

# PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN LA CONDUCCIÓN DE AGUA CON CONTENIDO DE SÓLIDOS

Luis Alfonso Ortiz Nuñez y Rafael Carmona Paredes\*

## Resumen

El cálculo de las pérdidas de energía en conducciones que transportan fluidos con cierto contenido de partículas es un factor importante para el diseño y operación de sistemas de transporte de agua no potable, y de lodos en los diferentes procesos en una planta de tratamiento de aguas residuales. Las metodologías existentes, como las presentadas en distintos manuales, libros y revistas, tienen ciertas desventajas típicas relativas a la incertidumbre en la selección de los coeficientes de fricción en la etapa de diseño, por lo que durante la operación los equipos de bombeo seleccionados en ocasiones resultan insuficientes -o exagerado-. Por tanto, conviene buscar un procedimiento que permita una adecuada estimación del coeficiente de fricción. Esto se ha logrado mediante la utilización de técnicas de análisis dimensional y ajustes numéricos realizados a distintas mediciones hechas en instalaciones para la conducción de lodos. La metodología aquí presentada debe ser considerada simultáneamente con otros parámetros de diseño basados en desarrollos teóricos y experimentales.

Algunas de las principales ventajas de la estimación del coeficiente de pérdidas mediante la metodología aquí descrita son: cálculo relativamente sencillo y rápido, expresiones numéricas que hacen más expedita la implementación de algoritmos de cálculo y la posibilidad de estimar los coeficientes de pérdidas para fluidos con concentración de sólidos totales entre el 1 y 10%, con alto grado de precisión. Una comparación de resultados teóricos con medidas de campo muestran que la metodología es adecuada para explicar los incrementos de pérdidas de energía medidas en el acueducto Chapala-Guadalajara en México.

**Palabras clave:** conducción, pérdida de energía, coeficiente de fricción.

## Introducción

La pérdida de carga que se produce en la conducción de un fluido con cierto contenido de sólidos en suspensión (FCCSS) depende de las propiedades del fluido y de las características del flujo y de la conducción. Se ha observado que las pérdidas de carga aumentan con el contenido de sólidos, con la mayor presencia de materia volátil y con la disminución de la temperatura. El transporte de FCCSS puede presentar dificultades cuando el porcentaje de materia orgánica multiplicado por el porcentaje de sólidos es superior a 600 (Metcalf y Eddy, 1991).

El agua, el aceite y la mayoría de los fluidos son newtonianos, lo cual quiere decir que en condiciones de flujo laminar la pérdida de carga es proporcional a la velocidad y a la viscosidad cinemática ( $\nu$ ). Conforme la velocidad aumenta y sobrepasa cierto valor crítico, el flujo pasa a ser turbulento. Los FCCSS tienen un comportamiento similar al del agua clara, sin embargo, en algunas ocasiones

(Turian et al., 1998) se comportan como si fuesen no newtonianos -es decir que para éstos, el esfuerzo cortante viscoso no varía conforme la ley de Newton prevista-. Para los fluidos no newtonianos existen diferentes procedimientos para la estimación del coeficiente de pérdida por fricción. En este trabajo se analiza tanto el método basado en consideraciones de tipo reológico, como otro alterno, presentado en Sanks. et al. (1998) y utilizado para elaborar el procedimiento denominado *Ingenieril*.

Las pérdidas de carga que se producen en las conducciones de FCCSS -lodos crudos- pueden ser del orden del 10 al 25% superiores a las del agua. Los lodos primarios, los digeridos y los concentrados, a bajas velocidades, y aún el agua no potable que proviene de lagos, embalses, acuíferos o fuentes superficiales, pueden experimentar un fenómeno similar al flujo plástico, en el que para vencer la resistencia para iniciar el flujo, es necesario superar una tensión de cedencia dada. A partir de este umbral, y dentro del intervalo de flujo laminar que alcanza ge-

\* Instituto de Ingeniería- UNAM, México. Ciudad Universitaria, Aptdo. Postal 70-472

e-mail: lao@hidros.iingen.unam.mx, rcp@pumas.iingen.unam.mx

Artículo recibido el 18 de febrero de 1999, recibido en formas revisadas el 27 de julio de 1999 y el 1 de octubre de 1999 y aceptado para su publicación el 22 de octubre de 1999. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

neralmente los 1.1 m/s (mínima velocidad crítica), la resistencia aumenta con la primera potencia de la velocidad. Por encima de la máxima velocidad crítica, correspondiente a 1.4 m/s, el régimen de flujo se puede considerar turbulento. En el intervalo de flujo turbulento, las pérdidas de carga en el transporte de FCCSS pueden ser de 2 a 3 veces las experimentadas por el agua o incluso superiores (Metcalf y Eddy, 1991; Ortiz y Sánchez, 1998).

