

Compresibilidad de suelos arcillosos de origen continental con distinta historia geológica: la Arcilla de la Armuña y la Arcilla del Viso (Salamanca)

Compressibility on continental origin clayey soils with different geological history: the Armuña Clay and the Viso Clay (Salamanca)

José Nespereira¹, Mercedes Suárez², Mariano Yenes¹, Yesenia Martínez², Indiani Ascanio², Serafín Monterrubio¹

¹ Departamento de Geología. Escuela Politécnica Superior de Zamora, Universidad de Salamanca. Avda. Cardenal Cisneros 34 (Campus Viriato). 49022. Zamora.

jnj@usal, myo@usal, seramp@usal.

² Departamento de Geología. Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca. Plaza de la Merced s.n. 37008. Salamanca

msuarez@usal.es, yesenia_mlama@hotmail.com, indiani@usal.

ABSTRACT

A comparative study of the unidimensional compressibility of two clays of continental origin but with different geological history is presented: the Armuña Clay and the Viso Clay. The former is a quaternary deposit of smectite and illite, with very high plasticity; the latter is a miocene overconsolidated clay of intermediate plasticity and with less smectite content. Under unidimensional compression, and taking the behaviour of reconstituted samples as a reference, it is observed that the natural samples of the Viso Clay are more rigid and their consolidation curves show trends of overconsolidated clay materials, with C_c values of 0.255, while when reconstituted C_c^ changes to 0.455; for the Armuña Clay, the values are noticeably higher, 0.51 and 1.1 respectively. The $\log(\sigma'_v)$ - e curves for this latter clay are typical of normally consolidated soils, but normalized by the I_v , void index, the relative position between the intrinsic and natural curves is similar to that of other overconsolidated clays, and differs from than expected.*

Key-words: clays, compressibility, continental, Duero Basin, Salamanca.

RESUMEN

En este trabajo se estudian comparativamente las diferencias en la compresibilidad de arcillas de origen continental, pero con historias geológicas distintas: la Arcilla de la Armuña y la Arcilla del Viso. La primera, de edad cuaternaria, está formada principalmente por esmectita e illita, y muestra una plasticidad muy elevada; la segunda por su parte, es una arcilla rígida sobreconsolidada y de edad miocena, con un menor contenido esmectítico en su mineralogía. En condiciones de compresibilidad unidimensional, y tomando como referencia el comportamiento de las muestras reconstituidas, se observa como la Arcilla del Viso en su estado natural es más rígida y sus curvas de consolidación muestran tendencias propias de materiales arcillosos sobreconsolidados, con valores de C_c de 0,255, mientras que reconstituidas pasan a C_c^ de 0,455; para la Arcilla de la Armuña los valores son sensiblemente más elevados, 0,51 y 1,1 respectivamente. Las curvas $\log \sigma'_v$ - e obtenidas para esta última arcilla son propias de suelos normalmente consolidados, pero normalizadas mediante el I_v , void index, la posición relativa entre la curva intrínseca y la natural es similar a la de otras arcillas sobreconsolidadas, y difiere de lo esperado.*

Palabras clave: arcillas, compresibilidad, continental, Cuenca del Duero, Salamanca.

Geogaceta, 64 (2018), 159-162
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 15 de febrero de 2018
Revisión: 9 de abril de 2018
Aceptación: 25 de abril de 2018

Introducción

Desde sus inicios, la Mecánica de Suelos ha basado muchos de sus avances en la experimentación en laboratorio, mostrándose ésta como herramienta adecuada para comprender las razones que justifican los comportamientos observados en materiales de distinta naturaleza. En línea con este tipo de trabajos, se pro-

puso un nuevo marco de referencia para comparar las propiedades de los suelos arcillosos reconstituidos frente a los naturales, y poder así valorar el efecto de la historia geológica en el comportamiento mecánico.

