

CARACTERIZACIÓN Y MEJORA DE SUELOS MARGINALES EN OBRA CIVIL

Autor:

Jorge Fuertes Blanco

Directores:

Pedro Luis López Julián

Luis Eduardo Arlegui Crespo

2016



Departamento de
Ciencias de la Tierra
Universidad Zaragoza

Índice

Abstract	2
Introducción	2
Suelos marginales.....	2
Definición y características de los RCD.....	3
Objetivos	3
Antecedentes	4
Clasificación de suelos según el PG-3.....	4
Usos de suelos marginales en terraplenes	4
Mejoras de suelos	6
Tratamiento con cal.....	6
Tratamiento con cemento	6
Métodos y materiales.....	6
Materiales	6
Suelo.....	6
Árido.....	7
Mezclas.....	8
Ensayos característicos y normas	9
Granulometría.....	9
Límites de Atterberg.....	10
Proctor normal	11
Proctor modificado	11
Ensayo de expansividad Lambe	12
Ensayo de rotura a compresión simple.....	13
Resultados	14
Granulometría.....	14
Límites de Atterberg.....	16
Proctor y Proctor modificado	17
Ensayo de expansividad Lambe	19
Compresión simple.....	19
Discusión.....	22
Conclusions	24
Bibliografía.....	25

Abstract

The technical characteristics of the clay-silt soils make them complicated to perform certain structures, this is because these materials have plastic behaviour in wet conditions, which makes complicated compaction. The compaction of these special materials is done with specialized machinery, which increases the economic costs and the duration of the project.

This work focuses on the use of sand size concrete waste, from recycling plant of construction and demolition waste (CDW), to improve the workability and technical characteristics of the soil by mixing it with the correct fraction of CDW. It is supposed to improve the granulometry of the mix and therefore the improvement in the technical attributes of the material.

The current regulation, PG-3, limit the use of the marginal soils in embankments. In this research study the possibility of reuse the CDW to reduce the plasticity and increase the density of the soil to make it useful for the embankment construction.

The results of the Proctor compaction tests shows that the raise in the density it is not considerable, however, it shows a great improvement in the workability and a reduction of the plasticity of the mixes. In general, the mixes shows an improvement in their mechanical qualities like the Young modulus or their axial compressive strength.

The optimal mix must combine a good workability, a good mechanical qualities and it must be economically worthwhile. For this reasons, the mix 3:1 could be the optimal for this plastic soil.

Introducción

El presente trabajo de fin de grado se centra en el estudio del comportamiento de los residuos de grano fino procedentes del machaqueo de hormigón para su uso en tratamientos de mejora de suelos arcillosos-limosos con problemas de plasticidad, que son caracterizados como suelos marginales.

Las características técnicas de estos suelos los hacen complicados para la realización de determinadas estructuras constructivas, especialmente en aquellas en las que se requiere compactar el suelo; esto es debido a que estos materiales presentan un comportamiento plástico en condiciones de humedad que dificulta su compactación.

El trabajo con estos materiales se realiza con maquinaria especializada y además, requiere un tiempo de ejecución más largo, lo que aumenta considerablemente los costes económicos del proyecto. Este trabajo se centra en el análisis geotécnico de la posibilidad de mejorar los suelos marginales mediante el uso de residuos de hormigón de tamaño arena, procedentes de plantas de reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD), y concretamente en la mejora de la trabajabilidad y de las características geotécnicas del suelo de cara a su puesta en obra.

Suelos marginales

Los suelos marginales son aquellos materiales naturales que, según la normativa vigente actualmente, no pueden clasificarse como suelos seleccionados, ni adecuados, ni como tolerables de cara a su reutilización en obras civiles. Por lo general, estos suelos son de granulometría fina, tamaño limo o arcilla. Frecuentemente, presentan una baja resistencia mecánica y una alta plasticidad. También se pueden clasificar en esta categoría debido a la concentración de sales solubles o materia orgánica, que pueden generar afecciones si no se toman las medidas pertinentes, en las posteriores estructuras que se pretendan edificar (PG-3; Ministerio de Fomento, 2000).

Por otro lado, estos suelos limosos-arcillosos presentan una cierta problemática en su compactación, lo que requiere maquinaria especializada como las compactadoras de “patas de cabra”, mostrada en la figura 1. La compactación de estos materiales se hace costosa económicamente y además requiere un tiempo más prolongado que la compactación de materiales de mejor calidad. Por estas razones, los suelos marginales suelen retirarse en obras, lo que genera un volumen considerable de residuos y al mismo tiempo encarece el coste y duración del proyecto. La posibilidad de ser reutilizados en las obras civiles conllevaría un importante beneficio económico, y constituye un motivo para desarrollar investigaciones como la que se presenta en este trabajo.