### Aplicación de propiedades reológicas al cálculo de las pérdidas de carga

Para el bombeo de FCCSS a largas distancias, se ha desarrollado un método de cálculo de la pérdida de carga basado en las propiedades de los FCCSS. Con anterioridad, se desarrolló un método de cálculo de las pérdidas de carga en régimen laminar basado en los resultados de estudios teóricos y experimentales (Babbitt y Caldwell, 1939). También, se han presentado otros estudios en las referencias bibliográficas (Mulbarger et al., 1991 y Sanks et al., 1998). Carthew et al. (1983) analizaron el bombeo de mezclas de lodos primarios y secundarios crudos a largas distancias. A continuación se analiza el enfoque en el que se basan estos estudios para el régimen de flujo turbulento y que resultan básicos para el estudio de conducciones de gran longitud. Para regímenes de flujo laminar y de transición se recomiendan los procedimientos de cálculo incluidos en Sanks et al. (1998).

Se ha observado que los FCCSS en ocasiones tienen comportamientos como los de plásticos de Bingham, para los que se establece una relación lineal entre la velocidad de flujo y las tensiones tangenciales, una vez iniciado el flujo. Un plástico de Bingham queda definido por el valor de dos constantes: (1) el esfuerzo de cedencia,  $S_y$ , y (2) el coeficiente de rigidez,  $\eta$ . En las Figuras 1 y 2 se muestran los valores típicos de ambos coeficientes (Mulbarger et al., 1991), los cuales presentan amplios intervalos de variación (las líneas discontinuas indican los límites superiores e inferiores), introduciendo errores asociados a la interpretación misma de estas gráficas. En este trabajo se obtuvieron tendencias medias -ecuaciones (1) y (2) y líneas continuas de las Figuras 1 y 2-, con el objeto de proporcionar una ayuda numérica adicional.

$$S_y = 16.440503 * 0.0069430673^{1/ST_{\%}} \quad (1)$$

$$\eta = 0.0018471781 * ST_{\%}^{1.5647212} \quad (2)$$

donde  $S_y$  es el esfuerzo de cedencia en  $N/m^2$ ,  $\eta$  es el coeficiente de rigidez en  $kg/(m.s)$  y  $ST_{\%}$  es el porcentaje de sólidos totales.

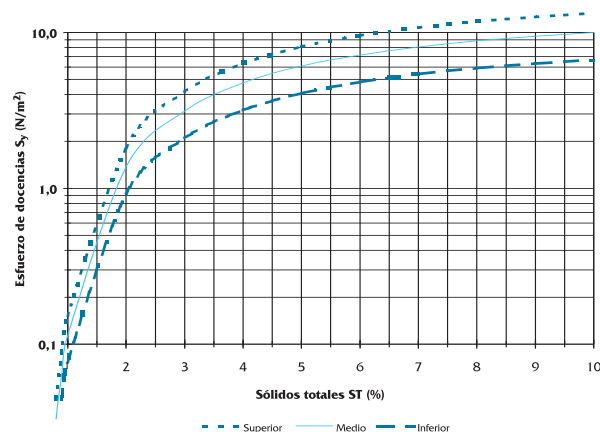


Figura 1: Esfuerzo de cedencia respecto al porcentaje de sólidos totales.

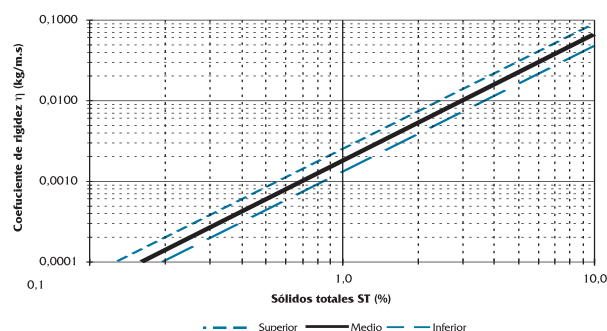


Figura 2: Coeficiente de rigidez respecto al porcentaje de sólidos totales.

Vale la pena aclarar que las Figuras 1 y 2, así como (1) y (2), solamente son válidas para flujos de agua con concentraciones de sólidos totales entre 0.1 y 10%, dado que provienen de datos experimentales obtenidos únicamente para este rango.