El término "muestra reconstituida", acuñado entonces, es asignado a la muestra que ha sido disgregada y mezclada con agua hasta alcanzar entre 1 y 2 veces su límite líquido, de-

nominándose a las propiedades de este estado intrínsecas, esto es, inherentes a la propia naturaleza de la arcilla. Esto es así ya que cualquier muestra reconstituida adquiere un estado con una estructura interna estable que no cambia pese a que se altere o modifique la muestra.

En general, la mayor parte de las arcillas estudiadas dentro de este marco se formaron en ambiente marino (Tsigé, 1999; Gasparre, 2005;

Amorosi y Rampello, 2007; Gasparre *et al.*, 2007; Santagata y Kang, 2007; Sorensen, *et al.*, 2007; Wilkinson *et al.*, 2011), y sólo existen algunas referencias sobre arcillas continentales (Burland, 1990; Burland *et al.*, 1996; Chandler, 2000; Chandler y Cotecchia, 2000; Burghignoli *et al.*, 2010; Nespereira *et al.*, 2016).

Este trabajo aborda el estudio de la compresibilidad unidimensional de dos arcillas de origen continental, la Arcilla de la Armuña (AA) y la Arcilla del Viso (AV) localizadas geológicamente en el borde SO de la cuenca del Duero pero con una historia geológica diferente. Partiendo de la identificación de sus propiedades geotécnicas básicas y de su mineralogía, se compara su comportamiento frente a procesos de consolidación unidimensional, confrontando los resultados y a partir de ellos, estableciendo el modo en el que la historia geológica las condiciona

Contexto geológico

La AV y la AA afloran en la zona norte del entorno urbano de la ciudad de Salamanca, geológicamente en el SO de la cuenca del Duero y cerca del contacto con el basamento Varisco de la zona Centroibérica.

La AV pertenece a la formación Arenas y Conglomerados del Viso, que representa el último episodio de sedimentación miocena (Nespereira, 2007;). Dentro de esta formación se han diferenciado dos unidades geotécnicas: una granular y otra cohesiva, en la que está la AV.

La AA se encuentra dentro de los materiales cuaternarios del área. Éstos suelen estar formados por arenas y gravas limpias, y relacionados con depósitos fluviales, tanto de terrazas como de llanuras de inundación (Nespereira, 2007). Sin embargo, la AA se asocia a una zona superficial y deprimida de esta unidad cuaternaria, con un marcado carácter endorreico, en la que se han visto favorecidos los procesos de decantación. Dada su pequeña extensión superficial y su escasa potencia, hasta 2015 no fue cartografiada (Rodríguez, 2015).

Mineral (%)	AA	AV
Esmectita	62	29
Illita	24	30
Cuarzo	4	33
Caolinita	2	6
Calcita	4	-
Feldespato K	4	2

Tabla I.- Mineralogía de la Arcilla de la Armuña y de la Arcilla del Viso.

Table I.- Mineralogical composition of the Armuña Clay and the Viso Clay.

Metodología

Para este estudio se recogieron varias muestras inalteradas. En el caso de la AA, se realizó una pequeña calicata manual, de 2 x 1 metro aproximadamente, y de un metro de profundidad (Fig. 1). De ella se extrajeron varios bloques de 30 x 20 x 20 cm. Todas las muestras se obtuvieron a una profundidad de 40 cm. Para muestrear la AV se excavó en un talud lo suficiente como para poder tallar pequeños bloques aislados en los que hincar anillos metálicos de 4 cm y orientados con su eje perpendicular a la horizontal.

Muestras reconstituidas

Para preparar las muestras reconstituidas, cada una de las arcillas se mezclaron con una proporción de agua hasta alcanzar 1,5 veces su límite líquido; tras homogeneizar en cámara húmeda durante varios días, se introdujeron en un consolidómetro formado por un tubo de metacrilato de 94 mm de diámetro y una base maciza de teflón con una ranura en su base para permitir el drenaje controlado (Nespereira *et al.*, 2016). En este equipo la mezcla fue sometida a un proceso de consolidación unidimensional y con intervalos de carga de 24 horas hasta alcanzar presiones de 89 (AA) y 72 (AV) kPa. Terminado este proceso, se retiró el agua y la muestra se extrajo poco a poco, insertándola a la vez en un anillo edométrico.

