

**Título:** Los Serrines de Granito como Barrera de Impermeabilización para su Uso en Vertederos

**Autor:** Ismael Falcón Suárez

**Director:** Jordi Delgado Martín y Ricardo Juncosa Rivera

**Centro:** Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña. Campus de Elviña s/n. 15192, A Coruña (España).

**Fecha de lectura:** 22 de julio de 2011

**Tribunal:** Francisco Javier Elorza, Vicente Navarro, Dieter Rammilmair, Francisco Padilla Benítez y Fernando Martínez Abella.

**Calificación:** Sobresaliente "Cum laude"

# Los Serrines de Granito como Barrera de Impermeabilización para su Uso en Vertederos

/ ISMAEL FALCÓN SUÁREZ

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña. Campus de Elviña s/n. 15192, A Coruña.

## INTRODUCCIÓN

Los vertederos controlados son elementos de ingeniería destinados a la eliminación de residuos tanto en la superficie, como bajo tierra. Su construcción suele aprovechar depresiones del terreno, ya sean estas naturales o artificiales. En cualquiera de los dos casos, es preciso compactar e impermeabilizar el fondo y los laterales del vaso de recepción de residuos. La eficacia de la impermeabilización, tanto de los contornos como de la capa de sellado superficial, resulta clave para evitar la contaminación del sistema agua-suelo circundante.

El uso de materiales finos para la construcción de capas de sellado y/o impermeabilización de vertederos no es nuevo, pudiendo citarse entre otros los residuos de distintos procesos industriales tales como cenizas volantes, fangos de depuradora o la fabricación de áridos. El uso de tales materiales, como alternativa a otros materiales sintéticos (geo-textiles o geo-membranas) constituye, en sí mismo, una política de gestión de residuos. En contraposición con las ventajas económicas y ambientales ofrecidas por los finos, el escaso conocimiento en relación con su comportamiento al ser expuestos a medio y largo plazo constituye un obstáculo.

## OBJETIVO

El trabajo desarrollado en la tesis doctoral aborda el estudio de la viabilidad de un material fino, conocido como serrines de granito, de cara a su uso

como materia prima para la construcción de barreras de impermeabilización y/o sellado. Para ello, partiendo de la amplia caracterización física, química y mecánica llevada a cabo sobre este material durante los últimos años, (Vázquez, 2005; Barrientos et al., 2010) hemos desarrollado diferentes modelos experimentales a través de los cuales se ha podido evaluar su comportamiento en referencia a su capacidad como barrera de flujo, desde la perspectiva del control detallado que ofrecen los ensayos de laboratorio a pequeña escala.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El término serrines de granito se aplica a aquellos materiales de granulometría fina (limo-arcilla), generados durante las operaciones de corte, pulido y acabado de bloques de roca granítica extraídos de canteras. El proceso de corte de los bloques de cantera suele llevarse a cabo mediante el empleo de telares de corte con flejes de acero refrigerados con agua, la cual transporta una carga de granalla de acero. Durante este proceso, el agua para la refrigeración de los flejes y para la resuspensión de la granalla y finos es basificada mediante la incorporación de hidrato de cal. El material residual del proceso de corte decanta en fangos de sedimentación, siendo espesado mediante filtros-prensa. Las tortas de los filtros presentan, en promedio, los siguientes valores aproximados: 36% de agua, 0.5% de cal, 16% de granalla de acero y 47% de fragmentos minerales propios de las rocas sometidas al corte. Es a este residuo al que denominamos serrines de granito.

La búsqueda de respuestas relacionadas con el comportamiento hidráulico de los serrines de granito, que permitan esclarecer la viabilidad del uso de estos finos como material de obra para la construcción de barreras de impermeabilización y/o sellado, es abordada desde un enfoque experimental mediante modelos a pequeña y mediana escala en el laboratorio.

A continuación se describen brevemente las características de los diseños experimentales empleados, así como el enfoque de la investigación en los ensayos llevados a cabo sobre cada uno de ellos.

## Columna para el análisis hidrogeoquímico de materiales granulares

Se trata de una columna de ensayo para análisis unidimensional del comportamiento hidrodinámico y geoquímico de materiales granulares no consolidados. El dispositivo consta de una columna de PVC rígida de 7 cm de diámetro, con un volumen útil ~2 dm<sup>3</sup>. Éste se encuentra equipado con herramientas de análisis no destructivo, tales como un escáner de rayos-X y una lámina geofísica para la medida de la conductividad eléctrica en suelos, evitando que el registro de datos interfiera en el comportamiento físico del sistema (técnicas de carácter no intrusivo).

