

Usos geotécnicos de la arcilla expandida

Geotechnical Uses of Lightweight Expanded Clay Aggregate

Elías A. Roces Alonso^{1*}, Mauro Muñoz Menéndez², Jesús González Galindo³, José Estaire Gepp⁴

Resumen

La arcilla expandida es un árido cerámico ligero, compuesto por un núcleo muy poroso de muy baja densidad y una cáscara exterior clinquerizada más resistente y densa. Este árido artificial se forma al calentar arcilla natural a temperaturas superiores a los 1100 °C en horno rotatorio, lo que genera una expansión de gases que forman los poros.

En ingeniería geotécnica la principal aplicación de la arcilla expandida es su uso en rellenos ligeros, ya sea en forma de terraplén sobre suelos blandos o como relleno del trasdós de estructuras (muros, falsos túneles) para disminuir cargas o empujes.

La realización de rellenos geotécnicos ligeros es una solución técnicamente válida y económicamente viable que, en muchos casos, se puede plantear como alternativa a ciertas técnicas de mejora del terreno.

A pesar de la amplia experiencia acumulada a lo largo de décadas de utilización de la arcilla expandida, siguen sin estar claras algunas características de su comportamiento.

En este artículo se analiza de forma somera la normativa existente, se describen las propiedades geotécnicas básicas del material (incluyendo resultados de alguno de los ensayos realizados en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX) y se desarrollan algunos criterios de diseño, puesta en obra y control de calidad de obras con este material.

Palabras clave: Geotecnia, arcilla expandida, Arlita, rellenos ligeros, áridos artificiales.

Abstract

Lightweight Expanded Clay Aggregates (LECA) is a lightweight ceramic aggregate, composed of a very low density and very porous core and a stronger and denser clinkerized outer shell. This manufactured aggregate is formed by heating natural clay to temperatures above 1100 °C in a rotary kiln, which generates an expansion of gases that forms the structural voids.

In geotechnical engineering, the main application of expanded clay is its use in light fillings, either as an embankment on soft soils or as a fill on retaining structures to reduce earth pressures.

The construction of lightweight geotechnical fills is, in many cases, an adequate technique as well as an economically viable solution, which can compete with some ground improvement techniques.

Despite the extensive experience accumulated over decades of using LECA, some characteristics of its behavior remain unclear.

This paper analyzes the existing codes and describes the main geotechnical properties of LECA (including some laboratory test results carried out at CEDEX's Laboratorio de Geotecnia). Furthermore, some criteria on design, construction and execution control are developed to facilitate its further use.

Keywords: Geotechnics, lightweight expanded clay, LECA, lightweight fill, artificial aggregates.

1. INTRODUCCIÓN

La arcilla expandida es un árido artificial cerámico de gran ligereza y con diversas aplicaciones en la ingeniería civil como pueden ser, entre otras, la fabricación de hormigones ligeros, uso como aislante térmico o acústico o empleo como relleno geotécnico ligero. Asimismo, en otros países la arcilla expandida tiene otros usos entre los que cabe destacar su utilización como capa de protección

contra heladas, como aislante bajo la cimentación de tanques de sales fundentes en energía termosolar o como relleno bajo losas para realización de cimentaciones compensadas.

Este texto se centra únicamente en su utilización como relleno geotécnico ligero siendo, en este caso, sus principales usos los siguientes:

- Material de relleno en terraplenes sobre suelos blandos para limitar asentamientos (figura 1 a).
- Relleno sobre y tras estructuras para reducir cargas muertas y empujes sobre la propia estructura, como puede ser trasdosado de muros, relleno sobre falsos túneles o rellenos sobre aparcamientos subterráneos (figuras 1 b y c).
- Terraplenes sobre laderas que, en caso de realizar un relleno convencional, serían potencialmente inestables (figura 1 d).

* Autor de contacto: earoces@rocesingenieria.es

¹ ETSI de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. C/ Profesor Aranguren, s/n, 28040, Madrid. Ingeniero consultor.

² Doctor en Geología. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

³ Doctor ingeniero de caminos, canales y puertos. ETSI de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

⁴ Doctor ingeniero de caminos, canales y puertos. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

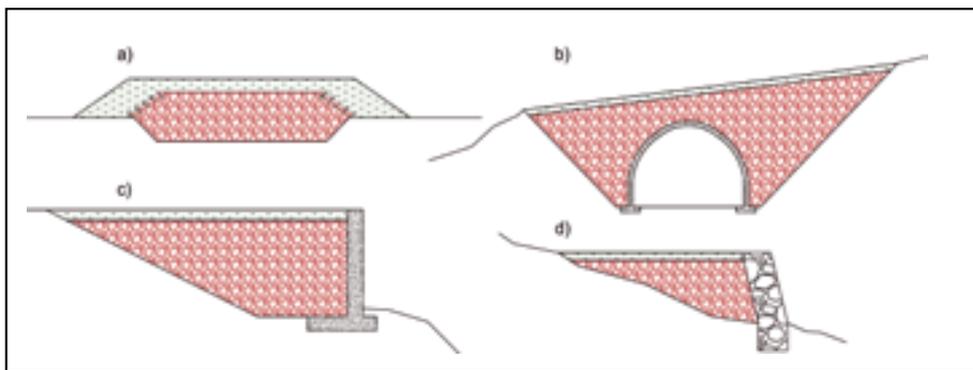


Figura 1. Usos habituales de la arcilla expandida. a) Relleno sobre suelos blandos para reducir asentamientos. b) Relleno sobre falso túnel para reducir empujes y carga muerta sobre la estructura. c) Trasdosado de estribo, para reducción de asentamientos en caso de presencia de suelos blandos y reducción de empujes. d) Trasdosado de muro en ladera, para reducción de empujes.

Este artículo se enmarca dentro de un estudio sobre arcilla expandida que se está llevando a cabo actualmente en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (LG-CEDEX, en adelante) para la redacción de una tesis doctoral sobre el comportamiento geotécnico de este material. La tesis se redacta dentro del programa de doctorado en Ingeniería de Estructuras, Cimentaciones y Materiales de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), continuando de esta manera la tradicional relación entre el Laboratorio de Geotecnia y el Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno de la UPM. Como resultado de este estudio, basado fundamentalmente en una campaña de ensayos de laboratorio, se va a publicar una serie de artículos centrados en el comportamiento en rotura de los granos, además de una compilación de los numerosos resultados de ensayos realizados.

El objetivo principal del artículo es servir de introducción al empleo de la arcilla expandida en obras geotécnicas, por lo que se analiza de forma somera la normativa existente, se describen las propiedades geotécnicas básicas del material (incluyendo resultados de alguno de los ensayos realizados en el LG-CEDEX para la citada tesis doctoral), y se desarrollan algunos criterios de diseño, puesta en obra y control de calidad de obras con este material.

2. NORMATIVA Y ANTECEDENTES TÉCNICOS

Dado que la arcilla expandida se viene utilizando desde hace bastantes años, la comunidad geotécnica europea ha hecho un esfuerzo de normalización tanto en lo que se refiere al material en sí mismo, como a sus posibles aplicaciones para rellenos geotécnicos o para otros usos. Las principales normativas europeas existentes sobre este tema se recogen a continuación:

- UNE-EN 15732:2014 *Materiales ligeros de relleno y productos aislantes térmicos para aplicaciones en ingeniería civil. Productos a base de áridos ligeros de arcilla expandida*: Esta norma especifica requisitos sobre las características y clasificaciones de la arcilla expandida.
- UNE-EN 13055-1:2003 *Áridos ligeros. Parte 1: Áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado*. Esta norma se refiere a los áridos ligeros en general,

independientemente de su tipología, empleados en la fabricación de hormigones y morteros.