La mineralogía de cada arcilla se ha obtenido mediante difracción de rayos X con la muestra total y con la fracción menor de 2 μ m a través de agregados orientados y sus diferentes tratamientos de glicolado y calcinado.

Las propiedades geotécnicas básicas se han obtenido mediante la realización de ensayos de granulometría por tamizado (UNE 103101-1995: AENOR, 1999), determinación de límites líquido y plástico (UNE 103103-1994, UNE 103104:1993: AENOR, 1999). Finalmente, se han hecho ensayos de consolidación unidimensional en edómetro con muestras reconstituidas y naturales, con determinación previa de la presión de hinchamiento en las naturales (UNE 103-405-94; AENOR, 1999).

Resultados

Mineralógicamente, ambas arcillas son similares, con esmectitas e illitas como minerales más abundantes, siendo la proporción de las primeras sensiblemente mayoritaria en el caso de la AA (Tabla I).

Desde el punto de vista geotécnico, la AA es un suelo cohesivo de color verde oscuro y con un porcentaje de partículas < 0,06 mm superior al 90%. Su plasticidad queda definida por un rango para el límite líquido (LL) de entre 90 y 100, y un índice de plasticidad (IP) entre 52 y 66. De este modo, se trata de un suelo CH (arcillas de alta plasticidad) según el USCS, o CE si se tiene en cuenta el sistema británico (BS 5930:1990), recalcando un carácter extremadamente plástico. El valor promedio del peso específico ha sido de 16,8 kN/m³, y el de la humedad natural del 48% (Tabla II).

La AV es también un suelo cohesivo, con un contenido en partículas limo y arcilla también superior al 90%, pero con una plasticidad ostensiblemente más baja, con valores de LL de 56 y de IP de 31. Son por tanto suelos CH tanto para el USCS como para la norma británica anteriormente mencionada. Su peso específico es de 17,5 kN/m³ y su humedad natural del 20% (Tabla II).

Consolidación unidimensional

Las curvas de consolidación para las muestras naturales del Cuaternario reciente, obtenidas a partir de las presiones de hinchamiento de entre 80 y 105 kPa, se caracterizan por mostrar un comportamiento plástico prácticamente desde el inicio, marcada por la ausencia de rama recarga (Fig. 1A). La tensión efectiva *in situ* (σ'_{vo}) de la muestra – para una profundidad de 40 cm, con 20 cm bajo el nivel freático y un peso específico saturado de 16,8 kN/m³ – es de 4,8 kPa, y es por tanto una arcilla normalmente consolidada, es decir, que nunca ha estado sometida a presiones efectivas mayores a las actuales.

El comportamiento de la muestra reconstituida muestra un primer tramo que no es más que el reflejo del proceso de consolidación al que se somete la muestra durante su preparación, y que lógicamente indica un cambio de pendiente para una presión efectiva (σ') mayor a 89 kPa. A partir de ahí la rama de compresión noval tiene dos tramos, mostrando para una presión mayor a 400 kPa una menor pendiente y por tanto menor deformabilidad (Fig. 1A).

En la figura 1B se representan dos curvas de consolidación representativas de la muestra natural y reconstituida de AA. Esta última es la más compresible, con una pendiente mucho más acusada y que refleja una reorientación de las láminas de arcilla. No obstante, para presiones por encima de 400 kPa, ambas tienden a hacerse paralelas. Paramétricamente este comportamiento

