la ecuación del coeficiente de descarga, o más bien, el efecto que tiene el espesor de la tubería, que al aumentar proporcionalmente con el diámetro (por tener constante el $RDE = 21$), aumenta también la rigidez de la tubería, evitando que el espesor de la ranura longitudinal se expanda con facilidad al aumentar la presión, impidiendo así el paso de un caudal mayor.

En la Figura 7.6 se ilustra el ajuste de los parámetros m y n , donde se observa una clara insensibilidad paramétrica del término m y una buena sensibilidad del exponente n . Sin embargo, el parámetro m debe mantenerse en el óptimo encontrado para obtener los valores de c determinados anteriormente, pues el orden de magnitud que posee este término imprime un efecto significativo sobre el cálculo de los coeficientes de descarga.

Por otro lado, para el exponente b , agrupando los resultados obtenidos para todos los diámetros, se calibró la siguiente ecuación:

$$b = a \cdot L^j \quad [7-3]$$

De la cual se obtuvo la siguiente ecuación en función de la longitud de la falla:

$$b = 2.53 \cdot L^{0.18}$$

[7-4]

donde,

b es el exponente de la falla.

L es la longitud de la falla, (m).

En la Figura 7.7 se observa la curva de ajuste para el exponente b en función de la longitud de la falla, donde los parámetros a y j poseen una alta sensibilidad. En el Anexo 7 se muestran los resultados completos de la calibración.

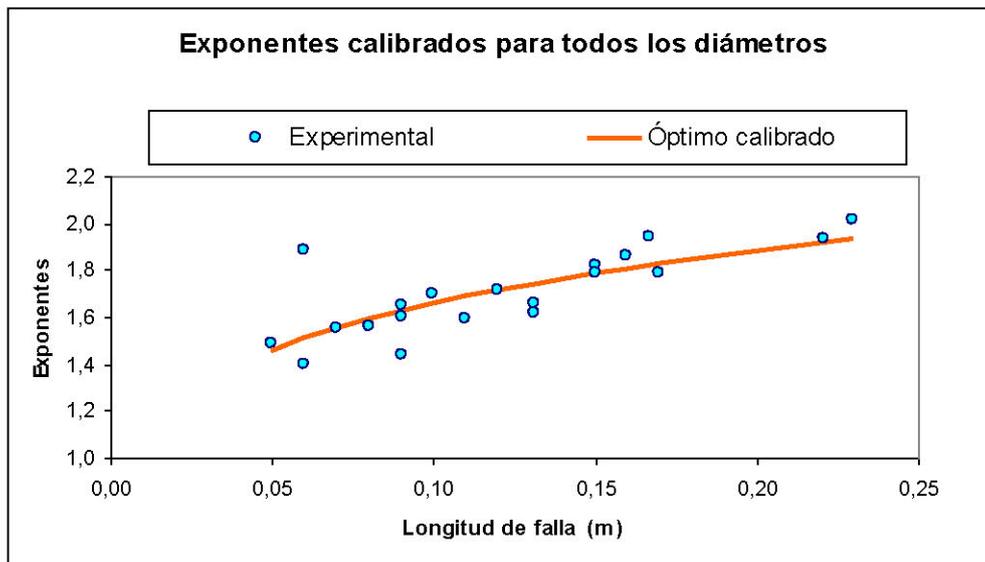


Figura 7.7: Ajuste de la curva de ajuste para exponentes b en función de la longitud de la falla para todos los diámetros.

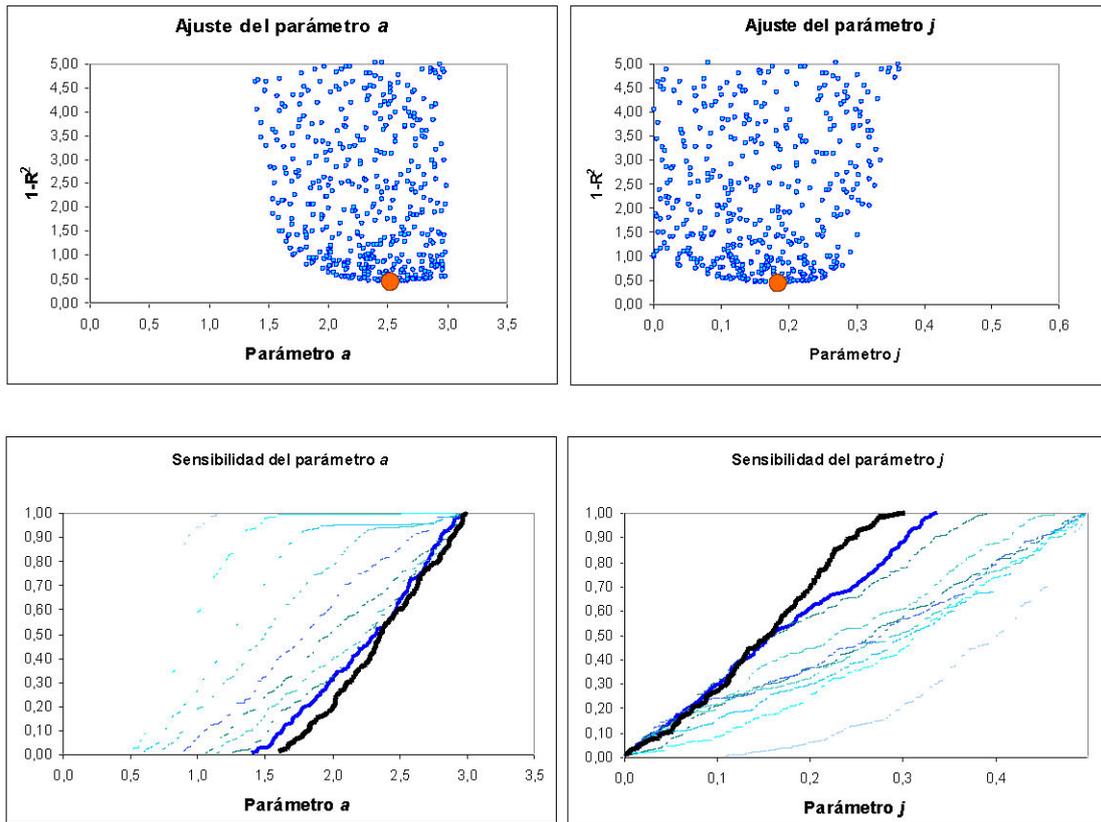


Figura 7.8: Ajuste 1-R2 para los parámetros a y j de la ecuación [7-1](Arriba). Sensibilidad de los parámetros a y j (Abajo). Para la determinación de una función para el parámetro b .

A pesar de que el exponente claramente depende de la longitud de la falla y tiende a incrementar, teóricamente este término debe ser adimensional. Motivo por el cual es necesario encontrar una expresión que relacione directamente la longitud de la falla (L) y a la vez sea adimensional. Por lo tanto se ensayó satisfactoriamente la expresión [7-5] que relaciona el exponente b en función de una relación entre la longitud de la falla (L) y el diámetro (d) correspondiente a cada exponente determinado en la calibración tipo I.

$$b = x \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^y \quad [7-5]$$

Obteniéndose que:

$$b = 1.678 \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{0.03} \quad [7-6]$$

En la Figura 7.9 y en el Anexo 7 se muestran los resultados de la calibración de la expresión [7-6], detallando la curva de ajuste, la calibración de los parámetros x y y , así como también el análisis de sensibilidad.

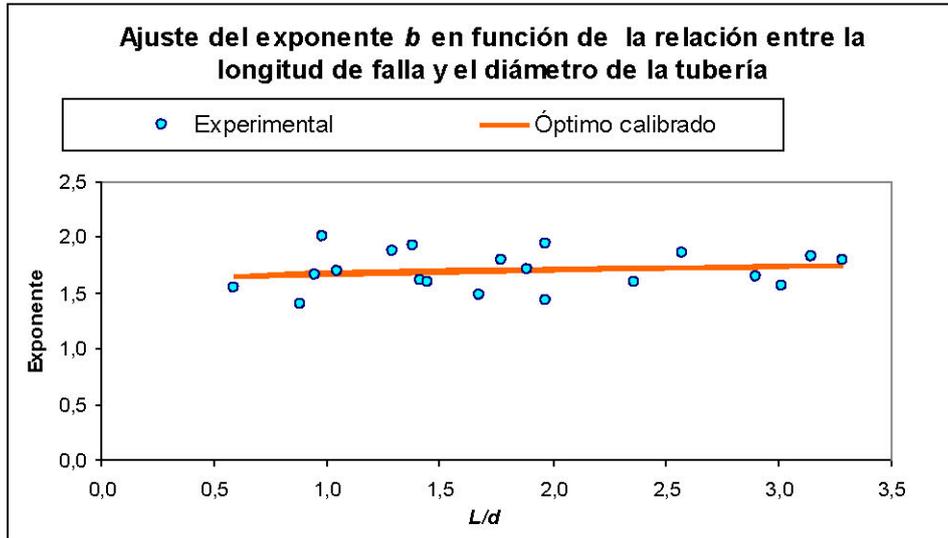


Figura 7.9: Curva calibrada de la expresión [7-6]