- UNE-EN 13055-2:2005 *Áridos ligeros. Parte 2: Áridos ligeros para mezclas bituminosas, tratamientos superficiales y aplicaciones en capas tratadas y no tratadas*. Esta norma contiene especificaciones sobre áridos ligeros en general, independientemente de su tipología, empleados, entre otras cosas, en rellenos geotécnicos.
- PNE-EN 13055 *Áridos ligeros*. Es un proyecto de norma (a fecha de agosto de 2021) que unificará y sustituirá a las dos anteriores.
- UNE-EN 14063-1:2006 y UNE-EN 14063-2:2015 *Productos y materiales aislantes térmicos. Productos de áridos ligeros de arcilla expandida aplicados in situ*: Esta norma se refiere a las arcillas expandidas utilizadas como aislante térmico.

Estas normas son de carácter general limitándose a indicar la nomenclatura a utilizar para clasificar los materiales y los ensayos a realizar para realizar dichas clasificaciones, haciendo referencia, en algún caso, a algún procedimiento especial. A este respecto, debe tenerse en cuenta que ninguna de estas normas da valores de referencia de las propiedades de la arcilla expandida.

Las propiedades geotécnicas de la arcilla expandida pueden encontrarse en los numerosos estudios, artículos y otras publicaciones sobre este material que existen en la literatura técnica. Cabría destacar la guía *Applicazioni geotecniche e caratterizzazione meccanica dell'argilla espansa Leca* (Prisco, 2007), redactada en el Politécnico de Milán, así como algunas otras guías técnico-comerciales elaboradas por los distintos fabricantes del material (Arlita, 2017; EXCA, 2015). Además de estas guías hay varias campañas de ensayos extensas, entre las que cabe destacar la realizada por el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil (LNEC) (Caldeira, Neves *et al.*, 2012) en Portugal, o la realizada por la empresa de ingeniería noruega Sintef (Høva y Gylland, 2009). Actualmente, en el LG-CEDEX (CEDEX, 2020) se está llevando a cabo un programa de ensayos sobre arcilla expandida fabricada en Avelar (Portugal) por la empresa Arlita con granulometría 10/20, que servirá para contrastar y validar alguno de los resultados obtenidos en los estudios citados anteriormente.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ARCILLA EXPANDIDA

3.1. Características básicas del grano

El grano de arcilla expandida tiene una composición heterogénea, estando compuesto por una cáscara exterior rígida *clinkerizada* que le aporta resistencia y un núcleo poroso que le aporta la ligereza característica de este material, dada por su bajo peso específico. En la figura 2 se recogen fotografías de varios granos donde se puede ver la diferencia entre la cáscara y el núcleo. Este núcleo es muy poroso, presentando huecos que están conectados con el exterior a través de la cáscara y otros que son inaccesibles desde el exterior, como se muestra esquemáticamente en la figura 3. En función del tamaño del canal de acceso al exterior, estos huecos pueden ser rellenados por agua, cuando se trata de canales anchos, o solamente por gas, cuando son canales estrechos.



Figura 2. Granos de arcilla expandida enteros y fracturados. En los granos fracturados se observa claramente la frontera entre núcleo y cáscara.

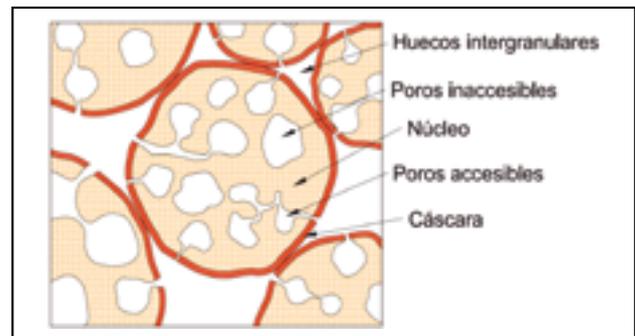


Figura 3. Estructura básica de un grano de arcilla expandida y de un agregado de granos con sus huecos intergranulares (Fuente: Modificado de Caldeira, Neves *et al.*, 2012). Se han representado unos accesos a poros de mayor tamaño y otros más estrechos e intrincados.

3.2. Granulometría

Aunque en el mercado existen numerosos tipos de arcilla expandida, cada uno con unas propiedades y desarrollado para una aplicación concreta, en ingeniería geotécnica se utiliza habitualmente la granulometría 10/20. Al tratarse de un producto manufacturado, presenta unas características muy regulares en lo que se refiere al tamaño de los granos, como se aprecia en la figura 4a, donde se muestra el huso granulométrico del material ensayado en el LG-CEDEX, como resultado de 12 ensayos granulométricos. Como puede verse, el material es muy uniforme, presentando un coeficiente de uniformidad [$C_u = D_{60}/D_{10}$] de 1,2. Otras granulometrías más continuas (como puede ser la 0/32) se pueden emplear para situaciones en que el relleno ligero deba soportar mayores cargas. Una granulometría 0/32 se compara con la 10/20 en la figura 4 b.

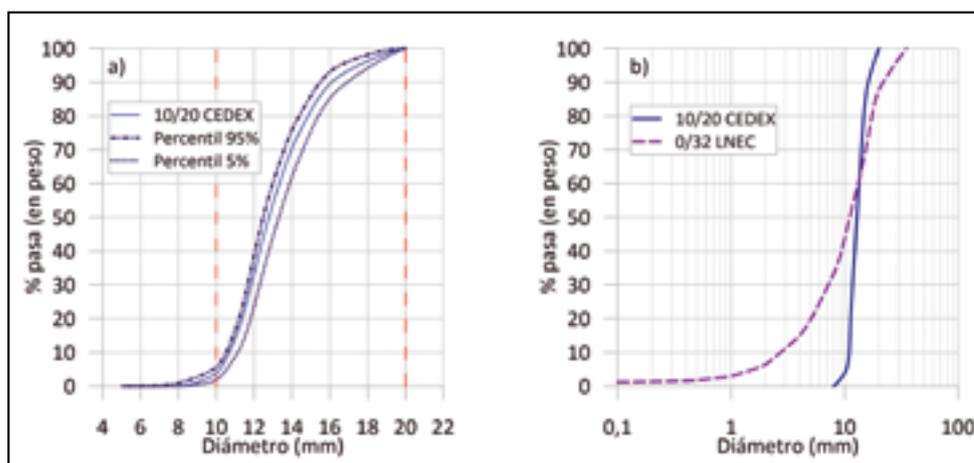


Figura 4. a) Huso granulométrico de la arcilla expandida 10/20 utilizada en los ensayos realizados en el LG-CEDEX. b) Comparación de la curva granulométrica de la arcilla expandida 10/20 y 0/32.