Para determinar la pérdida de carga debida a la fricción experimentada por FCCSS, se pueden emplear dos números adimensionales: el número de Reynolds ( $Re^*$ ) y el número de Hedstrom ( $He$ ). El número de Reynolds se debe calcular mediante la ecuación (3):

$$Re^* = \frac{\rho V D}{\eta} \quad (3)$$

donde  $Re^*$  es el número de Reynolds, es la densidad del FCCSS en  $kg/m^3$ ,  $V$  es la velocidad media del flujo en  $m/s$ ,  $D$  es el diámetro de la tubería en  $m$  y  $\eta$  es el coeficiente de rigidez en  $kg/(m.s)$ . El número de Hedstrom se calcula mediante la siguiente expresión:

$$He = \frac{D^2 S_y \rho}{\eta^2} \quad (4)$$

Utilizando los valores del número de Reynolds y del número de Hedstrom ya calculados, se puede determinar el coeficiente de fricción  $f^*$  utilizando un diagrama de  $f^*$  contra  $Re^*$  para distintos valores de  $He$  como el mostrado en Metcalf y Eddy (1991). La pérdida de carga en condiciones de flujo turbulento se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$h_f^* = \left( \frac{f^* L}{D} \right) \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

donde  $h_f^*$  es la caída de presión debida a la fricción en metros columna de FCCSS,  $f^*$  es el coeficiente de fricción (diferente al encontrado en el diagrama de Moody),  $L$  es la longitud de la conducción en metros y  $g$  es la aceleración gravitacional local en  $m/s^2$ .

Es necesario observar que en las ecuaciones (3) a (5), el número de Reynolds no coincide con el obtenido a partir de la viscosidad cinemática ( $\nu$ ). Se debe sustituir la viscosidad -parámetro variable- por el coeficiente de rigidez ( $\eta$ ), por consiguiente, los valores del número de Reynolds pueden ser muy diferentes. El coeficiente de fricción  $f^*$  diferirá notablemente del valor  $f$  para el agua, indicado en los textos de hidráulica. Se debe notar que esta metodología (Metcalf y Eddy, 1991), no tiene en cuenta los efectos debido a las rugosidades de la tubería. Para tener en cuenta la rugosidad interior de la tubería, se compara la pérdida de carga obtenida con (5) y la pérdida de carga para agua, y se toma la mayor de ellas. Así se determina si el fenómeno predominante en la disipación de energía es un efecto de superficie o de cuerpo.

Babbitt y Caldwell (1939) presentan distintas expresiones que tienen en cuenta consideraciones de tipo reológico, recomendando para el cálculo de pérdida de carga en flujos laminares, la ecuación de Bingham:

$$\frac{h_f}{L} = 5.33 \left( \frac{S_y}{D \rho g} \right) + 32 \left( \frac{\eta V}{D^2 \rho g} \right) \quad (6)$$

Mulbarger *et al.* (1991) presentan la siguiente expresión para flujos turbulentos:

$$h_f = G^2 h_{fw} \quad (7)$$

donde  $G$  es el peso específico del FCCSS respecto del agua,  $h_{f0}$  es la pérdida de carga como si se tratase de agua limpia y  $h_f$  es la pérdida de carga en metros columna de FCCSS.

### La presencia de las partículas sólidas como causante de variación en el comportamiento hidráulico

Hacia 1948 -después de la segunda Guerra Mundial- Toms (Levi, 1989), realizó algunas pruebas para estudiar experimentalmente la variación de propiedades reológicas en soluciones poliméricas. Ideó un dispositivo bastante sencillo, denominado aparato de Toms, que consistía de dos recipientes de vidrio conectados por un tubo, también de vidrio, que se llenaba hasta la mitad con dos litros de una solución de cierto polímero (partículas granulares) entonces disponible. Al reducir la presión en una de las vasijas, mientras que en la otra se mantenía la atmosférica, se conseguía un flujo por el tubo con un caudal tanto mayor cuanto mayor era la diferencia de presiones. El ensayo se realizó con distintas concentraciones del polímero y con varias diferencias de presiones. Los diagramas de caudal contra presión, para una misma solución, no revelaron algo especial, inclusive el límite del régimen laminar también se presentaba para números de Reynolds entre 2000 y 4000 -igual que con el agua-. Luego obtuvo familias de curvas de caudal contra concentración del aditivo, para diferencias de presión constantes; y aquí apareció una notable anomalía: con flujo laminar el caudal disminuía, a medida que aumentaba la concentración, como era de esperarse; pero, si el flujo era turbulento, sucedía lo contrario: cuanto más polímero se agregaba al solvente -dentro de ciertos límites y con concentraciones no excesivamente altas- más aumentaba el caudal. Lo más asombroso fue comprobar que existía una región de concentraciones en la cual, bajo condiciones turbulentas, la solución polimérica parecía experimentar en su flujo menos resistencia que la que la del solvente puro.

