

ESTUDIO DE RELLENOS COMPACTADOS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE ATAGUÍAS EN INDONESIA¹

Marcelo Sánchez², Grainne El Mountassir³ y Enrique Romero⁴

Resumen: Existe un interés renovado y creciente por estudiar el comportamiento de presas para protección de inundaciones. Es importante estudiar el comportamiento de los rellenos típicamente utilizados en su diseño en condiciones similares a las utilizadas en su construcción. Este trabajo se centra en el estudio del comportamiento bajo colapso volumétrico de un relleno utilizado en la construcción de las presas de protección de avenidas del río Bengawan Solo en Indonesia. Una historia recurrente de rebasamientos y fallas de estas presas despertó el interés por entender mejor el comportamiento del relleno compactado bajo diferentes condiciones de carga y de secado/humedecimiento. Para cubrir las diferentes condiciones operacionales posibles de estas presas, se realizaron ensayos edométricos saturados y no saturados (a contenido de humedad constante) en edómetros convencionales bajo diferentes condiciones de carga y humedecimiento. Se observó que muestras a densidades similares a las encontradas in-situ y sometidas a mojado bajo carga mostraron un claro comportamiento de colapso volumétrico. Un detallado estudio de la micro-estructura del relleno sometido a diferentes condiciones de carga y mojado; aportó evidencias adicionales en este sentido.

Palabras clave: ataguías, colapso volumétrico, micro-estructura, relleno no-saturado.

STUDY OF COMPACTED FILLS USED IN THE CONSTRUCTION OF LEVEES IN INDONESIA

Abstract: With increased interest in the performance of levees globally, it is important that the behavior of fills in conditions similar to 'as-constructed' is revised. This paper focuses on the collapsible behavior of a fill used in the construction of flood defense embankments along the Bengawan Solo River in Indonesia. The recurrent history of overtopping and failures of these embankments has awoken the interest in a better understanding of the behavior of this compacted fill under different loading and wetting conditions. To cover different plausible operational conditions of these embankments, saturated and unsaturated (constant water content) oedometer tests were performed in conventional cells under different initial and loading/soaking conditions. It was detected a clear collapsible behavior (upon wetting) in samples compacted in conditions similar to 'as-constructed'. Further evidences in this respect were obtained from a detailed microstructural study of the fill-material fabric aimed at understanding how typical loading and wetting paths can affect the soil-structure stability.

Keywords: levees, microstructure, unsaturated fill, volumetric collapse.

INTRODUCCIÓN

Las presas de protección de inundaciones son generalmente consideradas como obras simples y de bajo costo. Como consecuencia directa de estos factores, este tipo de presas son (en ocasiones) pobremente controladas, siendo común observar en el cuerpo de ellas una distribución no uniforme de densidades, con predominancia de los valores bajos de Compactación Relativa (CR); éste es el cociente entre la densidad seca compactada in-situ y la máxima densidad seca determinada de acuerdo al ensayo Proctor estándar. El comportamiento de estas presas puede ser significativamente afectado por la presencia de rellenos compactados de baja densidad, porque las propiedades clave (por ej. permeabilidad, resistencia al corte, compresibilidad) dependen fuertemente de la densidad seca. Además, suelos compactados con una estructura abierta (baja densidad seca) son susceptibles a colapso volumétrico durante su mojado. Este artículo se centra

¹ Artículo recibido el 20 de setiembre de 2011 como parte del 2do Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia. Artículo aceptado en versión final el 15 de noviembre de 2011.

² Profesor Asociado, Zachry Department of Civil Engineering, Texas A&M University, College Station, Texas, USA. E-mail: msanchez@civil.tamu.edu

³ Investigador, Department of Civil Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, UK. E-mail: grainne.elmountassir@strath.ac.uk

⁴ Profesor, Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España. E-mail: enrique.romero-morales@upc.edu

especialmente en esta característica de comportamiento de los suelos compactados, aplicado al estudio de una presa de control de avenidas en Indonesia.

