

Determinación experimental de la viscosidad de una salmuera

Arnau Triadú^{ab}, Javier Sanz^{a1}, Martí Sànchez-Juny^{a2}, Daniel Niñerola^{a3} y Antoni Andreu^{b1}

^aGrupo FLUMEN, ETS de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Jordi Girona 1-3, edificio D1. ^bAigües de Barcelona, Empresa Metropolitana de Gestió del Cicle Integral de l'Aigua, S.A., Grupo Suez, General Batet, 1-7. E-mail: ^{ab}arnau.triadu@upc.edu ^{a1}javiersanz900@gmail.com ^{a2}marti.sanchez@upc.edu ^{a3}daniel.ninyerola@upc.edu ^{b1}aandreu@aiguesdebarcelona.cat

Línea temática D | Estructuras hidráulicas

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es determinar de forma experimental la viscosidad de las salmueras provenientes de las minas de sal de Súrria (Barcelona, Catalunya), para distintas concentraciones de sal cercanas al límite de saturación y con un pequeño porcentaje de finos. Para la determinación se ha diseñado en el laboratorio un sistema de dos depósitos comunicados mediante un conducto a presión. Los resultados se han comparado con las viscosidades de las mismas muestras filtradas, obtenidas con un viscosímetro de Ostwald, apreciándose un comportamiento diferente en función de la temperatura del líquido. Esto indica que los finos presentes en las mezclas, aunque en concentraciones muy bajas, modifican la reología del fluido.

Palabras clave | Salmuera, viscosidad, finos, laboratorio.

INTRODUCCIÓN

Motivación

Es bien conocido cómo varía la viscosidad del agua en función de la temperatura a la que se encuentre (Sotelo, 1995). También es conocido cómo varía la viscosidad del agua cuando se le añade un determinado compuesto soluble, como la sal (Applebey, 1910). Pero cuando se trata de conocer la viscosidad del agua con varios compuestos solubles ya no es tanta la literatura existente, sobre todo en el caso de concentraciones altas. Y si este mismo fluido contiene además material insoluble entonces es necesario medir experimentalmente su viscosidad (Gillies et al., 1991).

Este trabajo experimental forma parte de un estudio cuyo objetivo es analizar el comportamiento hidráulico en una tubería a presión de las salmueras residuales generadas en las minas de sal de la comarca del Bages (Catalunya). Esta sal está formada por distintos compuestos salinos, además de contener un pequeño porcentaje de finos. Este análisis hidráulico no se puede realizar sin conocer la viscosidad del fluido estudiado, ya que ésta es necesaria para el cálculo del número de Reynolds del flujo y, por consiguiente, la determinación de las pérdidas de carga. Se ha diseñado y construido un modelo hidráulico que permitirá determinar de forma indirecta el valor de la viscosidad de la salmuera, para distintos valores de concentración de la parte sólida. En paralelo también se ha usado un viscosímetro de Ostwald para calcular la viscosidad de las mismas muestras de salmuera con filtrado previo de los finos para conocer el efecto de las partículas insolubles en la viscosidad de estas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Las muestras de salmuera estudiadas han sido generadas en laboratorio añadiendo sal 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 1.14% 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 | Valores medidos de densidad, concentración de sólidos y porcentaje en masa de sólidos de las tres muestras de salmuera estudiadas.

	Densidad (kg de mezcla / m ³ de mezcla)	Concentración (kg de sólidos / m ³ de mezcla)	Porcentaje en masa (kg de sólidos / kg de mezcla) * 100
SAL_1	1201.6	331	27.5
SAL_2	1197.6	326	27.2
SAL_3	1160.4	261	22.5

Modelo experimental

El modelo consta de dos depósitos rectangulares de PVC con rebosadero en su interior situados a la misma cota y conectados mediante dos tubos metálicos de diámetros 0.75 (tubo A) y 1.5 (tubo B) pulgadas de 3m de longitud. La capacidad de los depósitos es de 350 litros el primero y de 250 litros el segundo, incluyendo los depósitos auxiliares detrás de los vertederos, que tienen capacidades de 60 litros y 50 litros, respectivamente. El rebosadero del segundo depósito es 10.1 centímetros más bajo que el del primero para generar una diferencia de presiones controlada que provoque la circulación del fluido contenido de un depósito a otro. Ambos rebosaderos están conectados a un tercer depósito de mil litros de capacidad para permitir el vaciado de todo el sistema. En este tercer depósito se introduce una bomba sumergible que proporciona un caudal máximo de 5 l/s y que impulsa el líquido hacia el primer depósito. La Figura 1 muestra el esquema del modelo.