Parámetro	ARCILLA	
	AA	AV
γ (kN/m ³)	16,8 (6)	17,5
w (%)	48 (6)	20
LL	90-100 (2)	56
IP	52-66 (2)	31
USCS	CE	CH
eo	1,20	0,744 (2)
Cc	0,51 (3)	0,255 (2)
Cc*	1,102 (1)	0,455 (2)
σ^*_{ve} (kPa)	1000 (1)	400 (2)
σ^*_{vo} (kPa)	5	52,5
σ^*_{vc} (kPa)	5	250 (2)
σ^*_{vy} (kPa)	5	335 (2)
OCR ($\sigma^*_{vc}/\sigma^*_{vo}$)	1	4,8
YSR ($\sigma^*_{vy}/\sigma^*_{vo}$)	-	6,4 (2)
lnSR ($\sigma^*_{vo}/\sigma^*_{ve}$)	0,005	0,13
S σ ($\sigma^*_{vy}/\sigma^*_{ve}$)	0,005	0,8

Tabla II.- Propiedades geotécnicas básicas y resultados promedio de los ensayos de consolidación unidimensional en edómetro para las muestras naturales y reconstituidas (*) de la AA y de la AV. La presión de preconsolidación (σ^*_{vc}) para la muestra AV se ha obtenido de Nespereira et al., (2016). Entre paréntesis, número de datos experimentales considerados.

Table II.- Basic geotechnical properties and results of the unidimensional consolidation tests in oedometer for natural and reconstituted () samples of the AA and the AV. The preconsolidation pressure (σ^*_{vc}) taken from Nespereira et al., (2016). In parentheses, number of tests considered.*

queda reflejado en los valores del índice de compresión (C_c y C_c^*) (Tabla II).

Los resultados obtenidos con la AV (Fig.1C) muestran curvas de consolidación claramente diferentes para la muestra natural, con una parte inicial de escasa pendiente y una leve variación de la misma que permite estimar una presión de preconsolidación de 325 kPa (σ^*_{vy}). En estado reconstituido, la consolidación define una trayectoria rectilínea a partir de la presión aplicada en el consolidómetro (72 kPa). Para esta arcilla la presión de hinchamiento medida ha sido de 64 kPa, valor similar al obtenido por Herrera (2016). Los parámetros medidos se recogen en la Tabla II.

Análisis

Para poder analizar los resultados obtenidos de una manera más clara, se ha escogido de cada arcilla una curva de consolidación de muestra natural y otra de muestra reconstituida, señalándose a partir de ellas los valores de la presión intrínseca (σ^*_{ve}), *in situ* (σ^*_{vo}), de preconsolidación estimada en base a la geología (σ^*_{vc}), y de fluencia (σ^*_{vy}), según terminología recogida, entre otros, en las figuras 1B y D.

El comportamiento de la AA y de la AV es diferente, mucho más rígida esta segunda, con valores más bajos tanto de C_c como de C_c^* . En

muestra reconstituida, hay una clara diferencia en los índices de poros, mucho más elevados para la AA, lo que es achacable a un mayor efecto expansivo en esta arcilla más esmectítica. De las figuras 1B y 1D fácilmente se comprueba como la más plástica –AA– queda por encima. En lo relativo a los valores de C_c^* , los de la AV están en consonancia con otras arcillas terciarias sobreconsolidadas, mientras que valores superiores a la unidad de la AA son similares a los medidos en otras arcillas de alta plasticidad. Parece evidente que la diferencia en contenido esmectítico, muy superior en la AA, está detrás de las diferencias en este parámetro.

La menor porosidad natural inicial (e_0) de la muestra AV sería además consecuencia de la sobreconsolidación sufrida por este depósito debida a las presiones litostáticas a las que ha estado sometida, y que son evidentes al poder definir, una presión de fluencia (σ^*_{vy}) de 335 kPa. Esta flexión en la curva no es posible de definir para la AA, por lo que se descarta que haya estado sometida a procesos de consolidación importantes. El valor del índice OCR recoge todo ello, con un valor de 4,8 para la AV, y unitario para la AA, lo que indica que es esta última una arcilla normalmente consolidada. Sin embargo, la presión de preconsolidación para la AV es inferior – 250 kPa- (Nespereira et al., 2016), de tal

