

# Calibración de parámetros de fugas en fallas longitudinales en tuberías de PVC

Humberto Ávila\*, Juan Saldarriaga\*\*

---

## Resumen

*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. 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 variables conocidas en la práctica como el diámetro y longitudes características de cada falla.*

**Palabras claves:** Fugas, coeficiente de descarga, fallas en tuberías, presión.

## Abstract

*In general, the pipes and fittings leaks are analyzed like an orifice leak. Though, each kind of failure have particular characteristic in discharge coefficient and exponent. Besides, although the leak discharge is related with the failure area, many times is not possible calculate this component. Hence, the leak equation must be related with knew variables like diameter and characteristic length of a failure.*

**Key words:** Leaks, discharge coefficient, failure of pipes, pressure.

---

Fecha de recepción: 31 de mayo de 2004  
Fecha de aceptación: 26 de noviembre de 2004

## 1. INTRODUCCIÓN

Por lo general, las fugas en tuberías y accesorios se relacionan con la hidráulica de los orificios. Sin embargo, cada tipo de falla presenta características particulares en cuanto al exponente y al coeficiente de descarga y no necesi-

---

\* Ingeniero civil, Esp. Hidráulica de Ríos y Costas, Magíster en Ingeniería de Recursos Hídricos. Profesor e investigador del Grupo de Investigación en Tecnologías del Agua –GTA– Universidad del Norte. [havila@uinorte.edu.co](mailto:havila@uinorte.edu.co)

\*\* Ingeniero civil. MSc. Recursos Hídrico., Profesor y director del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA– Universidad de los Andes.

riamente son los mismos parámetros que presenta la ecuación de un orificio en un embalse.

En este artículo se presentan los resultados de una investigación relacionada con los parámetros de fuga para fallas longitudinales en tuberías plásticas de PVC de 2", 2,5", 3" y 4". Se plantea una ecuación general que relaciona la longitud de la falla, el diámetro de la tubería y la presión en la red, para determinar el caudal de fuga.

## 2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo 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.

## 3. HIDRÁULICA DE FUGAS

La ecuación general que describe la hidráulica de un orificio en un embalse se deduce a partir de la ecuación de Bernoulli, teniendo en cuenta la diferencia de presiones entre el punto más alto del embalse y la salida del orificio. La ecuación general para un orificio se expresa de la siguiente forma:

$$Q = c_d \cdot A \cdot \sqrt{2gH}^{0.5} \quad (1)$$

donde,  $Q$  es el caudal que sale a través del orificio, ( $L^3T^{-1}$ );  $A$  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 ( $L$ ). Las letras  $L$  y  $T$  representan unidades de longitud y tiempo respectivamente.

El coeficiente de descarga,  $c_d$ , depende de la relación entre la velocidad real  $V_r$  y teórica  $V_t$  del chorro, así como también de la relación entre el área del orificio  $A_o$  y el área del chorro  $A_{ch}$ . Luego el coeficiente de descarga,  $c_d$ , viene dado como

$$c_d = c_c \cdot c_v \quad (2)$$

Para el caso general de fugas en tuberías a presión, tanto el coeficiente de descarga como el exponente requieren ser calibrados. Por lo tanto, la ecuación (1) se simplifica de la siguiente forma:

$$Q = c \cdot P^b \quad (3)$$

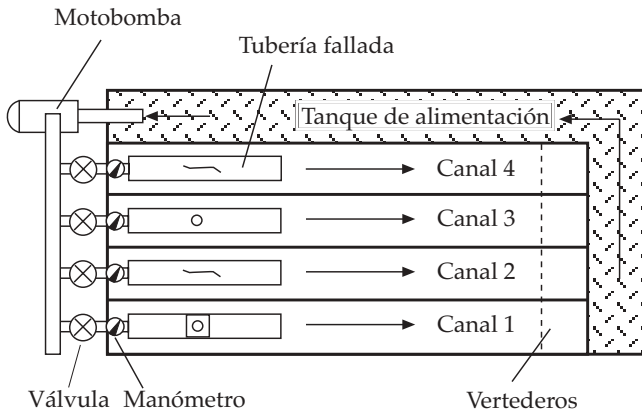
donde  $c$  = coeficiente global de descarga;  $P$  = presión en metros de agua.

La ecuación (3) es el punto de partida para la calibración de los parámetros  $c$  y  $b$ , buscando una dependencia con variables conocidas como una longitud característica de la falla y las características de la tubería. Las unidades utilizadas son: Caudal en mililitros, longitud de la falla, presión y diámetro en metros.

