

Resultados preliminares de los experimentos del efecto de polarización originado por un flujo de agua confinado en una estructura cilíndrica

A. ROZYCKI (*), A. DE LA CUADRA (**), J. L. MONTE (**),
J. M. RUÍZ FONTICIELLA (**) y J. M. MARTÍNEZ SANTAMARÍA (**)

RESUMEN La modelización directa y la interpretación inversa del potencial espontáneo puede basarse en distintos procedimientos. Las fórmulas analíticas obtenidas para cuerpos geométricos es un forma sencilla pero eficaz de detectar y evaluar los flujos de agua a través de unas formas de los tipos fractura o tubificación. La fórmula para el calculo del efecto del potencial espontáneo, originado por el flujo de agua en un cilindro, contiene un parámetro denominado el momento de polarización; dicho momento fue introducido como consecuencia de las condiciones de contorno en la solución de la ecuación de Laplace para una esfera o cilindro. Sin embargo, hasta la fecha, no se han publicado resultados de experimentos físicos que justifiquen la existencia del momento de polarización. Debido a la importancia del concepto del momento de polarización en la interpretación inversa del potencial espontáneo medido en las presas de materiales sueltos se han realizado varios experimentos de laboratorio para esclarecer la existencia y las propiedades físicas de dicho parámetro. Los resultados obtenidos indican la existencia del momento de polarización. Su valor total puede ser descompuesto en un valor originado por el movimiento rotatorio y otro generado por translación del liquido a lo largo del eje del cilindro. La magnitud del momento de polarización crece significativamente cuando el régimen del flujo pasa de laminar a turbulento.

FALTA TITULO EN INGLES
FALTA TITULO EN INGLES

ABSTRACT *Forward and inverse modelling of self-potential data can be based on different procedures. Seepages through a fracture or a pipe-like structure can be easily detected and evaluated employing the analytical formulae obtained for simple, geometrical bodies. Some of them contain a term denominated the polarization moment. The concept of the polarization moment arises as a consequence of the boundary conditions in the solution of the Laplace equation for sphere, a cylinder section or cylinder. In spite of the fact that the polarization moment was used for several authors in the past, its existence has not been experimentally proved up to date and the best of our knowledge. The results of several experiments carried out on cylinder-like bodies show that the existence of polarization moment can be originated by a confined fluid flow in such structures. The polarization moment has two components: one linked with rotatory movement of the confined water flow and the second one with drag of the ions along the cylinder axis. The polarization moment increases significantly in non-linear flow regime and the obtained self-potential effects allow the reliable detection of even relatively short piping phenomena in the field recorded data.*

Palabras clave: Potencial espontáneo, Momento de polarización.

1. INTRODUCCIÓN

Habitualmente, las presas de materiales sueltos tienen filtraciones del agua embalsada por lo cual, en su proyecto y construcción se prevén filtros. El agua filtrada se recoge mediante drenes evacuándose de este modo del cuerpo de presa, permitiendo mediante medición de su caudal, evaluar la magnitud de las pérdidas. El flujo de agua a través de un material poroso y permeable crea un campo de potencial eléctrico que en condiciones favorables al proceso, puede al-

canzar una magnitud de varios voltios (Vagshal and Belayev, 2001). El potencial eléctrico vinculado con el flujo de agua puede expresarse utilizando las ecuaciones generales formuladas por Osanger (1931):

$$\Gamma_i = \sum_{j=1}^n L_{ij} \nabla \Phi_j \quad (1)$$

donde: Γ_i es el flujo del fenómeno i que se esta estudiando, Φ_j es el campo escalar del potencial y L_{ij} son los coeficientes macroscópicos cinéticos del proceso o coeficiente de acoplamiento (Titov et al., 2002).

En caso de filtraciones de agua los miembros de la ecuación (1) se refieren al potencial hidráulico y al potencial eléc-

(*) E.T.S.I.M.M. (UPM).

(**) Laboratorio de Geotecnia (CEDEX).

trico denominado habitualmente como el potencial de flujo (*streaming potencial*, SP). Estos potenciales generan una intensidad de corriente eléctrica o un caudal hidráulico.