El colapso volumétrico en suelos fue definido por Lawton et al. (1992) como la densificación de suelos causada por la adición de agua bajo condiciones de tensiones totales constantes. Para que este fenómeno ocurra se requieren cuatro condiciones principales (por ej., Barden et al., 1973; Mitchell, 1993): i) una estructura abierta, inestable y parcialmente saturada; ii) una carga suficientemente alta, ante la cual la estructura de suelos es meta-estable; iii) un elemento que genere un efecto cementante que establezca la fábrica en estado seco; y iv) la adición de agua. En suelos no saturados, la succión (asociada a la tensión capilar) actúa como un elemento estabilizante de la fábrica del suelo. La reducción de la succión durante el mojado ha sido identificada como una de las principales causas de colapso volumétrico durante mojado (por ej., Fredlund y Rahardjo, 1993). Además, durante el mojado, los agregados se reblandecen y los ‘puentes de arcilla’ (generalmente presentes en la fábrica no saturada) se reblandecen, contribuyendo al cambio de volumen. La densificación no recuperable, que tiene lugar durante el colapso volumétrico por mojado es una consecuencia directa del reagrupamiento y plastificación de los agregados. Estudios recientes de la micro-estructura de suelos han mostrado que la fábrica de suelos compactados generalmente presenta dos tipos de poros dominantes: los inter-agregados y los intra-agregados (por ej., Delage et al., 1996; Lloret et al., 2003; Romero y Simms, 2008; Romero et al., 2011). El estudio de la distribución de poros en suelos compactados y sus cambios durante el mojado ayudan a un mejor entendimiento del fenómeno de colapso volumétrico. Tal vez las técnicas experimentales micro-estructurales más difundidas en mecánica de suelos son, de acuerdo con sus siglas en inglés: MIP (*Mercury Intrusion Porosimetry*), SEM (*Scanning Electron Microscopy*) y ESEM (*Environmental SEM*).

Las presas de protección de avenidas a lo largo del río Bengawan Solo en el Este de Java (Indonesia) han tenido una historia persistente de desbordamiento y fallas, incluso después que se implementaron significativas medidas de protección; tales como gaviones, revestimiento y paneles de hormigón (El Mountassir et al., 2011). El pobre comportamiento de estas obras de contención ha motivado un estudio detallado del material de relleno utilizado en su construcción. Se realizaron ensayos edométricos convencionales y no saturados en muestras compactadas a diferentes condiciones iniciales (densidades y contenido de agua) y se estudiaron muestras no disturbadas. La campaña experimental se ha completado con ensayos de la micro-estructura (MIP y ESEM) de muestras compactadas realizados antes y después del colapso. La fábrica de muestras imperturbadas ha sido también estudiada.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: primero se presenta una breve descripción del sitio ‘Bengawan Solo’ y del suelo estudiado. Luego se presentan los ensayos edométricos de carga y humedecimientos después se presenta el estudio microestructural. El artículo se cierra con una discusión incluyendo las principales conclusiones de esta investigación.

SITIO Y MATERIAL ESTUDIADO

La presa estudiada en esta investigación corresponde a una sección del río Bengawan Solo, en la villa de Kedungharjo, este de Java, Indonesia (Figura 1a). La cuenca de drenaje es unos 20.000 km² con una población vecina superior a los 20 millones. El río tiene una longitud de 540 km y en la zona de estudio el ancho promedio es 100 m. Aproximadamente 10 m es la variación del nivel de agua entre la estación seca y húmeda, época en la que son muy frecuentes los desbordamientos. El clima es de tipo monzónico, caracterizado por dos estaciones, la seca y la húmeda. Esto obliga a construir/repairar las presas en la estación seca, cuando el nivel del río es bajo. Estas presas tienen los problemas típicos de obras de bajo costo construidas en zonas remotas, con equipo de compactación ligeros y mano de obra no calificada (Brown, 1999).

Una historia recurrente de fallas y desbordamientos caracteriza el caso en estudio. Por ejemplo, Hidayat et al. (2008) informa que más de 100 personas murieron y 200.000 fueran evacuadas de sus hogares en esta región con un costo superior a los 200 millones de dólares americanos. Éstos y otros casos similares motivaron la construcción de medidas correctoras, como por ejemplo gaviones de roca (Figura 1b) y protecciones de hormigón (Figura 1c). Estas mejoras generalmente fallaron después de la primera inundación (Figuras 1c y d).