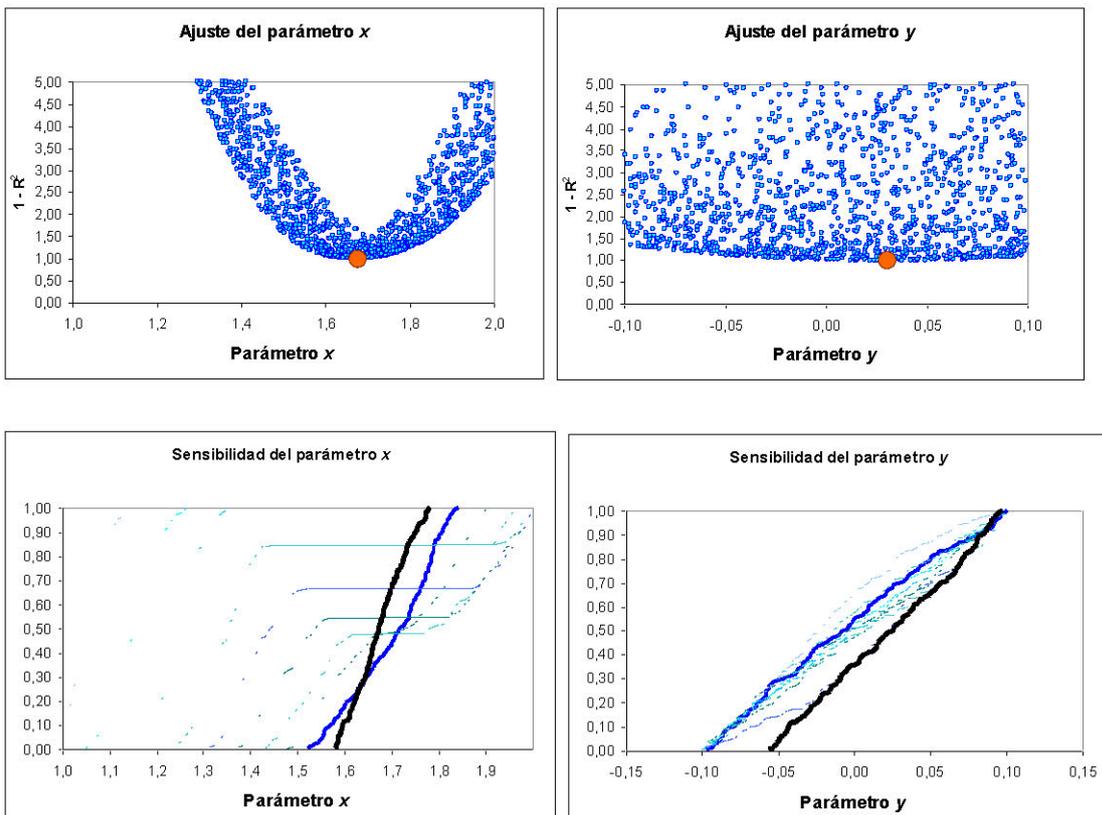


Figura 7.10: Ajuste 1-R² para los parámetros x y y de la ecuación [7-1](Arriba). Sensibilidad de los parámetros x y y (Abajo). Para la determinación de una función para el parámetro b.

En la Figura 7.10 se observa que el parámetro x posee una sensibilidad alta y provee una alta confiabilidad en adoptar el valor de $m = 1,678$. Sin embargo, debido a que la

sensibilidad del parámetro y es baja (aunque apreciable) y teniendo en cuenta que también es cercano a cero, es posible calibrar la expresión anterior fijando el valor de y en cero para simplificar la ecuación general que se desea finalmente. Obteniéndose con un ajuste aproximadamente igual al obtenido con la expresión [7-6].

$$b = 1.70 \quad [7-7]$$

Finalmente, la primera ecuación general para fugas en ranuras longitudinales se expresa como sigue:

$$Q = 875 \cdot L^{1.53} P^b \quad [7-8]$$

donde b puede tomar los valores de:

Criterio 1: $b = 2.53 L^{0.18}$

Criterio 2: $b = 1.678 \left(\frac{L}{d} \right)^{0.03}$

Criterio 3: $b = 1.70$

y donde,

g es la aceleración de la gravedad, (m/s^2).

L es la longitud de la falla, (m).

P es la presión del agua en metros.

d es el diámetro de la tubería, (m).

En el Anexo 7 se muestran las gráficas de calibración, ajuste y sensibilidad.

Como se mencionó anteriormente, la expresión [7-8], tiene la desventaja de no lograr explicar con buenos ajustes los datos experimentales de las fallas ensayadas, debido a que no se tiene en cuenta el efecto que genera el aumento del diámetro o el espesor de la tubería, que causa una disminución de los coeficientes globales de descarga con respecto a estas variables geométricas. Por consiguiente, se determinará una relación entre los coeficientes globales de descarga, la longitud de la falla y el diámetro de la tubería, después de analizar los criterios 2 y 3 del parámetro b para determinar la tendencia de los coeficientes individuales para cada una de las pruebas realizadas. El criterio 1 para el exponente, se omite en el análisis debido a que se busca tener el exponente adimensional.

7.1.3 Calibración tipo III

De acuerdo con lo obtenido en la calibración tipo II, es necesario calcular nuevamente los coeficientes globales para cada prueba individual manteniendo el exponente b en los criterios 2 y 3 de la ecuación [7-8]. El criterio 1, donde $b = 2.53 L^{0.18}$, no se aplica debido a que éste propone un exponente con unidades de $m^{0.18}$, lo cual no se ajusta a los fundamentos teóricos.

El criterio 2 propone un exponente $b = 1.678 \left(\frac{L}{d} \right)^{0.03}$, para el cual se calcularon los coeficientes de descarga para cada prueba. En la Tabla 7-3 se muestran los valores obtenidos para los coeficientes globales de descarga para cada uno de los ensayos realizados. De igual manera, en el Anexo 8 se ilustra la calibración de cada una de las pruebas evaluadas con este criterio. En esta calibración, el parámetro calibrado es el c de la ecuación [5-1], mientras que el exponente b se calcula directamente con la longitud de la falla y el diámetro de la tubería. En la tabla se muestran los coeficientes c y los exponentes b de la ecuación $Q = cP^b$.

Tabla 7-3: Resultados de la calibración en pruebas de fallas longitudinales reales para				
$b = 1.678 \left(\frac{L}{d} \right)^{0.03}$				
Diámetro (mm)	Longitud de la falla (mm)	Coefficiente c	Exponente b	R ²
50.8	50	5.7	1.670	0,978
50.8	70	10.65	1.694	0,987
50.8	90	15.82	1.707	0,997
50.8	100	27.75	1.712	0,981
50.8	130	53.64	1.726	0,983
50.8	160	86.91	1.736	0,986
50.8	170	94.33	1.739	0,991
63.5	60	3.85	1.675	0,994
63.5	90	9.53	1.695	0,991
63.5	120	30.90	1.706	0,995
63.5	150	48.52	1.722	0,992
76.2	80	11.10	1.680	0,987
76.2	110	23.31	1.696	0,996
76.2	150	60.66	1.712	0,999
76.2	221	136.84	1.732	0,989
76.2	230	152.58	1.734	0,977
101.6	60	4.54	1.651	0,991
101.6	90	10.68	1.672	0,996
101.6	131	29.71	1.690	0,995
101.6	170	61.95	1.722	0,985

En la tabla anterior, se observa con mayor claridad que coeficiente de descarga es directamente proporcional a la longitud de la falla y a la vez inversamente proporcional al diámetro o el espesor de la tubería al mantener un RDE constante.

Los coeficientes globales de descarga, de acuerdo con el criterio 3 se evalúan utilizando el exponente $b = 1.70$. Para este caso, el exponente es adimensional y tiene la tendencia de sobrestimar los caudales para ranuras con longitudes entre 5 y 7 cm. En la Tabla 7-4 se muestran los resultados de los coeficientes calculados.