Las ecuaciones (1) fueron utilizados por Sill (1983) en la modelización directa del potencial espontáneo en cuerpos bi-dimensionales. La aplicación de esta técnica de cálculo a la problemática de las presas en materiales sueltos puede encontrarse en Sheffer (2007). Dicho autor presenta en su tesis doctoral los resultados de modelización numérica de las medidas de SP realizadas en un experimento de filtración de agua en un cuerpo de presa a pequeña escala. Al ser un experimento de laboratorio se conocen todos los parámetros necesarios y la curva del modelo numérico se ajusta muy bien con los valores medidos de SP. El proceso de modelizado numérico consiste en resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\nabla \cdot \vec{j} = f \tag{2a}$$

$$\sigma^{-1} \cdot \vec{j} - \nabla \Phi = 0 \tag{2b}$$

$$f = -\nabla \cdot L \nabla h \tag{3}$$

donde: \vec{j} es la densidad de corriente eléctrica, f son fuentes de las corrientes de flujo, σ es la conductividad eléctrica, L es coeficiente de acoplamiento de corriente eléctrica, Φ es el potencial eléctrico y h es el potencial hidráulico.

En el mismo texto (Sheffer, 2007) se hallan resultados del calculo de los valores de SP para dos perfiles del potencial espontáneo efectuados sobre una presa de materiales sueltos. El autor utiliza diferentes parámetros eléctricos (14) considerando que existe el mismo número de elementos litológicos y materiales de construcción en el emplazamiento. La discretización del espacio para el cálculo es de orden de 10^6 elementos. Los resultados obtenidos permiten solamente reproducir la tendencia existente en los datos medidos de SP: Las diferencias pueden ser atribuidas a falta de algún valor de resistividad del terreno, mala elección del valor del coeficiente L o una filtración de agua canalizada en un camino preferente. Se considera que los resultados obtenidos son insuficientes para la evaluación del estado de filtración en la práctica.

Otra forma de modelizar o interpretar los valores anómalos locales de SP es mediante la utilización de las soluciones analíticas obtenidas para los cuerpos geométricos. La ventaja de esta manera de proceder es su sencillez y rapidez de cálculo ya que habitualmente no hay más de cuatro incógnitas para evaluar un modelo de un evento. Entre dichos modelos, el que corresponde al cilindro finito es de gran utilidad ya que se aproxima por su forma al proceso de tubificación que puede producirse en el núcleo impermeable de una presa. La formula para calcular SP en la superficie ($V(x, y, 0)$), para un cilindro finito, cuyo eje está orientado a lo largo de la coordenada y , está dada por la expresión (4):

$$V(x, y, 0) = M \frac{x \cos \theta - z \sin \theta}{\sqrt{x^2 + z^2}} \left[\arctan \left(\frac{y_2 - y}{\sqrt{x^2 + z^2}} \right) - \arctan \left(\frac{y_1 - y}{\sqrt{x^2 + z^2}} \right) \right] \tag{4}$$

donde M es el momento de polarización.

El concepto del momento de polarización aparece por primera vez en la solución analítica de la ecuación de Laplace para una esfera. (Petrovsky, 1928). Dicho autor la introduce como una de las condiciones de contorno, en la solución de la ecuación de Laplace, sin proporcionar ninguna justificación física ni teórica. De la misma manera el momento de polarización se emplea en la ecuación de la sección del cilindro infinito (Zaborovskyj, 1963; Bhattacharya and Roy, 1981; Rao et al., 1993 y recientemente Abdelrahman et al., 2003.). La existencia de un momento de polarización en el flujo de agua, confinado en un espacio tubular, es de cierta importancia ya que influye en la manera en la que disminuye el efecto de SP del cilindro con la distancia entre el detector y cilindro, lo que tiene a su vez una gran incidencia en la interpretación inversa de SP. Para aclarar este tema se han realizado una serie de experimentos de laboratorio cuyos resultados se comentan a continuación.

2. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS EXPERIMENTOS DE LABORATORIO

En la Fig. 1 se representa un esquema de los instrumentos empleados en los experimentos. En un tubo de PVC se ubican dos cilindros concéntricos de material granular, cada uno con distintas propiedades hidráulicas (ver Fotos 1 y 2). El cilindro exterior (C_e) tiene el diámetro de 0,3 m, y el cilindro interior (C_i) 0,1 m, siendo la longitud de ambos cilindros de 1 m. El dispositivo de medidas del potencial eléctrico

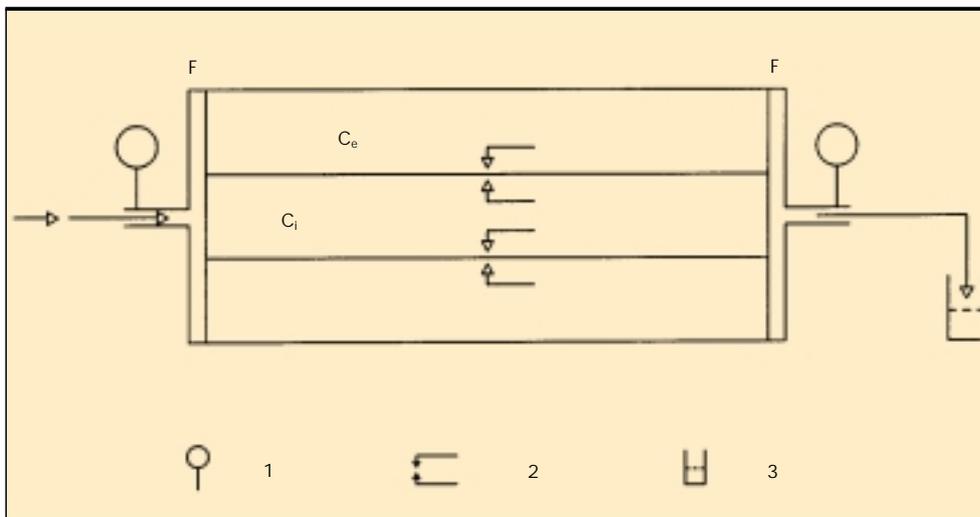


FIGURA 1. Esquema de la instrumentación empleada en los experimentos. (1) manómetro, (2) dispositivo de medida del potencial eléctrico, (3) aforador, (F) filtro de dispersión, (C_e) cilindro externo, (C_i) cilindro interno.



FOTO 1. Equipo empleado en los ensayos: Cilindro de PVC (derecha) y sistema de adquisición de datos (izquierda).



FOTO 2. Disposición concéntrica de dos terrenos (una vez desmontado el ensayo).

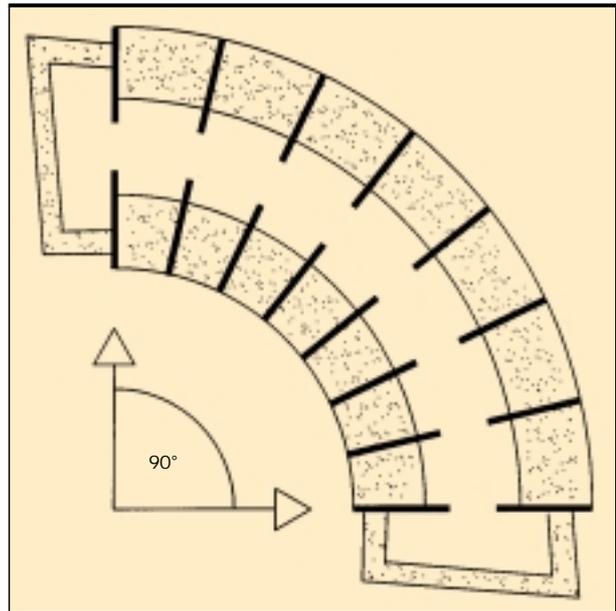


FIGURA 2. Dispositivo de medida del potencial eléctrico. Con líneas gruesas se señalan los electrodos.



FOTO 3. Dispositivo de medida del potencial eléctrico.

se muestra esquemáticamente en la Fig. 2 y en la Foto 3 y está ubicado de manera que simula las condiciones de contorno empleadas en la solución de la ecuación de Laplace. Los ocho pares de los electrodos del dispositivo están recubiertos de oro y separados por un ángulo de $12,9^\circ$ para cubrir un cuarto de círculo (90°) con fin de detectar la posible polarización del campo eléctrico provocado por el flujo de agua. Los electrodos sobresalen $0,5\text{ cm}$ de su soporte y entre cada par opuesto hay una distancia fija de $1,5\text{ cm}$ (Foto 3).