3.3. Esfericidad

Una inspección visual de los granos confirma que tienen una forma casi esférica, sin vértices, ni caras de fractura, aristas apreciables. Midiendo tres diámetros perpendiculares se puede obtener una medida de la esfericidad, según la fórmula de Krumbein (Krumbein, 1941):

$$\psi = \sqrt[3]{I S / L^2} \quad [1]$$

donde ψ es la esfericidad y L , I y S los diámetros mayor, intermedio y menor, respectivamente. El valor de ψ varía entre 0 y 1, correspondiendo 1 a una esfera perfecta.

De los más de 1.200 granos medidos en esta campaña (CEDEX, 2020) se deduce que la esfericidad es independiente del tamaño del grano, toma un valor medio de 0,89 y los percentiles 5 y 95 son 0,78 y 0,97, respectivamente. En la figura 5 se muestran los resultados de la esfericidad de los granos en función del diámetro medio del grano (media de los tres diámetros perpendiculares medidos).

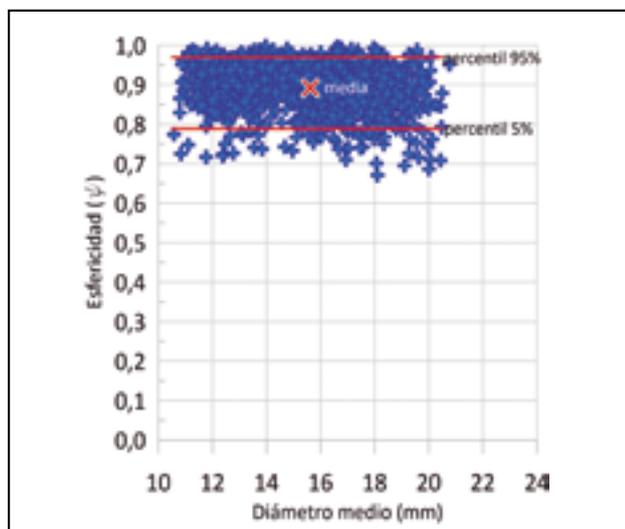


Figura 5. Esfericidad de los granos analizados. Se han indicado los percentiles 5 y 95 así como el valor medio de esfericidad y diámetro.

4. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS

Se describen seguidamente algunas de las características más interesantes desde el punto de vista del uso de la arcilla expandida como relleno geotécnico ligero.

4.1. Peso específico y absorción de agua

4.1.1. Ideas previas

Se puede considerar que los agregados de arcilla expandida tienen una doble porosidad: por un lado, la porosidad intergranular y, por otro, la porosidad interna del grano, como se mostraba en la figura 3. Esto hace que el peso específico de un relleno dependa del peso específico del grano seco, de la humedad del grano, de la porosidad intergranular y de la cantidad de agua existente en los poros intergranulares. En lo referido a porosidad intergranular, en los proyectos, generalmente sólo se consideran las situaciones extremas en las que los poros intergranulares

están secos o llenos de agua, no teniéndose en cuenta posibles situaciones intermedias de saturación.

En este apartado se analizan estos factores con el fin de justificar el valor del peso específico de la arcilla expandida que se debe utilizar en el diseño.

4.1.2. Peso específico del grano y absorción de agua

En la figura 3 se muestra que los poros interiores al grano pueden ser accesibles al agua, en caso que se puedan saturar y porosidad inaccesible, aquellos que no se pueden llenar de agua, por no estar conectados con el exterior del grano.

En la campaña de ensayos realizada en el LG-CEDEX (CEDEX, 2020) se ha determinado el peso específico del material seco utilizando dos metodologías diferentes:

- Por el método geométrico: midiendo tres diámetros del grano con calibre y obteniendo un volumen equivalente, suponiendo un elipsoide perfecto.
- Mediante picnómetro de agua: el grano se introduce en el picnómetro de agua un tiempo tan corto como sea posible, de tal forma que no dé tiempo a que ninguno de los huecos del grano se llene de agua, según se muestra en la figura 6 a.

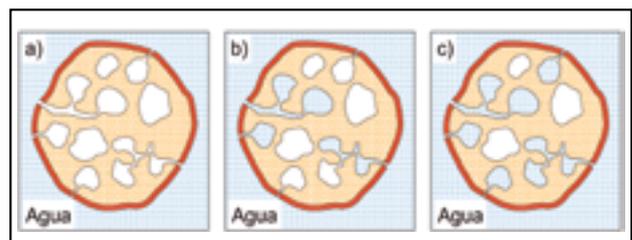


Figura 6. Esquema de un grano de arcilla para diferentes situaciones. a) Grano seco, sumergido en agua un tiempo tan corto que no da tiempo a que penetre agua en ningún poro; b) Grano en proceso de saturación, tras cierto tiempo sumergido; c) Grano totalmente saturado, con todos los huecos accesibles al agua saturados.

A partir de los ensayos realizados con el método geométrico en más de 1.200 granos se ha determinado que el peso específico medio del grano seco en estufa es de $5,7 \text{ kN/m}^3$ (figura 7), con unos percentiles 5 y 95% de $4,2$ y $7,8 \text{ kN/m}^3$, respectivamente, por lo que se puede considerar que existe cierta dispersión en este parámetro en la muestra ensayada. Además, se ha constatado que el peso específico es independiente del diámetro del grano.

Por otra parte, mediante picnómetro de agua, se ha determinado que el peso específico del grano seco en estufa es de $5,9 \text{ kN/m}^3$. La similitud entre los valores obtenidos por ambos métodos indica la bondad de las determinaciones realizadas, permitiendo establecer como valor de diseño del peso específico del grano un valor de $5,8 \text{ kN/m}^3$.

Para determinar el peso específico de la fase sólida se ha seguido el procedimiento propuesto por Santiago Buey y Raya García (De Santiago Buey y Raya, 2008), en el que se utiliza un picnómetro de helio sobre material pasante por el tamiz UNE 0,064, obtenido de la trituración de los granos. El valor obtenido tras repetir el ensayo tres veces fue de $24,5 \text{ kN/m}^3$. Este valor se asume, en este estudio, como el valor del peso específico de la fase sólida del material.

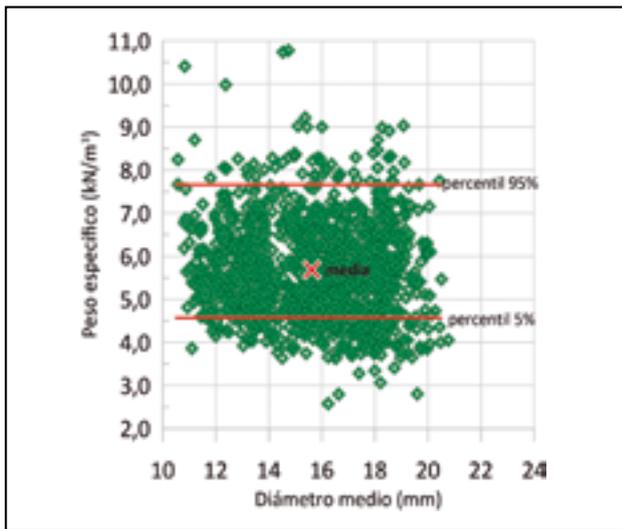


Figura 7. Valores del peso específico de los granos, obtenido por el método geométrico.

Conocidos el peso específico de la fase sólida y del grano se puede determinar que la porosidad total del grano es alrededor del 75 %. Si se asume que toda la porosidad es accesible al agua, es decir no hay porosidad inaccesible, un grano de arcilla expandida completamente saturado tendría un peso específico de $13,3 \text{ kN/m}^3$.