#### 4. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE

El montaje para la elaboración de las pruebas es un circuito cerrado compuesto por un tanque de almacenamiento de agua, una motobomba, un sistema de alimentación, cuatro canales de prueba y los instrumentos de medición de caudal y presión. En cada una de las entradas a los canales se instaló una válvula para el control de la presión, un manómetro para la medición de la presión. Cada canal posee un vertedero triangular de  $60^\circ$  de cresta delgada con su limnómetro para la medición del caudal. Todo el sistema está alimentado por una motobomba con capacidad de  $6,0 \text{ L/s}$  y  $56 \text{ m}$  de cabeza dinámica.

En la figura 1 se ilustra un esquema del montaje para las pruebas, donde se ubican cada uno de los componentes del modelo. Adicionalmente, se describe el sentido del flujo del agua por medio de flechas. Los vertederos triangulares de cresta delgada de  $60^\circ$  se esquematizan con una línea punteada para describir su ubicación.



**Figura 1.** Esquema del montaje para pruebas de fugas

El procedimiento experimental consiste primero en la generación de la falla en una tubería de diámetro específico. Luego la tubería se adapta a una de las alimentaciones de agua en cada canal. Posteriormente, la tubería se somete a presión mediante la motobomba, y se mide la presión del agua con un manómetro localizado inmediatamente aguas arriba de la falla y el caudal con el vertedero triangular. La válvula localizada aguas arriba del manómetro permite variar y controlar la presión. Cada par de medidas presión - caudal, en una falla específica, constituye un punto de la curva de presión - caudal, con la cual se calibrarán los parámetros que logren el mejor ajuste para la ecuación (3).

## 5. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

El procedimiento de calibración consiste inicialmente en la determinación de los parámetros  $c$  y  $b$  de la ecuación (3) para cada una de las pruebas realizadas, mediante simulaciones de Monte-Carlo. Esta calibración inicial se realizó para las fallas longitudinales y se denomina Calibración tipo I.

Posteriormente, para las fallas longitudinales, se realizó una calibración exhaustiva para relacionar los parámetros  $c$  y  $b$  con variables conocidas como el diámetro y la longitud de la falla. Para este procedimiento se empleó la siguiente secuencia de calibración:

- Calibración tipo II: Determinación de un coeficiente global de descarga  $c$ , en función de la longitud de la falla  $L$  únicamente. También se realizó la calibración del exponente  $b$ , en función de la longitud y del diámetro, utilizando dos criterios. La ecuación que se va a calibrar es la siguiente:

$$c = m \cdot L^n \quad (4)$$

donde,  $c$  = coeficiente global de descarga;  $m$  y  $n$  = parámetros que se va a calibrar.

Para el exponente  $b$  se utilizaron dos criterios de calibración:

$$b = a \cdot L^j \quad (5)$$

$$b = x \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^y \quad (6)$$

donde,  $a$ ,  $j$ ,  $x$  y  $y$  son parámetros que se va a calibrar. La ecuación 5 corresponde al criterio 1 y la ecuación 6 al criterio 2.

- Calibración tipo III: Determinación de los coeficientes globales de descarga, manteniendo los exponentes con los criterios 2 y un valor constante calculado a partir de los datos experimentales.
- Calibración tipo IV: Determinación de la dependencia de los coeficientes de descarga en función de la longitud para cada diámetro analizado.
- Calibración tipo V: Determinación de la dependencia del coeficiente global de descarga con el diámetro de la tubería.

## 6. PRUEBAS REALIZADAS

Las pruebas para fallas longitudinales, que se especifican en la tabla 1:

**Tabla 1**  
Características de las tuberías de PVC ensayadas con fallas longitudinales reales

Diámetro		RDE*	Espesor de pared (mm)
mm	pulgadas		
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

\*RDE: Relación diámetro - espesor.

## 7. CALIBRACIÓN TIPO I

En esta calibración tipo I se determinaron los parámetros de fuga  $c$  y  $b$  de la ecuación (3), mediante simulaciones de Monte-Carlo. Estos parámetros son el punto de partida para la determinación de dependencias con respecto a variables conocidas, como el diámetro de la tubería y una longitud característica de la falla evaluada. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2. Los caudales están expresados en mililitros y la presión en metros.