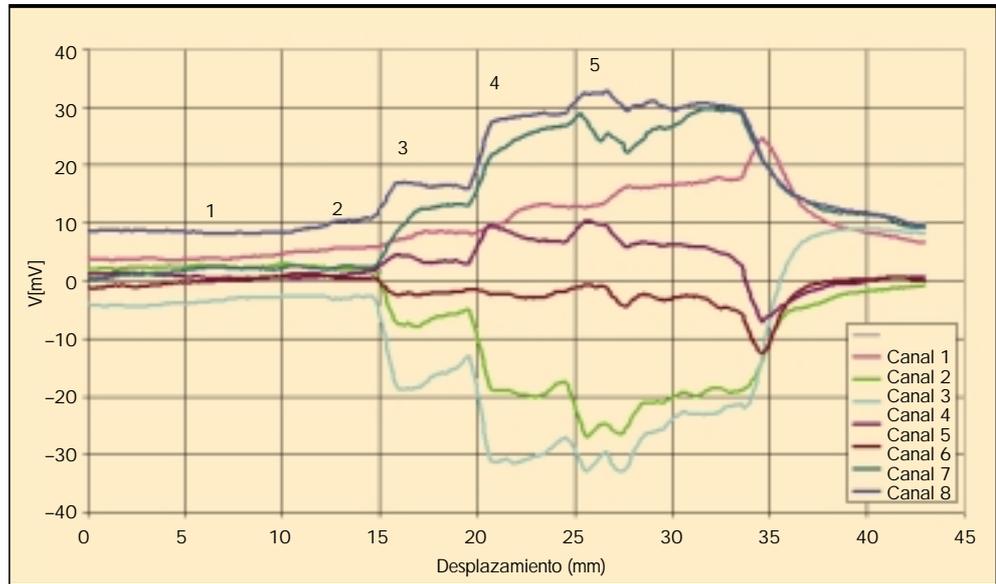


FIGURA 3. Curvas de SP registradas en un ensayo, los números de 1 a 5 indican los tramos de las curvas elegidos para el análisis posterior más detallado.

Dichos electrodos están conectados a un ordenador personal a través de convertidores analógico-digitales y la adquisición de datos se realizó con un programa desarrollado mediante la aplicación LabView 8 de National Instrument. La frecuencia de muestreo fue de 200-300 muestras por segundo en memoria, volcándose, al finalizar el ensayo, al disco duro para su futuro procesado. Las conductividades hidráulicas K_e y K_i de cada uno de los materiales se establecían de manera que siempre cumplieran la siguiente relación: $K_e \ll K_i$. En varios de los experimentos realizados se emplearon arenas y gravas con distintas dosificaciones para obtener diferentes valores de K . Durante los ensayos se incrementó la

presión de entrada de agua –regulándose mediante un manómetro– con escalones de 0,02 MPa. Una vez transcurrido el tiempo necesario para la estabilización de las medidas, controlándose el comportamiento de las curvas de SP en la pantalla del ordenador en tiempo real.

Los resultados de uno de estos ensayos se representa en la Fig. 3. El ensayo se realizó para $K_e = 10^{-7}$ m/s y $K_i = 10^{-4}$ m/s. Antes de comenzar las medidas, la muestra se saturó lentamente con agua de conductividad $118 \mu\text{S/cm}$. Durante el proceso de saturación, con duraciones de entre 4 y 6 semanas, se tomaban medidas de control. Si las curvas medidas registraban valores repetitivos entre ensayos consecuti-