Los serrines fueron deshidratados e introducidos en el interior de la columna, para ser sometidos a un proceso de hidratación progresiva desde la base del dispositivo. El proceso de hidratación fue monitorizado en continuo (humedad y

**palabras clave:** Serrines de Granito, Vertederos, Permeabilidad, Lixiviados, Costras de Oxidación

**key words:** Granite Fines, Landfills, Permeability, Leachates, Hardpans.

conductividad eléctrica), hasta alcanzar la condición de máxima saturación. Tras alcanzar este estado, se indujo su deshidratación parcial, empleando extractores de soluciones acuosas para suelos Rhizon. Esto permitió analizar el agua intersticial de los serrines de granito desde los puntos de vista fisicoquímico y composicional. Además, el proceso de extracción permite evaluar la conductividad hidráulica del material en las condiciones de ensayo, a partir de los registros caudal-tiempo obtenidos de cada uno de los extractores

Por último, se permitió que la columna se deshidrata de forma natural durante varios meses (evaporación inducida por las condiciones ambientales del laboratorio de trabajo), período tras el cual se desmanteló el dispositivo para examinar los eventuales cambios desarrollados en la mineralogía original del material.

#### **Columna con sensores de humedad y succión**

El dispositivo experimental consistió en un recipiente cilíndrico de metacrilato de 0.35 m de radio y un volumen útil de ensayo de 50 dm<sup>3</sup>, equipado con sensores de humedad y succión (psicrómetros y sondas de capacitancia) ubicados a diferentes alturas. Los sensores permiten analizar la evolución del sistema suelo-agua del material alojado en la columna, en respuesta a la inundación controlada mediante un sistema de riego acoplado al dispositivo. Un sistema de colectores situados en la base del cilindro permitieron almacenar, cuantificar y analizar los lixiviados procedentes de la percolación del material alojado en la columna.

Los ensayos desarrollados en la columna han empleado serrines de granito bajo diferentes condiciones iniciales, producto del procedimiento de puesta en obra ejecutado y la humedad original del material. Los datos registrados están enfocados a la evaluación de parámetros hidráulicos de interés en los serrines, tales como la conductividad hidráulica o la capacidad de campo, tanto de forma directa (a partir de los resultados observados), como de forma indirecta (empleando herramientas de simulación numérica).

#### **Tanque de electrodos**

Consiste en un cilindro de PVC con dimensiones análogas a las del cilindro de metacrilato descrito en el apartado anterior. Está equipado con un total de

80 electrodos que penetran lateralmente en el material ensayado desde la pared del tanque. Los electrodos se disponen en 5 anillos con 16 unidades cada uno, ubicados a diferentes alturas y configurados para realizar lecturas programables de la conductividad eléctrica del material alojado en el interior del dispositivo. La técnica permite evaluar el comportamiento del sistema suelo-agua con mínima interferencia en su dinámica natural (sólo los contornos se ven afectados). La hidratación de la columna se realizó desde su superficie de forma escalonada, hasta la aparición de los primeros lixiviados en los colectores inferiores del dispositivo experimental. Durante ese tiempo, se llevó a cabo un seguimiento de la conductividad eléctrica del material partir de la señal registrada por los electrodos. En el post-procesado de los datos registrados se obtiene la transformación de la señal eléctrica en grado de saturación, permitiendo evaluar el avance del frente de infiltración a través de la columna de serrines.

#### **Dispositivo ES-2345472-B1**

El dispositivo experimental "Dispositivo para la simulación del comportamiento termo-hidro-mecánico de barreras de materiales finos para la impermeabilización y sellado de vertederos", ES-2345472-B1 (Juncosa et al., 2011), consiste en un recinto de hormigón armado de planta cuadrada ~4.4 m<sup>2</sup> (abierto a techo y base), con elementos de soporte internos, sobre el cual se pueden verter y compactar materiales granulares, empleando para ello maquinaria de obra ligera. Cuenta con un sistema automatizado de riego que abastece unas boquillas nebulizadoras, a través de las cuales se suministra agua a la superficie del material de manera controlada. Su finalidad es simular condiciones de lluvia realistas. El emplazamiento de sensores de humedad en el material de ensayo tiene por objeto monitorizar la evolución del sistema suelo-agua. De ese modo, un sistema de colectores dispuestos en la parte inferior de la barrera permite recoger y analizar los lixiviados procedentes de la percolación del material estudiado.