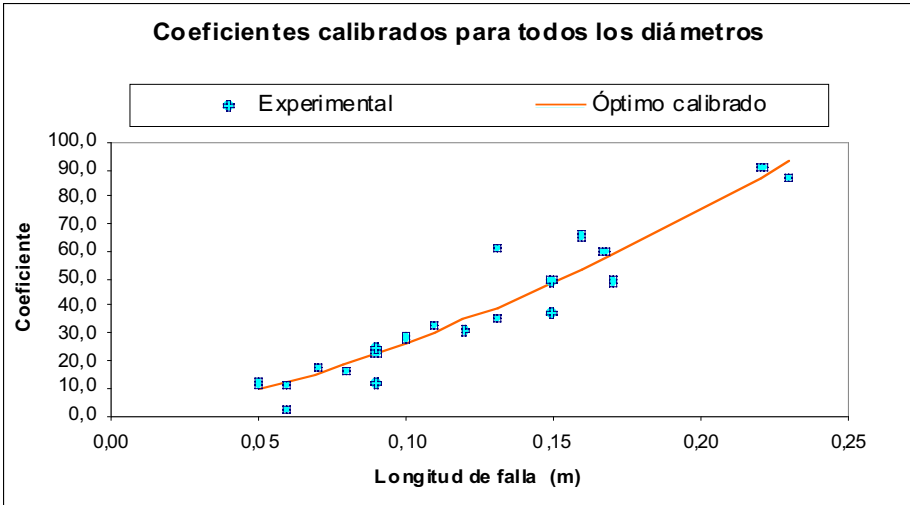
**Tabla 2**  
Resultados de la calibración en pruebas de fallas longitudinales reales

Diámetro (mm)	Longitud de la falla (mm)	Ecuación	R <sup>2</sup>
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	$Q = 86.80 \cdot P^{1.01}$	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

Para las fallas longitudinales se realizó una deducción total del exponente y el coeficiente global de descarga en función del diámetro y la longitud de la falla. Esta deducción se muestra en las siguientes calibraciones.

## 8. CALIBRACIÓN TIPO II

En esta calibración se agruparon todos los coeficientes de la tabla 2, sin discriminar los diámetros. En la figura 2 se muestra la curva calibrada para el coeficiente global de descarga.



**Figura 2.** Calibración de los coeficientes de descarga en función de la longitud de la falla  $L$  sin discriminar diámetros.

La ecuación obtenida para la curva calibrada es:

$$c = 875 \cdot L^{1.53} \quad (7)$$

De igual manera, se agruparon los exponentes y se calibraron los dos primeros criterios. Las curvas calibradas se muestran en la figura 3.

Para el criterio 1, mostrado en la figura 3, se obtuvo la siguiente ecuación:

$$c = 2.53 \cdot L^{0.18} \quad (8)$$

Para la calibración del exponente con el criterio 2 se obtuvo la siguiente ecuación:

$$b = 1.678 \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{0.03} \quad (9)$$

La curva obtenida para el criterio 2 se muestra en la figura 4.

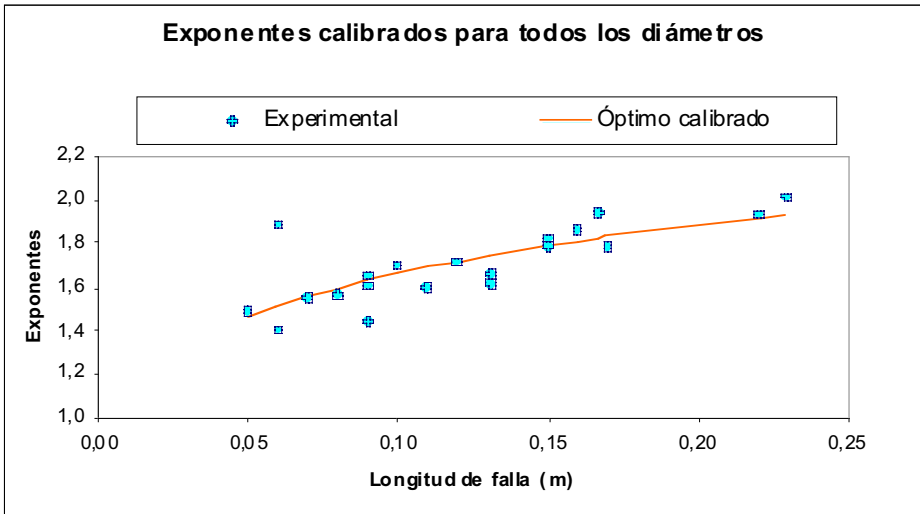


Figura 3. Calibración de los exponentes mediante el criterio 1.