En mayo de 2006 se realizaron ensayos de campo y se recogieron muestras perturbadas y imperturbadas en secciones cercanas a los gaviones presentados en la Figuras 1 b) y d). Se constató una marcada falta de uniformidad en la distribución de densidades secas (ρ_d), que son relativamente bajas, variando desde 1.18 a 1.36 Mg/m³. Esto se puede explicar considerando que se compactó en capas de 40 cm con equipos livianos, en el lado seco, con un CR entre 80 y 85% (Soemitro, 2006). Se midieron contenidos de humedad (ω_c) relativamente alto (cercanos al 43%). Cabe mencionar que esta investigación se realizó al final de la estación húmeda y que la presa fue desbordada la semana anterior a la visita.

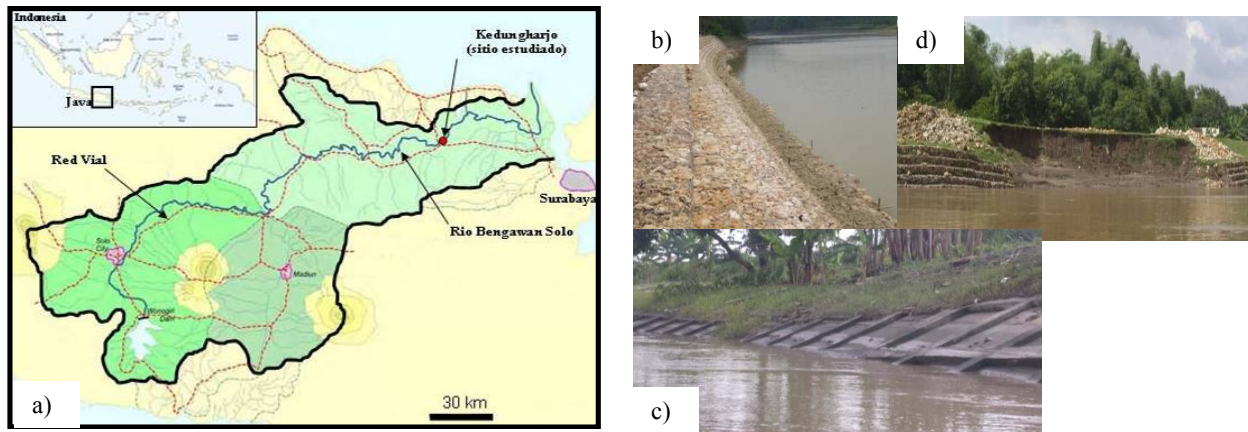


Figura 1: a) ubicación de Río Bengawan-Solo, Indonesia (modificado de Sudarsono, 2009); b) corrección con gaviones de roca, después de construcción; c) protección de hormigón; y d) falla de las secciones con gaviones.

El material de relleno es un limo orgánico de alta plasticidad. Las propiedades básicas se presentan en la Tabla 1 para las dos profundidades analizadas: 0.5 - 1.0 m y 1.0 - 1.5m. Barden et al. (1973) concluyeron que la fábrica de la mayoría de los suelos colapsables presenta minerales arcillosos actuando como ‘elemento cementante’ entre los granos de arena/limo. Se constató mediante rayos X que la fracción arcillosa del suelo de Bengawan-Solo corresponde a minerales de montmorillonita (88% de la fracción arcillosa) y caolinita. En el ensayo de Proctor Standard se obtuvo una densidad seca máxima (ρ_{dmax}) de 1.47 Mg/m³ a un contenido óptimo de humedad (ω_{cop}) de 28 %.

Tabla 1: Propiedades del relleno utilizado en las presas de Bengawan-Solo.

