Estudio de la dinámica del transporte de salmueras en tuberías a presión

Arnau Triadú[ab], Martí Sànchez-Juny[a1], Daniel Niñerola[a2] y Antoni Andreu[b1]

[a]Grupo FLUMEN, ETS de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, c/ Jordi Girona 1-3, edificio D1. [b]Aigües de Barcelona, Empresa Metropolitana de Gestió del Cicle Integral de l'Aigua, S.A. (grupo SUEZ), c/ General Batet, 1-7. E-mail: [ab]arnau.triadu@upc.edu [a1]marti.sanchez@upc.edu [a2] daniel.ninyerola@upc.edu [b1]aandreu@aiguesdebarcelona.cat.

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua.

RESUMEN

El presente trabajo se basa en el análisis del “Colector de salmueras”, una infraestructura que se encuentra entre las minas del Bages, en el centro de Catalunya, y el mar. En esta comunicación se muestran los resultados obtenidos en la determinación del modelo de resistencia al flujo a presión de diluciones salinas de alta concentración (salmueras). Se ha seguido el siguiente procedimiento: (a) análisis experimental en laboratorio con salmueras con distintas concentraciones de sal, (b) monitorización en campo de un tramo del "Colector de Salmueras", y (c) determinación del modelo de resistencia al flujo mediante modelación numérica. Los primeros resultados en laboratorio muestran similitud con el modelo de resistencia al flujo del agua, mientras que la monitorización *in situ* descubre una posible sedimentación de fondo en el interior del Colector.
Palabras clave | Salmuera, tubería a presión, transporte de sedimentos, finos, velocidad límite de deposición.

INTRODUCCIÓN

Motivación

Los yacimientos de sal de la comarca del Bages (Catalunya) se empezaron a explotar en el año 1918 para extraer potasa, un elemento imprescindible para la industria química. Dado que la potasa constituye una pequeña porción de la sal extraída y que el resto (cloruro de sodio en su mayor parte) no tiene salida comercial, los residuos de la actividad minera han sido siempre muy elevados. Estos se han ido acumulando durante años para formar una montaña, que en la actualidad alcanza los 500 metros de altura y que incluso ha sido incorporada en la toponimia de la zona con el nombre de *El Cogulló*. Ya en el año 1937 *La Vanguardia* anunciaba la construcción de un colector de salmueras (disoluciones salinas de alta concentración, incluyendo la partículas sólidas insolubles) para solucionar “la continuada y progresiva contaminación y adulteración de las aguas del Llobregat y Cardener por los residuos salinos” ("*La depuración de las aguas del Llobregat y el Cardoner*" 1937). El colector prometido entonces, fue finalmente construido en 1983 siguiendo el trazado que se muestra en la Figura 1, por lo que lleva casi 35 años operativo. Su función sigue siendo evacuar los residuos salinos desde las minas hasta el mar, y ha permitido reducir en gran medida la salinización del río Llobregat, que abastece de agua potable todo el entorno metropolitano de Barcelona.

La empresa concesionaria del denominado *Col·lector de Salmorres*, Aigües de Barcelona (grupo Suez), ha acumulado mucha experiencia en el mantenimiento y la gestión del mismo, aunque en muchos casos por el método del ensayo-error por la falta de estudios relativos al transporte de salmueras. Así, a principios de 2015 y en colaboración con el Grupo Flumen de la Escuela de Caminos de la UPC, se inicia un proyecto de investigación dentro del programa de Doctorado Industrial de la Generalitat de Catalunya, con el objetivo de analizar en detalle el comportamiento hidráulico del flujo de la salmuera que circula por el Colector. En esta comunicación se expone brevemente el estado de este proyecto.

El estudio se divide en tres partes: en la primera se llevan a cabo ensayos en laboratorio con salmueras en un circuito cerrado, la segunda consiste en la monitorización en campo de un tramo del Colector de Salmueras y en la tercera se utilizan los

datos obtenidos para ajustar y validar el modelo de resistencia al flujo de la salmuera en un conducto a presión mediante, la que se pretende sea, una modelación numérica sencilla.

Figura 1 | Esquema del colector de salmueras de la cuenca minera del Bages (Catalunya). Fuente: ICL Iberia.

Transporte de soluciones salinas en tuberías a presión

La resistencia al flujo de una salmuera puede verse modificada debido al transporte de sal en elevadas concentraciones y también debido al transporte de partículas insolubles. En el caso del transporte de diluciones salinas de alta concentración es necesario fijarse en dos conceptos, a saber, la solubilidad de estas sales en agua y la viscosidad del fluido resultante. Ambos pueden influir en el comportamiento hidráulico del flujo de salmuera.