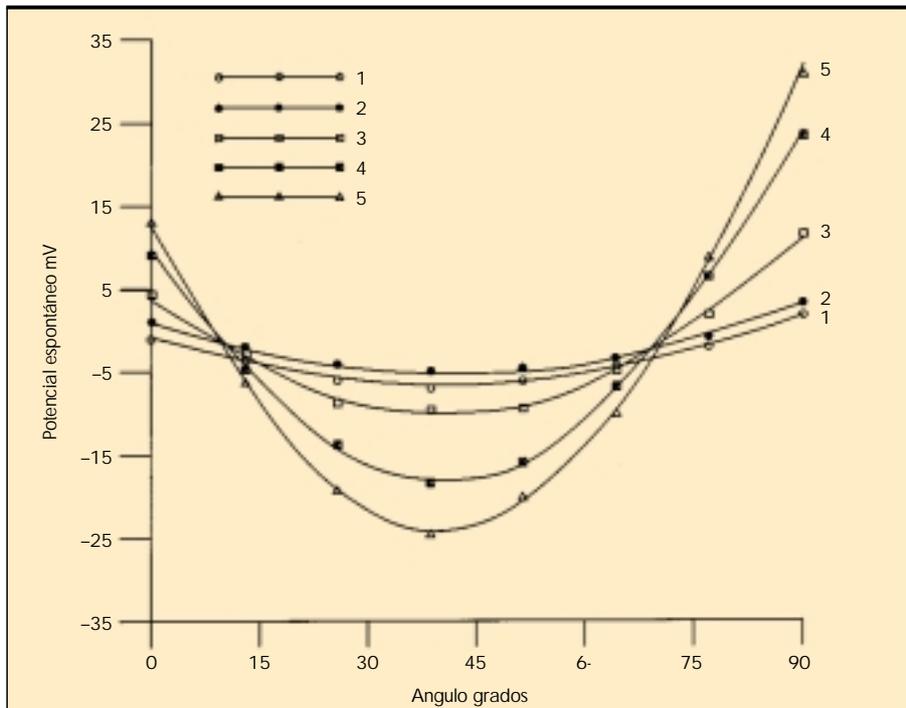


FIGURA 4. Curvas del ajuste de los resultados del ensayo descrito en el texto (Fig. 3). Los símbolos geométricos indican los valores tomados por el dispositivo de medida. Las curvas continuas muestran los valores del ajuste utilizando la expresión (5).

Tramo N°	Presión 0.1*MPa	M ₁ mV	φ grad	ω 1/ciclo	M ₂ mV
1	0.7	18.0	138.0	1.00	19.8
2	1.2	22.0	135.0	1.02	21.0
3	1.7	42.0	131.0	1.04	36.0
4	2.1	100.0	135.0	1.03	86.0
5	2.8	115.0	132.0	1.02	95.0

TABLA 1.

vos, se consideraba que se obtenía una curva definitiva para el ensayo concreto.

Los intervalos de tiempo marcados de 1 a 5 en la Fig. 3 son tramos elegidos para un análisis más detallado, utilizando los valores promediados para intervalos menos estables. Los valores de SP en mV obtenidos de esta manera se representan en las ordenadas de la Fig. 4. En abscisas se representan los ocho pares de electrodos mediante su posición angular en el dispositivos de medida. Dichos datos se ajustaron a los valores generados mediante la siguiente fórmula:

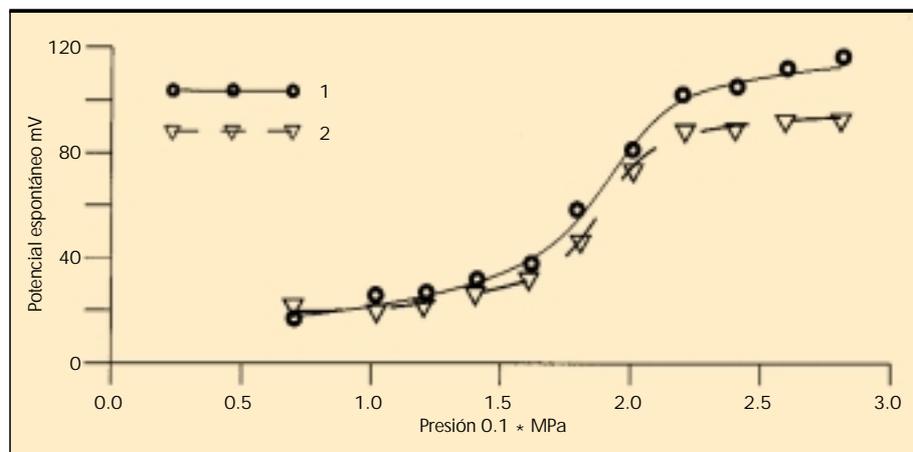
$$M = M_1 * \cos(\omega \cdot i + \varphi) + M_2 \quad (5)$$