Tabla 7-4: Resultados de la calibración en pruebas de fallas longitudinales reales para $b = 1.70$

Diámetro (mm)	Longitud de la falla (mm)	Coefficiente c	Exponente b	R^2
50.8	50	5.24	1.70	0,976
50.8	70	10.45	1.70	0,986
50.8	90	16.19	1.70	0,997
50.8	100	28.77	1.70	0,981
50.8	130	57.42	1.70	0,984
50.8	160	94.64	1.70	0,983
50.8	170	103.0	1.70	0,987
63.5	60	3.50	1.70	0,993
63.5	90	9.39	1.70	0,991
63.5	120	31.49	1.70	0,995
63.5	150	51.41	1.70	0,991
76.2	80	10.46	1.70	0,986
76.2	110	23.02	1.70	0,996
76.2	150	62.60	1.70	0,999
76.2	221	146.42	1.70	0,987
76.2	230	163.40	1.70	0,973
101.6	60	3.77	1.70	0,994
101.6	90	9.66	1.70	0,995
101.6	131	28.93	1.70	0,995
101.6	170	65.59	1.70	0,985

En la tabla anterior se aprecia que aunque el exponente se haya mantenido en un valor constante de 1.70, los coeficientes no varían en gran medida comparándolos con la Tabla 7-3

De acuerdo con los fundamentos teóricos, el coeficiente global de descarga depende de las dimensiones de la falla para la determinación del área, de la raíz cuadrada de dos veces la aceleración de la gravedad y de la relación entre el área real y teórica del chorro y de la relación entre la velocidad teórica y real del chorro [1]. Sin embargo, debido a la imposibilidad de medir el espesor de la falla por métodos directos y la variación del mismo en función de la presión, es necesario determinar una expresión que incluya una dimensión medible de la falla (la longitud) y un término que relacione la capacidad de expansión de la tubería en función del diámetro y que incluya indirectamente la relación entre el área y la velocidad real y teórica del chorro.

Esta expresión se determinará en la Calibración tipo IV, en la cual se buscará inicialmente la relación existente entre el coeficiente global de descarga y la longitud de la falla.

7.1.4 Calibración tipo IV

A partir del análisis realizado en la calibración tipo III, se determinará una expresión que relacione el coeficiente global de descarga con la longitud de la ranura. Es importante tener en cuenta que inicialmente, bajo una presión nula, el espesor de la

ranura es cero, debido a que no hay una pérdida del material al generar la falla, sino una separación de la estructura de la pared de la tubería.

Los datos iniciales necesarios para esta calibración se obtienen a partir de la calibración tipo III, donde se determinaron los coeficientes para cada longitud de la falla, discriminada para cada diámetro de tubería.

La calibración se rige por la ecuación [7-9] para determinar los parámetros m y n .

$$c = m \cdot L^n \quad [7-9]$$

Al calibrar los parámetros m y n , se observó una tendencia decreciente en el parámetro m , confirmando la hipótesis de que el coeficiente global de descarga disminuye en función del diámetro. Sin embargo, el parámetro n no muestra una tendencia clara a incrementar o a disminuir, manteniéndose por el contrario en un valor promedio de 2.65.

En la Tabla 7-5 se muestran los resultados obtenidos en la calibración con los coeficientes de descarga calibrados con el criterio 2 del exponente b . En el Anexo 9 se ilustra la gráfica de los parámetros m y n en función de la longitud de la ranura.

Tabla 7-5: Expresión para el coeficiente global de descarga en función de la longitud de la falla de acuerdo con el criterio 2 para el exponente b .				
Diámetro de la tubería (mm)	Longitud de la falla (cm)	Coefficiente de descarga (c)	Expresión calibrada	R^2
50.8	5	5.70	$c = 10905 L^{2.64}$	0,996
50.8	7	10.65		
50.8	9	15.82		
50.8	10	27.75		
50.8	13.1	53.64		
50.8	16.0	86.91		
50.8	16.7	94.33		
63.5	6	3.85	$c = 8379 L^{2.70}$	0,981
63.5	9	9.53		
63.5	12	30.90		
63.5	15	48.52		
76.2	8	11.10	$c = 4429 L^{2.29}$	0,992
76.2	11	23.31		
76.2	15	60.66		
76.2	22.1	136.84		
76.2	23	152.58		
101.6	6	4.54	$c = 13907 L^{3.03}$	0,999
101.6	9	10.68		
101.6	13.1	29.71		
101.6	17	61.95		

Al observar los resultados de la Tabla 7-5, se aprecia que no existe una tendencia clara entre los coeficientes m y los exponentes n , debido a que se permiten que los parámetros

se ajusten con libertad la ecuación, siendo que el parámetro m no posee una sensibilidad considerable. Por lo tanto, se fija el valor de n en 2.65 y se vuelve calibrar parámetro m para completar a expresión final del coeficiente global de descarga en función de la longitud de la ranura de acuerdo con el criterio 2 del exponente b .

En la Tabla 7-6 se muestra la expresión encontrada para cada longitud de la falla organizada por diámetros, manteniendo el parámetro $n = 2.65$:

Tabla 7-6: Expresión para el coeficiente global de descarga en función de la longitud de la falla con el criterio 2 para el exponente b , manteniendo constante el exponente $n = 2.65$		
Diámetro de la tubería (mm)	Expresión calibrada	R^2
50.8	$c = 11095 L^{2.65}$	0,996
63.5	$c = 7557 L^{2.65}$	0,981
76.2	$c = 7593 L^{2.65}$	0,997
101.6	$c = 6702 L^{2.65}$	0,999

Finalmente, se observa en la tabla anterior, que con un ajuste considerablemente bueno, los coeficientes de las expresiones mantienen un decrecimiento a medida que el diámetro aumenta. Esto requiere de la determinación de una última expresión que relacione esta variación con el diámetro de la tubería con $RDE = 21$ en la calibración tipo V. Para el criterio 3 del exponente b , los resultados son similares y se muestran en la Tabla 7-7.

Tabla 7-7: Expresión para el coeficiente global de descarga en función de la longitud de la falla de acuerdo con el criterio 3 para el exponente b .				
Diámetro de la tubería (mm)	Longitud de la falla (cm)	Coefficiente de descarga (c)	Expresión calibrada	R^2
50.8	5	5.24	$c = 11300 L^{2.60}$	0,997
50.8	7	10.45		
50.8	9	16.19		
50.8	10	28.77		
50.8	13.1	57.42		
50.8	16.0	94.64		
50.8	16.7	103.0		
63.5	6	3.50	$c = 10679 L^{2.80}$	0,983
63.5	9	9.39		
63.5	12	31.49		
63.5	15	51.41		
76.2	8	10.46	$c = 5542 L^{2.4}$	0,994
76.2	11	23.02		
76.2	15	62.60		
76.2	22.1	146.42		
76.2	23	163.40		
101.6	6	3.77	$c = 15103 L^{3.0}$	0.999
101.6	9	9.66		
101.6	13.1	28.93		
101.6	17	65.59		

De igual manera, el parámetro n se fija en un valor de 2.70 para disminuir el grado de libertad en la calibración. En la Tabla 7-8 se muestran los resultados obtenidos con $n = 2.70$.

Tabla 7-8: Expresión para el coeficiente global de descarga en función de la longitud de la falla con criterio 3 para el exponente b , manteniendo constante el exponente $n = 2.70$		
Diámetro de la tubería (mm)	Expresión calibrada	R^2
50.8	$c = 13203 L^{2.70}$	0,997
63.5	$c = 9100 L^{2.70}$	0,984
76.2	$c = 8400 L^{2.70}$	0,997
101.6	$c = 7656 L^{2.70}$	0,999

7.1.5 Calibración tipo V

Este último paso en la calibración de las fallas reales longitudinales, propone determinar una expresión que explique la variación decreciente del parámetro m de la ecuación [7-9], en función del diámetro de la tubería para un $RDE = 21$, para determinar finalmente una expresión empírica general que explique el caudal de fuga para fallas longitudinales en tuberías plásticas.

La expresión a calibrar es la siguiente:

$$m = p \cdot d^q \quad [7-10]$$

donde,

m es el coeficiente de la ecuación [7-9].

p es el parámetro designado como coeficiente de la ecuación [7-10].

d es el diámetro de la tubería para un $RDE = 21$, (m).

q es el parámetro designado como exponente de la ecuación [7-10].

La ecuación [7-10] fue calibrada con los coeficientes determinados con el criterio 2 de la calibración tipo IV, debido a que esta ecuación tiene en cuenta tanto la longitud de falla de la ranura como el diámetro de la tubería que explica la variación de la forma de la falla en función de la presión e indirectamente la rigidez de la tubería; además, el término es adimensional.

Esta expresión finaliza la determinación de la variación observada del coeficiente global de descarga, la cual se muestra en la ecuación [7-11] para el criterio en la cual

$$b = 1.678 \left(\frac{L}{d} \right)^{0.03} :$$

$$m = 1300 d^{-0.70} \quad [7-11]$$

En la Figura 7.11 se muestra el ajuste de la curva del parámetro m , ajustado a la ecuación [7-11], obteniendo un ajuste $R^2 = 0.830$. En el Anexo 10 se muestra la curva calibrada junto con el ajuste y el análisis de sensibilidad.