La solubilidad de las sales en agua depende principalmente de la temperatura del líquido, ya que la presión a la que se encuentra la mezcla no tiene ningún efecto significativo (Averill y Eldredge 2012). En el caso del cloruro de sodio (y para la mayoría de sales), su solubilidad en agua aumenta al aumentar la temperatura (International Union of pure and applied chemistry 1991). En cambio, en el caso del sulfato de calcio un aumento de la temperatura no implica un aumento de la solubilidad, sino que esta alcanza un máximo alrededor de los 40°C (Marshall y Slusher 1966). La presencia de otras sustancias en una solución también puede hacer variar la solubilidad de un compuesto. Por ejemplo, si a una solución de cloruro de sodio se le añade cloruro de potasio la solubilidad del NaCl disminuirá, por el efecto del ion común (en este caso el ion Cl^-). Por otro lado, aunque el cloruro de sodio y el sulfato de calcio no tienen ningún ión en común, la solubilidad del sulfato en una disolución que contenga NaCl varía en función de la concentración de cloruro de sodio (Raju y Atkinson 1990). En este proyecto, la concentración máxima de sólidos provenientes de las minas del Bages conseguida, incluyendo las sales y un pequeño porcentaje de finos, ha sido de 330 g/l.

El objetivo de este estudio es analizar el comportamiento hidráulico en una tubería a presión de un tipo concreto de salmuera que contiene distintos compuestos salinos, además de un pequeño porcentaje de finos. Este análisis no se puede realizar sin al menos conocer el orden de magnitud de la viscosidad del fluido estudiado, ya que ésta es necesaria para el cálculo del número de Reynolds del flujo. Si bien es conocido cómo varía la viscosidad del agua cuando se le añade un determinado compuesto soluble, como la sal (Applebey 1910), cuando se trata de conocer la viscosidad del agua con varios compuestos solubles ya no es tanta la literatura existente, y más aún en el caso de altas concentraciones. Y si este mismo fluido contiene además material insoluble entonces es necesario medir experimentalmente su viscosidad (Gillies et al. 1991). Es por ello que en este proyecto se han hallado experimentalmente las viscosidades de varias muestras de la salmuera utilizada.

Transporte de partículas sólidas en tuberías a presión

El transporte de sedimentos en tuberías a presión se puede producir mediante distintos regímenes de flujo, que se distinguen entre sí por la distribución de las partículas transportadas en la sección transversal. Esta distribución depende del tamaño de las partículas y de la velocidad del flujo de transporte. Existen cuatro regímenes de flujo posibles (Graf 1984), a saber:

a) Flujo homogéneo, en el cual las partículas sólidas se distribuyen uniformemente en la sección transversal de la tubería.
b) Flujo heterogéneo, en el cual las partículas sólidas se distribuyen de manera gradual en función de su tamaño y peso.
c) Flujo con plantilla móvil, en el cual se empieza a formar un lecho fijo de partículas sólidas en la parte inferior de la tubería, ya que el flujo no es capaz de mantenerlas todas en suspensión.
d) Flujo con plantilla estacionaria, en que las partículas sólidas forman un lecho fijo a la parte inferior de la tubería. Las partículas de la capa que se encuentra en contacto con el flujo pueden moverse lentamente formando dunas.

Dado que el flujo heterogéneo es el más económico para el transporte de partículas sólidas en tuberías (Moreno Avalos 2012) en sistemas impulsados por bombeo (son mayoría), los esfuerzos de los diferentes autores que han tratado el tema se han centrado en obtener una ecuación que permita calcular la velocidad límite de deposición, que es la máxima velocidad de transporte a la cual los sólidos en suspensión sedimentan en lugar de ser arrastrados. Es decir, se busca conocer la velocidad límite que separa el flujo heterogéneo del flujo con plantilla móvil.

La magnitud de la velocidad límite de deposición depende básicamente del tamaño de las partículas transportadas, su densidad, la concentración de sólidos y el diámetro de la tubería (Kaushal et al. 2002). Así, según estos autores hay hasta 60 correlaciones diferentes, la mayoría de las cuales se basan en el número de Froude, F_L, y se limitan a un rango de aplicabilidad determinado. El número de Froude se utiliza porque permite comparar la velocidad límite de deposición en tuberías de distinto diámetro (D) y para distintas densidades relativas de flujo (R_{sd}) sin tener que cambiar la escala de representación. Para el caso del transporte de partículas en suspensión este número queda definido por la siguiente expresión:

$$F_L = \frac{v_D}{\sqrt{2 \cdot g \cdot R_{sd} \cdot D}} \qquad (1)$$

Donde v_D es la velocidad límite de deposición, en m/s, D es el diámetro de la tubería, en m, g es la aceleración de la gravedad, en m/s^2 y R_{sd} es la densidad relativa del flujo, es decir:

$$R_{sd} = \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \qquad (2)$$

Donde ρ_s es la densidad de una muestra del sedimento transportado y ρ_l és la densidad del líquido. Algunos autores utilizan expresiones del número de Froude que no contienen el número 2 o la densidad relativa R_{sd} (Miedema y Ramsdell 2015).

Uno de los primeros trabajos en este campo fue realizado por Durand y Condolios (1952), para diámetros de tubería entre 40 mm y 700 mm y concentraciones de sólidos de hasta el 15% en volumen. Aunque sus resultados no son aplicables en el campo de la ingeniería de minas, en el cual las partículas transportadas son de grandes tamaños y la concentración de sólidos es alta, sí que son muy útiles para el transporte de finos de tamaño inferior a 500 µm, como es el caso de este estudio. Aun así, una de las formas más comunes para determinar la velocidad límite de deposición en ingeniería es usando el nomograma de Wilson (Wilson y Judge 1978; Wilson 1979), y por ello también se ha considerado en este estudio. Según este nomograma, el tamaño de partícula representativo que necesita de velocidades más elevadas para mantenerse en suspensión está alrededor de 0.5 mm, de modo que para una tubería de 100 mm de diámetro la velocidad necesaria sería de 1.95 m/s, mientras que para una de 350 mm de diámetro sería de 4.2 m/s.