Figura 1: Compactadora patas de cabra.

Definición y características de los RCD

Según el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, se define como residuo de construcción y demolición “cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de «Residuo» incluida en el artículo 3.a) de la Ley 10/1998, de 21 de abril, se genere en una obra de construcción o demolición.”

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son materiales procedentes de los procesos de construcción y de deconstrucción; estos materiales pueden tener una composición muy variada y heterogénea (Proyecto GEAR, 2011).

Las características geotécnicas y químicas del árido, como podría ser una posible reactividad con los materiales naturales del árido reciclado, dependen de su procedencia y, en último término de su composición, dado que el residuo puede contener una gran diversidad de materiales.

En este trabajo se plantea el uso de material procedente del machaqueo de piezas prefabricadas de hormigón de la empresa PRAINSA (Salesa Bordonaba, 2014), pero sus conclusiones se pueden aplicar al uso de residuos resultantes del machaqueo de hormigón procedente de la demolición de obras civiles o de edificación.

Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo comprobar si la mezcla del suelo con una fracción variable de residuos de construcción y demolición (RCD), procedentes del machaqueo de hormigón, provoca una mejora en la resistencia mecánica del suelo, así como de su trabajabilidad y de su clasificación técnica, según la clasificación de suelos presente en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3). La mejora de estos materiales estaría enfocada a su uso en terraplenes o rellenos en obra. El interés principal del estudio estriba en que se trata de dos materiales que, de partida, son clasificables como residuo. El suelo marginal sólo podría utilizarse en obra previo tratamiento (por ejemplo, con la adición de cal o de cemento), mientras que el residuo RCD, en su fracción fina, no tiene en la actualidad un uso permitido definido. Por ello, se ha investigado la posibilidad de que las mezclas de ambos materiales residuales puedan dar lugar a un material reutilizable en obra, lo que conllevaría un evidente beneficio en términos económicos y ambientales.

Antecedentes

Clasificación de suelos según el PG-3

El Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) establece una serie de denominaciones y usos del suelo a partir de sus características técnicas.

La clasificación de un suelo según el PG-3, se realiza atendiendo a las características mostradas en la tabla 2, para ello, se comprueba si todas las características del suelo a clasificar coinciden con las dadas para un suelo seleccionado, de no ser así, se pasa a la siguiente categoría hasta que el suelo cumpla todas las condiciones impuestas.

De esta forma, un suelo deberá de cumplir las condiciones especificadas el PG-3 para su clasificación, además de todas las condiciones de las clasificaciones inferiores.

Usos de suelos marginales en terraplenes

El PG-3 incluye una serie de restricciones de uso de cada categoría. En el apartado 330.4 de este documento, se detallan los usos por zonas dentro de un terraplén (Tabla 1).

Zona	Tipo de Suelos
Coronación	Suelos adecuados o seleccionados.
Cimiento	Suelos tolerables, adecuados o seleccionados, con un índice CBR ≥ 3 .
Núcleo	Suelos tolerables, adecuados o seleccionados; suelos marginales bajo justificación y estudio especial.
Espaldones	Materiales que satisfagan las condiciones que defina el proyecto en cuanto a impermeabilidad, resistencia, peso estabilizador y protección frente a la erosión.

Tabla 1: Uso de materiales para las diferentes zonas de un terraplén según el PG-3 (PG-3; Ministerio de Fomento, 2000).

Según lo expuesto en el PG-3, el único lugar en el que se podrían utilizar los suelos marginales sería en la zona de núcleo de un terraplén, lo que requeriría una compactación que, como anteriormente se ha comentado, es considerablemente más compleja que en otros materiales. El núcleo de los terraplenes es la zona que constituye el mayor volumen de material puesto en obra, por lo que la posibilidad de reutilizar suelos marginales en los núcleos permitiría un ahorro económico considerable en el presupuesto de la obra, sobre todo en zonas donde los suelos de mayor calidad geotécnica (seleccionados, adecuados o tolerables) no estuviesen disponibles en áreas próximas.

Con la realización de mezclas con RCD se pretende que la reutilización de los suelos marginales sea más fácil y que no requiera de maquinaria especializada, como sí ocurre por el contrario en el tratamiento de mejora con cal o con cemento.