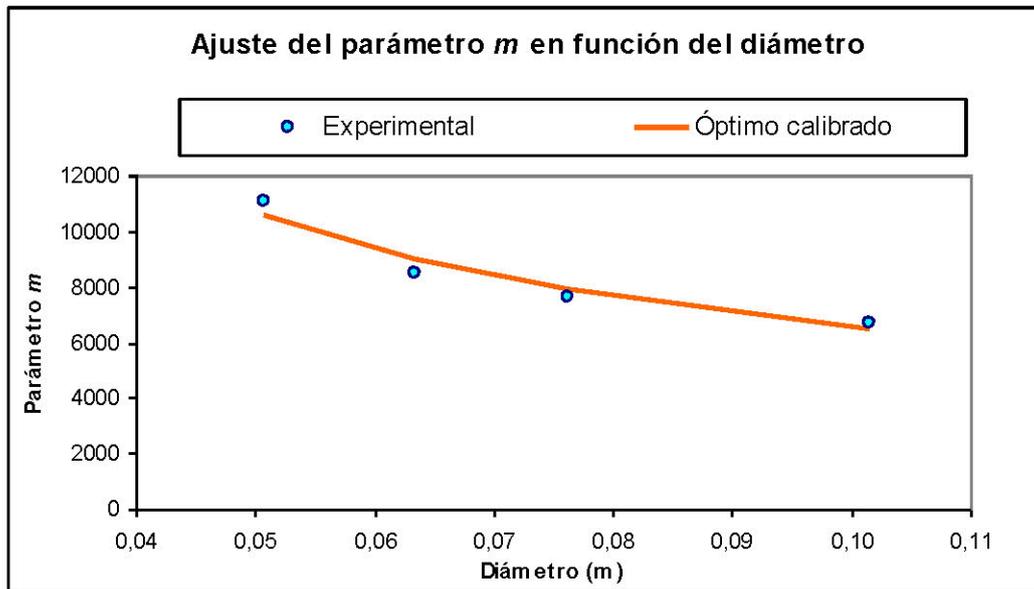


Figura 7.11: Curva de ajuste del parámetro m en función del diámetro de la tubería

Finalmente uniendo las expresiones calibradas, se obtiene la ecuación general de fugas para fallas longitudinales en tuberías de PVC según el criterio 2 para el exponente b , la cual es:

$$Q = 1300 \cdot d^{-0.7} L^{2.65} P \left(1.678 \cdot \left(\frac{L}{d} \right)^{0.03} \right) \quad [7-12]$$

donde,

Q es el caudal de fuga, (mL/s).

d es el diámetro de la tubería, (m).

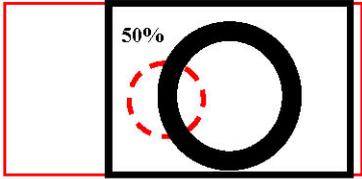
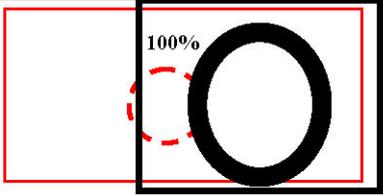
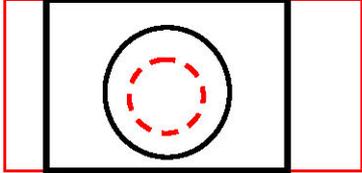
L es la longitud de la falla, (m).

P es la presión a la cual está sometida la tubería, (metros de agua).

Capítulo 8 FALLAS EN CONEXIONES DOMICILIARIAS

Las conexiones domiciliarias evaluadas consisten en collares de derivación de PVC de 3" de diámetro. Las fallas en conexiones domiciliarias se ejecutaron basándose en los criterios de una instalación inadecuada, en la cual se pueden presentar corrimientos del collar con respecto al orificio de salida de agua o a la ausencia del empaque hermético.

El orificio de salida (mostrado con líneas segmentadas en la Tabla 8-1), tiene un diámetro de 1,2 cm, aproximadamente equivalente al diámetro interno del collar de derivación. Adicionalmente, las fallas se evaluaron manteniendo cerrada la salida hacia el contador de agua que se ubica en los registros. Se probaron las siguientes fallas:

Falla 1	Corrimiento del 50 % del collar de derivación con respecto al orificio de salida (con empaque).	
Falla 2	Corrimiento del 100 % del collar de derivación con respecto al orificio de salida (con empaque).	
Falla 3	Collar de derivación sin empaque hermético.	

Para la falla 1, correspondiente al corrimiento del collar de derivación con empaque un 50 % del diámetro del orificio de salida (Ver Figura 8.1), se obtiene un coeficiente global de descarga de 5,87 y un exponente $b = 0,34$ con un ajuste $R^2 = 0,864$. La Figura 8.2 muestra que el exponente b es muy cercano al valor teórico para orificios circulares y se aprecia una pérdida del orden de 1,0 L/s para una presión de 50 m de cabeza de agua. La correlación y el análisis de sensibilidad se muestran en la Figura 8.3.



Figura 8.1: Fuga a través de un collar de derivación corrido al 50 % del diámetro del orificio de salida, evaluado con el acople para distribución cerrado.

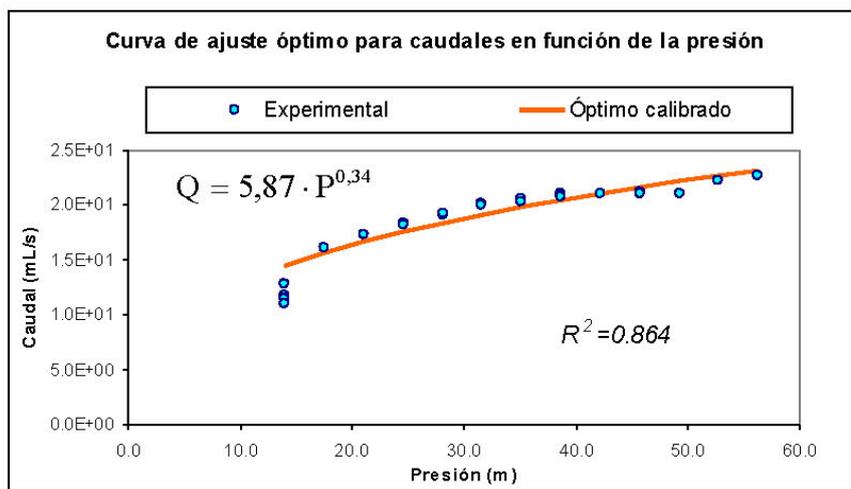


Figura 8.2: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión para una falla un collar de derivación corrido un 50 % del diámetro del orificio de salida.

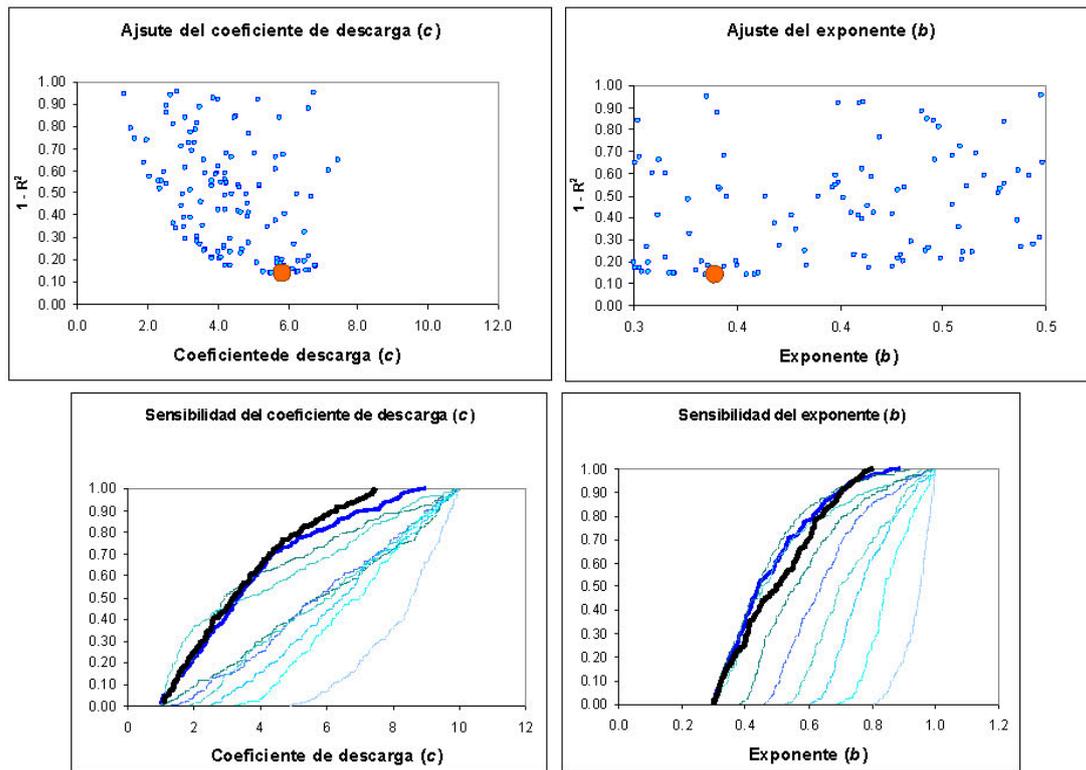


Figura 8.3: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla un collar de derivación corrido un 50 % del diámetro del orificio de salida.