Todas estas formas de cálculo de la velocidad de deposición se encuentran bajo la hipótesis que la tubería por la cual circula el flujo está en posición horizontal i rectilínea. Para tuberías con pendiente positiva, la velocidad de deposición puede llegar a aumentar hasta un 40% y dificultar aún más el arrastre de las partículas sólidas, mientras que en tuberías con pendiente negativa dicha velocidad decrece (Wilson y Tse 1984).

Por otro lado, hay que tener en cuenta que cuando se produce un paro en la circulación del flujo de una tubería que transporta partículas en suspensión, la velocidad necesaria para volver a suspender estos sedimentos aumenta con el tiempo de

duración del paro. Según Goosen (2017), en sólo 15 minutos de paro la "velocidad de resuspensión" puede superar en un 25% la velocidad límite de deposición.

MATERIAL Y MÉTODOS

Trabajo experimental en laboratorio

Los ensayos con salmueras se llevan a cabo en el laboratorio de Hidráulica y Mecánica de Fluidos de la Escuela de Caminos de Barcelona, en un circuito como el que se esquematiza en la Figura 2. Estos consisten en la circulación durante un tiempo determinado de distintas mezclas de agua con sal de la mina de Súria, que difieren por su concentración de sólidos (solubles e insolubles), para valores distintos de caudal y temperatura. Durante el ensayo se toman datos de caudal, presión y temperatura. Las tuberías son transparentes para permitir observar el comportamiento del flujo de forma cualitativa. Se han realizado ensayos con hasta 6 concentraciones diferentes de salmuera.

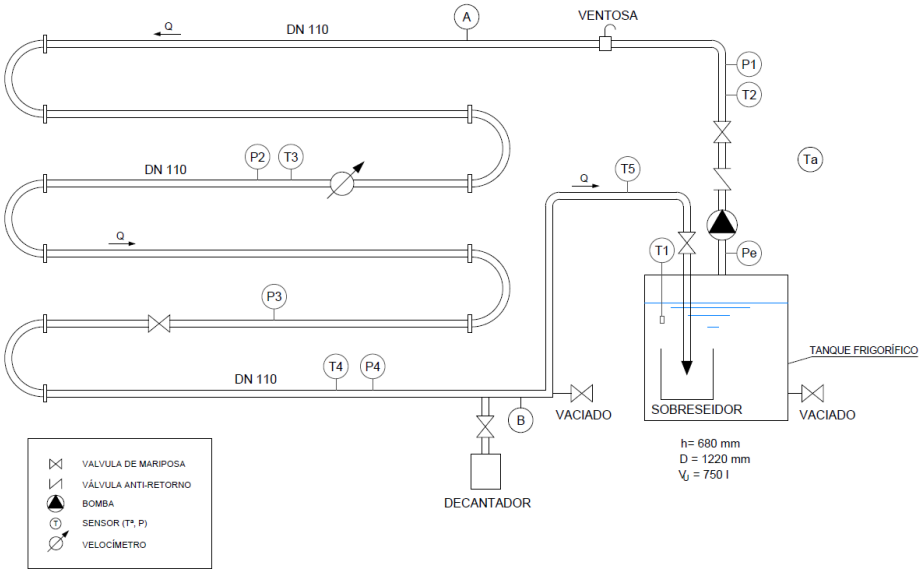

Figura 2 | Esquema del circuito experimental utilizado para los ensayos de laboratorio.

El circuito consiste en una tubería de PE transparente de unos 70 metros de largo, de 100 mm de diámetro interior y con inicio y final en un tanque frigorífico con capacidad para unos 750 litros de salmuera. La impulsión se lleva a cabo con una bomba centrífuga exterior. A lo largo del circuito se han instalado 5 sensores de presión de la, 4 de los cuales con un rango de medición de 0 a 1.5 bar y uno con un rango de medición de 0 a -0.8 bar que se sitúa en la tubería de aspiración. Adicionalmente, se han colocado 5 sensores de temperatura con rango de medición de 0 a 50 °C, y un velocímetro con un rango entre 0 y 3 m/s. Todos los sensores han sido calibrados y sus registros se graban a través de un *datalogger*, con una frecuencia de adquisición de 2 segundos.