Durante este trabajo se llevó a cabo una configuración tipo barrera capilar, combinando una arena comercial, compactada con cierta pendiente en condiciones de baja humedad sobre la cual se vertieron y compactaron tongadas de serrines de granitos hasta recuperar la horizontalidad superficial. Una vez alcanzadas las condiciones prescritas para el ensayo, se llevaron a cabo dos ejemplos de aplicación. En primer lugar,

el sistema fue configurado para el riego automático del modelo, intentando reproducir unas condiciones pluviométricas cercanas a las de un emplazamiento concreto (condiciones realistas), a partir de datos del registro histórico de lluvias de la región con mayor producción de serrines de granito (zona occidental de la provincia de Pontevedra). Tras este primer ejemplo, se llevó a cabo un ensayo con ciclos repetidos de hidratación/secado, en los cuales los procesos de deshidratación se desarrollaron tanto vía no forzada (evaporación natural), como forzada mediante la ventilación inducida con un flujo de aire desde la base del recinto.

### **RESULTADOS**

Los resultados alcanzados en los diferentes ensayos experimentales abarcan aspectos hidrogeoquímicos, hidrodinámicos y mineralógico, de los serrines de granito. La caracterización de los lixiviados de serrines de granito ha mostrado que nunca superan los valores máximos permitidos para residuos inertes (caso de los serrines), tal y como queda recogido en la Directiva 1999/31/CEE (2003/33/CE). En el análisis de su agua intersticial se han registrado las mayores concentraciones de elementos peligrosos pero, a excepción del Cr, nunca superan los valores límite de la Directiva, cuando se comparan con los ensayos normalizados de percolación.

Al igual que el Cr, muchos metales aparecen concentrados, de forma preferente, en el agua de poro respecto del agua de drenaje libre, lo cual denota que estos constituyentes tienden a permanecer retenidos en el material. Por tanto, los serrines se configuran como una posible barrera geoquímica para su inmovilización, al menos, con carácter temporal.

Desde el punto de vista hidrodinámico, los serrines han mostrado una conductividad hidráulica superior a la esperada, según los valores presentados por Barrientos et al. (2010) a partir de ensayos geotécnicos convencionales, situándose en torno a  $4 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ . Este valor resultaría insuficiente para la aplicación deseada según el Real Decreto 1481/2001, que regula los requisitos generales para cualquier tipo de vertederos. No obstante, los resultados del ensayo de barrera capilar empleando los serrines como material fino, superpuestos a una capa de arena compactada inclinada superficialmente, mostraron que, el agua infiltrada a través de los serrines de granito (~1.9 m<sup>3</sup> a lo largo

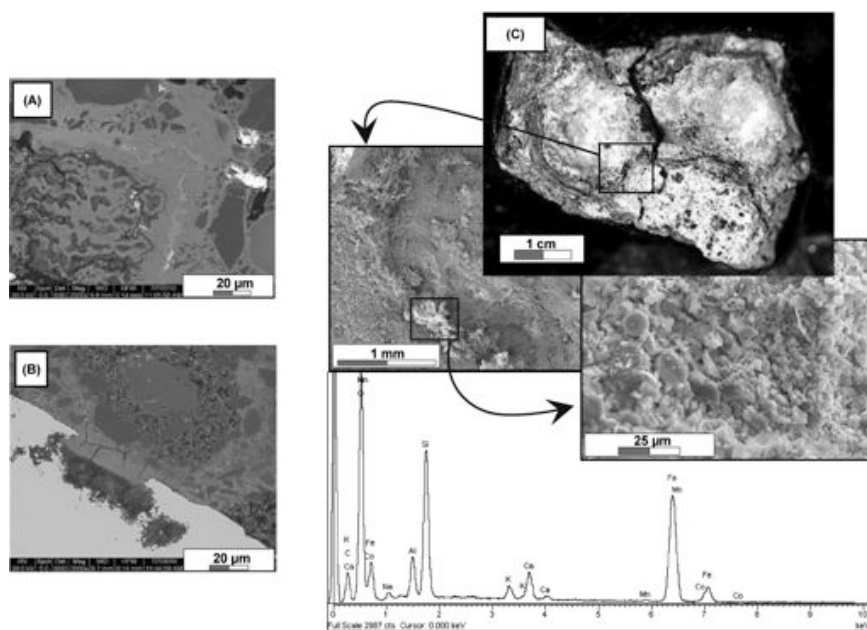


fig 1. A y B, formación de hardpans en el seno de serrines de granito; C, formación de hardpans entre granos de arena, afectados por lixiviados procedentes de serrines de granito suprayacentes.

del ensayo) drenó lateralmente a favor de la interfaz serrines/arena. Por lo tanto, para la configuración planteada, la eficacia de la barrera capilar fue del 100%, en términos de desviación lateral del flujo de infiltración, durante el tiempo de ejecución del ensayo (6 meses). Esto, en términos de permeabilidad relativa permitiría pensar en el uso de este material, los serrines de granito, como barrera de oposición al flujo de infiltración para su uso en vertederos, de acuerdo con el mismo Real Decreto.