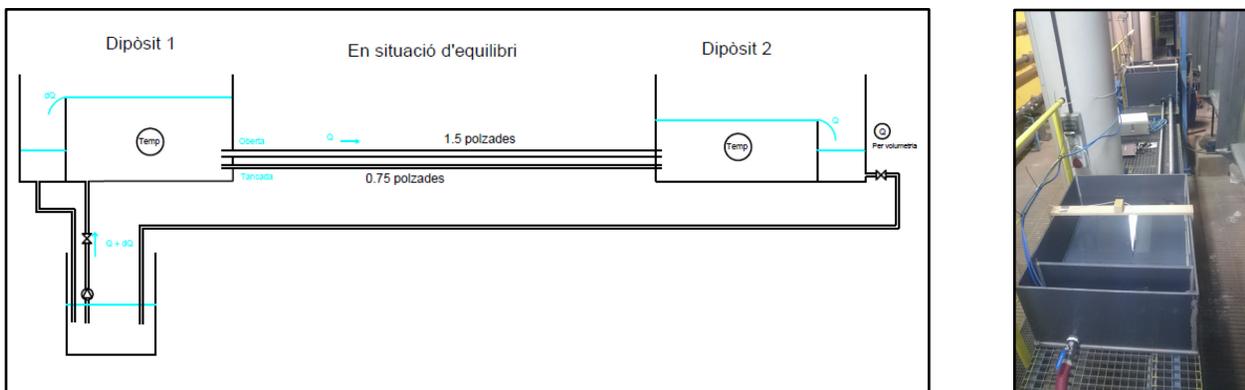


Figura 1 | Esquema (izquierda) y fotografía (derecha) de la instalación experimental. En azul, posición del fluido cuando se encuentra en situación de equilibrio.

Para el diseño del modelo experimental se ha tenido en cuenta la necesidad que el flujo entre ambos depósitos no se encuentre en régimen turbulento rugoso, pues en tal caso las pérdidas de carga son independientes del número de Reynolds y en consecuencia de la viscosidad. En todos los ensayos realizados el número de Reynolds alcanza valores alrededor de 10^4 . Por otro lado, se han escogido tubos de acero inoxidable para tener una alta rugosidad que permita, en poca distancia, apreciar las pérdidas de carga lineales producidas en su interior. Por otro lado, los tubos se han introducido al menos 3 veces su diámetro en el interior del depósito de cabecera, para minimizar las pérdidas de carga locales debidas a la introducción del fluido en la tubería. Sólo se han considerado las pérdidas locales por la incorporación del flujo al depósito de cola.

Se han instalado varios sensores para controlar todos los parámetros necesarios para la realización de los cálculos: en el depósito 1 (de carga) dos sensores de presión y un sensor de temperatura, y en el depósito 2 (de cola) dos sensores de presión en el rebosadero y un sensor de temperatura. Los sensores de presión tienen un rango de medición entre 0 y 250 mbar y un error acumulado del 0.3% del fondo de escala, mientras que los de temperatura presentan un rango entre -200°C y 500°C y un error

de $\pm 0.3^\circ\text{C}$ para temperaturas cercanas a 0°C . Todos los sensores han sido previamente calibrados y están conectados a un *datalogger* que permite almacenar los datos y controlar los mismos en tiempo real mediante un ordenador.

Para llevar a cabo las mezclas y posteriormente enfriarlas se ha utilizado un tanque frigorífico de 800 litros de capacidad que dispone de una pala giratoria para remover el líquido contenido en su interior.

Viscosímetro de Ostwald

La determinación de la viscosidad de las muestras de salmuera filtradas (sin partículas sólidas insolubles) se ha llevado a cabo mediante un viscosímetro de Ostwald. Este tipo de viscosímetro permite medir la viscosidad dinámica de un fluido midiendo el tiempo de paso a través de un tubo capilar. El diámetro de capilar necesario para medir una viscosidad depende a su vez de la viscosidad que se quiera medir, de modo que se trata de un proceso iterativo.

El procedimiento de medida consiste en insertar el líquido deseado en la cámara A desde el extremo I de la Figura 2 sin llegar a llenarla. A continuación se succiona el líquido por el otro extremo (H) hasta que el nivel del líquido se sitúe por encima de la marca B y se deja caer por gravedad. Hay que medir el tiempo que pasa desde que el nivel pasa por la marca B hasta que traspasa la marca C. Este tiempo permite calcular la viscosidad por comparación con un fluido patrón de viscosidad y densidad conocidos que se habrá ensayado previamente; en el caso de este trabajo, agua destilada.