	Clasificación				
	Seleccionados	Adecuados	Tolerables	Marginales	
<u>Características</u>	Se considerarán como tales aquellos que cumplen las siguientes condiciones	Se considerarán como tales los que no pudiendo ser clasificados como suelos seleccionados cumplan las condiciones siguientes	Se considerarán como tales los que no pudiendo ser clasificados como suelos seleccionados ni adecuados, cumplen las condiciones siguientes	Se considerarán como tales los que no pudiendo ser clasificados como suelos seleccionados, ni adecuados, ni tampoco como suelos tolerables, por el incumplimiento de alguna de las condiciones indicadas para éstos, cumplan las siguientes condiciones	Todos los que no se puedan incluir en las categorías anteriores, turbas y otros suelos con materiales perecederos y que puedan resultar insalubres.
Materia orgánica	<0,2%	<1%	<2%	<5%	
Sales solubles	<0,2%	-	<5%	-	
Contenido en yeso	-	-	<1%	-	
Tamaño máximo	D ≤100 mm	D ≤ 100 mm	-	-	
Cernido tamiz # 2 UNE	<80%	<80%	-	-	
Cernido tamiz # 0,40 UNE	<75%	-	-	-	
Cernido tamiz # 0,080 UNE	<25%	<35%	-	-	
Límite líquido (LL)	<30 %	<40%	<65%	-	
Índice de plasticidad (IP)	<10 %	-	-	-	
LL-IP	-	Si $W_L > 30$ $I_p > 4$	Si $LL > 40$ $IP > 0,73(LL-20)$	Si $LL > 90$ $IP < 0,73(LL-20)$	
Asiento en ensayo de colapso	-	-	<1%	-	
Hinchamiento libre	-	-	<3%	<5%	

Tabla 2: Clasificación de suelos según el PG-3. Los campos con un guion (-) no se tienen en cuenta para la clasificación (PG-3, Ministerio de Fomento, 2000).

Mejoras de suelos

Los tratamientos más comunes para corregir suelos con una alta plasticidad consisten en añadir al suelo cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) o cemento. Estos materiales modifican las características del suelo haciéndolo menos plástico, con una menor tasa de expansividad, aumentando su resistencia a compresión y reduciendo su sensibilidad al agua.

Tratamiento con cal

Este método de estabilización de suelos que consiste en añadir y mezclar la cal con el suelo a estabilizar, en una proporción variable, como norma general para suelos arcillosos esta cantidad varía entre 2 % y 10 % de cal.

También se le pueden añadir otros elementos con capacidad reactiva como las cenizas volantes, residuo de grano muy fino procedente de la quema de carbón. Este tipo de cenizas posee una gran capacidad puzolánica y, por lo tanto, mejoran la efectividad de la mezcla (Jofré et al., 2008).

El tratamiento reduce la expansividad y plasticidad del suelo, lo que favorece su trabajabilidad y manejo durante la compactación del mismo; esto se debe a que la cal tiene la capacidad de controlar la humedad de la mezcla y actúa como desecante del suelo.

Tratamiento con cemento

La normativa vigente indica que a un suelo se le debe añadir un porcentaje mínimo del 3 % en peso de cemento, frente al peso seco del suelo a tratar, aportando el cemento necesario para obtener una resistencia mínima a compresión de 2,5 MPa a los 7 días (IECA, 2013).

El cemento provoca una mejora en el suelo debido a su efecto aglomerante, por lo que no es indicado para materiales con un alto índice de plasticidad o con un gran porcentaje de finos (IECA, 2011).

En la figura 2 se muestra el conglomerante adecuado en función de la plasticidad y la granulometría del material.

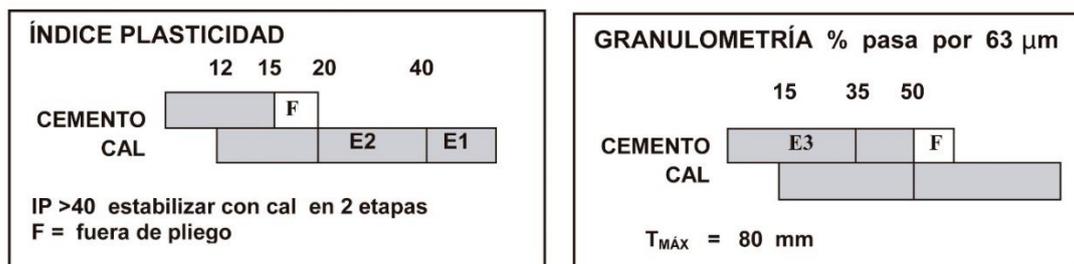


Figura 2: Gráfico orientativo sobre el uso de cal o cemento como aglomerante (IECA, 2013).

