

Mejora en la compactabilidad de un suelo limoso mediante la elaboración de mezclas con residuos de construcción y demolición

Improved compactability of a silty soil by mixing with construction and demolition waste

Pedro Luis López Julián¹, Ángel Salesa Bordonaba¹, José Ángel Pérez Benedicto¹ y Óscar Pueyo Anchuela²

¹ Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia – C/ Mayor, s/n – 50.100 – La Almunia
pllopez@unizar.es, asalebora@unizar.es, joanpebe@unizar.es

² Departamento de Ciencias de la Tierra – Universidad de Zaragoza – C/ Pedro Cerbuna, 12 – 50.009 – Zaragoza
opueyo@unizar.es

ABSTRACT

Reuse of cohesive soils in construction works is rare because of both unfavourable geotechnical characteristics and to the specific needs of placing conditions. This paper evaluates the improvement in compactness of a lutitic material (silty soil) present in large areas of the province of Zaragoza, Spain, by mixing with a sandy construction and demolition waste (CDW). The results obtained by the standard Proctor compaction test indicate that the maximum dry density of the mixture is increased from the original silty soil, with a maximum in the 2:1 (silty soil:CDW) ratio. Furthermore, it has been found that the addition of CDW to silty soil greatly reduces plastic behavior of the mixtures in the compaction process, which would allow these materials could be placed on site using conventional compaction equipment.

This improvement of lutitic material further entails obvious environmental benefits by allowing both a reduction in construction waste (excavated soil volumes but not reused) and the conversion of a waste to a by-product.

Key-words: Recycling, compactness, silty soil, construction waste (CDW).

RESUMEN

La reutilización en obra civil de los suelos cohesivos no es frecuente debido a sus condiciones geotécnicas poco favorables y a sus necesidades específicas de puesta en obra. En este trabajo se evalúa la mejora en la compactabilidad de un material lutítico (suelo limoso) presente en amplias zonas de la provincia de Zaragoza, mediante la mezcla con un residuo procedente de molida de hormigón (RCD), de granulometría principalmente arenosa. Los resultados obtenidos mediante los ensayos de compactación Proctor normal indican que la densidad seca máxima de las mezclas se incrementa respecto del material lutítico original, con un máximo en la proporción 2:1 (lutita:RCD). Además, se ha comprobado que la adición de RCD a la lutita permite un comportamiento mucho menos plástico de las mezclas en el proceso de compactación, lo que permitiría que estos materiales se pudiesen colocar en obra empleando maquinaria convencional de compactación.

Esta mejora del material lutítico conlleva además beneficios ambientales evidentes, al permitir una reducción de residuos en obra (volúmenes de suelo excavados pero no reutilizados) y la conversión del RCD de residuo a subproducto.

Palabras clave: Reciclaje, compactabilidad, suelo limoso, residuo de construcción (RCD).

Geogaceta, 61 (2017), 179-182
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 15 de julio de 2016
Revisión: 3 de noviembre de 2016
Aceptación: 25 de noviembre 2016

Introduction

Los suelos cohesivos son materiales naturales que en general no se suelen considerar geotécnicamente aptos para su reutilización en obras civiles. Así, cuando en una obra es preciso realizar una excavación y retirar suelos de composición predominantemente arcillosa o limosa, las normativas sólo permiten su reutilización en situaciones constructivas muy limitadas y, en muchos casos, con un tratamiento previo de mejora de sus cualidades geotécnicas. El principal

problema que presentan es la dificultad para ser compactados, para lo cual es necesario el manejo de maquinaria especial (compactadoras tipo "pata de cabra"), y aun así es muy complicado obtener densidades secas adecuadas.