De forma general, un grano de arcilla expandida sumergido a presión atmosférica se va saturando a lo largo del tiempo, según se muestra en la figura 6 b, hasta llegar a una saturación completa de los huecos accesibles (figura 6 c).

Para estimar la evolución del peso específico en el tiempo, en el LG-CEDEX, se han mantenido sumergidas, durante más de 6 meses, seis muestras de arcilla expandida. La evolución del peso específico con el tiempo se muestra en la figura 8.

En la figura se observa un claro cambio en la tendencia tras unos diez días de inmersión, cambio que también

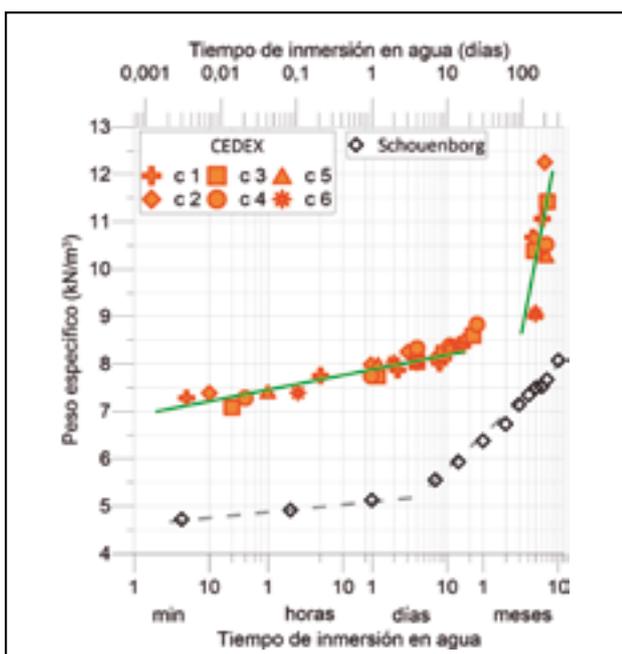


Figura 8. Aumento del peso específico de la arcilla expandida, por absorción de agua, medido en granos enteros en función del tiempo.

ha sido observado en otros ensayos similares sobre áridos ligeros. A modo de ejemplo, en la figura 8 también se han incluido los resultados de los ensayos realizados por (Schouenborg, 2003) en los que se observa una tendencia similar, aunque la diferencia en los pesos específicos muestra claramente que se trata de un material más ligero.

El peso específico de una de las muestras ensayadas en el LG-CEDEX ha llegado a superar en algún caso los 12 kN/m^3 que, como puede verse, es inferior al valor teórico máximo calculado con anterioridad ($13,3 \text{ kN/m}^3$), por lo que todavía cabe esperar un por lo que todavía cabe esperar un cierto aumento del peso específico total del material si se dejase sumergido más de 6 meses.

Por otra parte, otro aspecto a destacar de este tipo de ensayos es que la cáscara exterior además de dar la resistencia al grano disminuye notablemente su velocidad de absorción de agua, como se pudo comprobar en ensayos de inmersión a 24 horas realizados por Saint-Gobain (Storbråten y Morken, 2012) sobre granos enteros y granos completamente fracturados.

4.1.3. Peso específico del agregado

La determinación del peso específico del agregado, entendido como el conjunto de granos que ocupan un cierto volumen, debe realizarse teniendo en cuenta tanto el peso específico del grano como el volumen de los huecos intergranulares.

De acuerdo a los ensayos realizados en el LG-CEDEX, siguiendo el método preconizado en la norma UNE 103 105:1993, se obtuvo un peso específico mínimo del agregado de entre $3,3$ y $3,5 \text{ kN/m}^3$, haciendo la determinación con los granos totalmente secos.

4.1.4. Peso específico de diseño del agregado

Durante la fase de proyecto, el valor del peso específico del agregado a utilizar en los cálculos debe tener en cuenta el grado de compactación deseado (habitualmente en obra el material se vibra hasta obtener una reducción de volumen de un 10 % respecto del volumen posterior al extendido), el peso específico del grano seco y la humedad esperada que tendrá el grano durante la vida útil de la obra.

Si no se dispone de ensayos concretos para el material que va a emplear se debe recurrir a las recomendaciones dadas por el fabricante; así, por ejemplo, (Arlita, 2017) recomienda tomar un peso específico del agregado de $4,0 \text{ kN/m}^3$ para el material con presencia ocasional de agua y $5,0 \text{ kN/m}^3$ cuando el material va a estar sometido a una presencia de agua muy frecuente. Estos valores parecen ser algo inferiores a los que se pueden deducir de los ensayos realizados en el LG-CEDEX.

4.2. Deformabilidad

La deformabilidad del material se suele medir en ensayos de compresión confinada en los que el material se encuentra en condiciones edométricas. En la figura 9 se muestran algunos de los ensayos de este tipo realizados en el LG-CEDEX, en los que la muestra se preparó vertiendo el material en el portamuestras (un molde de los empleados para los ensayos Próctor modificado) y vibrándolo hasta obtener una reducción de volumen de un 10 %, igual

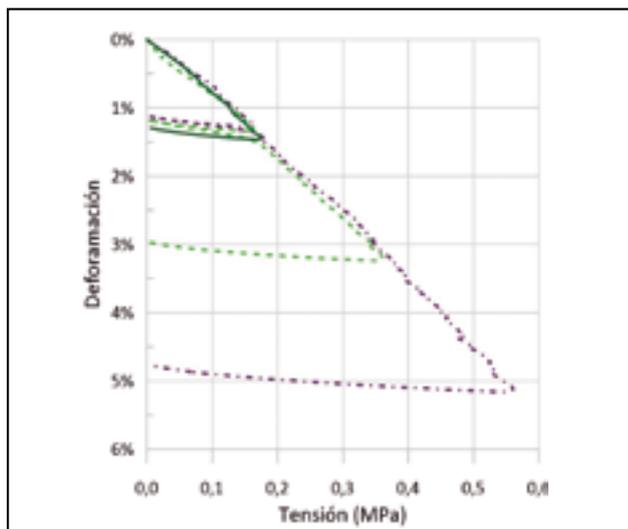


Figura 9. Curvas edométricas, en escala natural, obtenidas en los ensayos realizados en el LG-CEDEX.

al valor que se usa habitualmente en obra como objetivo de compactación, como se decía anteriormente.

El análisis de los resultados de los ensayos edométricos permite realizar las siguientes consideraciones:

- Se observa una relación lineal entre tensiones y deformaciones en todo el rango de tensiones utilizadas, hasta 0,55 MPa que suponen unas cinco veces la carga vertical máxima de diseño habitualmente utilizada en rellenos de arcilla expandida (nótese que en el gráfico los resultados se han representado en escala natural).
- El módulo edométrico en carga noval es del orden de 12 MPa, en las condiciones de compactación anteriormente indicadas.
- Los módulos en descarga-recarga son superiores al módulo en carga noval. Así, para descarga, se puede estimar un módulo edométrico de 120 MPa (10 veces superior al módulo en carga noval) y para recarga de 70 MPa (6 veces superior al módulo en carga noval).
- En la recarga, una vez que el material supera la tensión máxima a la que ha sido sometido, el ensayo continúa por la rama noval, con la misma pendiente que si no se hubiese realizado el ciclo de descarga-recarga.