La falla 2, correspondiente a un collar de derivación corrido un 100 % del diámetro del orificio de salida de agua (Ver Figura 8.4), muestra un coeficiente global de descarga de 27,36 y un exponente $b = 0,51$ con un ajuste $R^2 = 0,965$. La Figura 8.5 muestra que el exponente b es muy cercano al valor teórico para orificios circulares y se aprecia una pérdida del orden de 1,0 L/s para una presión de 50 m de cabeza de agua. La correlación y el análisis de sensibilidad se muestran en la Figura 8.6.



Figura 8.4: Fuga a través de un collar de derivación corrido al 100 % del diámetro del orificio de salida, evaluado con el acople para distribución cerrado.

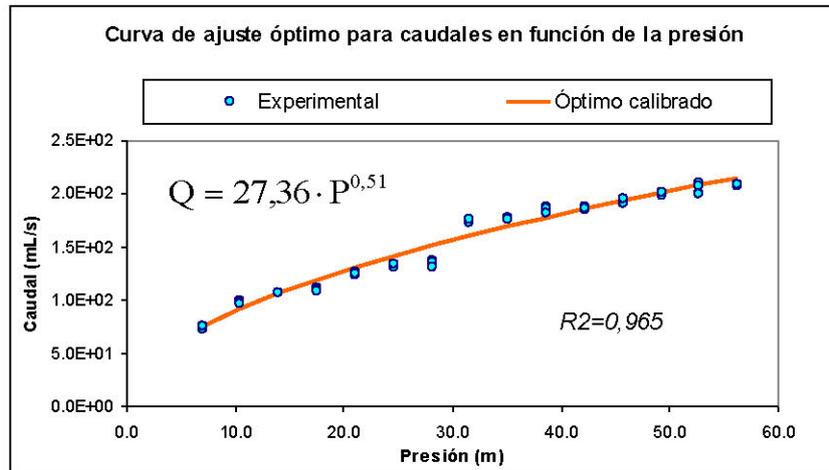


Figura 8.5: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión para una falla un collar de derivación corrido un 100 % del diámetro del orificio de salida.

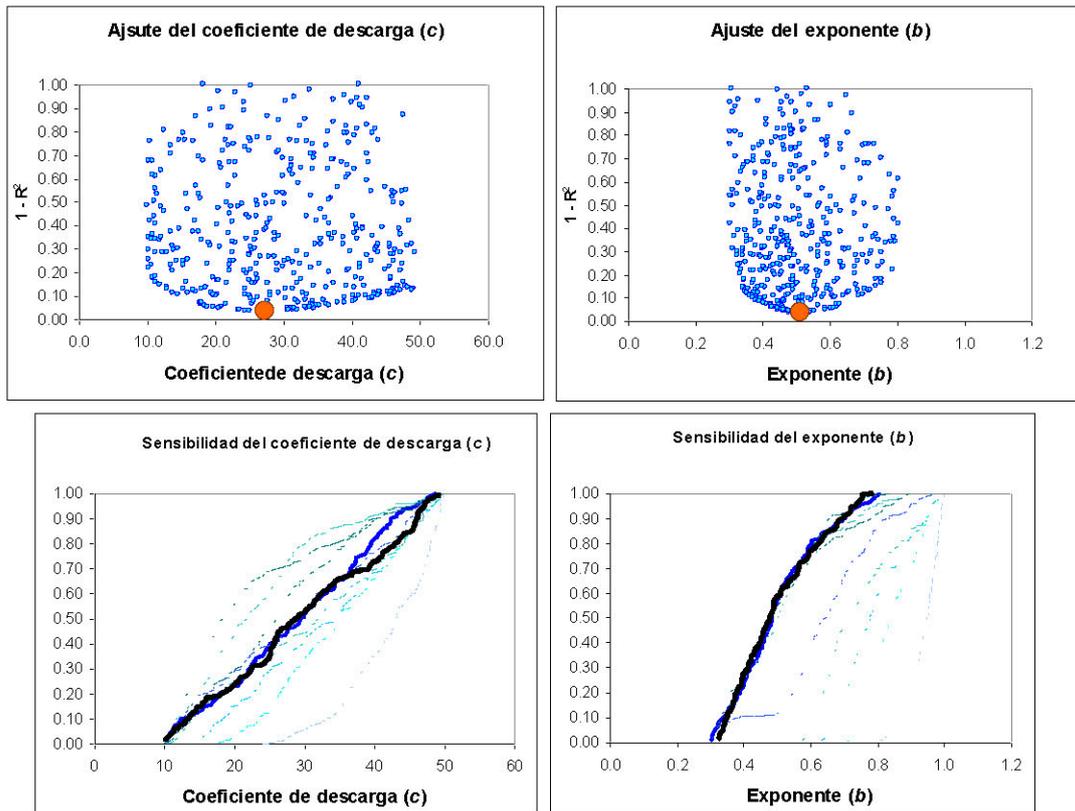


Figura 8.6: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla un collar de derivación corrido un 100 % del diámetro del orificio de salida.

Por último, la falla 3, correspondiente a un collar de derivación centrado con el orificio de salida pero sin empaque (Ver Figura 8.7), muestra un coeficiente global de descarga de 5,55 y un exponente $b = 0,40$ con un ajuste $R^2 = 0,833$. La Figura 8.9 muestra que el exponente b es muy cercano al valor teórico para orificios circulares y se aprecia una pérdida del orden de 1,0 L/s para una presión de 50 m de cabeza de agua. La correlación

y el análisis de sensibilidad se muestran en la Figura 8.9. En la Figura 8.8 se observa el detalle del acople del collar de derivación con y sin empaque hermético.



Figura 8.7: Fuga a través de un collar de derivación corrido sin empaque.



Figura 8.8: Detalle del acople del collar de derivación con y sin empaque hermético.

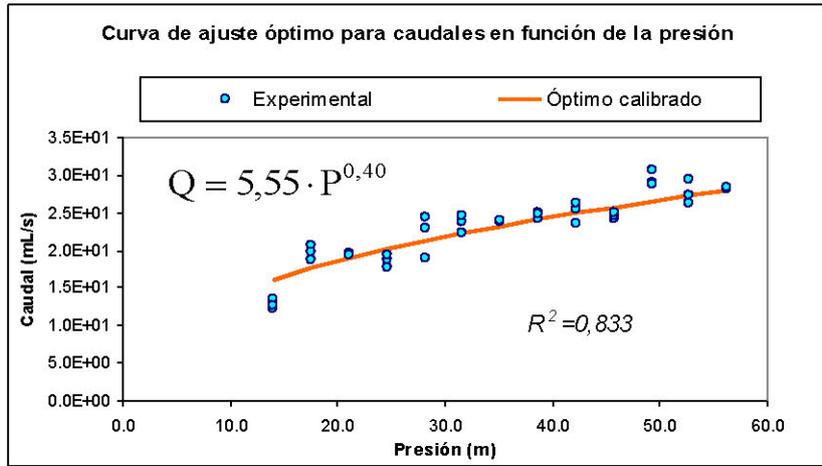


Figura 8.9: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión para una falla un collar de derivación sin empaque y centrado con el orificio de salida.

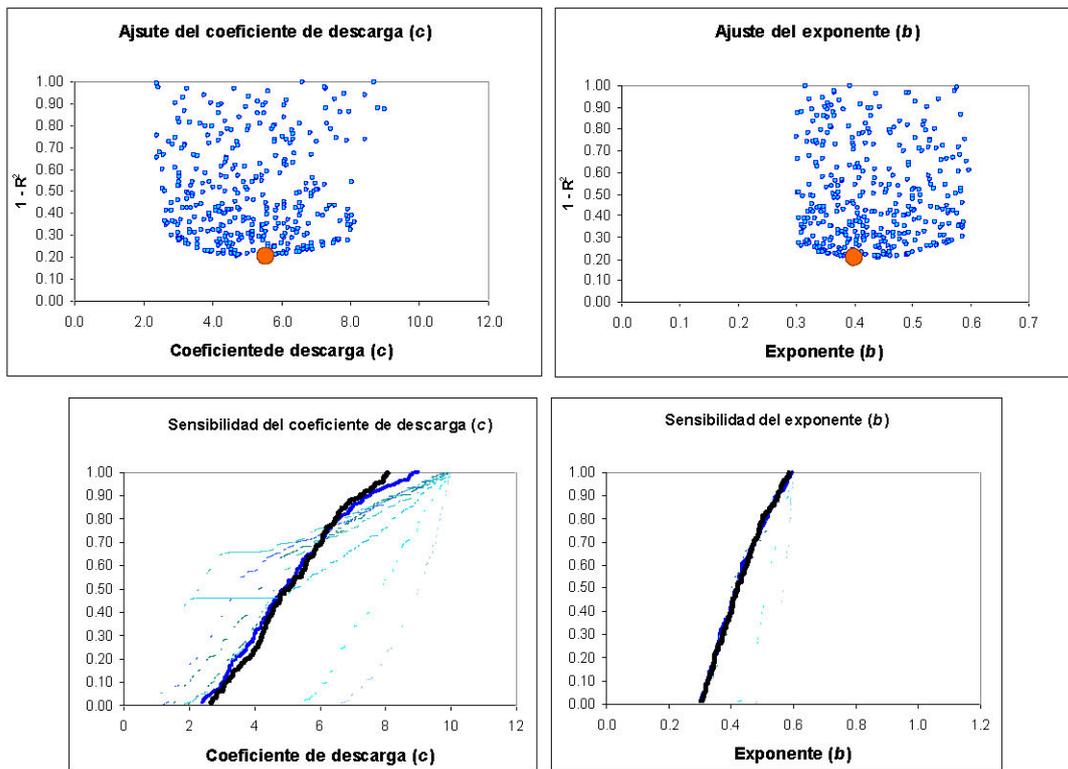


Figura 8.10: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla un collar de derivación sin empaque y centrado con el orificio de salida.