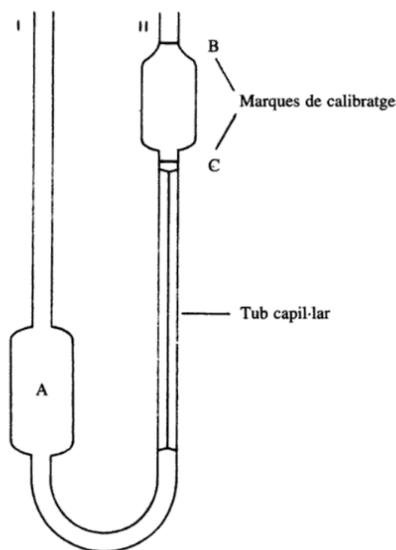


Figura 2 | Esquema (izquierda) y fotografía (derecha) del viscosímetro de Ostwald utilizado.

Para cada mezcla de salmuera se han realizado ensayos a 16°C , 20°C , 25°C y 30°C , con tres repeticiones como mínimo para cada valor. Dado que la viscosidad de un líquido es muy variable en función de la temperatura los ensayos se han realizado en un baño maría para poder controlarla mejor y asegurar que el líquido en el interior del viscosímetro se encuentra a temperatura constante durante todo el ensayo.

La viscosidad de la mezcla se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$\mu_i = \mu_{H_2O} * \frac{\rho_i * t_i}{\rho_{H_2O} * t_{H_2O}} \quad (1)$$

Donde μ_i es la viscosidad dinámica de la mezcla i , ρ_i su densidad y t_i el tiempo de paso entre marcas del capilar. Dividiendo la viscosidad dinámica por la densidad de la muestra se obtiene la viscosidad cinemática.

Metodología

El diseño del modelo hidráulico (Figura 1) permite conocer con mucha precisión el valor de la pérdida de carga del flujo en su viaje del primer al segundo depósito, cuando ambos se encuentran llenos a rebosar. Esta pérdida de energía se reduce a la diferencia de cota entre los niveles de ambos depósitos, a lo que hay que sumar la pérdida de carga local en la salida del tubo (Lencastre y Robles García, 1998). Conocido este valor, se puede calcular la rugosidad absoluta de las tuberías llenando los depósitos con un líquido de viscosidad conocida, en este caso agua destilada, y midiendo el caudal circulante en situación de equilibrio. Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la rugosidad son las de Darcy-Weisbach y Colebrook-White, tomando de incógnitas el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach (f) y la rugosidad absoluta (k). Posteriormente, se llenan los depósitos con el fluido de viscosidad desconocida y se mide otra vez el caudal que circula en situación de equilibrio. Utilizando las mismas ecuaciones, pero en este caso considerando como incógnitas el coeficiente de fricción f y la viscosidad cinemática del fluido (ν), se puede calcular el valor de esta última. Este proceso se realiza de forma independiente para ambos tubos de conexión de los depósitos 1 y 2.

Para cada mezcla de salmuera se han realizado ensayos a 16°C, 20°C, 25°C y 30°C, con tres repeticiones como mínimo para cada valor. Para regular la temperatura de la mezcla se hace uso de tres componentes: un tanque frigorífico con 800 litros de capacidad para rebajar la temperatura y botellas de agua congelada impermeabilizadas y una resistencia eléctrica para regular la temperatura durante el proceso de circulación. Se ha considerado aceptable para la realización del ensayo toda temperatura incluida en el margen de $\pm 0.2^\circ\text{C}$ alrededor de la temperatura deseada.

Este proceso de 24 ensayos debe realizarse con agua primero, para calibrar el modelo, y luego con la salmuera deseada.

Estudio de sensibilidad

La medida de la viscosidad de una muestra es un trabajo que requiere de mucha precisión, dado que se trabaja con expresiones empíricas logarítmicas (ábaco de Moody). Por esta razón se ha estudiado en qué medida una variación en alguna de las mediciones puede afectar al valor final de viscosidad.