Posteriormente Oldroyd (Levi, 1989) expresó su opinión a este fenómeno, afirmando que, al fluir la solución debía crearse una pequeña capa de pared, de viscosidad baja -menor que la correspondiente al solvente puro-, y que de este modo se reduciría la resistencia de la pared al movimiento del fluido. Dicha justificación, mencionada en el trabajo de Toms, dio lugar a que al fenómeno se le llamara *reducción de fricción o reducción de arrastre*. Sin embargo, esta teoría implicaba un comportamiento no newtoniano de la solución. Ensayos posteriores comprobaron que el efecto viscoso es algo que tiene, como se sabe, mucha influencia sobre el flujo laminar, pero poca o ninguna sobre el turbulento, que es justamente el régimen en el cual el fenómeno de Toms se manifiesta.

También consideró que siendo las moléculas de los polímeros muy alargadas, su distribución dentro del solvente daría al fluido una rigidización en sentido longitudinal, que facilitaría la disipación de la turbulencia dentro del fluido. Sin embargo, en contra de esta interpretación están dos hechos, el primero, que también puede conseguirse un efecto Toms con aditivos no poliméricos, por ejemplo, materiales finos cualesquiera en suspensión en una corriente de agua o de aire. El segundo, se ha comprobado que no es preciso que el aditivo esté distribuido en el interior de toda la masa fluida, sino que es suficiente con inyectar la solución cerca de la pared del conducto, en una corriente de solvente, para que la reducción de arrastre se manifieste de inmediato; lo cual confirma que se trata de un efecto de frontera. Con lo anterior se plantea la pregunta de

que si este fenómeno se debe a una acción de masa o a una acción de superficie. Al entender mejor el mecanismo de la turbulencia, se ha visto que las fluctuaciones en el seno del fluido tienden a disiparse por fricción viscosa, mientras que la interacción del flujo con la pared las genera continuamente para su difusión en todo el fluido.

Con lo expuesto anteriormente, se puede inferir que si el flujo en las cercanías de la interfaz pared-fluido presenta características diferentes a las del seno del fluido, el comportamiento hidráulico se vería influenciado y se reflejaría en la magnitud de las pérdidas por fricción, que experimenta dicho flujo a través de su recorrido por la conducción.

### Aproximación ingenieril y verificación con datos de campo tomados en el acueducto Chapala-Guadalajara

Para la evaluación de las pérdidas por fricción, en conducciones que transportan fluidos con cierto contenido de sólidos, se deben calcular las pérdidas como si se tratase de agua limpia, y posteriormente multiplicar éstas por el factor de amplificación, que se calcula en función de la velocidad media del flujo y el contenido de sólidos que posee el fluido. El factor se puede obtener de la Tabla 1 o utilizando las expresiones numéricas (8) y (9). Ambas ayudas (tabla y ecuaciones) han sido determinadas por los autores, con base en las gráficas de diseño publicadas por Mulbarger et al. (1991) y Sanks et al. (1998).

Tabla 1. Factores de amplificación de pérdidas, obtenidos mediante el enfoque ingenieril.

V	Factor amplificador de pérdidas "k" en función del porcentaje de sólidos en el agua										
(m/s)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.8	2.0	3.0	4.0	5.0	7.0	10.0
0.3	3.32	5.40	8.13	11.53	31.15	43.82	117.84	187.02	242.00	314.85	368.43
0.4	1.97	3.21	4.84	6.86	18.53	26.06	70.08	111.23	143.93	187.26	219.13
0.5	1.32	2.14	3.23	4.58	12.38	17.42	46.84	74.34	96.19	125.14	146.44
0.6	1.00	1.54	2.32	3.30	8.91	12.53	33.69	53.48	69.20	90.03	105.35
0.7	1.00	1.17	1.76	2.49	6.74	9.48	25.51	40.48	52.38	68.15	79.75
0.8	1.00	1.00	1.38	1.96	5.30	7.45	20.04	31.81	41.16	53.55	62.66
0.9	1.00	1.00	1.12	1.58	4.28	6.02	16.20	25.71	33.27	43.28	50.65
1.1	1.00	1.00	1.00	1.10	2.98	4.19	11.27	17.89	23.15	30.12	35.25
1.2	1.00	1.00	1.00	1.00	2.55	3.58	9.63	15.29	19.79	25.74	30.13
1.4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.93	2.71	7.29	11.58	14.98	19.49	22.80
1.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.70	2.39	6.44	10.22	13.22	17.20	20.13
1.6	1.00	1.00	1.00	1.00	1.51	2.13	5.73	9.10	11.77	15.31	17.92
1.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.36	1.91	5.14	8.15	10.55	13.72	16.06
1.9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.11	1.56	4.20	6.67	8.63	11.23	13.14
2.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.30	3.51	5.57	7.20	9.37	10.96
2.3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.11	2.98	4.72	6.11	7.95	9.30
2.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.56	4.06	5.26	6.84	8.00
2.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.23	3.53	4.57	5.95	6.96
2.9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.96	3.11	4.02	5.23	6.12
3.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.74	2.75	3.56	4.64	5.43
3.3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.55	2.46	3.18	4.14	4.85
3.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.39	2.21	2.86	3.72	4.36
3.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.26	2.00	2.59	3.37	3.94
4.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.30	1.68	2.19	2.56
5.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.19	1.54	1.81
6.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.15	1.35
7.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.05
8.7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