En el Anexo 11 se muestran los resultados de la calibración para conexiones domiciliarias.

Capítulo 9 ANÁLISIS DE RESULTADOS

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

9.1 Fallas longitudinales reales

El análisis de resultados consiste en la evaluación de la ecuación general calibrada para fallas longitudinales reales con respecto a los datos experimentales medidos.

La ecuación general calibrada [9-1] muestra claramente la dependencia del caudal de fuga con el diámetro y la longitud de la falla; adicionalmente a la presión a la cual esté sometida la tubería. Cabe aclarar que la ecuación [9-1] es totalmente empírica y las unidades de las variables deben ser aplicados como se muestra en la ecuación [7-12].

$$Q = 1300 \cdot d^{-0.7} L^{2.65} P \left(1.678 \cdot \left(\frac{L}{d} \right)^{0.03} \right) \quad [9-1]$$

En primer lugar, el coeficiente de descarga es directamente proporcional a la longitud de la falla, debido a que a medida que la falla sea más larga, lógicamente el área será mayor. Además, el coeficiente muestra también una dependencia inversamente proporcional al diámetro; que para el caso de esta investigación, debido a que la relación diámetro – espesor es constante ($RDE=21$), el espesor aumenta, generando una mayor dificultad para incrementar el ancho de la ranura a medida que la presión aumenta. Es decir, la ecuación [9-1] es posible expresarla también en función del espesor, pero para efectos prácticos se aplica el diámetro como variable. Sin embargo, a pesar de que el coeficiente global de descarga dependa tanto del diámetro como de la longitud de la falla, esta última posee mayor incidencia sobre el término.

Por otro lado, el exponente b , que depende de la forma de la falla, posee también una dependencia inversamente proporcional diámetro y directamente proporcional a la longitud de la falla, debido a que la forma de la falla pasa de tener inicialmente una forma hipotéticamente rectangular, a una forma ovoide con un ancho máximo en el centro y un ancho nulo en los extremos a medida que la presión aumenta. En la Figura 9.1 se ilustra el fenómeno que ocurre sobre la forma de la falla en función de la presión. A pesar de existir una dependencia clara del exponente b con el diámetro y la longitud de la falla, este término puede aplicarse como $b = 1,70$, debido a que el exponente de la relación L/d de la ecuación [9-1] es muy cercano a cero; luego la ecuación puede expresarse como lo muestra la ecuación [9-2], con una variación en coeficiente 1300 y en el exponente del diámetro, para mantener un ajuste global de $R^2 = 0.888$. Sin embargo, se recomienda utilizar la ecuación [9-1] que tiene en cuenta el efecto de la variación de la forma de la falla, que por insignificante que pueda ser, tiene una incidencia importante en los cálculos de caudales de fuga.

$$Q = 850 \cdot d^{-0.9} L^{2.70} P^{1.70} \quad [9-2]$$

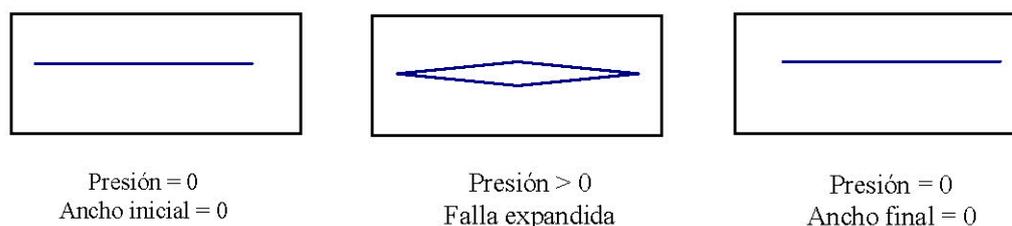


Figura 9.1: Fenómeno de expansión del ancho de la falla longitudinal en función de la presión.

El término 1300 en el coeficiente y el término $1,678$ en el exponente de la ecuación [9-1], son valores calculados empíricamente durante la calibración y ajustados a partir del análisis de sensibilidad realizado. Sin embargo, estos términos pueden depender de las características mecánicas del material, como el módulo de elasticidad o la rigidez del material de la tubería. Esta última suposición no hace parte del alcance de esta investigación y puede ser tomado como un nuevo enfoque de investigaciones posteriores para el análisis de fallas en tuberías.

Se realizó un análisis para determinar el grado de confiabilidad de la ecuación [9-1], para explicar los caudales medidos experimentalmente en función de la presión para cada una de las pruebas realizadas, donde se obtuvo un ajuste promedio global para todas las pruebas de $R^2 = 0,910$. Los ajustes para cada una de las pruebas realizadas se muestran en la Tabla 9-1. Las curvas de ajuste se muestran en el Anexo 12.

Díámetro de la tubería (mm)	Longitud de la falla (m)	Ajuste R^2
0,0508	0,05	0,603
0,0508	0,07	0,903
0,0508	0,09	0,967
0,0508	0,10	0,932
0,0508	0,13	0,970
0,0508	0,16	0,989
0,0508	0,167	0,996
0,0635	0,06	0,737
0,0635	0,12	0,977
0,0635	0,15	0,728
0,0762	0,08	0,928
0,0762	0,11	0,993
0,0762	0,15	0,871
0,0762	0,221	0,977
0,0762	0,23	0,928
0,1016	0,06	0,910
0,1016	0,09	0,994
0,1016	0,13	0,995
0,1016	0,17	0,975

Hay que tener en cuenta que para longitudes menores a 7,0 cm de longitud, los ajustes son relativamente bajos con respecto a longitudes mayores. Sin embargo, se obtiene una buena aproximación para efectos prácticos en el caso de fallas con longitudes menores a los 7,0 cm.

El ajuste calculado con la ecuación [9-2] se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 9-2: Resultados del análisis de la ecuación general calibrada [7-12] con respecto a los datos experimentales medidos.		
Diámetro de la tubería (mm)	Longitud de la falla (m)	Ajuste R²
0,0508	0,05	0,633
0,0508	0,07	0,937
0,0508	0,09	0,929
0,0508	0,10	0,926
0,0508	0,13	0,990
0,0508	0,16	0,997
0,0508	0,167	0,993
0,0635	0,06	0,765
0,0635	0,12	0,963
0,0635	0,15	0,962
0,0762	0,08	0,894
0,0762	0,11	0,988
0,0762	0,15	0,864
0,0762	0,221	0,969
0,0762	0,23	0,888
0,1016	0,06	0,812
0,1016	0,09	0,982
0,1016	0,13	0,973
0,1016	0,17	0,944

Se observa en la tabla anterior, que los ajustes logrados con la ecuación [9-2] son menores a los logrados con la ecuación [9-1], hecho que refleja la conveniencia de utilizar la expresión [9-1].

9.2 Fallas en conexiones domiciliarias

Para los tres tipos de fallas en conexiones domiciliarias se observa que la forma de la curva de caudales es similar al de un orificio, pues los exponentes b no logran superar el valor de 0.50, disminuyendo hasta 0.31 al tener una condición de hermeticidad del 50 % del orificio de salida. Este hecho se debe a que el caudal fugado sale por medio del orificio circular que inicialmente posee un coeficiente de 0.50, es decir, para un caso extremo de no poseer el collar de derivación, la falla se convierte en un orificio circular con un coeficiente de 0.50 y a medida que se imposibilita el paso de agua, al cerrar el orificio por el empaque hermético del collar de derivación, el exponente disminuye.

Para el caso del collar de derivación sin empaque se calibró un exponente $b = 0.40$, mostrando que en realidad la fuga se comporta como un orificio circular dentro del collar de derivación, y el collar disminuye el porcentaje de salida de agua.