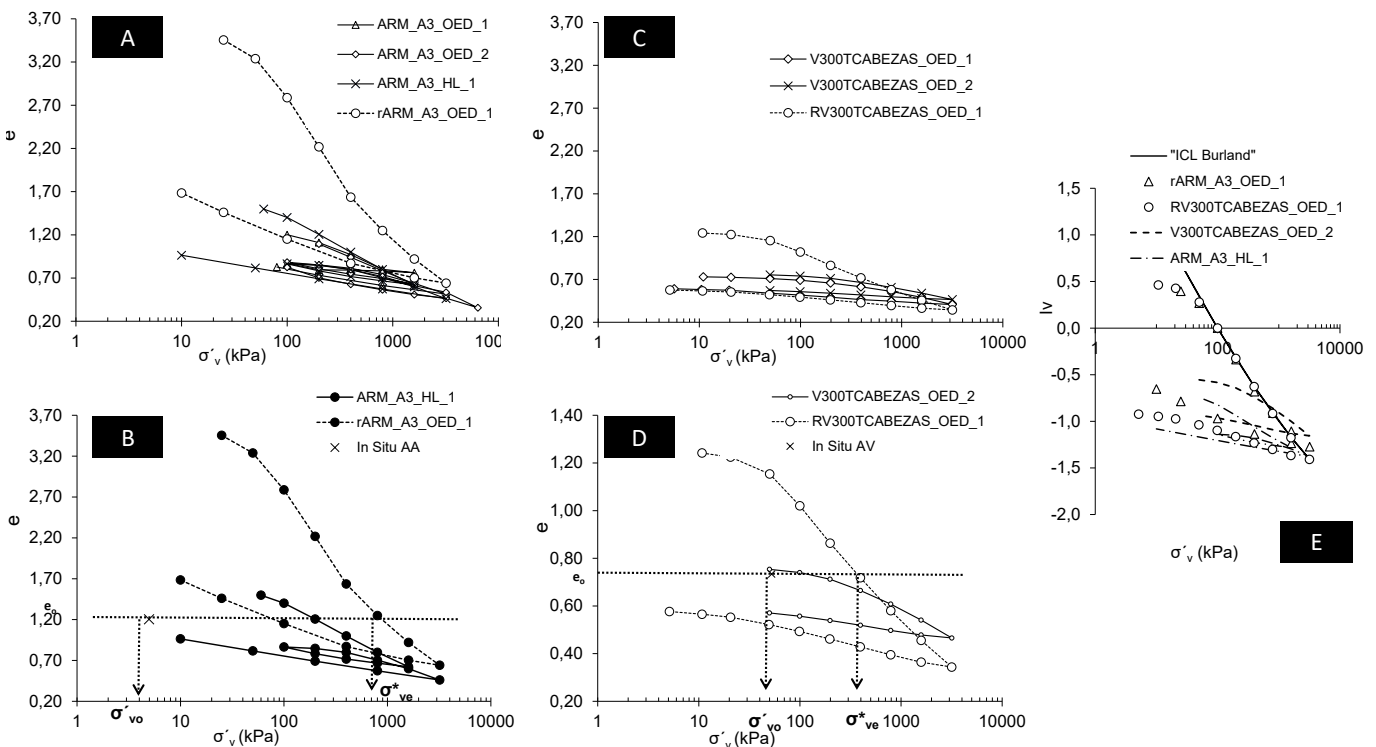


Fig. 1.- A) Curvas de consolidación para AA; en trazo discontinuo la de la muestra reconstituida. B) Curvas representativas para la AA. C) Curvas de consolidación para AV; en trazo discontinuo la de la muestra reconstituida. D) Curvas representativas para la AV. E) Normalización de las curvas de B y D mediante el índice I_v . En las figuras B y D, las líneas de trazos horizontales y las flechas permiten representar y determinar σ^*_{vo} y σ^*_{ve} .