En (8) y (9) se muestran los modelos de interpolación y regresión realizados, con el mínimo de errores en la predicción. El parámetro  $k$  se puede generar mediante una familia de curvas de tipo potencial, tal como se muestra en la ecuación (8-a).

$$k = \alpha V^{-\beta} \quad (8-a)$$

donde  $k$  es el magnificador de las pérdidas en FCCSS y es una constante definida como:

$$\beta = 1.80618 \quad (8-b)$$

El parámetro  $\alpha$  está representado por una curva de tipo exponencial representada mediante la ecuación (9-a).

$$\alpha = \exp\left(a + \frac{b}{ST_{\%}} + c * \ln(ST_{\%})\right) \quad (9-a)$$

donde  $a, b$  y  $c$  se definen en (9-b) como:

$$\begin{aligned} a &= 5.30879620 \\ b &= -6.8728801 \\ c &= -0.3851498 \end{aligned} \quad (9-b)$$

### Descripción del Acueducto Chapala-Guadalajara

La conducción tiene una longitud de 42 km en tubería de concreto preesforzado (Figura 3) de 2.1 m de diámetro interior, con una rugosidad absoluta ( $\epsilon$ ) de 0.5 mm y, a través de mediciones de campo al inicio de su operación y siguiendo la metodología expuesta en Ortiz y Sánchez (1998), se determinó que presenta un coeficiente global de pérdidas ( $f_G$ ) de energía igual a 0.0146. Los primeros 26 km, forman el tramo de bombeo que entrega el agua en un tanque de cambio de régimen (TCR), a partir del cual el agua fluye por gravedad hasta el tanque de entrega (TE), localizado en el extremo sur de la ciudad. En todo su recorrido la conducción está adecuadamente provista con válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA), así como de desagües (Figura 3).

El Acueducto Chapala-Guadalajara (ACH-G) fue diseñado para entregar un caudal de 7.5 m<sup>3</sup>/s a la ciudad de Guadalajara, siendo su fuente de abastecimiento el lago de Chapala. El acueducto cuenta con

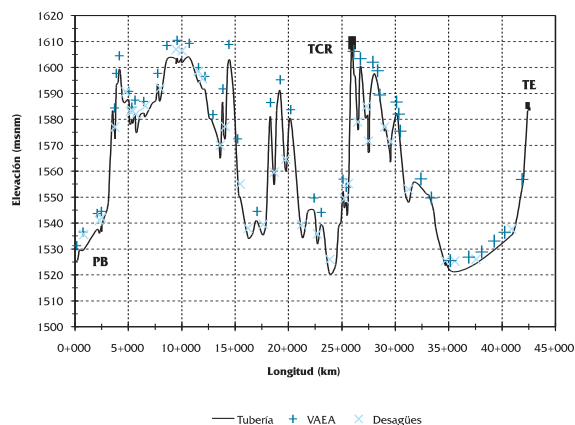


Figura 3: Perfil del Acueducto Chapala-Guadalajara, México

una planta de bombeo (PB) donde se tienen instaladas seis bombas de eje vertical, de las cuales cinco operan continuamente y una permanece como de respaldo, cada una de éstas con capacidad de bombeo de 1.5 m<sup>3</sup>/s para una carga dinámica de 138 m.