La medición realizada que conlleva mayor error asociado es la determinación del caudal circulante, que se lleva a cabo mediante un aforo volumétrico. Los valores de nivel registrados por el sensor de presión con una frecuencia de un segundo permiten hacer este cálculo con una precisión razonable (unos 25 puntos para el tubo B, de 1.5 pulgadas y unos 150 para el tubo A, de 0.75 pulgadas). Aun así, se ha estudiado la influencia del posible error en la determinación de la pendiente de la recta que se forma al relacionar el nivel del rebosadero del depósito de cola con el tiempo transcurrido (es decir, en la determinación del valor que equivale a la velocidad de subida del nivel): la regresión lineal llevada a cabo con los datos obtenidos postula que en el 95% de los casos la variación de la viscosidad calculada sería inferior al 2%.

Por otro lado, también se ha estudiado la influencia del valor del diámetro de la tubería utilizado en los cálculos de la viscosidad. La cristalización de la sal en el interior de las tuberías puede provocar reducciones en la sección de las mismas y, por tanto, afectar tanto al valor de la rugosidad absoluta como al del diámetro que debe considerarse en los cálculos. En este caso, el resultado del estudio arroja que la importancia en la determinación del diámetro efectivo es crucial: para poner un ejemplo, una variación de solamente 0.1 mm en el diámetro efectivo del tubo provoca una variación del 19% en el valor de la viscosidad calculado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra los valores de viscosidad obtenidos para las tres muestras de salmuera (filtradas previamente, es decir, sin residuo insoluble) a partir de los ensayos realizados con el viscosímetro de Ostwald.

Se observa, como cabía esperar, que la viscosidad aumenta al aumentar la concentración de sal de la mezcla y que la muestra S1, disolución con una concentración situada en el límite de saturación, alcanza valores cercanos al doble de la viscosidad del agua destilada. El patrón de variación de la viscosidad de la salmuera en función de la temperatura es similar al

del agua mostrando una ligera tendencia a disminuir al aumentar la temperatura del sistema. Estos resultados se comparan más adelante con los valores obtenidos mediante el modelo hidráulico.

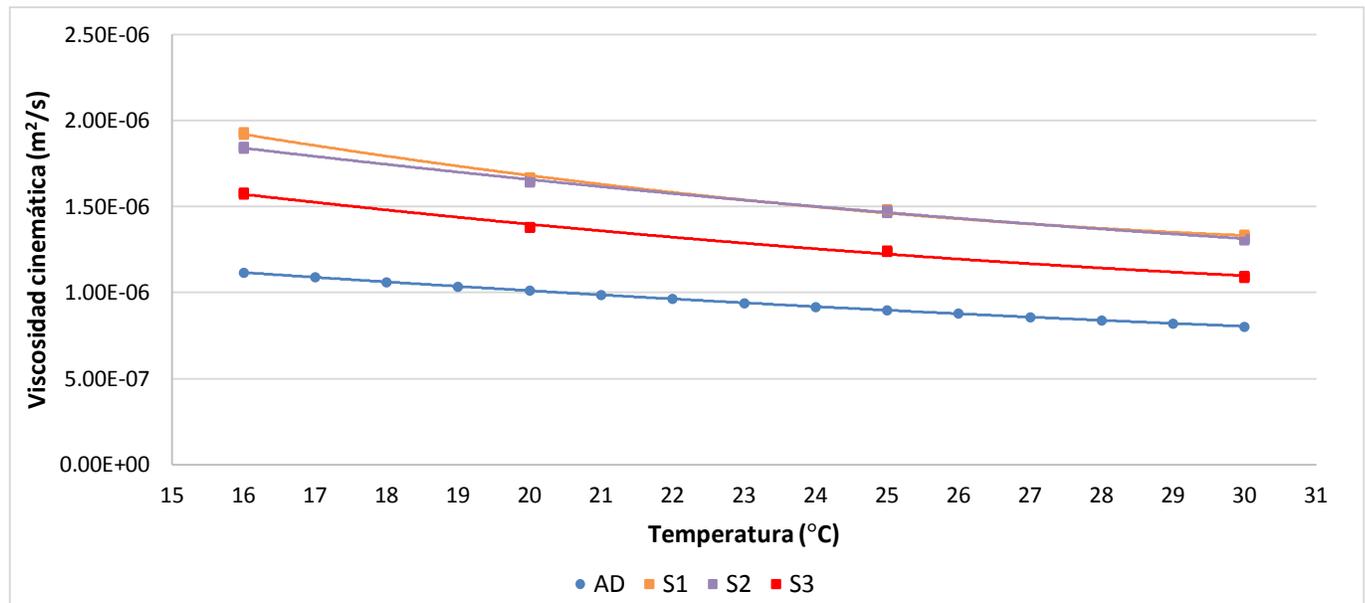


Figura 3 | Valores de viscosidad cinemática obtenidos con el viscosímetro de Ostwald para las muestras S1 (331 g/l), S2 (326 g/l) y S3 (261 g/l), previamente filtradas, y viscosidad cinemática teórica del agua destilada (AD).