*Fig. 1.- A) Oedometer compression curves for AA; dotted line represents the reconstituted sample. B) Representative curves for AA. C) Oedometer compression curves for AV; dotted line represents the reconstituted sample. D) Representative curves for AV. E) Normalised oedometer compression curves taken from B and D using the I_v index. In figures B and D, the horizontal dotted lines and the arrows allow representation and determination of σ^*_{vo} and σ^*_{ve} .*

modo que los procesos postdeposicionales distintos a la propia consolidación litostática (probablemente cementaciones) parecen desempeñar un papel importante en este material, en sintonía con el comportamiento habitual de muchas arcillas rígidas, quedando reflejado en el valor del YSR superior a 1, aspecto éste ya apuntado en Nespereira *et al.*, (2016). Sin embargo, si tenemos en cuenta las posiciones relativas de σ_{ve}^* , σ_{vy}^* y σ_{va}^* , con ésta última situada como la más próxima al eje vertical, y con σ_{ve}^* prácticamente coincidente con σ_{vy}^* (Figs. 1C y D) se obtiene un S_v levemente inferior a la unidad, lo que difiere de lo esperable para materiales sobreconsolidados, y con lo observado en, donde este índice – considerado como una medida relativa del grado de refuerzo que la estructura de una arcilla ha adquirido a lo largo de su historia geológica – es muy superior a la unidad.

Sorprende en el caso de la AA que σ_{ve}^* esté a la derecha de σ_{va}^* , ya que para depósitos normalmente consolidados se espera precisamente lo contrario (Burland *et al.*, 1996; Chandler, 2000).

En la última gráfica que se presenta (Fig. 1E) se han normalizado las curvas de compresión para poder compararlas evitando las posibles diferencias achacables a índices de poros distintos. Esto se ha hecho introduciendo el índice Iv :

$$Iv = \frac{e - e_{100}^*}{e_{100}^* - e_{1000}^*}$$

siendo e el índice de poros de la muestra en cada escalón de carga y e_{100}^* y e_{1000}^* los índices de poros en la curva de compresibilidad intrínseca -ICL- para 100 y 1000 kPa.

La superposición en este caso de las curvas intrínsecas refuerza el carácter único y normalizador de la ICL propuesta por Burland (1990).

En relación a las muestras naturales, lo que se observa es que ambas arcillas, con historias geológicas diferentes, muestran una tendencia muy similar y están ambas a la izquierda de la línea de compresibilidad intrínseca (*intrinsic compression line*, ICL), a la que cortan a presiones elevadas. Normalmente esta circunstancia ocurre con una arcilla sobreconsolidada, como es la AV, pero no parece ser el caso de la AA, dándole de nuevo a ésta una cierta singularidad. Por último, en esta misma figura las curvas de las arcillas en su estado natural no llegan a mostrar flexión posterior en su parte final, de tal modo que, bajo las presiones aplicadas, su estructura – que en ambos casos responde a procesos postdeposicionales adicionales a la propia sedimentación – no parece haber sufrido modificaciones relevantes.

Conclusiones

La AA y la AV son suelos arcillosos de alta plasticidad, y tienen una composición mineralógica que difiere especialmente por la mayor proporción de esmectitas en la primera, que eleva su límite líquido a valores cercanos a 100.

La AV es una arcilla miocena sobreconsolidada. Sin embargo, los procesos postdeposicionales han elevado su presión de fluencia por encima de la presión de preconsolidación, reforzando su estructura.

La AA es una arcilla normalmente consolidada y depositada durante el Cuaternario. Sin embargo, cuando se normalizan sus curvas de consolidación, muestran una tendencia similar a la AV, acompañada de algunos rasgos que hasta ahora se han venido asociando a arcillas sobreconsolidadas. Este hecho añadido a la anómala posición de su presión efectiva en relación a la ICL parece apuntar la presencia de procesos postdeposicionales adicionales a la consolidación, como podrían ser cementaciones incipientes.

Las muestras reconstituidas de AA muestran una estructura más abierta y una compresibilidad mayor que la de AV, y una tendencia similar se observa al comparar las curvas de consolidación naturales. La mayor proporción de esmectitas en las primeras explica esta diferencia. En todo caso, ambas al ser normalizadas mediante el índice Iv coinciden con la expresión general propuesta para cualquier tipo de arcilla reconstituida.