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 una falla longitudinal de 10 cm, sometida a una presión de 21 m de presión de agua, se estarían perdiendo aproximadamente 5,5 L/s de agua; que es equivalente a 475,2 m³ de agua durante un día completo. Para el caso de una falla de 17 cm de longitud, se estaría perdiendo el equivalente a 503 m³ por día bajo una presión de agua de 14 m. Además, se está teniendo en cuenta únicamente una sola falla, pues al sumar las fallas totales de este tipo en una red, la pérdida de agua sería considerable.

Para el caso de las fallas en las conexiones domiciliarias analizadas en esta investigación, el caudal de fuga promedio bajo una presión de 21 m de altura de agua es del orden de 1,2 L/s, equivalente a 103 m³/día.

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. Para las pruebas realizadas en orificios, al mantener los exponentes fijos en 0,5, se obtuvo un coeficiente de descarga c_I entre 0,6 y 0,7, el cual es el rango esperado teóricamente.
2. Teniendo en cuenta que los resultados obtenidos para fugas en orificios fueron muy cercanos a los esperados teóricamente, se concluye que el comportamiento del montaje de pruebas, aporta confiabilidad en los resultados obtenidos para otros tipos de falla.

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

1. Para ranuras entre 1,2 cm y 6,0 cm, con ancho de 1,0 mm, los exponentes b de la ecuación [5-1], varían entre 0,48 y 0,76. Se aprecia entonces una ligera variación incremental con relación a los exponentes para una falla en orificio. De igual manera, se mantiene la forma cóncava hacia debajo de la curva de caudales en función de la presión. Hay que aclarar que para estas fallas poseen un ancho fijo de 1,0 mm y por lo tanto existe una pérdida de material de la tubería, que ignora el efecto de expansión de la falla en función de la presión.
2. Para las ranuras longitudinales de geometría controlada y ancho de 1,0 mm, se aprecia un incremento claro en los valores del exponente b de la ecuación $Q = c \cdot P^b$. Este incremento se debe a que en la medida de que la longitud de la falla es mayor, existe una tendencia a expandirse el ancho de la ranura en función de la presión y por lo tanto las dimensiones y la forma de la falla. Sin embargo, aunque exista una expansión del ancho de la falla, no es lo suficientemente considerable como para incrementar el orden de magnitud del exponente b como es el caso de las fallas longitudinales reales.
3. Las ranuras longitudinales reales tienen también 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". Se observa una variación en el orden de magnitud del exponente b que pasa de ser menor que 1 a mayor que 1, lo cual implica también un cambio en la concavidad hacia arriba de la curva de caudales en función de la presión. Esto implica un aumento considerable del caudal en función de la variación de la presión.

4. Debido a que no existe una pérdida de material de la tubería al producirse la falla, es decir, solamente se separa la estructura de la tubería, 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. Esto produce que la falla longitudinal cambie de ser hipotéticamente rectangular a tener una forma ovoide con ancho máximo en el centro y cero en los extremos. Lo anterior genera una ligera variación de los valores del exponente b en función de la longitud y el diámetro de la falla, resultando la ecuación $b = 1.678 \left(\frac{L}{d} \right)^{0.03}$. Sin

embargo, a partir del análisis de sensibilidad, es posible reducir esta expresión a $b = 1,70$, implicando 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.

5. El coeficiente global de descarga c de la ecuación $Q = c \cdot P^b$ tiene dos características fundamentales. La primera es una tendencia creciente en función de la longitud de falla, la cual se explica por el incremento de las dimensiones de la falla (el área) y de la posibilidad de expandir el ancho de en función de la presión a medida que la longitud es mayor. La segunda característica es una disminución del valor del coeficiente en función del diámetro o del espesor de la tubería al mantener una relación diámetro – espesor constante. Esto debido a que a medida que se incrementa el diámetro o el espesor de la tubería, se incrementa también la rigidez de la tubería, imposibilitando la expansión del ancho de la falla en función de la presión. Sin embargo, esta disminución tiene una influencia mucho menor que la tendencia creciente del coeficiente global de descarga con respecto a la longitud de la falla. El coeficiente global de descarga está dado como $c = 1300 d^{-0,70} L^{2,65}$.

6. La ecuación general calibrada para ranuras longitudinales reales está dada como:

$$Q = 1300 \cdot d^{-0,7} L^{2,65} P^{\left(1,678 \left(\frac{L}{d} \right)^{0,03} \right)}$$

, con un ajuste global sobre los datos experimentales de $R^2 = 0,91$. Pero también la ecuación anterior puede expresarse también como $Q = 850 \cdot d^{-0,9} L^{2,70} P^{1,70}$, donde Q es el caudal de fuga en mL/s, d es el diámetro de la tubería en m, L es la longitud de la falla en m, P es la presión en la tubería en metros de agua. Sin embargo, se sugiere utilizar la primera ecuación por tener mejores ajustes con los datos experimentales.

7. La forma de la curva de caudales para las fallas longitudinales reales posee una tendencia de crecimiento exponencial, reflejando un incremento de caudal considerablemente alto para cada variación positiva de la presión. A diferencia de estas fallas, se observa que en las ranuras con ancho controlado de 1,0 mm no se presenta este incremento en la forma de la curva. Esta diferencia se debe fundamentalmente, a que las ranuras controladas no presentan una deformación considerable en el ancho de la ranura con las presiones aplicadas. Sin embargo, las ranuras de ancho 1,0 mm presentan lógicamente caudales mayores por unidad de longitud de la falla.

8. Se midieron caudales de hasta 5,50 L/s para una falla de 23,0 cm en una falla longitudinal real. Este caudal representa una pérdida de agua del orden de los 475 m³/día.
9. Las fugas en conexiones domiciliarias no alcanzan caudales superiores a los encontrados para las fallas longitudinales reales. Sin embargo, el rango de caudales entre 1,0 L/s y 3,5 L/s representa una cantidad considerable de agua perdida del orden de los 302 m³/día.
10. 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 red.
11. 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.

10.3 Recomendaciones

1. En la medida de 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.

Capítulo 11 BIBLIOGRAFÍA

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

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 parámetros de fuga en orificios

Anexo 4: Calibración de parámetros de fuga en ranuras de ancho 1,0 mm

Anexo 5: Calibración tipo I de parámetros de fuga c y b en fallas longitudinales reales

Anexo 6: Calibración tipo II de los parámetros m y n para el coeficiente global de descarga c

Anexo 7: Calibración tipo II del parámetro b para los tres criterios de análisis.

Anexo 8: Calibración tipo III de los coeficientes globales de descarga para cada prueba utilizando los criterios 2 y 3 del exponente b .

Anexo 9: Calibración tipo IV del parámetro m del coeficiente de descarga a partir de la calibración tipo III.

Anexo 10: Calibración tipo V de los parámetros p y q del coeficiente m con los criterios 2 y 3 del exponente b