En el circuito de laboratorio también se han hecho circular las tres muestras, pero sin filtrar y con resultados muy dispares, los cuales están representados en la Figura 4. En ella se aprecia que los resultados obtenidos muestran escasa relación con los obtenidos de los ensayos con el viscosímetro de Ostwald, ya que la muestra con mayor concentración (S1) es la que presenta una viscosidad menor. Por otro lado, en la muestra S2, sólo 5 g/l inferior a S1, la viscosidad se dispara hasta multiplicar por diez la del agua. Para entender estos resultados es preciso detallar el proceso cronológico de realización de los ensayos. El modelo se calibró, inicialmente, con agua destilada para obtener el valor de la rugosidad absoluta de los tubos. A continuación se ensayó la primera mezcla, en la concentración límite de saturación (S1), vaciando y limpiando la instalación antes de preparar y ensayar la segunda muestra (S2). Analizando los resultados obtenidos en este segundo caso se concluyó que los tubos debían estar obturados, de modo que se vació el sistema de nuevo y se procedió a una limpieza en mayor profundidad. A continuación se volvió a calibrar el modelo con agua y se hicieron los ensayos con la tercera muestra. No se pudieron repetir los ensayos con la segunda muestra porque cuando se descubrió el error de calibración esta muestra ya no existía, ya se había diluido para formar la S3. Por esta razón, dado que no se calibró correctamente el modelo antes de los ensayos con la salmuera S2, los resultados obtenidos para este caso han sido descartados.

La Figura 5 muestra el estado de las paredes interiores de los tubos después de los ensayos realizados con las salmueras 1 y 2: se aprecian precipitados de sal adheridos a la pared del tubo. Esta cristalización se produce durante el proceso de vaciado y llenado del modelo, ya que esto permite la entrada de aire, la evaporación del agua que queda en el interior de los tubos y la consecuente precipitación de las sales que se encontraban disueltas en ella. Se comprende que este precipitado modifica notablemente la rugosidad absoluta de la tubería, así como la sección efectiva de la misma. Por esta razón, antes de llevar a cabo los ensayos con la tercera muestra de salmuera (S3) se llenaron los tubos con vinagre durante 3 días, con el objetivo de recuperar la sección inicial, y posteriormente se procedió a una nueva calibración de la rugosidad absoluta con agua.

Aun así, las viscosidades obtenidas para la muestra S3 han seguido siendo superiores a las obtenidas para la muestra S1, lo cual carece de sentido al contener una concentración de sólidos inferior. Teniendo en cuenta lo comentado en el análisis de sensibilidad realizado, los resultados obtenidos hacen pensar que la limpieza con vinagre del conducto no ha sido todo lo eficiente que hubiera sido deseable, y no se ha podido recuperar ni la rugosidad ni la sección efectiva iniciales.