Propiedad	D1: 0.5 - 1.0m	D2: 1.0 – 1.5m
Densidad sólida (Mg/m ³)	2.73	2.72
Contenido de arena (%)	30	29
Contenido de limo (%)	57	55
Contenido de arcilla (%)	13	16
Límite líquido (%)	54	53
Límite plástico (%)	36	37
Límite de contracción (%)	14	15
Actividad	1.4	1.0
Contenido orgánico (%)	8.0	6.0

COLAPSO VOLUMÉTRICO DURANTE HUMEDECIMIENTO

El objetivo de los ensayos de carga y mojado fue explorar el comportamiento del material compactado ante diferentes condiciones de carga y mojado. Cinco ensayos han sido seleccionados en este trabajo, resumidos a continuación:

- Series A: muestras compactadas en condiciones de humedad inferiores a la óptima (promedio $\omega_c = 19.8\%$) y con baja densidad seca (promedio $\rho_d = 1.17 \text{ Mg/m}^3$); cercana a las más bajas medidas in-situ, con una CR alrededor de 80%. Esta serie corresponde a condiciones cercanas a ‘como-compactado’ en el campo.
- Series B: muestras compactadas en condiciones de humedad inferiores a la óptima (promedio $\omega_c = 19.4\%$) a una densidad seca mayor que serie A (promedio $\rho_d = 1.37 \text{ Mg/m}^3$); cercana a las más altas medidas in-situ, con una CR alrededor de 93%.
- Series C: muestras compactadas en condiciones de humedad óptima (promedio $\omega_c = 29.2\%$; $\rho_d = 1.43 \text{ Mg/m}^3$).
- Series D: muestras compactadas a densidades secas similares a la serie A (promedio $\rho_d = 1.18 \text{ Mg/m}^3$); pero con contenidos de humedad más elevados (promedio $\omega_c = 35.9\%$).
- Series U: muestras imperturbadas (promedio $\omega_c = 34.8\%$; $\rho_d = 1.21 \text{ Mg/m}^3$).

En las series A, B y D las muestras fueron compactadas en cilindros de 60 mm de diámetro y 18 mm de altura. Las muestras de la Serie C se prepararon en el molde y bajo condiciones del ensayo Proctor estándar. Las muestras imperturbadas fueran extraídas de los bloques transportados desde Indonesia. La Figura 2 a) presenta los resultados de la serie A. Pequeños hinchamientos (asociados a los minerales de arcilla) tuvieron lugar durante el mojado bajo la carga de contacto de 3 kPa. Se observó colapso volumétrico durante mojado en un amplio rango de tensiones verticales, desde 32 a 538 kPa. El colapso aumentó con la carga aplicada hasta un valor máximo (13.6% a $\sigma_v = 125 \text{ kPa}$) y luego se redujo a

cargas elevadas (Figura 2b). Los ensayos de la Serie B exploran la influencia de la densidad inicial en el colapso. Se observó que el colapso se redujo notablemente, cercano al 2.3% a una tensión vertical de 125 kPa. Como era de esperar, no se detectó colapso en muestras de la Serie C. Las muestras de la Series D y U tampoco colapsaron durante el mojado.

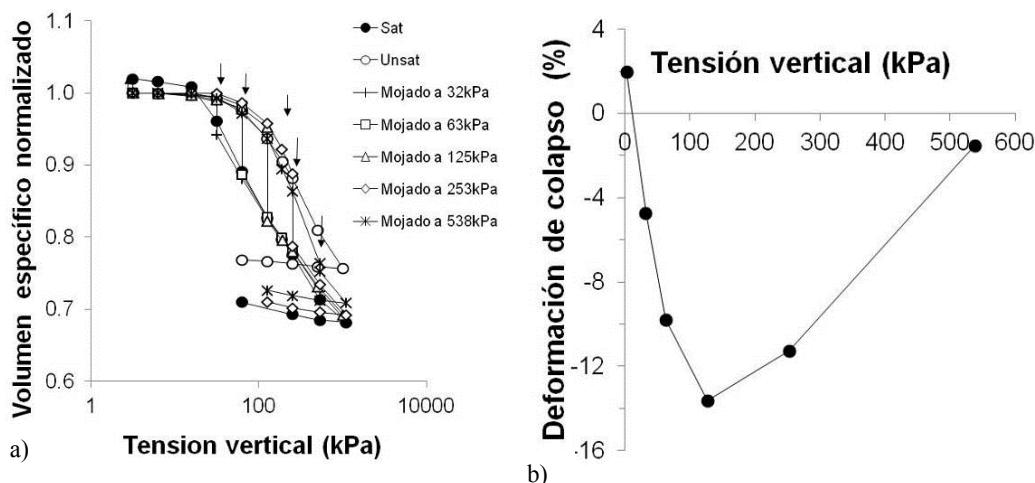


Figura 2: Resultados de la Serie A (baja densidad, condición seca de óptimo); a) mojado bajo carga en el edómetro; b) deformación de colapso a diferentes tensiones verticales.