En la mayoría de ensayos de compresión en condiciones edométricas realizados LNEC (Caldeira, Neves *et al.*, 2012) sobre arcilla expandida 10/20 se observó que la curva tensión-deformación tenía un aspecto similar al mostrado en la figura 9, incluyendo una relación lineal entre tensiones y deformación y una rigidez en descarga mayor que en carga noval. En estos ensayos se determinó un módulo edométrico en carga noval de 6 MPa (la mitad del determinado en los ensayos del LG-CEDEX) y un módulo en descarga de entre 80 y 140 MPa (similar al determinado en los ensayos del LG-CEDEX).

Dado que el material es mucho más rígido en descarga-recarga que en carga noval, en aquellos casos en los que el asiento del relleno fuera un requisito difícil de conseguir, se podría pensar en la posibilidad de realizar una precarga del relleno de arcilla expandida, dado que, una vez retirada la precarga, el material asentaría alrededor de una décima parte de lo que hubiese asentado sin precarga. La precarga podría tener una duración muy pequeña, ya que se conseguiría una densificación del material por recolocación de los granos (no por consolidación), efecto que se produce de forma casi instantánea.

4.3. Resistencia al corte

Los ensayos de corte directo hechos en el LG-CEDEX, según UNE-EN ISO 17892-10, se realizaron en la caja de corte directo del equipo mostrado en la figura 10.

Las muestras ensayadas se prepararon con material seco previamente en estufa, vertido en la caja y compactado hasta obtener una reducción de volumen del 10 % (valor habitual en obra para el control de compactación, como se indicaba anteriormente).

Con este equipo, se realizaron ensayos con seis tensiones normales diferentes, entre 25 y 400 kPa, con el fin de analizar la no-linealidad del comportamiento resistente del material. Como comprobación de la repetitividad de los resultados, se repitieron los ensayos para tensiones normales de 25 y 50 kPa. En la figura 11 se muestran los resultados de los ensayos.

Del análisis de los resultados de la figura 11 se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Los resultados son coherentes para las diferentes tensiones ensayadas y los ensayos que se han repe-



Figura 10. Equipo de corte directo de 30 x 30 cm con el que hicieron los ensayos con Arlita 10/20 en el LG-CEDEX.

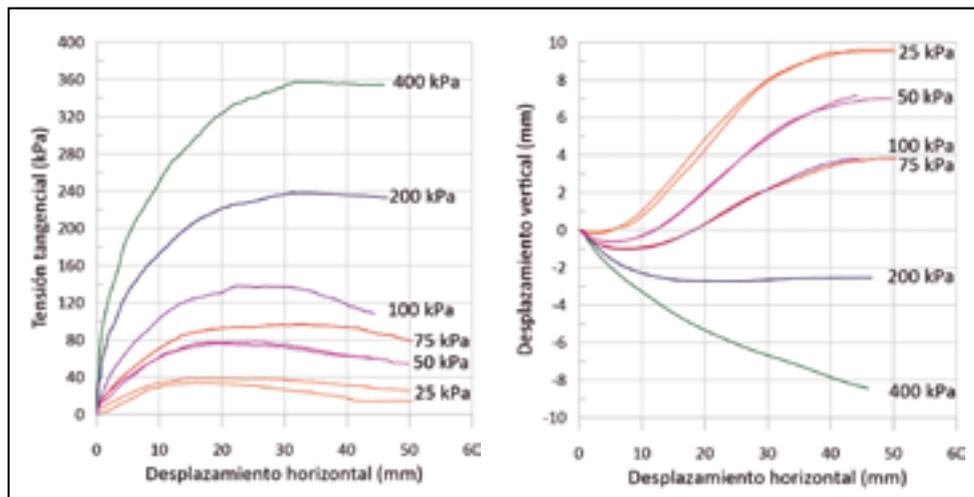


Figura 11. Resultados de los ensayos de corte realizados en el LG-CEDEX sobre Arlita 10/20 seca en estufa, compactada un 10 %.

tido se han obtenido resultados prácticamente idénticos, lo que indica la bondad del método de ensayo.

- El material es fuertemente dilatante para tensiones inferiores a 100-150 kPa, como cabe esperar en un material granular de este tipo.
- Para tensiones superiores a 100-150 kPa, el material es contractante. Esta disminución de volumen podría estar asociada con la rotura de granos. Durante la aplicación de las cargas tangenciales, que se produce en la banda de corte para estas tensiones. Esta rotura de granos produce una degradación granulométrica del material que provoca una reducción de volumen.
- Para tensiones normales superiores a 100-150 kPa, la curva no presenta una tensión de pico, mientras que para tensiones inferiores se observa un ligero pico en las tensiones, que se produce para desplazamientos horizontales de entre 10 y 25 mm.

La interpretación de las curvas tensión-desplazamiento permite elegir, en cada ensayo, la que se considera la resistencia del material para la tensión normal utilizada. Las parejas tensión normal-tensión tangencial en rotura se han

recogido en la figura 12 a, donde se han dibujado dos criterios de rotura: uno lineal, correspondiente al criterio de Mohr-Coulomb, y otro parabólico. A su vez, en la figura 12 b se han representado los ángulos de rozamiento secante, en función de la tensión normal aplicada en el ensayo de corte, tanto de los resultados obtenidos de los ensayos, como los deducidos de los criterios de rotura.

El análisis de la figura anterior permite determinar las siguientes conclusiones:

- La resistencia del material no sigue un criterio lineal, bajando sensiblemente el ángulo de rozamiento para las tensiones normales para las que el material tiene un comportamiento contractante.
- La resistencia del material presenta cohesión nula, como cabe esperar de un material granular.
- Para las tensiones habituales de trabajo del material parece que un ángulo de rozamiento pico de 45° está del lado de la seguridad según estos ensayos. En diseño es habitual ser más conservador y suponer que la resistencia del material a corte sigue un criterio lineal de Mohr Coulomb sin cohesión y con un ángulo de rozamiento de unos 40°.

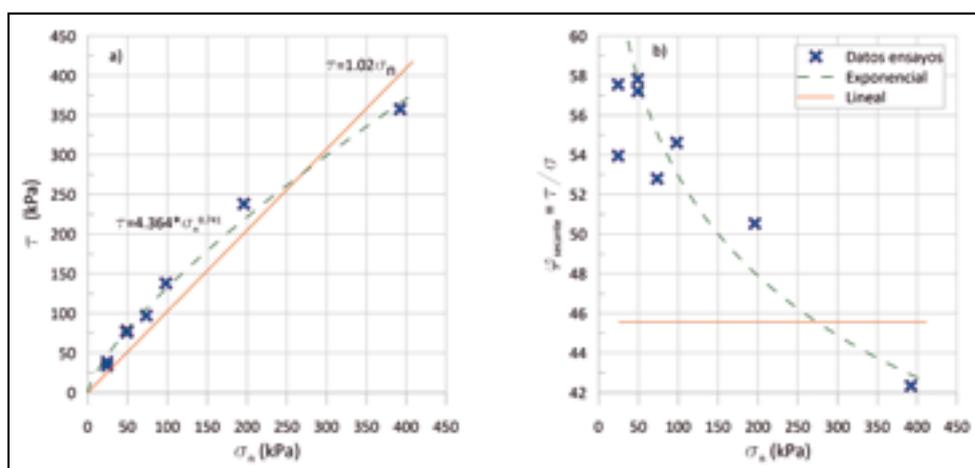


Figura 12. a) Interpretación de los ensayos de corte directos realizados en el CEDEX. Se muestran los resultados de los ensayos y la interpretación de los mismos empleando un criterio lineal y exponencial. b) Ángulo de rozamiento secante. Se muestran los resultados de los ensayos y el valor para el criterio lineal y exponencial.