En aquellos contextos geológicos en los que los materiales cohesivos aparecen alternando con otros tipos de suelos o rocas, tanto en afloramiento como en los primeros niveles del subsuelo, los volúmenes de suelo cohesivo que es preciso excavar se convierten en residuos de la actividad constructiva, que es pre-

ciso retirar. Pero en otras situaciones en las cuales los suelos cohesivos constituyen el material mayoritario en un entorno geográfico amplio, la necesidad de retirar importantes volúmenes y de importar otros de materiales geotécnicamente más aptos (bien de la propia obra, bien procedentes de préstamos) da pie a la investigación para la mejora de los materiales allí existentes para de este modo poder ser utilizados, al menos, en algún punto de la obra.

Este concepto, el de la mejora de suelos, está bien desarrollado desde hace tiempo

para poder reutilizar materiales cohesivos de todo tipo, clasificados técnicamente dentro del grupo de "suelos marginales" (PG-3; Ministerio de Fomento, 2000), incluyendo aquéllos que presentan expansividad y/o colapsabilidad. Las estrategias de mejora más habituales son los tratamientos con cal (estabilizaciones) y con cemento (suelo-cemento), pero en los últimos años se está investigando en la utilización de otros materiales procedentes de actividades industriales, que inicialmente son residuos pero que pueden ser empleados como subproductos en sustitución de la cal o del cemento, dando lugar a una mejora en las características geotécnicas de los materiales a los que se aportan y reduciendo así los volúmenes de residuos. En este trabajo se presentan los resultados preliminares de la utilización de la fracción fina de residuos de construcción y demolición de hormigón, aplicados a lutitas terciarias de la cuenca del Ebro (zona de Muel, Zaragoza), las cuales son originalmente clasificables como suelos marginales según el PG-3. Se han empleado en diferentes proporciones de mezcla, y el análisis se ha llevado a cabo evaluando los niveles de compactabilidad alcanzados en cada caso.

Materiales y Métodos

Se ha seleccionado como material natural a mejorar las lutitas rojas del Aragón Inferior, muestreadas en las proximidades de la carretera Muel-Épila, a la salida de la primera de las localidades citadas (coordenadas del punto de muestreo: 41°28'27"N, 01°06'07"O). Es una formación geológica con una amplia distribución superficial en la zona y una potencia máxima de unos 80 m, presentando intercalaciones centimétricas de areniscas; genéticamente, esta unidad se atribuye a ambientes distales, de tipo llanura lutítica, de abanicos aluviales (Hernández Samaniego *et al.*, 2005). Sobre la muestra recogida se realizaron análisis de caracterización geotécnica, principalmente granulometría (UNE 103101:1995), límites de Atterberg (UNE 103103:1994 y UNE 103104:1993), ensayo de compactación Proctor normal (UNE 103500:1994) e hinchamiento Lambe (UNE 103600:1996), todas ellas normas vigentes publicadas en España por AENOR.

Por su parte, el material empleado para mejora de las lutitas procede de residuos

de construcción y demolición de hormigón (en adelante, RCD). La normativa española permite la reutilización de este tipo de residuo, pero sólo en su fracción más gruesa y como árido para hormigones reciclados, limitado a un porcentaje máximo de sustitución del 20% (Salesa Bordonaba, 2014). Por ello, aquí se ha empleado la fracción fina del RCD, es decir, aquélla descartada tras la molienda de residuos de hormigón y después del aprovechamiento parcial de las partículas más gruesas. Sobre dicha fracción se ha realizado un análisis de caracterización granulométrica.

Finalmente, se ha diseñado un protocolo de mezcla en proporciones fácilmente reproducibles en obra: 1:1, 2:1 y 3:1 (el primer número indica la proporción en peso de lutita y el segundo la correspondiente a la fracción fina del RCD). Las mezclas así obtenidas, homogeneizadas en una mezcladora giratoria de hormigón, fueron sometidas al ensayo de compactación Proctor normal, y en la que mostró los mejores resultados se realizó además un ensayo de compactación Proctor modificado (UNE 103501:1994). Todos los ensayos de caracterización geotécnica se han realizado en el laboratorio de materiales de la Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia.

Resultados

Los resultados obtenidos en la caracterización geotécnica se han estructurado en tres bloques relativos respectivamente a las lutitas rojas, a los residuos RCD empleados y a las mezclas obtenidas en las diferentes proporciones planteadas.