Métodos y materiales

Materiales

En este apartado se describen los materiales empleados en la realización del presente trabajo.

Suelo

La muestra de suelo con la que se han realizado los ensayos son unas lutitas de color rojizo del Aragoniense inferior, se presentan frecuentemente bioturbadas, con nódulos de yeso y ocasionales capas

de gipsiarenitas de color gris-verdoso. Esta unidad se interpreta como las facies medias y distales de abanicos aluviales según Hernández Samaniego et al. (2005).

Desde un punto de vista geotécnico, se podría describir como un suelo de grano fino, denso y firme, de color rojizo y que presenta una plasticidad y una cohesión altas. En el afloramiento no se observan bandeados o laminaciones, tampoco se observan alteraciones del material. No muestra presencia de un contenido elevado de materia orgánica, debido a la ausencia de olor y a la ausencia de un color oscuro.

Para su caracterización definitiva se han determinado las siguientes características: granulometría, límites de Atterberg y ensayo de expansividad Lambe.

La toma de muestras se realizó a 1,4 Km al norte de la localidad de Muel (Figura 3), en las inmediaciones del barranco Salado. El acceso se realiza, partiendo desde la localidad de Muel, desde la carretera A-1101 en dirección a Épila.

Coordenadas UTM (Datum ETRS 89)
30T X: 658545 Y: 4593494

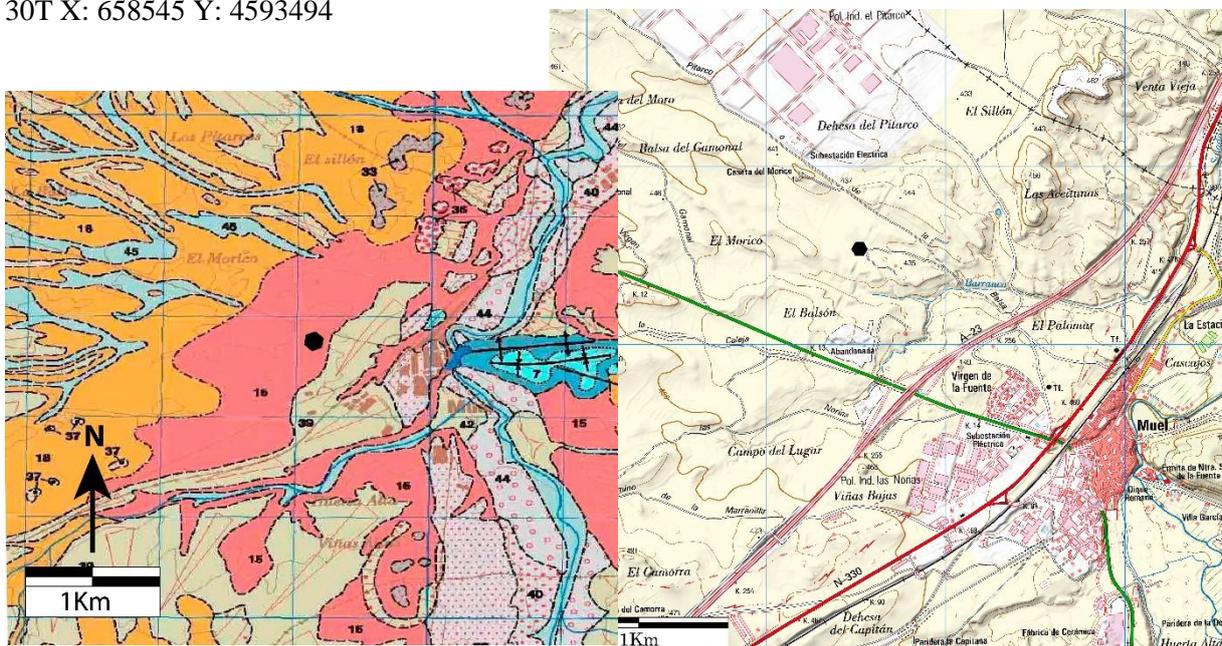


Figura 3: Situación geográfica y geológica de las muestras (Hernández Samaniego et al., 2005), (IGN, 2011).