ESTUDIO DE LA MICROESTRUCTURA

Esta sección presenta los ensayos micro-estructurales ESEM y MIP realizados en muestras de la presa de contención. Un equipo /electroskan/ 2020 ESEM de la Universitat Politècnica de Catalunya –UPC–, Barcelona, España, fue utilizado para los ensayos ESEM. Los ensayos MIP fueron realizados en un porosímetro Autopore IV 9500 (UPC). La microestructura de las muestras de la Serie A ha sido estudiada en tres condiciones diferentes, como se muestra en la Figura 3: a) compactada (C); b) compactada y cargada (CC), con $\sigma_v = 125$ kPa (que corresponde al máximo colapso, Figura 2b); y c) compactada, cargada ($\sigma_v = 125$ kPa) y mojada (CCM). Muestras indisturbadas fueron también estudiadas (Figura 3d). En la Figura 3a) se puede apreciar una estructura abierta, con grandes poros (1) entre los agregados (2), los que están generalmente conectados mediante puentes de arcilla (3). Después de aplicar la carga (Figura 3b) son visibles los poros inter-agregados (4) y los agregados (5). Muchos puentes/conexiones entre partículas han sido alterados debido a la carga, aunque algunos son todavía visibles (6). Después del mojado (Figura 3c), hay una marcada ausencia de macroporos, aunque los agregados todavía se pueden distinguir (7). Como resultado del mojado, la fábrica del suelo es más uniforme debido al reblandecimiento de los agregados y a la reducción de los macroporos entre agregados. Estas parecen ser las razones de la reducción de volumen durante el mojado observado en los ensayos edométricos. En cuanto a las muestras imperturbadas (Figura 3 d), se puede observar una marcada similitud con las muestras compactadas colapsadas (Figura 3c), lo que indicaría que al momento de muestrear ese relleno, éste ya había colapsado debido a las fuertes lluvias e inundaciones que tuvieron lugar las semanas anteriores a la visita.

Los ensayos MIP permiten cuantificar la distribución de poros. Sin embargo, este método tiene limitaciones en el rango de poros que puede ser medido. En el límite superior, no se pueden detectar poros mayores a $450\mu\text{m}$. Tampoco es posible detectar poros inferiores a 7 nm . El índice de vacíos asociado a estos poros pequeños es conocido como ‘índice de vacío no-penetrado’ (e_{np}) y generalmente no depende de la densidad seca. En este estudio, este valor se determinó ($e_{np} = 0.078$) para una muestra de lodo (con ω_c cercano a 70%) después de disecado ($\omega_c = 9.2\%$; $\rho_d = 2.00\text{Mg/m}^3$).

La Figura 4 a) presenta la distribución de poros de las muestras compactadas que fueron discutidas anteriormente (esto es C, CC y CCM). Las tres muestras presentan dos niveles de poros dominantes, siendo el menor de ellos (próximo a los 20 nm) común a las tres muestras. Este tamaño de poro dominante fue también observado en la muestra de lodo disecado. El porosímetro no puede detectar los macroporos de las muestras ‘C’ ($> 450\mu\text{m}$). Se observa también que la carga (muestra CC) mueve el tamaño de macroporos dominante al tamaño cercano a los $170\mu\text{ m}$ (en el rango de poros detectable con el porosímetro). El subsecuente mojado reduce aún más el tamaño de los macroporos a valores cercanos a los $2.1\mu\text{ m}$. Las imágenes correspondientes a estos tres estados se presentan en las Figuras 4 b), c) y d).