Lutita roja

La muestra ensayada ha permitido comprobar que se trata de un suelo de partículas finas según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM, 1985), constituido por un 93,5% de finos, un 5,5% de arena y un 1% de partículas tamaño grava. Los ensayos de consistencia realizados indican que el suelo presenta un valor de límite líquido de 45,8% y un límite plástico del 33%, lo que da lugar a un índice de plasticidad de 12,8%. Con estos valores, al proyectar sobre el gráfico de Casagrande se comprueba que se trata de un suelo de tipo limo de baja plasticidad (ML), y al hacer lo propio sobre el gráfico de criterios de clasificación geotécnica según plasticidad del

PG-3 (Ministerio de Fomento, 2000), el punto se localiza en el campo de los suelos marginales. Se ha evaluado también el potencial de hinchamiento mediante el ensayo Lambe, obteniéndose un índice de hinchamiento de 0,04 MPa (no crítico).

El ensayo de compactación Proctor normal ha permitido comprobar que este material natural puede alcanzar una densidad seca máxima de 2,02 T/m³, para una humedad óptima del 13%. El valor de densidad obtenido no es excesivamente bajo, pero sí se ha podido comprobar durante la ejecución del ensayo que las condiciones de humedad necesarias para obtener dicho valor de densidad seca máxima dificultan el proceso de compactación, produciéndose más un amasado que una compactación en sentido estricto durante los golpes de la maza.

Según todo lo expuesto y al tratarse de un suelo marginal, el material no podría ser reutilizado directamente en obra si aplicamos los criterios del PG-3, siendo necesario un tratamiento de mejora de sus propiedades geotécnicas. Las dificultades observadas en el ensayo de compactación para valores elevados de humedad obligarían a emplear compactadores de tipo "pata de cabra", lo cual redundaría en un incremento en los tiempos de ejecución.

RCD

El análisis granulométrico realizado sobre una muestra del material residual ha permitido conocer que presenta un 9,4% de grava, un 89% de arena y un 1,6% de finos, lo que nos lleva a clasificarlo como una arena limpia mal graduada, de tipo SP según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM, 1985), tal y como se refleja en la figura 1.

Mezclas lutita-RCD

Los resultados del ensayo de compactación Proctor Normal realizados sobre las mezclas lutita-RCD en proporciones 1:1, 2:1 y 3:1 se representan en la figura 2. En ella se puede comprobar que la mezcla de ambos tipos de material en proporciones equivalentes en peso (es decir, la mezcla 1:1) permite obtener un material con una densidad máxima seca de 1,98 T/m³ para una humedad óptima en torno al 13%. Por su parte, la mezcla 2:1 (dos partes en peso de lutita por una de RCD) ha dado lugar a un material con una densidad máxima seca de 2,06 T/m³ para