donde: M es el momento de polarización total, M₁ y M₂ son sus componente radial y lineal respectivamente, ω es la frecuencia angular, i es un parámetro y φ es el ángulo de polarización. Los valores de ajuste de la fórmula (5) se representan en la Tabla 1. Se observa un buen ajuste de la función coseno (5) a los datos experimentales y también se puede observar que el ángulo de polarización (φ) y frecuencia (ω) son prácticamente estables durante el ensayo. Las pequeñas oscilaciones que muestran dichas magnitudes pueden atribuirse a los errores de medidas. Los cambios realmente significativos con el aumento de la presión muestran los parámetros M₁ y M₂. Dichos cambios se representan en la Fig. 5. En las curvas pueden distinguirse tres tramos principales. El primero de ellos corresponde al flujo laminar, inferior a la presión de 1,3 [0,1*MPa], el último tramo es representativo de los valores de presión superiores a 2,1 [0,1*MPa], y está vinculado al movimiento turbulento del agua, y finalmente se puede distinguir un tramo de transición comprendido entre los dos anteriores. Si comparamos la Fig. 5

con la Fig. 6, en la cual se representan los valores de caudal y velocidad del flujo respecto a la presión, se puede concluir que es el caudal la variable directamente correlacionada con los cambios de los parámetros M₁ y M₂. Dicha relación puede ser entonces utilizada en la valoración del riesgo provocado por el flujo de agua en una tubificación así como para su cuantificación. Este tipo de razonamiento, aplicado de manera intuitiva, fue utilizado por Bogoslovsky y Ogilvy, (1970) para ponderar los valores relacionados con fugas de agua de un embalse. De los datos que se observan en la Fig. 3 se puede concluir que el efecto de SP originado por el flujo de agua es reversible ya que vuelve a su estado inicial con la disminución de las presiones aplicadas.

Los resultados presentados en la Fig. 3 y en la Tabla 1 demuestran la existencia de un efecto de polarización originado por un flujo de agua confinado en un cilindro, que se suele denominar el momento de polarización. Como se deduce de la ecuación (5) el potencial eléctrico vinculado con dicho flujo tiene dos componentes M₁ y M₂ que corresponden respectivamente a un movimiento rotatorio y a uno de translación. La primera componente es debida a la fuerza centrífuga del movimiento rotatorio del líquido en su flujo de régimen turbulento. El valor absoluto de la velocidad radial que actúa sobre la masa de un ion tiene un máximo cerca del límite del cilindro donde se produce el flujo (Hsien-Ping, 1970), lo que podría explicar el salto de potencial en dicho límite. La segunda componente es consecuencia del arrastre del exceso de iones en el líquido que se encuentra en los poros. Ambas componentes crecen con el aumento de la presión y toman sus valores más significativos para un flujo en régimen turbulento. Este efecto sugiere cierta ventaja de los métodos de interpretación basados en la fórmula (5) res-

FIGURA 5. Cambios de los parámetros ajustados M₁ y M₂ con el aumento de la presión. (M₁) Curva 1, (M₂) Curva 2.



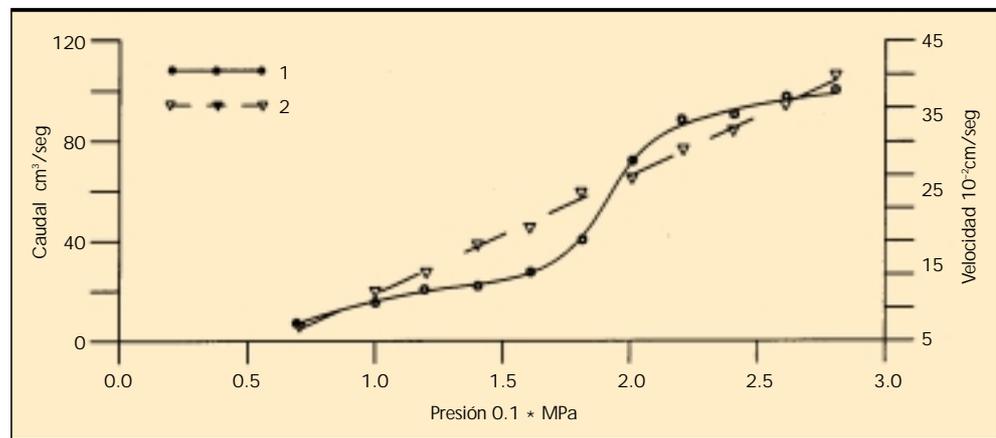


FIGURA 6. Cambios del caudal (Curva 1) y de la velocidad (Curva 2) registrados durante el experimento.

pecto a las soluciones obtenidas por el sistema de las ecuaciones (2) y (3) ya que éstas últimas se pueden emplear solamente dentro de la validez de la ley de Darcy, es decir requieren condiciones de flujo laminar.