- Los ángulos de rozamiento secantes varían entre 58 y 42°, para el rango de tensiones normales aplicadas entre 25 y 400 kPa.
- El ángulo de rozamiento secante que se deduce a partir del criterio de rotura exponencial sigue sensiblemente la tendencia de los resultados experimentales, mientras que. Para el criterio de rotura lineal, el ángulo de rozamiento es constante e independiente de la tensión normal aplicada, representando un valor medio de los datos experimentales.

Como se decía anteriormente, del análisis de los resultados de la campaña realizada en el LG-CEDEX y de otras disponibles (Høva y Gylland, 2009; Caldeira, Neves *et al.*, 2012), parece claro que el material no sigue un criterio de rotura lineal y que el ángulo de rozamiento baja sensiblemente al aumentar la carga a que está sometido el agregado.

En la figura 13 se muestra el ángulo de rozamiento secante para los ensayos triaxiales realizados en el LNEC. El ángulo de rozamiento baja de 44° para presiones de confinamiento de 50 kPa a tan solo 30° para presiones de confinamiento de 200 kPa. En la misma figura se ha incluido la tendencia de variación del ángulo de rozamiento, según el criterio propuesto por Veiga Pinto (Veiga Pinto, 1983) para pedraplenes y empleado por Caldeira para arcilla expandida (Caldeira y Neves, 2015).

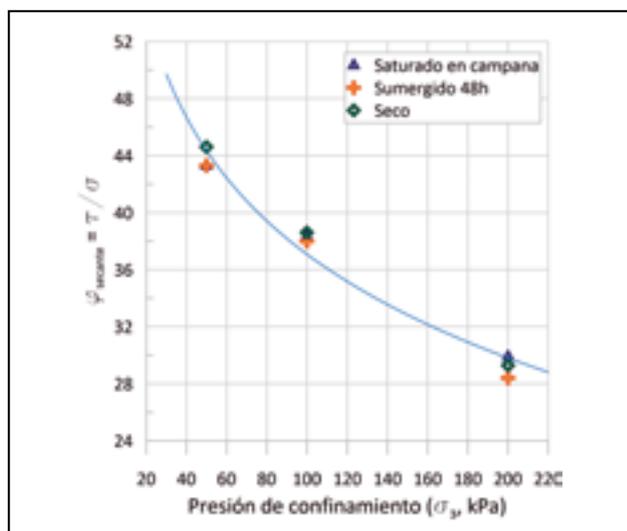


Figura 13. Variación del ángulo de rozamiento secante con la presión de confinamiento en los ensayos triaxiales realizados por LNEC con arcilla expandida 10/20. Se han incluido datos para las tres humedades ensayadas (Fuente: Adaptado de (Caldeira, Neves *et al.*, 2012).

Si se comparan los ángulos de rozamiento medidos en los ensayos de corte directo del LG-CEDEX (figura 12 b) con los resultados obtenidos por LNEC (figura 13) se aprecia que el ángulo de rozamiento medido en los ensayos del LG-CEDEX es superior, a pesar de tratarse de material con la misma granulometría. Parte de esta diferencia podría asociarse a que habitualmente los ángulos de rozamiento medidos en aparatos de corte son ligeramente superiores a los ángulos medios en ensayos triaxiales (como orden de magnitud, para arenas densas el ángulo de rozamiento obtenido mediante ensayos de corte directo es 8° superior al obtenido mediante ensayos triaxiales (Das, 2019)), pero es

posible que otra parte de esa diferencia estuviese asociada con que las características del material son diferentes.

De los mismos ensayos de LNEC (figura 13), que se han hecho para diferentes condiciones de humedad (grano seco, sumergido 48 horas o saturado en campana) se deduce que la humedad del grano no influye significativamente en el ángulo de rozamiento del material.

4.4. Rotura de granos

Es habitual limitar la carga a que está sometida la arcilla expandida a valores de 100 kPa. En ensayos de compresión confinada, no se observa rotura generalizada de los granos hasta tensiones muy superiores (del orden de 10 veces superiores), pero en ensayos triaxiales y de corte se detecta una gran degradación granulométrica para tensiones bajas, muy posiblemente debido a que la mayor parte de las roturas son debidas al desplazamiento relativo entre granos.

Existen numerosos estudios realizados que relacionan la rotura de partículas dentro de un agregado con el trabajo realizado por las fuerzas externas (Casini y Viggiani, 2011; Casini y Viggiani *et al.*, 2013). Esta relación parece cumplirse también para la arcilla expandida, pero es un tema actualmente en estudio.

A falta de un estudio más detallado de este aspecto, parece lógico mantener las limitaciones de carga, ya que una fracturación masiva de partículas además de aumento de densidad del material traerá aparejado importantes asentamientos.

4.5. Propuesta de parámetros de diseño

A la hora de determinar unos parámetros para el diseño de un relleno con arcilla expandida deben conocerse las características del producto concreto a emplear, ya que, al ser un material manufacturado, las características varían según el fabricante y el objetivo con el que haya sido fabricada la arcilla expandida.

A partir de los ensayos realizados expuestos en este artículo, en la tabla 1 se proponen unos parámetros básicos de diseño.

Tabla 1. Propuesta de parámetros de diseño

Parámetro	Valor propuesto
Peso específico seco del agregado con granos a humedad ambiente	4,3 kN/m ³
Peso específico seco del agregado con granos casi saturados	8,0 kN/m ³
Porosidad intergranular del material tras compactación en obra	35 %
Peso específico saturado del agregado con granos a humedad ambiente	7,7 kN/m ³
Peso específico saturado del agregado con granos casi saturados	11,4 kN/m ³
Módulo edométrico en carga noval	10 MPa
Módulo edométrico en descarga	120 MPa
Módulo edométrico en recarga	70 MPa
Coefficiente de Poisson	0,2
Ángulo de rozamiento interno (tensiones máximas inferiores a 150 kPa)	40°
Carga vertical máxima admisible	150 kPa

Es destacar que el valor del peso específico propuesto en la tabla anterior es sensiblemente superior al recomendado por alguno de los fabricantes. Esta discrepancia pone de relieve la necesidad de realizar ensayos específicos con el material que se va a usar en el caso de que este parámetro tenga una influencia importante en el diseño.