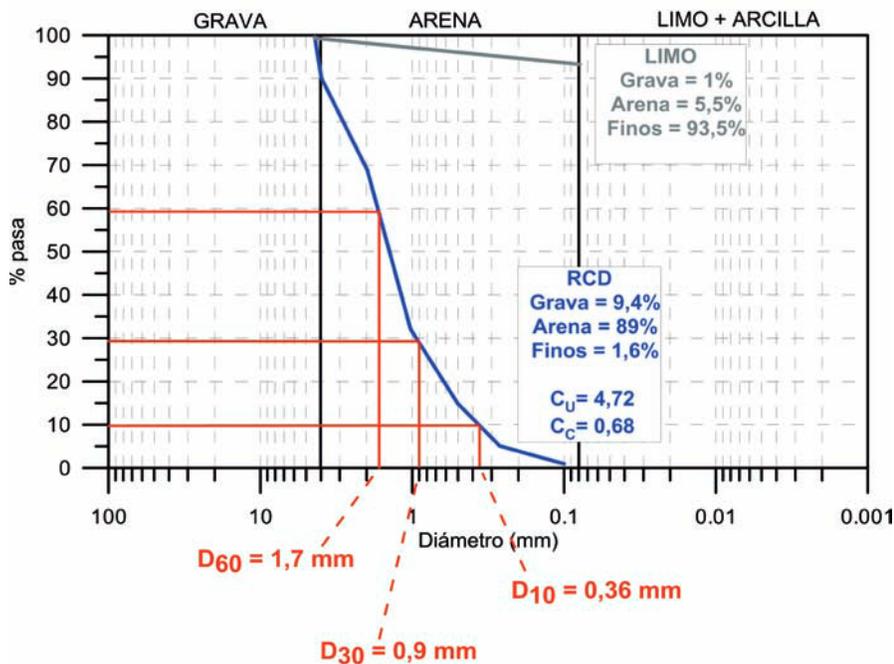


Fig. 1.- Diagrama granulométrico del residuo de construcción y demolición (RCD) y de los materiales limosos, con indicación de los principales parámetros granulométricos. Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- Granulometric plot for construction waste (CDW) and silty soil, with indication of main parameters. See color figure in the web.

una humedad óptima del 14%. Finalmente, la mezcla 3:1 (tres partes en peso de lutita por una de RCD) permite obtener un valor de densidad máxima seca de $2,04\text{ T/m}^3$ para una humedad óptima del 13%.

Merece una mención expresa que se ha observado una mejora en la ejecución de los ensayos de compactación conforme aumentaba la proporción de RCD en las mezclas, debido a que su carácter granular reducía el comportamiento más plástico que imponía la fracción lutítica. Este hecho no se ha podido cuantificar, pero es muy importante a la hora de valorar la manejabilidad de los materiales en obra.

Los resultados obtenidos indican que al incrementar la proporción de RCD en la mezcla con la lutita se observa un aumento inicial en la densidad seca de la mezcla hasta la fracción 2:1 (de $1,98$ a $2,06\text{ T/m}^3$), con una reducción en la correspondiente a la mezcla 3:1 ($2,04\text{ T/m}^3$). Todo ello tiene lugar para unos valores muy similares de humedad óptima pero, como se acaba de indicar, el incremento en la proporción de RCD en las mezclas facilita la tarea de compactación, alejando el comportamiento del material de aquél más plástico que exhibe la lutita cuando se compacta sin mezclar.

Finalmente, sobre la mezcla 2:1 se ha realizado un ensayo de compactación de tipo Proctor modificado, que se aproxima

más a las condiciones reales de compactación con la maquinaria actualmente utilizada en obra. Se ha obtenido una densidad seca máxima de $2,1\text{ T/m}^3$, para una humedad óptima del 11%.

Discusión

La clasificación de un suelo como de tipo marginal según el PG-3 puede obedecer a distintos factores, entre los que podemos citar los relativos a contenidos elevados en sales solubles y/o materia orgánica y riesgo medio-alto de expansividad o colapsabilidad. No obstante, en muchas ocasiones, suelos clasificados como marginales lo son únicamente en función de su granulometría y su consistencia, por lo que un suelo de granulometría predominantemente fina y con unos valores de los límites de Atterberg determinados podría entrar dentro de esta clasificación técnica de suelos sin exhibir otros problemas geotécnicos como los citados. En estos casos, el principal problema que presentan estos suelos reside en las dificultades para su manejo en obra, ya que su compactación necesita de maquinaria especial y distinta de la empleada para capas granulares y el control de obra debe ser más riguroso, por lo que lo más habitual es retirarlos y sustituirlos por otros suelos o zahorras más fácilmente manejables.

Este es el caso de las lutitas aquí empleadas para el análisis, y que están ampliamente distribuidas, por ejemplo, en la zona del valle medio del Huerva (Muel-Longares-Cariñena) y en el sector adyacente entre Cariñena y La Almunia. En estas zonas, la ejecución de obras civiles de distintos órdenes de importancia (autovías, vías de ferrocarril, caminos rurales) se apoya sobre este tipo de materiales, lo que ilustra acerca de la importancia de investigar estrategias de mejora de sus propiedades geotécnicas. En algunos casos, la sustitución por materiales geotécnicamente más favorables puede abordarse por disponibilidad presupuestaria (como en el caso de autovías o vías de ferrocarril), pero en el caso de obras más modestas resulta económicamente necesario emplear los materiales existentes *in situ*, con un mínimo tratamiento.