Los experimentos llevados a cabo indican que un efecto de SP originado en una tubificación tiene unas magnitudes suficientemente grandes para poder ser detectadas a grandes profundidades, incluso para estructuras cilíndricas de pequeño diámetro. La componente rotatoria de la polarización tiene probablemente carácter aleatorio en la orientación de su eje de polarización ya que en distintos ensayos se obtuvieron diferentes valores de dicho parámetro. Sin embargo, parece ser que una vez establecido el fenómeno, dicho eje se mantiene constante en distintos regímenes de flujo. Queda por determinar si la orientación del eje de polarización es de carácter local o es característica para toda la estructura cilíndrica. También hacen falta más ensayos para evaluar la influencia, si ésta existe, de la ubicación del dispositivo que mide el potencial eléctrico a lo largo del eje de cilindro.

3. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en los experimentos llevados a cabo indican la existencia de un momento de polarización originado por un flujo de agua en las estructuras de forma cilíndrica. Dicho momento de polarización aumenta de manera significativa su magnitud con el incremento de la presión en régimen no-laminar, lo que a su vez está correlacionado positivamente con el caudal de flujo en la estructura de tubificación. En dicho régimen de flujo crece la probabilidad de arrastre de las partículas con el consiguiente aumento del riesgo para la estructura afectada.

Las magnitudes del efecto de SP son suficientemente grandes para poder ser detectadas en los casos de filtraciones de agua en los cuerpos de presas. En ensayos posteriores se debería estudiar la relación del momento de polarización con la permeabilidad del medio tubular, donde se desarrolla el flujo, para determinar si es posible un pronóstico de riesgo basado en dicho parámetro.

4. REFERENCIAS

- Abdelrahman, S. M., H. M. El-Araby, A. G. Hassaneen, and M. Hafez, 2003, New method for shape and depth determination from SP data, *Geophysics*, vol. 68, no. 4, p. 1202-1210, 10.1190/1.1598112.
- Bhattacharya, B., B. and Roy, N., 1981, A note on the use of nomograms for self potential anomalies, *Geophysical Prospecting*, 29, 102-107.
- Bogoslovsky, V. A. and Ogilvy, A., A., 1970, Natural potential anomalies as a quantitative index of the rate of seepage from water reservoir, *Geophysical Prospecting*, 18, 261-268.
- Hsien-Ping Pao, 1970, A numerical computation of a confined rotating flow, *J. of Applied Mechanics*, June, p. 480-487.
- Onsager, L., 1931, Reciprocal relations in irreversible processes I: *Phys. Rev.*, vol. 37, p. 405-426.
- Petrovsky, A. A., 1928, Problem of a hidden polarised sphere, *Phil. Mag.*, vol. 5, p. 334- 352.
- Rao S. J., P. R. Rao, and I. V. R. Murthy, 1993, Automatic inversion of self-potential anomalies of sheet-like bodies, *Computer and Geosciences*, vol. 19, no. 11, p. 61-73.
- Sheffer, M. R., 2007, Forward modelling and inversion of streaming potential for the interpretation of hydraulic conditions from self-potential data, Ph. D. thesis, Univ. of British Columbia.
- Sill, W.R., 1983, Self-potential modeling from primary flows, *Geophysics*, vol. 48, no.1, p. 76-86.
- Titov, K., Yu. Ilyin, P. Konosavsky, and A. Levitski, 2002, Electrokinetic spontaneous polarization in porous media: petrophysics and numerical modelling, *J. of Hydrology*, vol. 267, Issues 3-4, p. 207-216.
- Vagshal, D. S. and Belayev, S. D., 2001, Self-potential anomalies in Cerro de Pasco and Hualgayoc areas (Peru) revisited, *Geophysical Prospecting*, 49, 151-156.
- Zaborovskiy, A. I., 1963, *Elektrorazvedka, Gostoptehizdat*, p.p. 423.