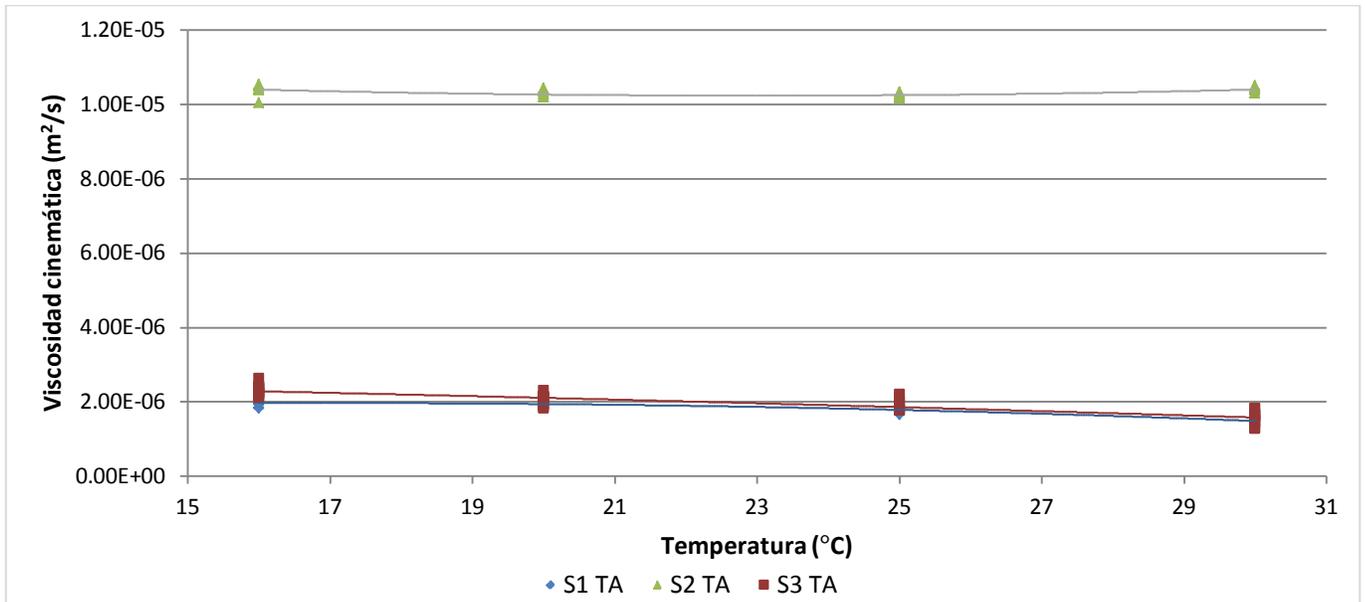


Figura 4 | Valores de viscosidad cinemática calculados a partir de los datos obtenidos en los ensayos realizados con el tubo A en el modelo hidráulico para las muestras S1 (331 g/l), S2 (326 g/l) y S3 (261 g/l).

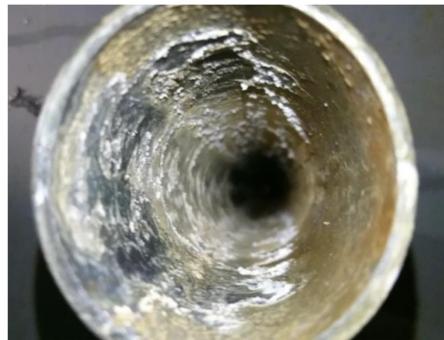


Figura 5 | Cristalización de las sales en las paredes internas del tubo B (1.5 pulgadas).

Debido a la dificultad que conlleva medir la sección efectiva real de los tubos una vez se ha producido la precipitación de sales en su pared, se ha hecho un análisis del diámetro efectivo que permitiría ajustar la viscosidad a valores esperables, suponiendo que el porcentaje de variación en la viscosidad de las muestras se mantiene de la misma forma para las muestras filtradas como para las que contienen finos en suspensión.

Así pues, se ha calculado el porcentaje de disminución de los valores de viscosidad de la muestra S3 (filtrada) respecto de los de la muestra S1 (filtrada). A continuación, los valores obtenidos como resultado de los ensayos realizados con el tubo A en el modelo hidráulico de la muestra S1 (sin filtrar) se han reducido en el mismo porcentaje para conocer cuáles serían los valores de viscosidad esperables para la muestra S3 (sin filtrar). El diámetro efectivo que ajusta mejor la viscosidad a estos valores esperables resulta ser de 20 mm (contra los 21.3 mm iniciales, que equivalen a $\frac{3}{4}$ de pulgada).