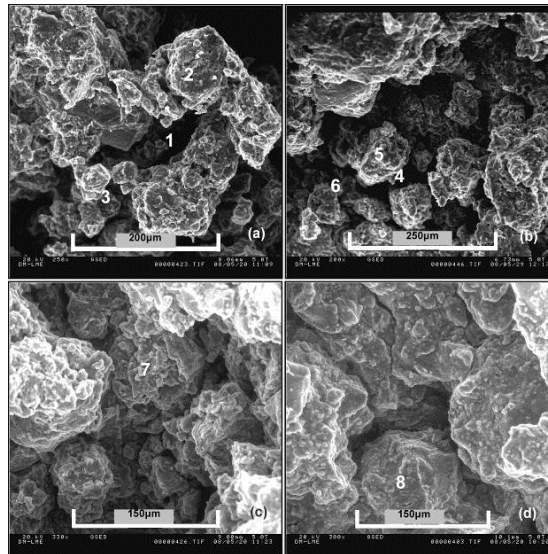


Figura 3: Micrografías ESEM de muestras: a) compactadas (C); b) compactadas y cargadas (CC); c) compactadas, cargadas y mojadas (CCM); y d) indisturbadas.

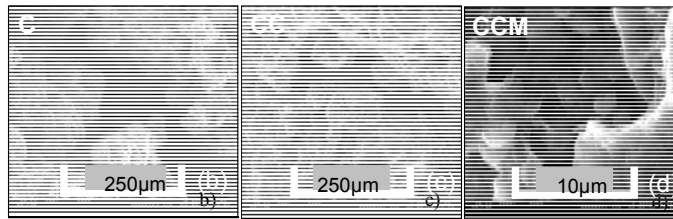
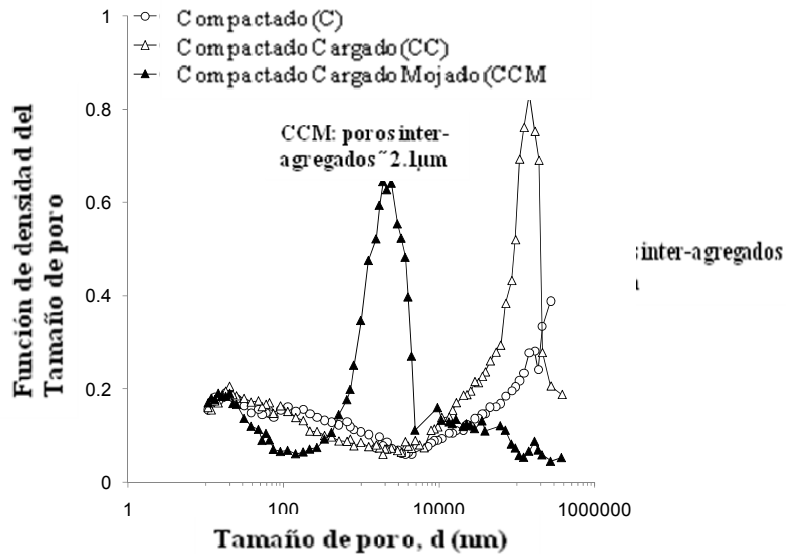


Figura 4: Resultados MIP de muestras: compactadas (C); compactadas y cargadas (CC); y compactadas, cargadas y mojadas (CCM). (a) Distribución de tamaño de poros. (b), (c) y (d) ESEM de las correspondientes muestras.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los ensayos edométricos mostraron que el relleno de Bengawan-Solo compactado en condiciones similares a las detectadas en el estudio de campo es susceptible de colapso volumétrico cuando es sometido a mojado bajo carga. Cabe mencionar que la construcción/repación de estas presas de protección generalmente se realiza en la estación seca, compactado del lado seco del óptimo, con equipos de compactación relativamente livianos y generalmente con un pobre

control de compactación/calidad. Esto lleva a tener rellenos con condiciones cercanas a las de la Serie A de este estudio. Es también relevante destacar que las condiciones mencionadas anteriormente (compactado del lado seco, con equipos livianos y poco control), no son exclusivas de esta presa en Surabaya, sino bastante comunes en presas para controlar avenidas de agua. Los ensayos de la Serie B, C and D demostraron que compactar con una energía un poco mayor, o del lado húmedo, reduce significativamente el potencial de colapso de estos suelos. Por ejemplo, se observó que un incremento de la densidad seca del 15%, implicó una reducción del potencial de colapso en un 80% (El Mountassir, 2011).