Árido

Para realizar el tratamiento de mejora del suelo se ha empleado un árido de granulometría fina procedente del reciclaje de piezas de hormigón prefabricadas, en concreto, se trabaja con los denominados desclasificados inferiores, partículas descartadas por la planta de procesamiento por ser demasiado finas para su uso como árido reciclado y para las que en la actualidad no hay ningún uso definido, por lo que constituyen un material de tipo residual que debe ser destinado a vertedero.

Estos desclasificados inferiores proceden de piezas de hormigón prefabricadas desechadas por la empresa PRAINSA, utilizado para anteriores trabajos de investigación (Salesa Bordonaba, 2014), concretamente sobre hormigones reciclados.

El material se genera en plantas de machaqueo destinadas a la producción de áridos reciclados. En la figura 4 se puede observar una de estas plantas.

Este tipo de materiales puede presentar una cierta capacidad aglomerante, provocada por la presencia de óxidos reactivos no hidratados procedentes del cemento empleado durante la fabricación de las piezas.



Figura 4: Planta de machaqueo para la producción de áridos reciclados.

Mezclas

Las mezclas realizadas en este trabajo están pensadas para su aplicación en obra, por lo que la proporción de suelo será como mínimo igual a la del árido reciclado, ya que una mezcla con una proporción mayor de árido que de suelo es inviable en cualquier aplicación real. Esto es debido a que el coste del transporte del árido sería mayor que el coste de retirada del suelo marginal.

Para la realización de las mezclas se procedió a dejar secar los materiales al aire durante una semana para eliminar el posible exceso de humedad que pudieran contener; tras esto, se procedió al tamizado a través un tamiz de 20 mm de luz de malla.

Una vez realizados estos procesos y cuarteados los materiales, se realizaron las diferentes mezclas para obtener aproximadamente 3 Kg de cada una. Cada mezcla se introdujo en una amasadora durante varios minutos para obtener una muestra homogénea.

Las mezclas suelo-árido realizadas son las siguientes (siempre expresadas como proporciones en peso):

- Relación 1:1 50 % de suelo, 50 % de árido reciclado.
- Relación 2:1 66 % de suelo, 33 % de árido reciclado.
- Relación 3:1 75 % de suelo, 25 % de árido reciclado.

Ensayos característicos y normas

En este apartado se describen los ensayos de laboratorio realizados para la caracterización geotécnica de los materiales empleados. En Geotecnia, se distinguen por un lado los ensayos de laboratorio descriptivos, que son aquéllos que permiten la descripción y clasificación geotécnica de los materiales; en este grupo se encuentran las granulometrías y los ensayos de consistencia (estos últimos se conocen como límites de Atterberg). De los restantes ensayos de laboratorio, se han seleccionado para este trabajo los que permiten conocer la aptitud para la puesta en obra de los materiales (ensayos de compactación Proctor y Proctor modificado) y, además, un ensayo de caracterización mecánica (compresión simple).

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los ensayos geotécnicos citados.

Granulometría

La granulometría es un ensayo de laboratorio que permite obtener la distribución de los tamaños de las partículas que componen un suelo, expresada en porcentaje en peso. El conocimiento de dicha distribución permite conocer las propiedades básicas de los suelos.

La granulometría tiene como objetivo el estudio que se basa en la distribución de tamaños de las partículas de un suelo y que son útiles para conocer las propiedades básicas del mismo, así como para realizar una clasificación previa.

Se realiza mediante las siguientes normas: UNE-EN 933-1:2012: “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado” y la norma UNE 103101:1995: “Análisis granulométrico de suelos por tamizado”.

Este ensayo se basa en la separación de las partículas en función de su tamaño, con ayuda de un conjunto de tamices con diferentes luces de malla según una serie decreciente (4 mm-0,100 mm).

La realización del ensayo requiere el siguiente procedimiento operativo:

Se cuartea la muestra seca para obtener un volumen representativo de material, posteriormente se pesa y se introduce en la tamizadora. En este caso, se han utilizado los tamices de 4; 2; 1; 0,500; 0,250 y 0,100 mm.

En la columna, los tamices deben de estar ordenados de forma decreciente y con un recogedor en la base, donde se acumulan los granos que han pasado por dichos tamices. La columna se introduce en una torre de agitación que actúa como un vibrador mecánico, y se deja actuar durante 5 minutos.