La Tabla 1 muestra algunos de los ensayos realizados (42 en total), todos con una duración de 4 minutos. Los ensayos realizados con agua de red han servido para calibrar el modelo de pérdidas de carga locales. La regulación del caudal de paso en el circuito se ha llevado a cabo mediante la operación de una válvula de mariposa situada al pie de la tubería de retorno al depósito de recirculación. Dado que la impulsión de la bomba genera leves fluctuaciones en el sistema, las velocidades a las cuales se han llevado a cabo los ensayos no son idénticas para cada muestra de salmuera, pero en cada caso se ha controlado la velocidad máxima (válvula completamente abierta) y velocidades de alrededor de 1.2 y 0.6 m/s, con la intención de obtener resultados para diferentes números de Reynolds. Para velocidades menores a 0.6 m/s no se han podido obtener resultados aceptables. Por otro lado, las concentraciones de sal y sólidos en suspensión de las mezclas ensayadas se encuentran entre 180 y

260 g/l para abarcar varias concentraciones reales de las mezclas que circulan por el Colector de Salmueras. Las distintas salmueras han sido generadas en el laboratorio añadiendo sal procedente de las minas del Bages al agua, y las concentraciones y densidades medidas a posteriori, una vez homogeneizada la mezcla. La muestra de sal utilizada para llevar a cabo las mezclas está formada principalmente de cloruro de sodio y contiene un poco más de un 1% en masa de partículas insolubles en forma de finos. Las concentraciones expresadas en la Tabla 1 se refieren al contenido total de sólidos de las muestras, ya sean solubles o insolubles.

Tabla 1 | Relación de algunos de los ensayos realizados en el circuito de laboratorio.

	Concentración de sólidos[1] (g sólidos / l mezcla)	Densidad de la mezcla (g mezcla / l mezcla)	Velocidad media (m/s)	Caudal medio (l/s)
H_2O 01			1.65	12.95
H_2O 03	0	995.20	1.19	9.36
H_2O 06			0.59	4.63
SAL_B 01			1.53	12.00
SAL_B 03	258	1157.53	1.17	9.19
SAL_B 06			0.59	4.60
SAL_E 01			1.59	12.52
SAL_E 03	209	1124.05	1.22	9.59
SAL_E 06			0.60	4.71
SAL_F 01			1.56	12.28
SAL_F 03	187	1109.27	1.21	9.53
SAL_F 06			0.61	4.75

Monitorización *in situ* del Colector de Salmueras

El trabajo de monitorización del Colector de Salmueras consiste en la instalación de varios sensores de presión y temperatura en un tramo del mismo para estudiar el comportamiento hidrodinámico de las salmueras en su interior. En concreto el tramo monitorizado se encuentra entre la balsa de decantación de las minas de Súria y la torre de rotura de carga de El Cortès. La toma de datos empezó en febrero de 2017 y se ha alargado hasta principios de julio. La Figura 3 muestra el perfil longitudinal del tramo y los puntos en los cuales se lleva a cabo la toma de datos. La tubería es de PRFV, mide unos 4 km de largo y tiene un diámetro de 350 mm.

Tanto en la balsa de decantación como en la torre de rotura de carga se han instalado sendos sensores para controlar a la vez el nivel de salmuera y la presión atmosférica, además de la temperatura. Estos sensores tienen un rango de medición de 0 a 5 mca, y han sido calibrados previamente en condiciones controladas. En los tres puntos intermedios también se controla presión y temperatura mediante sensores de presión, con rango de medición entre 0 y 25 bar, y sensores de temperatura, con rango de medición de 0 a 50 °C. Por otro lado, el gestor del Colector de Salmueras lleva el control del caudal que circula por la tubería mediante un caudalímetro electromagnético y del nivel de la balsa mediante un sensor de ultrasonidos.

La frecuencia de toma de datos es de 1 minuto durante los 10 primeros días de campaña, y de 5 minutos a partir de entonces. Los datos facilitados por el gestor están tomados con una frecuencia de 15 minutos.

[1] Total de partículas solubles e insolubles, incluyendo sales y sedimentos.

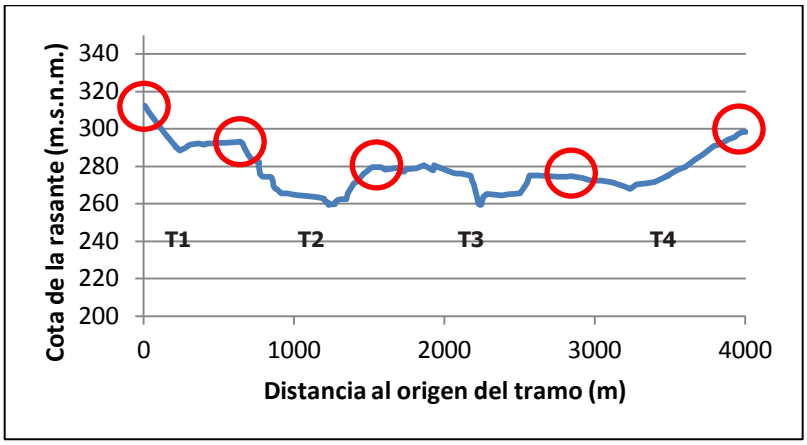

Figura 3 | Perfil longitudinal del segmento del Colector de Salmueras monitorizado. En rojo, los puntos de control en los cuales se toman datos de presión y temperatura. División en cuatro tramos, definidos entre los puntos de control.

Metodología de cálculo

Los datos obtenidos tanto en laboratorio como en campo se han analizado para obtener la pendiente motriz (S_f) y el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach (f) de ambos sistemas, para cada tramo entre puntos de control de la presión. Se han calculado las pérdidas de carga localizadas (Lencastre y Robles García 1998) para determinar el coeficiente de pérdida asociado a cada elemento (codos, estrechamientos, etc.) y se han deducido de las pérdidas totales para obtener las pérdidas debidas a la fricción. A partir de ahí, se han obtenido los parámetros deseados mediante la ecuación de Darcy-Weisbach.