Los resultados aquí presentados indican que el uso de un material clasificado como residuo (RCD procedente de molienda de hormigón) puede producir una mejora notable en la compactabilidad de las lutitas. El aporte de RCD a la lutita le proporciona una fracción de granulometría de tamaño arena que ya de por sí mejora el comportamiento de la mezcla frente al proceso de compactación, reduciendo su respuesta plástica a la acción de las compactadoras. Además, uno de los principales problemas que presenta el residuo fino de RCD para su reutilización en la elaboración de hormigones reciclados, su capacidad de absorción de agua (Salesa Bordonaba, 2014), es aquí una ventaja añadida, ya que sus partículas son capaces de absorber una cierta proporción de agua y reducir así su posible interacción con las partículas arcillosas, que podría dar lugar a una respuesta de tipo plástico al humectarse.

Los beneficios de la utilización de residuos finos de RCD para mejora de materiales lutíticos alcanzan a varios factores: a) posibilidad de reutilización de materiales marginales sin necesidad de maquinaria específica, al mejorar sus propiedades geotécnicas; b) reducción de material residual retirado de una obra; c) reducción de residuos procedentes de construcción y demolición, al darles un segundo uso y convertirse así en subproductos; d) reducción de la necesidad de materias primas de mejora de suelos (cal y/o cemento); e) reducción de la necesidad de materiales procedentes del exterior de la obra (préstamos). Varios de estos factores presentan una evidente inci-

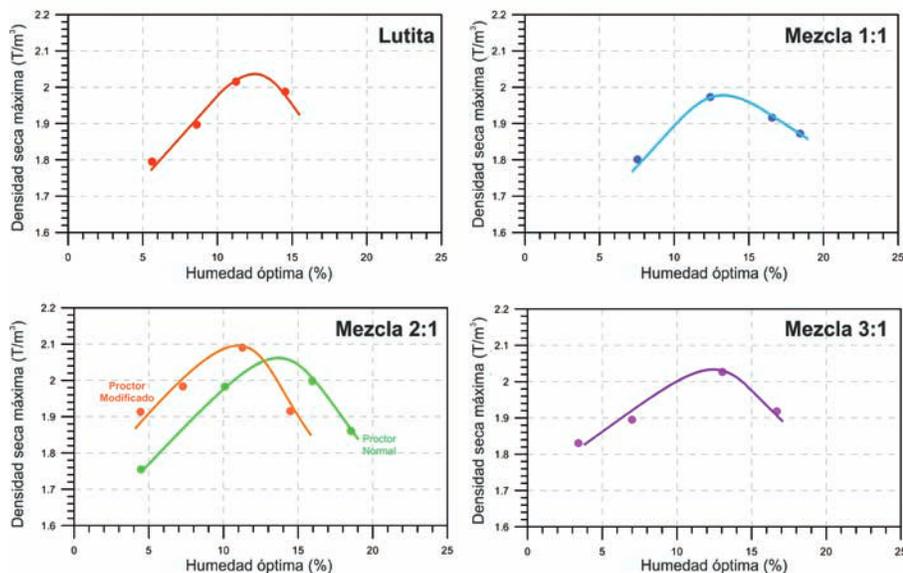


Fig. 2.- Gráficos de los ensayos de compactación Proctor normal realizados sobre la lutita y las diferentes mezclas elaboradas con RCD (ver explicación en el texto). Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Plots for Standard Proctor compaction tests performed on lutite and all the mixes lutite:RCD (see explanation in text). See color figure in the web.

dencia ambiental positiva, pero es necesario destacar que también se traducen en un beneficio económico evidente. Por ello la investigación continúa en la actualidad, en el sentido de analizar cuantitativamente la mejora en el comportamiento reológico de las mezclas, es decir, en el estudio en laboratorio tanto de la resistencia de los suelos obtenidos en las mezclas como la amplitud del campo de comportamiento elástico y plástico de las mismas.