La construcción de medidas correctoras, como gaviones de roca o protecciones de hormigón, añaden una carga adicional al terraplén. La combinación de una estructura de poros abiertas (meta estable), una carga adicional elevada y un subsecuente mojado (que tiene lugar en la época húmeda de inundaciones), puede provocar cambios volumétricos importantes, con asentamientos relevantes (como los observados en la Figura 1 d y c), que pueden afectar las condiciones de servicio de la presa.

La investigación microestructural confirmó que el relleno en condiciones similares a las in-situ presenta una fábrica con grandes macroporos, que tiende a disminuir drásticamente el tamaño y la proporción cuando es sometida a mojado bajo carga. Se detectó una variación del tamaño de macroporo de un valor $> 450 \mu\text{m}$ de la muestra compactada a $2.1 \mu\text{m}$ luego de cargada y mojada. Los macroporos son los únicos que están asociados al colapso volumétrico. Los microporos (el otro tamaño de poros dominante) no se afectaron por la carga y subsecuente mojado (El Mountassir, 2011).

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico de la Carnegie Trust, de la Bellahouston Travelling Scholarship y del Research Enhancement Group de la Universidad de Strathclyde (Glasgow). También agradecen el soporte técnico brindado por el personal de laboratorio y estudiantes graduados de la UPC (Barcelona) durante el estudio micro-estructural presentado en este artículo. Agradecen asimismo a la Dr. Ria Soemitro (ITS, Indonesia) y al Profesor Mark Dyer por las fructíferas discusiones en el área de este artículo. Finalmente los autores expresan su agradecimiento a los revisores de esta contribución por sus acertados comentarios y sugerencias.

REFERENCIAS

- Barden, L., McGown, A. y Collins, K., (1973). "The collapse mechanism in partly saturated soil", *Engineering Geology*, Vol. 7, pp. 49-60.
- Brown, R.L. (1999). "Vientiane Plain flood protection: Urgent Phase. Flood management and mitigation in the Mekong river basin", *Proceedings of the Regional Workshop*, Number 1999/14, Vientiane, LAO PDR, RAP Publication.
- Delage, P., Marcial, D., Cui, Y.J. y Ruiz, X. (2006). "Ageing effects in a compacted bentonite: a microstructure approach", *Géotechnique*, Vol. 56, Issue 5, pp. 291-304.
- El Mountassir, G., Sanchez, M., Romero, E. y Soemitro, R. (2011). "Behaviour of compacted silt used to construct flood embankment", *Geotechnical Engineering, Proceedings of the ICE*, Vol. 164, Issue 3, pp. 195-210.
- El Mountassir, G. (2011). "Behaviour of a collapsible, structured, unsaturated fill material", Ph.D. Dissertation, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland.
- Fredlund, D.G. y Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, Wiley, New York. 517 p.
- Hidayat, F., Sungguh, H.M. y Harianto, C. (2008). "Impact of climate change on floods in Bengawan Solo and Brantas river basins, Indonesia", *11th International Riversymposium*, Brisbane, Australia.
- Lawton, E.C., Fragaszy, R.J. y Hetherington, M.D. (1992). "Review of wetting induced collapse in compacted soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118, pp. 1376-1394.
- Lloret, A., Villar, M.V., Sánchez, M., Gens, A., Pintado, X. y Alonso, E.E. (2003). "Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes", *Géotechnique*, Vol. 53, Issue 1, pp. 2-40.
- Mitchell, J.K. (1993). "*Fundamentals of Soil Behavior*", 2nd Edition, Wiley, 577 p.
- Romero, E., Della Vecchia, G. y Jommi, C. (2011). "An insight into the water retention properties of compacted clayey soils", *Géotechnique*, Vol. 61, Issue 4, pp. 313-328.
- Romero, E. y Simms, P. (2008). "Microstructure investigation in unsaturated soils: A review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 26, pp. 705-727.