Por otro lado, se ha calculado la velocidad límite de deposición de los sedimentos transportados por las salmueras mediante los procedimientos propuestos por Durand y Condolios (1952) y por Wilson y Judge (1978).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En paralelo a estos ensayos se han realizado ensayos de laboratorio para determinar la viscosidad de las salmueras utilizadas, en función de su peso específico y de la temperatura a la que se encuentren (un avance de los resultados obtenidos se presenta en otra comunicación aceptada para este congreso). También se han hecho medidas de densidad, concentración y peso seco de las mezclas usadas en laboratorio, además del tamizado y la ampliación láser de una muestra de sedimentos para conocer el tamaño medio y la forma de las partículas sólidas en suspensión. En este apartado sólo se expondrán los resultados obtenidos en relación a la velocidad límite de deposición y a la resistencia al flujo detectada en laboratorio y campo.

Velocidad límite de deposición de las partículas sólidas

El cálculo de la velocidad límite de deposición se ha llevado a cabo tanto para las muestras de salmuera utilizadas en los ensayos de laboratorio como para varias muestras de datos de campo. A día de hoy se está trabajando en el tratamiento de más datos de campo con el objetivo de ampliar la muestra representativa, pero se pretende que los datos presentados sirvan de avance. Para este cálculo se ha considerado una concentración en volumen de las partículas sólidas transportadas por el flujo (C_V) constante, del 0.5%, ya que al tratarse de finos la concentración en volumen de las distintas muestras presenta una mínima variación. Como diámetro representativo de las partículas sólidas se ha tomado el d_{50} de la distribución de tamaños de partícula, equivalente a 141.5 µm. La densidad de los sólidos se ha supuesto de 2600 kg/m^3, un valor estándar usado en la ingeniería de minas para los sedimentos formados por arenas o arcillas. Finalmente, los diámetros internos de las tuberías son de 100 mm en el laboratorio y de 350 mm en el Colector de Salmueras. La densidad de las salmueras usadas en el laboratorio se ha medido a partir de muestras tomadas en circulación, mientras que en campo se calcula de forma indirecta a partir del nivel de salmuera del embalse (primer punto de control), previa calibración con muestras tomadas en campo.

La Tabla 2 y la Tabla 3 presentan los resultados obtenidos para las muestras de laboratorio y para las muestras de campo, respectivamente. Como se puede ver, la velocidad límite de deposición teórica en todos los casos es bastante elevada, y los dos métodos de cálculo dan valores parecidos. Hay que recordar que la velocidad máxima obtenida en el circuito de laboratorio está cerca de 1.6 m/s, mientras que en el interior del Colector se calculan velocidades de entre 0.7 y 1.2 m/s.

Tabla 2 | Velocidad límite de deposición de los partículas sólidas para las distintas mezclas de salmuera utilizadas en los ensayos de laboratorio, calculada con los métodos de Durand y Condolios (1952) y de Wilson y Judge (1978). Resultados obtenidos para C_V = 0.5%, d_{50} = 141.5 µm, ρ_s = 2600 kg/m^3 y D = 100 mm.

	Densidad mezcla (kg/m^3)	Froude (F_L)	V_{ld} Durand (m/s)	V_{ld} Wilson (m/s)
SAL_B	1157,53		1.25	
SAL_E	1124,05	0.8	1.28	1.4
SAL_F	1109,27		1.30	

Tabla 3 | Velocidad límite de deposición de los partículas sólidas para algunas mezclas de salmuera que circulan por el Colector de Salmueras, calculada con los métodos de Durand y Condolios (1952) y de Wilson y Judge (1978). Resultados obtenidos para C_V = 0.5%, d_{50} = 141.5 µm, ρ_s = 2600 kg/m^3 y D = 350 mm.

Fecha	Hora	Densidad mezcla (kg/m^3)	Froude (F_L)	V_{ld} Durand (m/s)	V_{ld} Wilson (m/s)
14-marzo	13:00	1159,62	0.8	2,34	2.01
	13:15	1149,83		2,35	
	13:30	1175,23		2,31	
	13:45	1159,40		2,34	
	14:00	1168,40		2,32	
	19:00	1091,71		2,46	
	19:15	1106,95		2,43	
	19:30	1079,65		2,49	
	19:45	1086,77		2,47	
	20:00	1089,33		2,47	
16-marzo	10:00	1109,71		2.43	
	10:15	1119,70		2.41	
18-marzo	00:00	1086.43		2.47	

Análisis numérico de la hidrodinámica del flujo. Laboratorio

Las pérdidas de carga locales del circuito usado en el laboratorio (Figura 2) se calibraron circulando agua limpia de red suponiendo régimen turbulento en zona de transición con tubo liso. Se utilizó la relación entre f y Re de Nikuradse por ser la más adecuada para ello (Sotelo 1995). Para tal calibración se supuso un modelo de pérdidas locales que siguiera el patrón $a \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} + b$, siendo a y b constantes para cualquier número de Reynolds. La calibración se hizo independientemente para cada tramo entre dos sensores de presión (3 tramos), consiguiendo una buena aproximación. Para los ensayos realizados con salmueras de distintas concentraciones se supuso el mismo modelo de pérdidas de carga locales y las mismas constantes que las obtenidas para agua de red.