Conclusiones

Las características geotécnicas de los suelos marginales deben ser adecuadamente definidas para proceder a una correcta valoración de su potencial reutilización en obra civil. En el caso de los suelos marginales aquí considerados, correspondientes a lutitas terciarias (que geotécnicamente son suelos de tipo ML sin problemas específicos de contenidos elevados en materia orgánica o sales solubles, ni riesgo de expansividad ni colapsabilidad), el principal problema observado es el relativo al manejo y puesta en obra de estos materiales, ya que precisan de maquinaria de compactación específica y

de un control técnico de puesta en obra más cuidadoso de lo habitual.

La adición a las lutitas de residuos de construcción y demolición de hormigón en su fracción fina, en diferentes proporciones de mezcla, ha permitido comprobar una mejora en la compactabilidad de las mezclas. La situación óptima se ha observado para una proporción 2:1, es decir, dos partes de lutita y una parte de RCD, en la cual se ha obtenido el valor más elevado de densidad seca máxima en el ensayo Proctor normal. Además, para esta mezcla, el resultado obtenido en el ensayo de compactación Proctor modificado (2,1 T/m³ para una humedad óptima del 11%) es razonablemente bueno para su puesta en obra. Los resultados numéricos se ven acompañados por las observaciones realizadas durante los ensayos en laboratorio, en los cuales se comprobó que la adición de RCD a la lutita permite una compactación mucho más sencilla y adecuada, mostrando las mezclas una reducción evidente en el comportamiento de tipo plástico que permitiría su colocación en obra sin maquinaria de compactación específica para materiales cohesivos y sin una necesidad de un control técnico específico, lo que redundaría clara-

mente en su ventaja respecto de otros métodos de mejora

Esta metodología lleva además asociadas una serie de ventajas ambientales y económicas, entre las que destacan tanto la reducción en el volumen de materiales residuales como la conversión del residuo RCD en subproducto con una segunda utilización en obra civil.

Referencias

- AENOR (1993). *Determinación del límite plástico de un suelo*. UNE 103104:1993. Madrid.
- AENOR (1994). *Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande*. UNE 103103:1994. Madrid.
- AENOR (1994). *Geotecnia. Ensayo de compactación. Proctor modificado*. UNE 103501:1994. Madrid.
- AENOR (1995). *Análisis granulométrico de suelos por tamizado*. UNE 103101:1995. Madrid.
- AENOR (1996). *Determinación de la expansividad de un suelo en el aparato Lambe*. UNE 103600:1996. Madrid.
- AENOR (1994). *Geotecnia. Ensayo de compactación. Proctor normal*. UNE 103500:1994. Madrid.
- ASTM American Society for Testing and Materials (1985). *Classification of Soils for Engineering Purposes*. Annual Book of ASTM Standards. D 2487-83, 04.08.
- Hernández Samaniego, A., Ramírez Merino, J.I., Navarro Juli, J.J., Cortés Gracia, A.L., Rodríguez Santisteban, R., Babiano González, F., Gómez Gras, D., Ramírez del Pozo, J., Cuenca Bescós, G., Pozo Rodríguez, M. y Casas Sainz de Aja, J. (2005). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 411 (Longares) y memoria*. IGME, Madrid, 97 p.
- Ministerio de Fomento (2000). *Geotecnia vial en lo referente a materiales para obras de la construcción de explanaciones y drenajes. Orden circular 326/00 (PG-3)*. Serie normativas. Instrucciones de construcción. Madrid.
- Salesa Bordonaba, A. (2014). *Propiedades físico-mecánicas del hormigón tras dos ciclos de reciclado*. Tesis Doctoral inédita. Univ. Alfonso X el Sabio, 438 p.