5. PROYECTO DE ESTRUCTURAS CON ARCILLA EXPANDIDA

En el proyecto de cualquier estructura geotécnica (especialmente terraplenes o rellenos) en el que se vaya a utilizar arcilla expandida como material se deben hacer todas las verificaciones de los estados límite que se realizarían para un proyecto convencional (comprobaciones de estabilidad, asientos, etc.), pero además se deben tener en cuenta las siguientes normas de buena práctica:

- La arcilla expandida debe estar siempre y por todos lados envuelta con un geotextil con función anticonaminante. Sería válido, por ejemplo, el polipropileno de 200 gr/m² o superior.
- En rellenos de más de 6 m de altura, es recomendable introducir capas de refuerzo intermedias con geomallas o similar.
- La arcilla expandida debe de confinarse entre espaldones de tierra, ejecutados previamente, que permitan su correcta compactación y actúen como elementos protectores del relleno frente a fallos de estabilidad local en los espaldones. Los espaldones se construirán según la normativa vigente. Actualmente en España según lo recogido en el artículo 300 del Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3)
- Sobre el relleno debe extenderse una capa de coronación de, al menos, 50 cm de espesor, ejecutada con material natural de calidad, que cumpla las condiciones de calidad indicadas en el artículo 330 del PG3.
- Se debe tener en cuenta el drenaje, ya que el material flota, y en caso que se espere presencia de agua tener en cuenta esta flotación a la hora de realizar los cálculos geotécnicos.

A este respecto se pueden consultar las recomendaciones de la normativa sueca de carreteras para rellenos de arcilla expandida (Karlsson, 2014), en las que se tiene en cuenta la evolución del peso específico del grano a medida que absorbe agua: una situación a corto plazo en la que el agua no ha tenido tiempo de penetrar en los granos y otra a largo plazo en la que los huecos accesibles del grano están rellenos de agua. En la figura 14 puede verse un esquema de los niveles freáticos a tener en cuenta en el diseño, mientras que en la tabla 2 se indican los pesos específicos del agregado a usar en cada zona del terraplén.

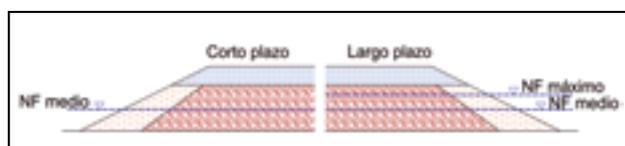


Figura 14. Situaciones de cálculo propuestas por Karlsson (2014) (Fuente: modificado de Karlsson, 2014).

Tabla 2. Pesos específicos del agregado a usar en el cálculo de terraplenes con presencia de nivel freático

Posición del material	Situación de cálculo	
	Corto plazo	Largo plazo
Debajo del NF medio	Peso específico saturado del agregado con granos a humedad ambiente	Peso específico saturado del agregado con granos casi saturados.
Entre NF medio y máximo	Peso específico seco del agregado con granos a humedad ambiente	Peso específico saturado del agregado con granos a humedad ambiente
Encima del NF máximo	Peso específico seco del agregado con granos a humedad ambiente	Peso específico seco del agregado con granos a humedad ambiente

Nota: Ver valores propuestos en tabla 1 para los pesos específicos

En la figura 15 se muestra el esquema habitual de un terraplén ejecutado con arcilla expandida, en el que se indican los valores usuales de diferentes magnitudes: inclinación del espaldón del relleno, dimensiones del espaldón de tierras, espesor de tongada y espesor de capa de coronación.

Desde el punto de vista económico, hay que tener en cuenta que el coste de la arcilla expandida ya puesta en obra varía mucho en función del coste del transporte desde las fábricas que suministran el material. A este respecto, hay que tener en cuenta que las principales fábricas que suministran material en España están situadas en Portugal e Italia, mandándose el material, desde esta última, al Levante español, por vía marítima.

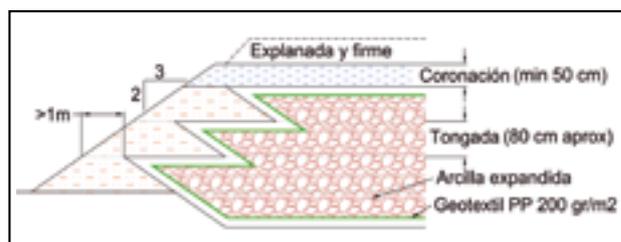


Figura 15. Esquema de un terraplén con arcilla expandida (Fuente: Modificado de Arlita, 2017).

6. PUESTA EN OBRA

6.1. Ejecución

El transporte a obra de la arcilla expandida suele realizarse a granel mediante camiones de fondo móvil o camiones bañera; en caso que se deban realizar rellenos en zonas de difícil acceso, el material se suele suministrar en *big-bags* o en cubas y colocarlo mediante bombeo, por lo que además debe seleccionarse adecuadamente su granulometría para asegurar que el material sea bombeable.

El extendido y compactación suele realizarse con un mismo equipo, generalmente una máquina de cadenas mediana de entre 25 y 35 toneladas de peso, que transmita al terreno unas presiones medias de 50 a 75 kPa, para evitar la rotura de los granos de la arcilla expandida. La compactación se realiza dando pasadas con esta máquina de cadenas, sin acudir al uso de rodillos lisos vibratorios. En los casos de difícil acceso o volumen de material reducido, la compactación se puede hacer con una bandeja vibratoria.



Figura 16. A) Suministro de arcilla expandida en camión de fondo móvil. B) Extendido del material con el cazo de la retro. C) Compactación del material con las cadenas de la retro. D) Aspecto de la arcilla expandida tras compactación. Todas las fotos de las obras de urbanización del exterior del Estadio Metropolitano de Madrid (2019).

En la figura 16 se muestra el proceso de compactación de un relleno realizado en las obras de urbanización del exterior del Estadio Metropolitano de Madrid (año 2019) que se ejecutó con una Komatsu PC-350, retroexcavadora de cadenas de 33 ton que con sus tejas de 600 mm de anchura transmite una presión al terreno de 65 kPa. En este caso se empleó arcilla expandida porque se quería realizar un relleno sobre una línea de metro existente, que no estaba dimensionada para las cargas que generaría un relleno convencional.

Para el diseño de la compactación, está muy extendido el uso de las curvas de compactación de la figura 17, que indican el número de pasadas a realizar en función del espesor de la tongada y del equipo utilizado. Lo más habitual, si se compacta con equipos de cadenas, es realizar el relleno por tongadas de 80 cm dando 8 o 9 pasadas.

Existe otro diseño, utilizado habitualmente en Italia, pero poco frecuente en otros países, que consiste en alternar, en modo sándwich, capas de arcilla expandida de un espesor de entre 0,7 y 1,0 m, con capas de material granular de calidad tipo “suelo seleccionado” (según PG3) de un espesor de, al menos, 0,2 m. La compactación se realiza únicamente sobre las capas de terreno natural, empleando para ello equipos convencionales de compactación (rodillos vibratorios). Esta tipología de sección aparece reflejada en la guía del profesor Di Prisco (Di Prisco, 2007) o en los catálogos de la casa Laterlite (Laterlite, 2015).

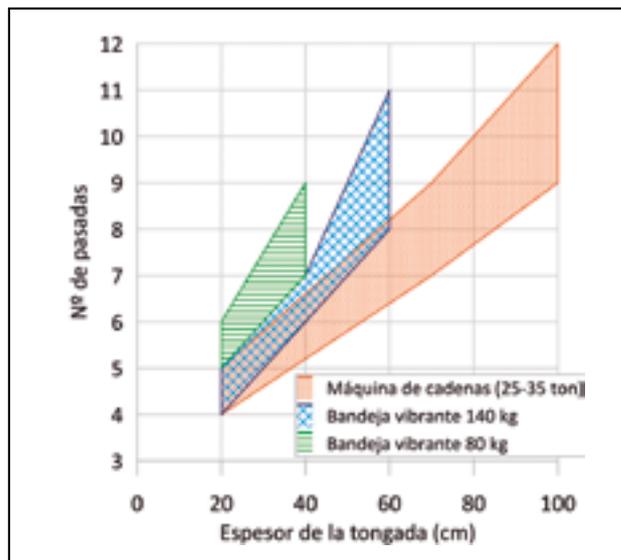


Figura 17. Curvas de compactación (Fuente: Modificado de EXCA, 2015, y Arlita, 2017).