Una vez conocidas las pérdidas de carga locales, las relaciones entre f y Re obtenidas para las diferentes salmueras representadas sobre el ábaco de Moody demuestran que la calibración de las pérdidas de carga locales es aceptablemente buena.

Aunque estos no se encuentran exactamente sobre la curva relativa a tubos lisos, la tendencia es la correcta. A partir de ahí, el resto de resultados obtenidos para las distintas concentraciones de salmuera siguen claramente el mismo patrón, aunque con mayor dispersión. La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos tanto para f como para S_f en cada ensayo.

Así pues, no parece existir dependencia entre el modelo de resistencia al flujo y la concentración de la muestra: los valores del coeficiente f para un mismo número de Reynolds de las distintas muestras de salmuera se encuentran indistintamente por encima o por debajo de los obtenidos para el agua, sea cual sea su concentración. Aun así, para poder apreciar diferencias o patrones entre las diferentes muestras sería necesario aumentar de forma considerable la precisión de las medidas de presión, ya que, por ejemplo, un error del 5% en el valor de la diferencia de presiones entre dos puntos puede hacer variar entre un 3% y un 8% el valor de cálculo del coeficiente f, en función del caudal circulante.

En relación a la sedimentación de partículas sólidas, en ninguno de los ensayos de laboratorio se ha podido observar este fenómeno, excepto durante los tiempos de parada de la bomba, en los que los finos se dejaban caer hasta la parte baja del tubo. Aún así, la turbidez de las muestras a medida que se les iba aumentando la concentración aumentaba considerablemente, dificultando así la visibilidad en el interior del tubo. Según los cálculos expuestos en el apartado anterior, la velocidad límite de deposición teórica de estas muestras tendría que estar alrededor de 1.25 m/s, de modo que para velocidades inferiores tendría que producirse la sedimentación de algunas partículas sólidas, formando un lecho al fondo del tubo.

Por otra parte, tampoco se ha observado precipitación de sales en ningún caso, ni su cristalización en el interior de la tubería.

Tabla 4 | Resultados obtenidos en los ensayos realizados en laboratorio para la pendiente motriz y el coeficiente de Darcy-Weisbach. Se muestra la media de los resultados obtenidos para cada tramo del circuito. Valores de f correspondientes a los de la Figura 4.

	Reynolds	Sf	f
H_2O 01	1,46E+05	0.0239	0,0172
H_2O 03	1,05E+05	0.0127	0,0175
H_2O 06	5,36E+04	0.0037	0,0210
SAL_B 01	1,05E+05	0.0220	0,0184
SAL_B 03	8,08E+04	0.0138	0,0198
SAL_B 06	4,05E+04	-	-
SAL_E 01	1,27E+05	0.0223	0,0172
SAL_E 03	9,78E+04	0.0137	0,0180
SAL_E 06	4,84E+04	0.0036	0,0196
SAL_F 01	1,33E+05	0.0219	0,0175
SAL_F 03	1,04E+05	0.0138	0,0184
SAL_F 06	5,17E+04	-	-

Análisis numérico de la hidrodinámica del flujo. Colector de Salmueras

En la Tabla 5 se presenta una previa de los resultados del cálculo de la pendiente motriz y el coeficiente f para cada uno de los cuatro tramos que forman los cinco puntos de control, obtenida de los primeros datos de que se dispone.

Los valores de los cuatro tramos son muy superiores a los que en teoría tendrían que darse para esta tubería, ya que las rugosidades absolutas asociadas a estos resultados son muy superiores a las que cabe esperar para una tubería de PRFV de 350 mm de diámetro (8 mm contra 0,1 mm). En la Figura 4 se marca la zona donde deberían encontrarse estos resultados y se representan los valores de f promediados entre los cuatro tramos. En los tramos exteriores (T1 y T4) los resultados son significativamente mayores que en los interiores (T2 y T3): en el primer tramo de tubería (T1) todas las líneas piezométricas teóricas calculadas apuntan que en dicho tramo se den presiones negativas aguas abajo de la balsa , de forma que en los

primeros metros la tubería no entraría en carga, mientras que en el último tramo podría haber problemas de precisión por el hecho de que acaba en una torre de rotura de carga que genera inestabilidades en el flujo. Con todo, aun tomando solamente los valores de los dos tramos intermedios los valores de f siguen siendo muy elevados.

Tabla 5 | Valores obtenidos en el cálculo de la pendiente motriz y del coeficiente de Darcy-Weisbach en distintos instantes de tiempo y para cada uno de los tramos monitorizados.