Anexo 11: Análisis de resultados de las fallas longitudinales reales

Anexo 12: Calibración de las ecuaciones de fuga de las conexiones domiciliarias

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1	INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo 2	OBJETIVOS.....	2
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
Capítulo 3	MARCO TEÓRICO.....	3
3.1	Comportamiento de la hidráulica de un orificio en un embalse.....	3
3.2	Aplicación de la hidráulica de un orificio para fugas en tuberías.....	5
Capítulo 4	DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE DEL CIRCUITO PARA PRUEBAS.....	7
4.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.....	7
Capítulo 5	METODOLOGÍA GENERAL.....	10
5.1	PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	10
5.1.1	CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS.....	10
5.1.2	GENERACIÓN DE LAS FALLAS.....	11
5.1.3	EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS.....	12
5.1.3.1	DESCRIPCIÓN DE LAS MEDICIONES.....	12
5.2	CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS.....	13
Capítulo 6	FALLAS CON GEOMETRÍA CONTROLADA.....	15
6.1	Orificios.....	15
6.2	Ranuras.....	18
Capítulo 7	FALLAS LONGITUDINALES REALES.....	25
7.1.1	Calibración tipo I.....	26
7.1.2	Calibración tipo II.....	29
7.1.3	Calibración tipo III.....	34
7.1.4	Calibración tipo IV.....	36
7.1.5	Calibración tipo V.....	39
Capítulo 8	FALLAS EN CONEXIONES DOMICILIARIAS.....	41
Capítulo 9	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
9.1	Fallas longitudinales reales.....	47
9.2	Fallas en conexiones domiciliarias.....	49
9.3	Magnitud de los caudales de fuga generados por las fallas.....	50
Capítulo 10	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	51
10.1	Conclusiones relacionadas con el montaje y las mediciones experimentales.....	51
10.2	Conclusiones relacionadas con los resultados de la calibración de parámetros de las ecuaciones de fuga.....	51
10.3	Recomendaciones.....	53
Capítulo 11	BIBLIOGRAFÍA.....	54
Capítulo 12	ANEXOS.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Detalle de un orificio en un embalse.....	3
Figura 3.2: Detalle de una falla en una tubería.....	6
Figura 4.1: Motobomba y sistema de distribución del circuito de pruebas.....	8
Figura 4.2: Válvulas y manómetros ubicados en la entrada de cada canal.....	8
Figura 4.3: Canal No. 2 para pruebas, condicionado con los sistemas de aquietamiento.	9
Figura 4.4: Sistema de purga para la evacuación del aire acumulado en la tubería fallada.....	9
Figura 4.5: Vertedero triangular de 60° condicionado con su limnómetro.....	9
Figura 5.1: Falla longitudinal real realizada en una tubería de 3" de diámetro.....	11
Figura 6.1: Ajuste entre puntos experimentales y teóricos para una tubería de 3" de diámetro con una falla en orificio de 5,0 mm (Arriba). Ajuste del R^2 del coeficiente (Abajo).....	17
Figura 6.2: Ajuste entre puntos experimentales y teóricos para una tubería de 3" de diámetro con una falla en orificio de 7,70 mm (Arriba). Ajuste del R^2 del coeficiente (Abajo).....	18
Figura 6.3: Ajuste entre puntos experimentales y teóricos para una tubería de 3" de diámetro con una falla longitudinal de 1,225 cm y ancho 1 mm.....	19
Figura 6.4: Ajuste 1-R2 para los parámetros c y b (Arriba). Sensibilidad de los parámetros c y b (Abajo). Para una ranura de 3,72 cm de longitud y 1 mm de ancho.....	20
Figura 6.5: Ajuste entre puntos experimentales y teóricos para una tubería de 3" de diámetro con una falla longitudinal de 3,72 cm y 1 mm de ancho.....	21
Figura 6.6: Ajuste 1-R2 para los parámetros c y b (Arriba). Sensibilidad de los parámetros c y b (Abajo). Para una ranura de longitud 3,72 cm de largo y 1 mm de ancho.....	21
Figura 6.7: Ajuste entre puntos experimentales y teóricos para una tubería de 3" de diámetro con una falla longitudinal de 6,0 cm y 1 mm de ancho.....	22
Figura 6.8: Ajuste 1-R2 para los parámetros c y b (Arriba). Sensibilidad de los parámetros c y b (Abajo). Para una ranura de longitud 6,0 cm de largo y 1 mm de ancho.....	23
Figura 7.1: Fuga generada por una falla de 23,0 cm de longitud sometida a una presión de 8,1 m de cabeza de agua.....	25
Figura 7.2: Ejecución de la prueba para una ranura real de 15.0 cm de longitud en una tubería de 3" de diámetro.....	26
Figura 7.3: Coeficientes calibrados para todos los diámetros y longitudes de falla ensayados.....	28
Figura 7.4: Exponentes calibrados para todos los diámetros y longitudes de falla ensayados.....	28
Figura 7.5: Ajuste de la curva de ajuste para los coeficientes globales de descarga en función de la longitud de la falla para todos los diámetros.....	29
Figura 7.6: Ajuste 1-R2 para los parámetros m y n de la ecuación [7-1](Arriba). Sensibilidad de los parámetros m y n (Abajo). Para la determinación de una función para el parámetro c	30

Figura 7.7: Ajuste de la curva de ajuste para exponentes b en función de la longitud de la falla para todos los diámetros.....	31
Figura 7.8: Ajuste 1-R2 para los parámetros a y j de la ecuación [7-1](Arriba). Sensibilidad de los parámetros a y j (Abajo). Para la determinación de una función para el parámetro b	32
Figura 7.9: Curva calibrada de la expresión [7-6]	33
Figura 7.10: Ajuste 1-R2 para los parámetros x y y de la ecuación [7-1](Arriba). Sensibilidad de los parámetros x y y (Abajo). Para la determinación de una función para el parámetro b	33
Figura 7.11: Curva de ajuste del parámetro m en función del diámetro de la tubería ..	40
Figura 8.1: Fuga a través de un collar de derivación corrido al 50 % del diámetro del orificio de salida, evaluado con el acople para distribución cerrado.	42
Figura 8.2: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión para una falla un collar de derivación corrido un 50 % del diámetro del orificio de salida.	42
Figura 8.3: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla un collar de derivación corrido un 50 % del diámetro del orificio de salida.	43
Figura 8.4: Fuga a través de un collar de derivación corrido al 50 % del diámetro del orificio de salida, evaluado con el acople para distribución cerrado.	43
Figura 8.5: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión para una falla un collar de derivación corrido un 100 % del diámetro del orificio de salida.	44
Figura 8.6: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla un collar de derivación corrido un 100 % del diámetro del orificio de salida.	44
Figura 8.7: Fuga a través de un collar de derivación corrido sin empaque.	45
Figura 8.8: Detalle del acople del collar de derivación con y sin empaque hermético..	45
Figura 8.9: Curva de ajuste óptimo de caudales en función de la presión para una falla un collar de derivación sin empaque y centrado con el orificio de salida.	46
Figura 8.10: Ajustes del coeficiente global de descarga y el exponente b para una falla un collar de derivación sin empaque y centrado con el orificio de salida.	46
Figura 9.1: Fenómeno de expansión del ancho de la falla longitudinal en función de la presión.	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5-1: Ecuaciones calibradas de los vertederos triangulares de 60°	10
Tabla 6-1: Fallas ensayadas con geometría definida	15
Tabla 6-2: Resultados de la calibración de la ecuación de fugas para orificios	16
Tabla 6-3: Ecuación calibrada para una ranura de 1,225 cm de longitud y 1,0 mm de ancho	19
Tabla 6-4: Ecuación calibrada para una ranura de 3,72 cm de longitud y 1,0 mm de ancho	20
Tabla 6-5: Ecuación calibrada para una ranura de 6,0 cm de longitud y 1,0 mm de ancho	22
Tabla 6-6: Resultados de la calibración de ranuras longitudinales con dimensiones controladas. (Ancho de 1,0 mm).....	23
Tabla 7-1: Características de las tuberías de PVC ensayadas con fallas longitudinales reales	25
Tabla 7-2: Resultados de la calibración en pruebas de fallas longitudinales reales	27
Tabla 7-3: Resultados de la calibración en pruebas de fallas longitudinales reales para $b = 1.678 \left(\frac{L}{d} \right)^{0.03}$	35
Tabla 7-4: Resultados de la calibración en pruebas de fallas longitudinales reales para $b = 1.70$	36
Tabla 7-5: Expresión para el coeficiente global de descarga en función de la longitud de la falla de acuerdo con el criterio 2 para el exponente b	37
Tabla 7-6: Expresión para el coeficiente global de descarga en función de la longitud de la falla con el criterio 2 para el exponente b , manteniendo constante el exponente $n = 2.65$	38
Tabla 7-7: Expresión para el coeficiente global de descarga en función de la longitud de la falla de acuerdo con el criterio 3 para el exponente b	38
Tabla 7-8: Expresión para el coeficiente global de descarga en función de la longitud de la falla con criterio 3 para el exponente b , manteniendo constante el exponente $n = 2.70$	39
Tabla 8-1: Fallas evaluadas en conexiones domiciliarias	41
Tabla 9-1: Resultados del análisis de la ecuación general calibrada [7-12] con respecto a los datos experimentales medidos.	48
Tabla 9-2: Resultados del análisis de la ecuación general calibrada [7-12] con respecto a los datos experimentales medidos.	49

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 parámetros de fuga en orificios
- Anexo 4: Calibración de parámetros de fuga en ranuras de ancho 1,0 mm
- Anexo 5: Calibración tipo I de parámetros de fuga c y b en fallas longitudinales reales
- Anexo 6: Calibración tipo II de los parámetros m y n para el coeficiente global de descarga c
- Anexo 7: Calibración tipo II del parámetro b para los tres criterios de análisis.
- Anexo 8: Calibración tipo III de los coeficientes globales de descarga para cada prueba utilizando los criterios 2 y 3 del exponente b .
- Anexo 9: Calibración tipo IV del parámetro m del coeficiente de descarga a partir de la calibración tipo III.
- Anexo 10: Calibración tipo V de los parámetros p y q del coeficiente m con los criterios 2 y 3 del exponente b
- Anexo 11: Análisis de resultados de las fallas longitudinales reales
- Anexo 12: Calibración de las ecuaciones de fuga de las conexiones domiciliarias

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis padres y hermanos por su apoyo incondicional y en especial por todos aquellos atardeceres que compartimos y seguiremos compartiendo en familia.

Gracias al profesor Juan Saldarriaga, por su orientación, confianza y motivación permanente.

Gracias al Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) y a PAVCO, por haberme dado la oportunidad de financiar mis estudios de Magíster a través de la Cátedra PAVCO.

Gracias a todos mis amigos del CIACUA, por su amistad, por su colaboración y por esas eternas trasnochadas estudiando y trabajando.

Gracias a Dios.