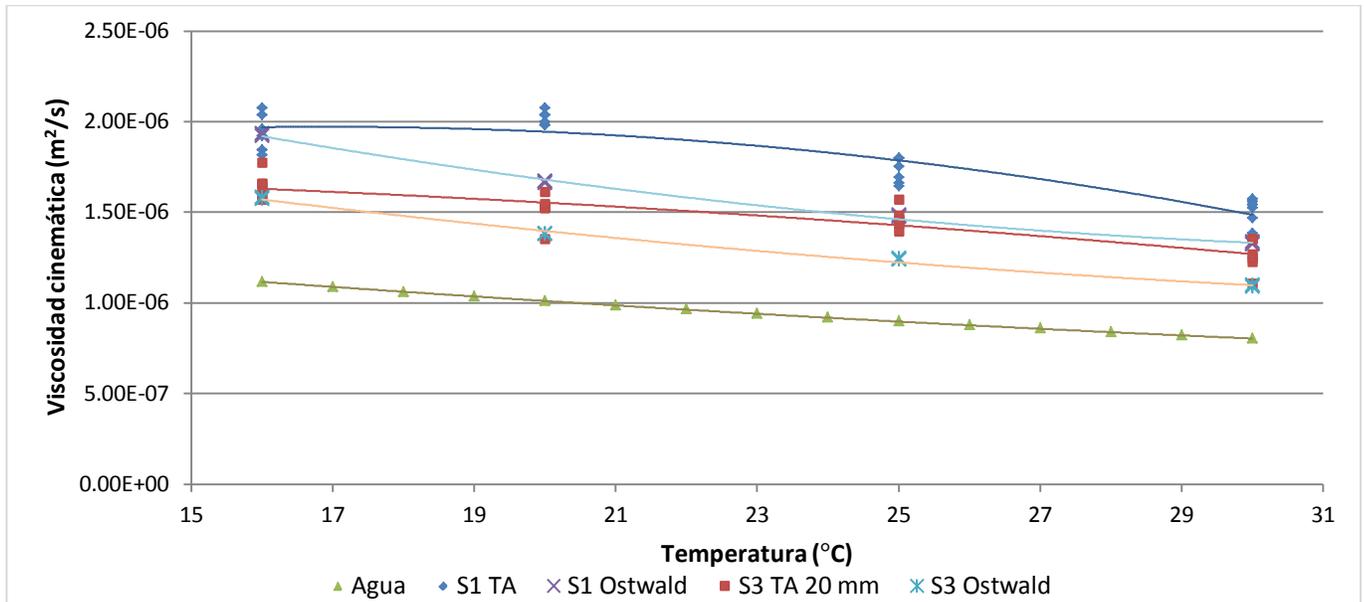


Figura 6 | Valores de viscosidad cinemática: a) obtenidos con el viscosímetro de Ostwald para las muestras S1 y S3 filtradas y b) calculados a partir de los datos obtenidos en los ensayos realizados con el tubo A (0.75 pulgadas) en el modelo hidráulico para las muestras S1 y S3 sin filtrar, en función de la temperatura de las muestras. El diámetro efectivo del tubo considerado para la muestra S1 sin filtrar es de 21.3 mm, mientras que para la muestra S3 sin filtrar es de 20 mm. También se presenta la viscosidad cinemática teórica del agua como patrón.