Fecha	Hora	Reynolds	Sf				f			
			T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
14-marzo	13:00	1,5E+05	0,0052	0,0032	0,0031	0,0034	0,078	0,047	0,046	0,051
	13:15	1,6E+05	0,0050	0,0031	0,0030	0,0037	0,074	0,046	0,046	0,055
	13:30	1,4E+05	0,0055	0,0034	0,0031	0,0031	0,082	0,050	0,046	0,046
	13:45	1,5E+05	0,0052	0,0032	0,0031	0,0034	0,078	0,048	0,046	0,051
	14:00	1,4E+05	0,0053	0,0033	0,0031	0,0033	0,080	0,049	0,046	0,049
	19:00	2,0E+05	0,0038	0,0025	0,0029	0,0048	0,057	0,038	0,044	0,072
	19:15	1,9E+05	0,0041	0,0027	0,0030	0,0044	0,062	0,041	0,045	0,067
	19:30	2,0E+05	0,0035	0,0024	0,0029	0,0051	0,052	0,037	0,044	0,076
	19:45	2,0E+05	0,0036	0,0025	0,0029	0,0049	0,054	0,038	0,044	0,074
	20:00	2,0E+05	0,0037	0,0025	0,0029	0,0049	0,056	0,038	0,044	0,073
16-marzo	10:00	1,9E+05	0,0041	0,0028	0,0032	0,0046	0,058	0,041	0,045	0,066
	10:15	1,8E+05	0,0043	0,0029	0,0032	0,0044	0,062	0,042	0,045	0,063
18-marzo	00:00	2,0E+05	0,0039	0,0026	0,0030	0,0048	0,056	0,037	0,043	0,069

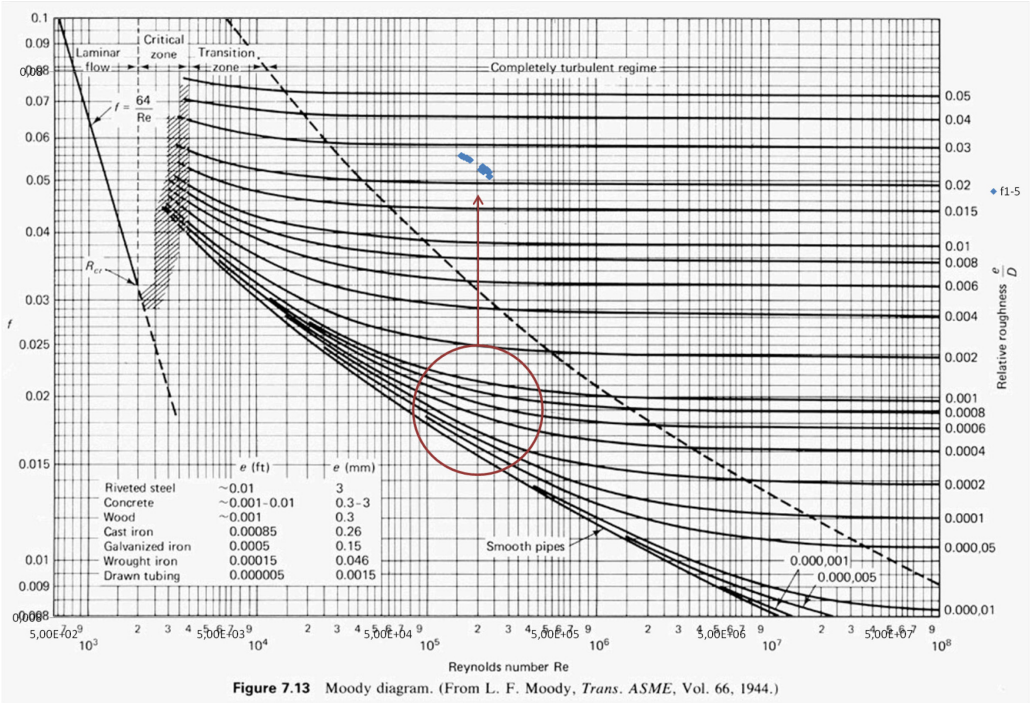

Figura 4 | Representación de los valores del coeficiente de Darcy-Weisbach obtenidos a partir de algunos datos de campo. La zona en la que teóricamente deberían estar estos valores se encuentra marcada.

Por ello es lícito pensar en la posibilidad que la sección del tubo que conforma el Colector de Salmueras sea inferior a la considerada en los cálculos por la existencia de un lecho de sedimentos en su parte baja. Esto tendría sentido tomando en

consideración las velocidades límite de deposición calculadas en un apartado anterior, que se situaban entre 2 y 2.5 m/s. La velocidad del flujo en el interior del Colector, dado que el caudal es de 66 l/s, no llega a 0.7 m/s si se considera una sección de 350 mm de diámetro, mientras que si se considera la hipótesis de la sedimentación con un diámetro equivalente de 290 mm la velocidad se sitúa alrededor de 1 m/s. A todo esto, hay que añadirle que, en caso de paro del Colector, lo cual se produce más a menudo de lo deseado, la velocidad necesaria para volver a suspender el sedimento acumulado en el fondo es superior a la velocidad límite de deposición. La única duda que quedaría es por el hecho que en los ensayos de laboratorio no se ha observado sedimentación en ningún caso, ni para velocidades muy inferiores a la velocidad límite de deposición calculada en cada caso.

También se podría plantear la posibilidad que la hipótesis de la reducción de diámetro efectivo fuera debida a la cristalización de sal en las paredes interiores de la tubería, pero las concentraciones de sal de las salmueras evacuadas por el Colector (cerca de 230 g/l) son bastante inferiores a los límites de saturación, que se sitúan alrededor de los 330 g/l.