Para poder profundizar en la explicación de las diferencias manifestadas en este estudio, se deberá afrontar el estudio de la microestructura con la ayuda de microscopía electrónica, lo que permitirá identificar y confirmar el papel desempeñado por los procesos postdeposicionales en las anomalías señaladas.

Agradecimientos

Parte de este trabajo ha sido financiado por el proyecto CGL2016-77005. Los autores agradecen los comentarios de los revisores, Meaza Tsige y Carlos López, que han servido para mejorar el manuscrito original.

Referencias

AENOR (1999). *Geotecnia. Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Ensayos de campo y de laboratorio*. Asociación Española de normalización y certificación AENOR, 385 p.

Amorosi, A. y Rampello, S. (2007). *Geotechnique*, doi: 10.1680/geot.2007.57.2.153

Burghignoli, A., Miliziano, S. y Soccodato, F.M. (2010). *Geotechnical and Geological Engineering*, doi: 10.1007/s10706-010-9343-3

Burland, J. B. (1990). *Geotechnique*, doi: 10.1680/geot.1990.40.3.329

Burland, J. B., Rampello, S., Georgiannou, V.N. y Calabresi, G. (1996). *Geotechnique*, doi: 10.1680/geot.1996.46.3.491

Chandler, R. J. (2000). *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*, doi: 10.1144/qjgegh.33.1.7

Chandler, R. J. (2010). *Geotechnique*, doi: 10.1680/geot.07.KP001

Chandler, R. J. y Cotecchia, F. (2000). *Geotechnique*, doi: 10.1680/geot.2000.50.4.431

Fearon, R. E. y Coop, M. R. (2000). *Geotechnique*, doi: 10.1680/geot.2000.50.4.471

Gasparre, A. (2005). *Advanced laboratory characterisation of London Clay*. Thesis, Imperial College, 598 p.

Gasparre, A., Nishimura, S. y Coop, M. R. (2007). *Geotechnique*, doi: 10.1680/geot.2007.57.1.19

Gasparre, A., Nishimura, S., Minh, N. A., Coop, M. R. y Jardine, R. J. (2007). *Geotechnique*, doi: 10.1680/geot.2007.57.1.33

Herrera, D. (2016). *Compresibilidad y textura de las arcillas del Viso*. Proyecto fin de carrera, Univ. de Salamanca.

Nespereira, 2007. *Estudio, definición y cartografía de unidades geotécnicas en un entorno urbano: Salamanca y su zona de expansión*. Tesis Doctoral, Univ. de Salamanca, 552 p.

Nespereira, J., Suárez, M., Monterrubio, S., Yenes, M. y Herrera, D. (2016). In J. A. Morales, B. M. Carro, A. Miguel y M. A. Camacho (Eds.), *Geo-Temas Vol. 1*, 957–960.

Rodríguez, G. (2015). *Análisis geomorfológico virtual 3D del río Tormes durante el Cuaternario*. Proyecto final de carrera, Univ. de Salamanca, 124 p.

Santagata, M. y Kang, Y. I. (2007). *Engineering Geology*, doi: 10.1016/j.enggeo.2006.09.018

Sorensen, K. K., Baudet, B. A. y Simpson, B. (2007). *Geotechnique*, doi: 10.1680/geot.2007.57.1.113.

Tsige, M. (1999). *Microfábrica y mineralogía de las arcillas azules del Guadalquivir: influencia en su comportamiento geotécnico*. CEDEX, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Fomento, Madrid, 294 p.

Wilkinson, S., Brosse, A., Fenton, C., Kamal, R. H. y Jardine, R. J. (2011). En: *Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* 1, 305–310.

Yenes, M., Nespereira, J., Blanco, J. A., Suárez, M., Monterrubio, S. y Iglesias, C. (2012). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, doi: 10.1007/s10064-010-0337-4