### Mediciones y resultados

Tal como se puede observar en la Tabla 2, las mediciones de campo se han realizado de manera periódica durante la presente década: Los aforos se realizaron mediante la utilización de tubos de Pitot localizados en dos secciones, la primera en la descarga de los equipos de bombeo y la otra ubicada a unos 700 m aguas arriba del tanque de entrega. De esta manera se tenía certeza de los caudales transitados por los tramos a presión y a gravedad. Adicionalmente se verificaban los caudales mediante las curvas de las bombas, previa medición con manómetros, de la presión de succión y de descarga de los equipos de bombeo en operación.

Para la determinación del gradiente hidráulico ( $S_p$ ), se instalaron manómetros en gran parte de las VAEA, así como en algunos desfuegos y, adicionalmente, se medían los niveles en los tanques de cambio de régimen (TCR) y de entrega (TE). De esta manera, se garantizaba que la obtención de gradientes, y por ende de los coeficientes de fricción, no estaba afectada por presencia de aire atrapado u obstáculos en el interior de la conducción, hecho que se verificaba numéricamente a través de los altos coeficientes de correlación obtenidos, luego de ajustes numéricos realizados a las mediciones (Carmona y Sánchez, 1996).

Los datos de campo se procesaron de acuerdo con la teoría de propagación de errores y el criterio de Chauvenet aplicables a este tipo de mediciones (Ortiz

Tabla 2. Mediciones de campo en el Acueducto Chapala-Guadalajara.

Fecha (mes/año)	Tramo	Tiempo de operación (meses)	Q (m <sup>3</sup> /s)	V (m/s)	S <sub>f</sub> (m/m)	f <sub>G</sub>	k
09/90	PB-TCR	04	2.750	0.794	0.000224	0.0146	1.00
08/94	TCR-TE	35	5.458	1.576	0.001053	0.0174	1.19
10/94	PB-TCR	53	5.644	1.630	0.001496	0.0232	1.59
	TCR-TE	37	5.481	1.582	0.001078	0.0177	1.21
11/95	PB-TCR	66	5.006	1.445	0.001221	0.0241	1.65
	TCR-TE	50	4.991	1.441	0.001171	0.0230	1.58
04/96	PC-TCR	71	5.933	1.713	0.001761	0.0247	1.69
	TCR-TE	55	5.561	1.606	0.001504	0.0240	1.64
10/96	PB-TCR	77	5.086	1.468	0.001311	0.0250	1.71
			3.771	1.089	0.000879	0.0306	2.10
			1.552	0.448	0.000298	0.0611	4.18
	TCR-TE	61	5.963	1.722	0.001528	0.0212	1.45
			4.924	1.422	0.001211	0.0247	1.69
			4.085	1.179	0.000972	0.0288	1.97
			1.637	0.473	0.000300	0.0553	3.79
01/97	TCR-TE	64	5.835	1.685	0.001498	0.0217	1.49
02/97	TCR-TE	64	5.882	1.698	0.001480	0.0211	1.45
10/98	PB-TCR	91	1.579	0.456	0.000288	0.0571	3.91
			4.046	1.168	0.001049	0.0317	2.17

y Sánchez, 1998). En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos, en ésta,  $k$  representa la relación entre los coeficientes globales de pérdidas de energía ( $f_G$ ) medidos, respecto del coeficiente teórico del acueducto (correspondiente al medido en el año 1990, fecha en que comienza a operar la conducción).

### Análisis de resultados

En la Figura 4, se muestra la representación gráfica de la Tabla 1. En ésta se ubican los valores de  $k$  obtenidos con datos de campo medidos en el ACH-G durante la presente década. Tal como afirman Kaftori *et al.* (1998), Turian *et al.* (1998) y Wilson y Addie (1997), las partículas sólidas conducidas en flujos inciden notablemente sobre el mecanismo de pérdidas de energía generada en la cercanía de las paredes interiores de los conductos a presión, hecho que se verifica en el presente trabajo.

En las Figuras 5 y 6 se puede apreciar la evidencia de que en el ACH-G se presenta efecto de migración, que altera la rugosidad de la tubería y simultáneamente, antes de depositarse, produce alteraciones en la concentración de sólidos en la interfaz pared-fluido.

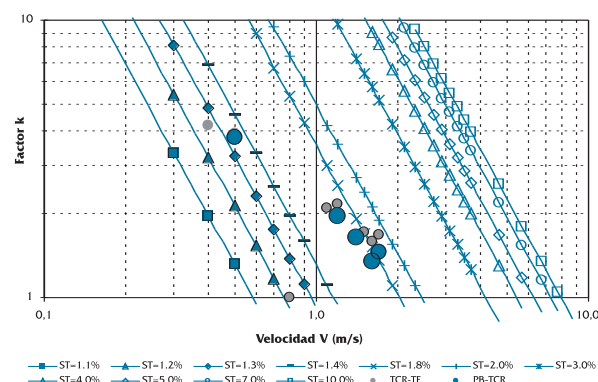


Figura 4: Verificación de la influencia del contenido de sólidos en el mecanismo de pérdidas de energía, datos de campo obtenidos en el Acueducto Chapala-Guadalajara, México.