CONCLUSIONES

Los resultados de los ensayos realizados en laboratorio apuntan que las salmueras con concentraciones de sal cercanas al límite de saturación y con bajas concentraciones de finos en suspensión no ven modificado el modelo de resistencia al flujo del agua, sino que siguen el mismo patrón. Es necesario confirmar este extremo con ensayos de más precisión. Además, a nivel cualitativo, no se produce sedimentación en las tuberías horizontales del circuito de laboratorio: todo el sedimento es arrastrado para cualquier velocidad testeada (entre 0.6 y 1.6 m/s), aunque esto contradice los cálculos de los valores de la velocidad límite de deposición. Tampoco se produce cristalización de sal en las paredes interiores de los tubos.

Los resultados de campo apuntan a la hipótesis que la sección del Colector de Salmueras se haya visto reducida por sedimentación de partículas sólidas, ya sea porque las velocidades del flujo son insuficientes para mantenerlas en suspensión o por parada del colector y posterior arranque con velocidad inferior a la necesaria para la resuspensión. Las velocidades límite de deposición calculadas se encuentran entre 2 y 2.5 m/s, mientras que las velocidades de circulación del flujo dentro del Colector de Salmueras son inferiores a 1 m/s.

Sería de mucho interés llevar a cabo otros ensayos en laboratorio aumentando la concentración de sedimentos para comprobar si así se depositan en el fondo y forman lechos, ya que es muy probable que la concentración de partículas sólidas insolubles en el interior del Colector sea notoriamente superior a la testeada en el circuito de laboratorio.

AGRADECIMIENTOS

Al apoyo económico de AGAUR, mediante el Programa de Doctorats Industrials de la Generalitat de Catalunya, d'Aigües de Barcelona, Empresa Metropolitana de Gestió del Cicle Integral de l'Aigua, S.A. (grupo Suez) y de Institut Flumen (CIMNE, UPC). También a Paterson & Cooke (Cape Town, Sudáfrica) por su colaboración.

REFERENCIAS

"La depuración de las aguas del Llobregat y el Cardoner", 1937, June 23, *La Vanguardia*, p. 3.

Applebey, M. 1910. CCXI.—The Viscosity of Salt Solutions. *Journal of the Chemical Society, Transactions* 97, 2000–2025.

Averill, B. A. and Eldredge, P. 2012. Solutions. *Principles of General Chemistry*, 161-172.

Durand, R. 1953. Basic Relationships of the Transportation of Solids in Pipes—experimental Research. *Proceedings: Minnesota International Hydraulic Convention*, 89-103. ASCE.

Durand, R. and Condolios, E. 1952. Experimental Study of the Hydraulic Transport of Coal and Solid Material in Pipes. *Proc. Colloq. on the Hydraulic Transport of Coal, Natl. Coal Board, UK,* 39-55.

Gillies, R. G., Shook, C. A. and Wilson, K. C. 1991. An Improved Two Layer Model for Horizontal Slurry Pipeline Flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 69(1),173–78.

Goosen, P. 2017. “Analysis of Friction Pressure Gradients During Slurry Pipeline Restart.”

Graf, W. H. 1984. *Hydraulics of Sediment Transport*. Water Resources Publications.

ICL Iberia. Sostenibilitat I Mineria. Retrieved March 24, 2017 (https://sostenibilitatimineria.wordpress.com/).

International Union of pure and applied chemistry. 1991. *Solubility Data Series. Alkali Metal and Ammonium Chlorides in Water and Heavy Water (Binary Systems)*. Edited by Roger Cohen-Adad and John W. Lorimer. Pergamon Press, Oxford.

Kaushal, D. R., Tomita, Y. and Dighade, R. R. 2002. Concentration at the Pipe Bottom at Deposition Velocity for Transportation of Commercial Slurries through Pipeline. *Powder Technology* 125(1), 89–101.

Lencastre, A. C. and García, C. R. 1998. *Manual de Ingeniería Hidráulica*. Universidad Pública de Navarra.

Marshall, W. L. and Slusher, R. 1966. Thermodynamics of Calcium Sulfate Dihydrate in Aqueous Sodium Chloride Solutions, 0-110° 1,2. *The Journal of Physical Chemistry* 70(12), 4015–4027.

Miedema, S. A. and Ramsdell, R. C. 2015. The Limit Deposit Velocity Model, a New Approach. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 63(4), 273–286.

Moreno Avalos, V. M. 2012. Optimización de La Succión de Sólidos Sumergidos Utilizando Bombas Centrífugas Con Velocidad Variable. Universidad Politécnica de Madrid.

Raju, K. U. G. and Atkinson, G. 1990. Thermodynamics of ‘Scale’ Mineral Solubilities. 3. Calcium Sulfate in Aqueous NaCl. *Journal of Chemical and Engineering Data* 35(3), 361–367.

Wilson, K. C. 1979. Deposition Limit Nomograms for Particles of Various Densities in Pipeline Flow. *Proc. Hydrotransport*, vol. 6, 1-12. BHRA Fluid Engineering Bhubaneswar, India.

Wilson, K. C. and Judge, D. G. 1978. Analytically-Based Nomographic Charts for Sand-Water Flow. *Proceedings of the Hydrotransport*, vol. 5, B1-1.

Wilson, K. C. and Tse, J. K. P.. 1984. Deposition Limit for Coarse Particle Transport in Inclined Pipes. *Proceedings of the 9th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes*, 149-161.