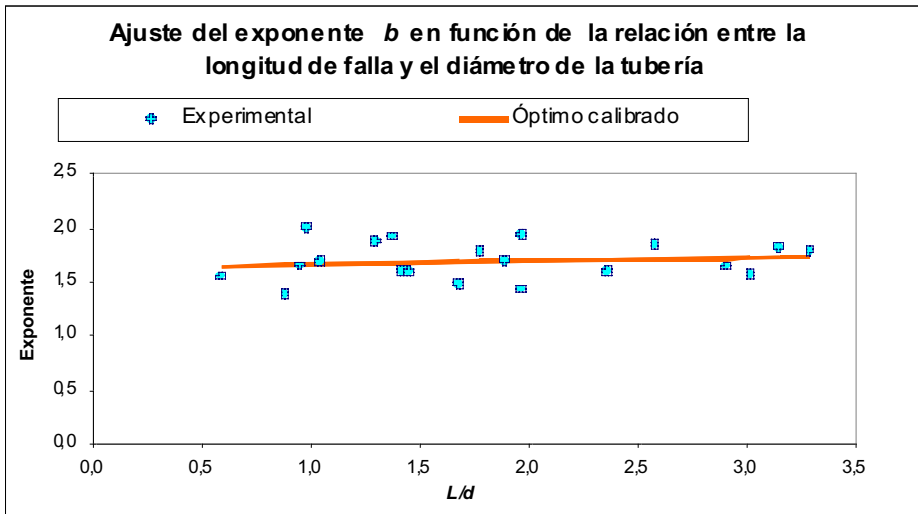


Figura 4. Calibración del exponente mediante el criterio 2.

De la calibración del exponente  $b$  con el criterio 2 se determinó un criterio 3, donde

$$b=1.70 \quad (10)$$



La primera aproximación a una ecuación general para las fugas en fallas longitudinales está expresada como

$$Q = 875L^{1.53}P^b \quad (11)$$

donde  $b$  puede tomarse como cualquiera de los tres criterios calibrados de las ecuaciones (8), (9) y (10). El caudal está expresado en mililitros, la longitud en metros y la presión en metros.

Esta primera aproximación a la ecuación general para fugas en fallas longitudinales no logra explicar bien el comportamiento de las fugas al relacionarla con los datos experimentales. Esto se debe a que no se tuvo en cuenta el efecto que tiene el espesor de la tubería, el cual al incrementarse dificulta el aumento del área de la falla en función de la presión. Entonces, se relacionará el coeficiente con los diámetros de cada tubería, pues se está manteniendo constante el  $RDE$  para todas las tuberías ensayadas.

## 9. CALIBRACIÓN TIPO III

En esta calibración se determinarán nuevamente los valores de los coeficientes de descarga para cada uno de los diámetros, como se realizó en la calibración tipo I, pero utilizando los criterios 2 y 3 de los exponentes  $b$ . Estos resultados serán los datos de entrada para la calibración de un parámetro  $m$  que permita visualizar el efecto que tiene el diámetro sobre el coeficiente de descarga.

## 10. CALIBRACIÓN TIPO IV

En la calibración tipo IV se determinó el parámetro  $m$  de la ecuación (4), manteniendo el parámetro  $n = 2.65$  para el criterio 2 del exponente y  $n = 2.70$  para el criterio 3 del exponente. La selección de los valores de  $n$  para cada criterio del exponente se obtuvieron del análisis de todos los valores de  $n$  durante la parte inicial de la calibración IV. A partir de las calibraciones realizadas para cada diámetro se obtuvieron las ecuaciones presentadas en las tabla 3 y 4.

**Tabla 3**

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 <sup>2</sup>
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

**Tabla 4**

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)	Ecuación	R <sup>2</sup>
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

En las tablas anteriores se puede observar la tendencia decreciente del coeficiente  $m$ , en función del diámetro. Esto permite concluir que el espesor de la tubería tiene un efecto importante en cuanto a la dificultad de aumentar el ancho de la falla al aumentar la presión para tuberías de diámetros mayores al mantener un  $RDE$  constante.

## 11. CALIBRACIÓN TIPO V

La calibración tipo V determina la dependencia del parámetro  $m$  en función del diámetro. Esta calibración se realiza mediante la siguiente expresión:

$$m = p \cdot d^q \quad (12)$$

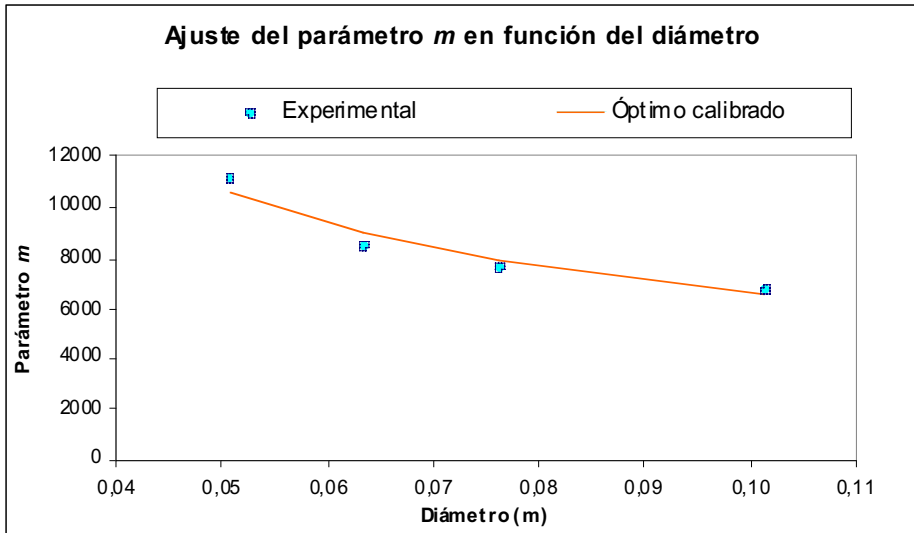
donde  $p$  y  $q$  = parámetros que se va a calibrar.

Para los criterios 2 y 3 se obtuvo las siguientes expresiones:

$$\text{Criterio 2: } m = 1300 d^{-0.70} \quad (13)$$

$$\text{Criterio 3: } m = 850 d^{-0.90} \quad (14)$$

La curva calibrada de  $m$  para el criterio 2 se muestra en la figura 5.



**Figura 5.** Calibración del parámetro  $m$  con el criterio 2 del exponente. Datos de la tabla 5.

Finalmente, teniendo todos los parámetros calibrados, se obtienen dos ecuaciones que describen el comportamiento hidráulico de las fallas longitudinales. Estas ecuaciones son:

$$Q = 1300 \cdot d^{-0.7} L^{2.65} P \left( 1.678 \left( \frac{L}{d} \right)^{0.03} \right) \quad (15)$$

$$Q = 850 \cdot d^{-0.9} \cdot L^{2.70} \cdot P^{1.70} \quad (16)$$

Se puede utilizar cualquiera de las dos ecuaciones anteriores para calcular el caudal de fuga a través de una falla longitudinal. Sin embargo, la ecuación (15) tiene un mejor ajuste global con los datos experimentales medidos de  $R_ = 0.91$ . La ecuación (16) tiene un grado de ajuste menor de  $R_ = 0.88$ , pero tiene la ventaja de una ecuación más sencilla. El diámetro se expresa en metros.

Los ajustes entre la ecuación (15) y los datos experimentales se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5**

Resultados del análisis de la ecuación general calibrada (15) con respecto a los datos experimentales medidos

Diámetro de la tubería (mm)	Longitud de la falla (m)	R <sup>2</sup>
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

## CONCLUSIONES

Las fallas reales en las redes de distribución tienen un comportamiento totalmente diferente a la hidráulica de un orificio en un embalse. Los exponentes obtenidos para las fallas longitudinales varían entre 1.5 y 1.8.

Las características plásticas de las tuberías de PVC introducen una dependencia del área de la falla en función del diámetro o el espesor de la tubería, la presión y la geometría de la falla misma.

Al incrementar el diámetro de la tubería, con un *RDE* constante, el caudal de fuga disminuye debido a que el espesor de la pared de la tubería es mayor, lo cual dificulta el aumento del ancho de la falla en función de la presión.

Teniendo en cuenta que las fallas se evaluaron bajo la hipótesis de un consumo de agua nulo, la ecuación rige para el comportamiento en horas de bajo consumo, cuando las presiones en el sistema son altas.

El comportamiento hidráulico de las fallas en tuberías de agua potable es un horizonte que debe ser explorado para tener un conocimiento más claro de la hidráulica de las redes bajo ambiente de fugas.

### Referencias

- STREETER, V., WYLIE, B. & KERTH, B. (1984). *Fluid Mechanics*, 9<sup>a</sup> ed. McGraw–Hill.
- LEES, M. & THORSTEN, W. (2000). Monte-Carlo Análisis (MCA) v.2. Department of Civil Engineering - Imperial Collage.
- STREET, R., WATTERS, G., VENNARD, J. (2000). *Elementary fluid Mechanics*, 7<sup>a</sup> ed. John Wiley and Sons.
- TRUEBA, S. (1979). *Hidráulica*. Compañía editorial continental.
- MAKAR, J.M. (2001). Investigating large gray cast iron pipe failures: a step by step approach. National research council Canada.
- SALDARRIAGA, J. (1998). *Hidráulica de Tuberías*. McGraw–Hill.
- LARRY, M. & KOUNG, Y. (1992). *Engineering Management*. McGraw–Hill.