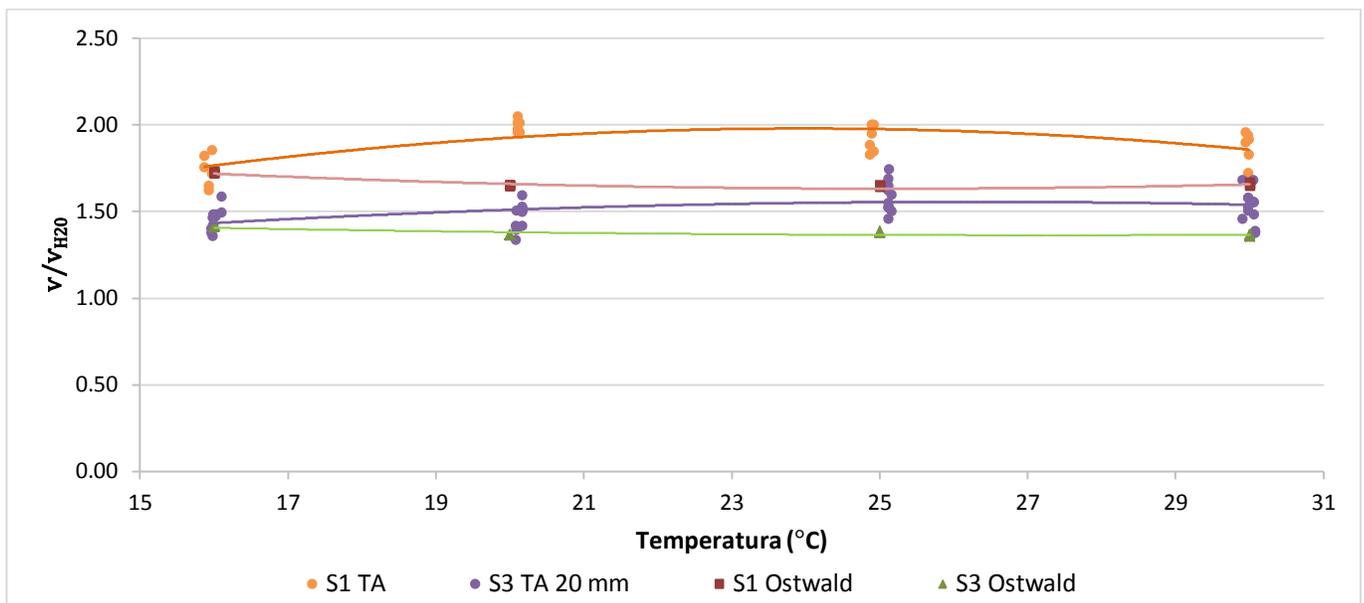


Figura 7 | Valores de viscosidad cinemática relativa: a) obtenidos con el viscosímetro de Ostwald para las muestras S1 y S3 filtradas y b) calculados a partir de los datos obtenidos en los ensayos realizados con el tubo A (0.75 pulgadas) en el modelo hidráulico para las muestras S1 y S3 sin filtrar, en función de la temperatura de las muestras. El diámetro efectivo del tubo considerado para la muestra S1 sin filtrar es de 21.3 mm, mientras que para la muestra S3 sin filtrar es de 20 mm.

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos para las muestras S1 y S3, filtradas y sin filtrar, si se considera como válido dicho diámetro efectivo. La reducción del mismo en un 6%, pasando de 21.3 mm a 20 mm, supone una reducción de los valores de viscosidad obtenidos para la muestra S3 (sin filtrar) del 30%.

Se use uno u otro diámetro efectivo, la tendencia de la viscosidad cinemática de las muestras a evolucionar en función de la temperatura varía en cualquier caso por el hecho de contener partículas sólidas en suspensión, aunque sea en una proporción muy reducida. En la Figura 7 se puede apreciar claramente como el cociente entre la viscosidad cinemática de las muestras

filtradas y la viscosidad del agua (viscosidad relativa) es prácticamente constante para cualquier temperatura, pero en el caso de las muestras sin filtrar este cociente varía.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados con el viscosímetro de Ostwald confirman la tendencia de la viscosidad de un líquido a aumentar cuando aumenta la concentración de sales del mismo. También muestran la tendencia de la viscosidad de estas muestras a disminuir al aumentar su temperatura. Por otro lado, los resultados obtenidos con el modelo hidráulico muestran que los sólidos en suspensión, aunque sea en concentraciones muy bajas, modifican ligeramente la viscosidad de una muestra, además de su tendencia a evolucionar con la temperatura.

Por otro lado, los valores obtenidos en los cálculos indican que la viscosidad cinemática de la salmuera estudiada en su límite de saturación es ligeramente inferior al doble de la del agua. El hecho de conocer el orden de magnitud de la viscosidad cinemática de estas muestras permite llevar a cabo los cálculos hidráulicos necesarios en el estudio del comportamiento de la mezcla que fluye por el Colector de Salmueras.

La precisión en la medida del caudal y, sobretodo, en la medida del diámetro efectivo del tubo por el cual circulan las muestras es clave para obtener valores fiables de viscosidad mediante el modelo hidráulico de laboratorio que se ha diseñado. El estudio de sensibilidad realizado muestra que una mínima desviación de 0.1 mm en el diámetro efectivo (sobre 21.3 mm, es decir, un 0.5%) puede comportar un error de cálculo en la viscosidad de la muestra de un 19%.

A modo de futuros trabajos, cabe decir que este estudio requeriría de más ensayos con otras muestras de la misma salmuera para determinar un patrón claro de comportamiento en las viscosidades cinemáticas de este tipo de mezclas. Para tal efecto sería recomendable cambiar los tubos utilizados por tubos nuevos después de haber realizado los ensayos con una muestra, para evitar la cristalización de sal y los cambios en la sección efectiva de los mismos.

AGRADECIMIENTOS

Al apoyo económico de AGAUR, mediante el Programa de Doctorats Industrials de la Generalitat de Catalunya, Aigües de Barcelona, Empresa Metropolitana de Gestió del Cicle Integral de l'Aigua, S.A. (grupo Suez) e Institut Flumen (CIMNE, UPC).

REFERENCIAS

- Applebey, M. P. 1910. CCXI.—The viscosity of salt solutions. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 97, 2000–2025.
- Gillies, R. G., Shook, C. A. y Wilson, K. C. 1991. An improved two layer model for horizontal slurry pipeline flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 69(1), 173–178.
- Lencastre, A. C. y García, C. R. 1998. Manual de ingeniería hidráulica, Universidad Pública de Navarra.
- Sotelo, G. 1995. Hidráulica general: fundamentos, Limusa.