De acuerdo con la información aquí presentada y teniendo en cuenta que Zandi (1971), basado en estudios experimentales, afirma que en flujo turbulento de agua con contenido de partículas, éstas pueden presentar migración radial en una región cercana a las paredes interiores del conducto, produciendo concentraciones locales de sólidos mayores a las encontradas en el seno del fluido; en este trabajo se verificó de manera indirecta que dichas concentraciones locales son del orden del 1.8% pa-

ra el caso de la conducción principal del Acueducto Chapala-Guadalajara.

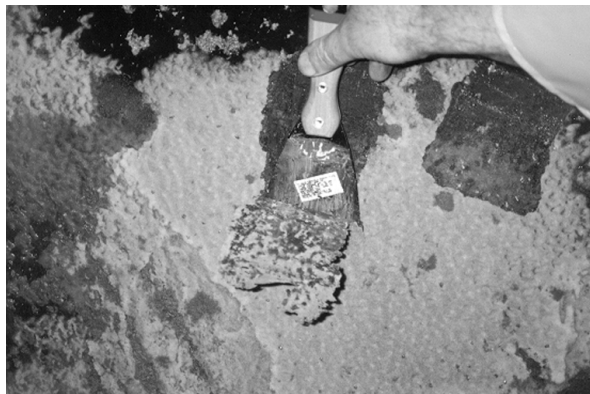


Figura 5: Material que migra y se deposita en las paredes interiores del ACH-G, México.

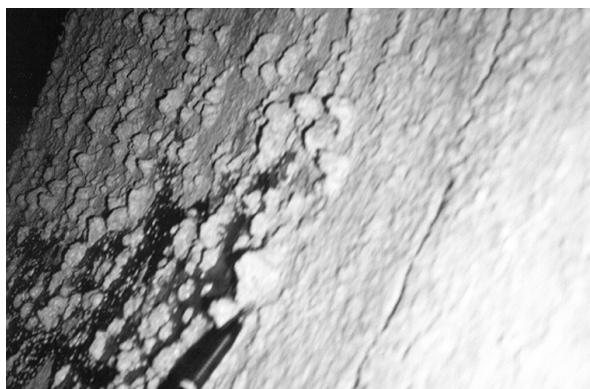


Figura 6: Detalle del material sólido (orgánico e inorgánico) que altera la interfaz líquido-sólido en la conducción del ACH-G, México.

## Conclusiones

La metodología que se propone para calcular las pérdidas por fricción en conducciones que transportan un fluido con cierto contenido de sólidos, ofrece las siguientes ventajas con respecto a los otros métodos analizados:

- En otros métodos la ayuda se presenta en gráficas, la metodología aquí desarrollada, proporciona expresiones numéricas de fácil evaluación.
- En Sanks et al. (1998) se muestran curvas de diseño para inferir el comportamiento de las pérdidas en fluidos con diferentes concentraciones de sólidos, en las cuales es muy difícil la lectura para concentraciones de sólidos totales comprendidas entre 5 y 10%. Este no ocurrirá al utilizar las expresiones numéricas aquí desarrolladas y comprobadas mediante datos de campo.

La aplicación del procedimiento desarrollado

en este trabajo está limitada a fluidos con contenido de sólidos, en los cuales se presentan concentraciones de sólidos totales comprendidos entre 1 y 10%, ya sea en todo el fluido o en la interfaz pared-fluido, dado que éste fue el rango de las mediciones con las cuales se disponía.

A partir de las mediciones de campo realizadas en el Acueducto Chapala-Guadalajara, y su posterior análisis mediante la metodología aquí expuesta (enfoque ingenieril), se puede afirmar que en la interfaz pared-fluido, a lo largo de la conducción principal, se ha presentado una migración radial de material, que antes de depositarse conforma concentraciones de hasta 1.8% de contenido de sólidos, produciendo una disminución en la capacidad de conducción del acueducto.