6.2. Control de ejecución

Habitualmente, el control de calidad se hace por medio de un control de procedimiento, verificando el espesor de las tongas y que el número de pasadas para compactar es el indicado en proyecto.

Adicionalmente, se pueden hacer placas de carga sobre la coronación del relleno. Debe tenerse en cuenta que los módulos obtenidos con las placas de carga sólo proporcionan información sobre el material más superficial, por lo que realmente no sirven para verificar la compactación del relleno de arcilla expandida.

De realizar placas de carga sobre coronación, sería recomendable emplear placas de 600 mm, aunque lo habitual sea emplear las de 300 mm, para poder obtener información del material subyacente a la capa de coronación.

Con estos controles (control de procedimiento y placas de carga sobre coronación) se han hecho innumerables obras sin que estas presentasen patologías, por lo que se puede considerar un método de control sancionado por la experiencia.

Se han hecho intentos de control con ensayos sobre la propia arcilla expandida con poco éxito. Por ejemplo, las placas de carga, tanto de 300 como de 600 mm de diámetro, no suelen cumplir la relación entre el módulo en primer ciclo de carga (E_{v1}) y segundo ciclo (E_{v2}), según exige la normativa. A modo de ejemplo, el artículo 330 del PG3 indica que la relación E_{v2} / E_{v1} debe ser inferior a 2,2.

Recuérdese, que para los ensayos de compresión confinada la relación entre los módulos en carga noval y recarga era de 6 (figura 9). En los ensayos con placa de carga realizados directamente sobre arcilla expandida se suelen obtener relación entre módulos superiores a 5. Por lo que los resultados son coherentes entre los ensayos de campo y laboratorio.

Otros equipos que se podrían pensar utilizar son los penetrómetros dinámicos ligeros de energía variable, tipo Panda como se ve en la figura 18, los cuales se clavan en el material sin apenas resistencia, por lo que no dan resultados utilizables. También se han hecho intentos hincando un tubo cilíndrico y retirando el material del interior para pesarlo y obtener su peso específico, al ser conocido el volumen del tubo, pero las perturbaciones que se producen al hincar el tubo no permiten tener sensibilidad sobre el grado de compactación.



Figura 18. Penetrómetro Panda en un relleno de arcilla expandida realizado por Uriel & Asociados en una obra en Madrid.

No se tiene constancia de que se hayan hecho intentos de verificar el nivel de compactación con el ensayo de huella (UNE 103407:2005), por lo que su uso debería estar condicionado a pruebas previas para su validación.

7. CONCLUSIONES

La arcilla expandida es un material que lleva décadas empleándose como relleno geotécnico ligero y que, con un diseño y un control de ejecución adecuados, no presenta ningún problema durante su fase de servicio. En algunos casos su empleo entra en competencia con técnicas clásicas de mejora del terreno (sobre todo en el ámbito de los terraplenes sobre suelos blandos) y en otros su uso se justifica por la reducción de empujes y cargas muertas sobre estructuras.

Los resultados de la campaña de ensayos realizados en el LG-CEDEX han permitido establecer unos valores de diseño de los principales parámetros geotécnicos que intervienen en el proyecto de estructuras geotécnicas realizadas con arcilla expandida.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la colaboración de los técnicos de laboratorio, pertenecientes al LG-CEDEX, José Luis Gómez, Óscar Tello, Manuel Raya, José Luis Toledo, Manuel Pintado y Felipe García durante la realización de los ensayos geotécnicos de este trabajo.

Agradecer a Luis Ortuño que permitiese utilizar fotografías de ensayos de campo realizados por Uriel & Asociados. El material ensayado en el LG-CEDEX fue suministrado por Arlita. Asimismo, se agradece a Raúl Murciego, de Arlita, compartir alguna de la información empleada en la redacción de este artículo.

9. REFERENCIAS

- ARLITA (2017). *Guía Técnica* (2ª ed.). Madrid: Arlita.
- Caldeira, L., y Neves, E.M.D. (2015). Mechanical Characterization of Lightweight Expanded Clay Aggregate Materials for Modeling Their Geotechnical Behavior. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(11): pp. 04015027-9.
- Caldeira, L., Neves, E.M.D., y Saraiva, P. (2012). *Reporte: LNEC-Proc. 501/19/18038*. Lisboa (Portugal): Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Instituto Superior Técnico (IST).
- Casini, F., y Viggiani, G.M. (2011). Experimental investigation of the evolution of grading of an artificial material with crushable grains under different loading conditions. *Proceedings of the 5th international symposium on deformation characteristics of geomaterials, Seoul, Korea, September 1-3, 2011*, pp. 957-964.
- Casini, F., Viggiani, G.M., y Springman, S.M. (2013). Breakage of an artificial crushable material under loading. *Granular Matter*, 15(5): pp. 661-673.
- CEDEX (2020). *Trabajo 7777: Ensayos sobre arcilla expandida para tesis doctoral de Elías A. Roces*. Madrid: Laboratorio de Geotecnia (CEDEX).
- Das, B.M. (2019). *Advanced Soil Mechanics*. Londres/Nueva York: Crc Press. Taylor & Francis Group.
- De Santiago Buey, C., y Raya, M. (2008). Análisis del peso específico y porosidad de materiales porosos mediante picnometría de helio. *Ingeniería Civil*, nº 151, pp. 95-103.

Di Prisco, C. (2007). *Applicazioni geotecniche e caratterizzazione meccanica dell'argilla espansa Leca*. Bregnano (Italia): Leca.

EXCA (2015). *Expanded clay LWA in CEA: Lightweight fill and thermal insulation products for civil engineering applications. Installation and structural quality control on site*. Technical Report 2015/TR/001. Bruselas (Bélgica): EXCA.

Høva, E.M., y Gylland, A.S. (2009). *Documentation of material properties for Leca aggregates*. Trondheim (Noruega): Sintef Report n° SBF IN F09411.

Karlsson, M. (2014). *Trafikverkets tekniska krav för geokonstruktioner TK Geo 13. TRV 2014/13914. Version 1.0*. Borlänge (Suecia): Swedish Transport Administration (Trafikverket).

Krumbein, W.C. (1941). Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 11(2): pp. 64-72.

Laterlite (2015). *Géotechnique et infrastructure. Solutions légères et résistantes avec argile expansée Laterlite et bétons légers structuraux*. Chasselay (Francia): Laterlite.

Schouenborg, B., et al. (2003). *Test methods adapted for alternative and recycled, porous aggregate materials. Part 3-Water absorption*. Nordtest project 1531-01. Karlskrona (Suecia): SP Swedish National Testing and Research Institute.

Storbråten, T., y Morken, S. (2012). *Green Roof-Phase 1-Laboratory test*. Lillestrøm (Noruega): Competence Centre Exclay.

Veiga Pinto, A.A. (1983). *Prediction of the structural behavior of rockfill dams*. Research Thesis. Lisboa (Portugal): Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Instituto Superior Técnico (IST).