El análisis textural y mineralógico llevado a cabo sobre secciones pulidas fabricadas a partir de muestras tomadas de las columnas experimentales de serrines de granito, ha permitido identificar la formación de costras de oxidación (hardpans) en zonas donde el material se encuentra en contacto directo con la atmósfera (fig. 1A y B). Estas mineralizaciones, producto de la oxidación de granalla presente en los serrines o por la precipitación de minerales como producto de reacciones químicas de la interacción agua/serrines, actúan como un cemento de los granos del material. Como consecuencia, se reduce la porosidad, lo cual se traduce en una disminución (pequeña en nuestros ensayos) de la permeabilidad del sistema. Los encostramientos fueron también identificados en las gravas y arenas empleadas como capas drenantes en algunas columnas experimentales (fig. 1C), por la acción de lixiviados procedentes de serrines de granito. Por tanto, la fábrica original de la grava se vio modificada, quedando reforzada por el cemento neoformado (textura grano-portante).

### CONCLUSIONES

Los valores de conductividad hidráulica determinados experimentalmente mediante ensayos controlados en laboratorio con serrines de granito bajo distintos grados de compactación y humedad, han mostrado resultados superiores a los máximos exigidos para barreras minerales empleadas como aislantes en los contornos de vertederos, de acuerdo con el Real Decreto 1481/2001, salvo para el caso particular de la configuración de barrera capilar combinados con arena. Por tanto, su uso como capa para la impermeabilización de vertederos sólo es aconsejable bajo esta particular configuración. El análisis de los lixiviados procedentes del lavado de serrines de granito muestra que no superan los valores máximos permitidos en residuos inertes (2003/33/CE), actuando de forma adecuada como barrera geoquímica frente al transporte e inmovilización de ciertos contaminantes.

El análisis textural y composicional en serrines de granito envejecidos, ha permitido identificar formaciones de costras de oxidación (hardpans), preferencialmente ligadas a zonas donde el material se encontró en contacto directo con la atmósfera.

Esto lleva asociado una reducción parcial de la porosidad del material y, consecuentemente, un descenso en su permeabilidad, tanto en los propios serrines de granito como en el material circundante afectado por la acción de sus lixiviados.

### AGRADECIMIENTOS

El trabajo ha sido llevado a cabo al amparo de los proyectos concedidos por el Ministerio de Educación (BIA2005-07916-C02-01) y la Xunta de Galicia (PGIDT06PXIC176002PN).

### REFERENCIAS

Barrientos, V., Delgado, J., Navarro, V., Juncosa, R., Falcón, I. y Vázquez, A. (2010): Characterization and geochemical-geotechnical properties of granite sawdust produced by the dimension stone industry of O Porrino (Pontevedra, Spain). *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43, 141-155.

Delgado, J. & Juncosa, R. (2005): Estudio de los residuos de corte de granito ("serrines") en relación con sus características como residuo, su potencial contaminante y aplicaciones prácticas en ingeniería civil. *Revista Academia Galega de Ciencias*, 24, 73-258.

Di Bonito, M. (2005): Trace elements in soil pore water: a comparison of sampling methods. *Tesis Doctoral, University of Nottingham*.

Juncosa, R., Delgado, J., Vázquez, A., Barrientos, V. y Falcón, I. (2011): Dispositivo para la simulación del comportamiento termo-hidro-mecánico de barreras de materiales finos, para la impermeabilización y sellado de vertederos. *Patente de invención ES 2345472 B1, Universidade da Coruña, España*.

Navarro, V., Barrientos, V., Yustres, A. y Delgado, J. (2008): Settlement of embankment fills constructed of granite fines. *Computers & Geosciences*, 34, 978-992.

Redwan, M. & Rammlmair, D. (2010): Simultaneous monitoring of water saturation and fluid conductivity in unconsolidated sand columns. *Soil Science Society of America Journal*, 74, 1457-1468.

Van Genuchten, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of soil. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.

Vázquez, A. (2005): Modelización Geoquímica de los Serrines de Granito. *Tesis Doctoral, Universidade da Coruña*.

Vázquez, A., Juncosa, R., Barrientos, V., Falcón, I. y Delgado, J. (2007): Hydrodynamic and reactive transport modeling of the behavior of compacted granite saw dust for landfill liners & covers. *Water-Rock Interaction*, 1, 653-657.