Es necesario tener cuidado con la aplicación del procedimiento expuesto, pues los problemas de alta resistencia al flujo pueden no presentarse de manera inmediata, sino después de algunos meses de operación, durante los cuales parte del material arrastrado por el flujo se deposita uniformemente sobre las paredes interiores de las tuberías, por la acción combinada de actividades físico-químicas, microbiológicas e hidrodinámicas, llevando a una distribución de concentraciones que favorece el aumento de disipación de energía por incremento de esfuerzos cortantes.

Adicionalmente, con lo expuesto anteriormente se puede inferir que si el flujo en las cercanías de la interfaz pared-fluido presenta características diferentes a las del seno del fluido, el comportamiento hidráulico se ve influenciado y se refleja en la magnitud de las pérdidas por fricción.

## Agradecimientos

Los autores manifiestan el más sincero agradecimiento al personal de la coordinación de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos (Grupo de Hidromecánica) del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, que suministró la información de campo con la cual se elaboró el presente trabajo.

## Lista de símbolos

FCCSS	fluido con cierto contenido de sólidos en suspensión
$S\gamma$	esfuerzo de cedencia
$\eta$	coeficiente de rigidez

$ST_{\%}$	porcentaje de sólidos totales
$Re^*$	número de Reynolds
$He$	número de Hedstrom
$V$	velocidad media del flujo
$D$	diámetro de la tubería
$\rho$	densidad del FCCSS
$h_f^*$	caída de presión debida a la fricción en un FCCSS
$f^*$	coeficiente de fricción
$L$	longitud de la conducción
$g$	aceleración gravitacional local
$G$	peso específico del FCCSS respecto del agua
$h_{f_w}$	pérdida de carga como si se tratase de agua limpia
$\varepsilon$	rugosidad absoluta
$k$	factor amplificador de pérdidas
$\beta$	parámetro numérico
$\alpha$	constante
$\nu$	viscosidad cinemática
$a, b, y c$	constantes
$S_f$	gradiente hidráulico
$TCR$	tanque de cambio de régimen
$TE$	tanque de entrega
$VAEA$	válvula de admisión y expulsión de aire
$f_G$	coeficiente global de pérdida de energía
$Q$	caudal

## Referencias

- Babbitt, H. E. y Caldwell, D. H. (1939). Laminar flow of sludge in pipes with special reference to sewage sludge University of Illinois Engineering Experiment Station Bulletin, N° 319.
- Carmona, R. y Sánchez, A. (1996). Incremento de pérdida de carga en acueductos: información de campo de dos acueductos, IAHR, XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, vol. 5, pp. 267-278.
- Carthew, G. A., Goehring, C. A. y Van Teylingen, J. E. (1983). Development of dynamic head loss criteria of raw sludge pumping, Journal of Water Pollution Control Federation, vol. 55, N° 5.
- Kaftori, D., Hetsron, G. y Banerjee, S. (1998). The effect of particles on wall turbulence, International Journal of Multiphase Flow, vol. 24, N°3, pp. 359-386.
- Levi, E. (1989). El agua según la ciencia, Ediciones Castell-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México.
- Metcalf, L. y Eddy, H. P. (1991). Wastewater engineering, treatment disposal and reuse, McGraw Hill, Inc, Singapore, 3th Ed.
- Mulbarguer, M. C., Copas, S. R., Kordic, J. R. y Cash, F. M. (1991). Pipe friction losses for wastewater sludges, Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 51, N° 8, pp.1303-1313.
- Ortiz, L. A. y Sánchez, A. (1998). Determinación de los coeficientes globales de pérdidas de energía en el Sistema Cutzamala, IAHR, XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, vol. 2, pp. 687-696.
- Sanks, R., Tchobanoglous, G., Newton, D., Bosserman, B. E. y Jones, G. M. (eds). (1998). Pumping station design, Butterworths, Stoneham, USA.
- Turian, R. M., Ma, T. W., Hsu, F. L. y Sung, D. J.. (1998) Flow of concentrated non-newtonian slurries: 1. Friction losses in laminar, turbulent and transition flow through straight pipe, International Journal of Multiphase Flow, vol. 24, N° 2, pp. 225-242.
- Turian, R. M., Ma, T. W., Hsu, F. L. y Sung, D. J. (1998). Flow of concentrated non-newtonian slurries: 2. Friction losses in bends, fittings, valves and Venturi meters, International Journal of Multiphase Flow, vol. 24, N° 2, pp. 243-269.
- Wilson, K. y Addie, G. (1997). Coarse-particle pipeline transport: effect of particle degradation on friction, Powder Technology, vol. 94, N° 3, pp. 235-238.
- Zandi, I. (1971). Advances in solid-liquid flow in pipes and its application, 1st Ed., Pergamon press Ltd., Headinton Hill Hall, Oxford.