A continuación, se recoge y pesa el material que queda retenido en cada tamiz y se calcula su porcentaje, representándose en un gráfico X-Y en cuyo eje de ordenadas se lee el porcentaje acumulado de suelo que atraviesa cada tamiz (en escala lineal), y en abscisas la luz de los tamices empleados, este último eje en escala logarítmica decimal. De este modo, tras la realización del ensayo granulométrico, conseguimos dibujar la curva granulométrica del material sometido a ensayo.

De la curva granulométrica de un suelo podemos obtener su proporción en partículas de grava, arena o finos (en esta categoría se incluyen tanto las partículas de tamaño limo como las de arcilla). El gráfico obtenido también permite obtener los diámetros característicos (D_{60} , D_{30} y D_{10}), que se emplean para calcular dos coeficientes que ayudan a clasificar con mayor precisión y a describir los suelos de partículas gruesas: el coeficiente de uniformidad (C_U), que permite conocer si el suelo es más o menos uniforme, y el coeficiente de curvatura (C_C), que nos avisa de la existencia de discontinuidades en la distribución de tamaños de partículas en el suelo.

Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg o límites de consistencia tienen como objetivo caracterizar el comportamiento de los suelos de grano fino. Estos ensayos se diseñaron para complementar al granulométrico, el cual tiene una limitación metodológica, al no poder separar físicamente por vía seca las partículas con tamaño inferior a la arena (normalmente, en el laboratorio de geotecnia, el tamiz de menor luz de malla empleado es el de 0,100 mm, como a este caso).

Los ensayos de consistencia se basan en el concepto de que un suelo de grano fino puede encontrarse en cuatro estados de consistencia según la humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido cuando está seco, y al agregársele agua poco a poco irá pasando sucesivamente a los estados semisólido, plástico y finalmente, líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg, y varían para cada tipo de partículas finas, y también para cada combinación de las mismas en cualquier suelo.

El límite plástico (LP) corresponde al porcentaje de humedad para el cual se produce el cambio de estado semisólido a plástico. Se realiza mediante la norma UNE 103-104-93 “Determinación del límite plástico de un suelo”.

A su vez, el límite líquido (LL) corresponde al porcentaje de humedad para el cual que se produce el paso de estado plástico a líquido. Se realiza mediante la norma UNE 103-103-94 “Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande”.

A continuación, se resume el procedimiento operativo para la obtención en laboratorio de ambos límites.

Límite líquido

Para la determinación de este límite se utiliza la cuchara de Casagrande. Para este ensayo, se parte de una muestra cuarteada y tamizada por un tamiz de 430 μm , a la que se añade una cierta cantidad de agua. Posteriormente, se coloca en la cuchara de Casagrande aplicando una capa de aproximadamente 1 cm en toda la superficie de la cuchara y se realiza un surco en el centro de la misma con un acanalador normalizado.

A continuación, se realiza el golpeo a razón de dos golpes por segundo hasta que las dos mitades de suelo se junten en el fondo de la cuchara. El ensayo es válido si las dos mitades se juntan entre los 15 y 35 golpes.

En el caso de que el ensayo sea válido, se extrae una muestra de la parte central de la cuchara y se determina el contenido en humedad de la misma mediante secado en estufa. Para este ensayo se realizan al menos 2 determinaciones, una para conseguir el objetivo en el intervalo de 25 a 35 golpes y otra entre 15 y 25 golpes.

Límite plástico

Se parte de una muestra cuarteada y tamizada por el tamiz de 430 μm a la que se le añade una cierta cantidad de agua, que permita realizar cilindros de 3 mm de diámetro con la palma de la mano sobre una superficie plana sin que éstos se rompan. Finalmente, se determina la humedad de los cilindros realizados, mediante secado en estufa.

Proctor normal

En general, los ensayos Proctor se diseñaron para comprobar la mayor o menor aptitud de un suelo para su colocación adecuada en obra, la cual se considera como tal si, tras la compactación con medios mecánicos convencionales (generalmente, rodillos vibrantes), el suelo ya colocado presenta una densidad seca en torno a 2 t/m^3 o superior.

El ensayo Proctor normal tiene como objetivo, por tanto, determinar la máxima densidad seca y su humedad correspondiente aplicando una energía de compactación normalizada (0.563 J/cm^3), ya que se conoce que los materiales pueden alcanzar distintas densidades máximas en función de la humedad con la cual se compacten.



Figura 5: Material empleado para el ensayo Proctor.

Se utiliza para determinar la humedad de compactación del material para la puesta en obra, realizándose mediante la norma UNE 103500:1994 “Geotecnia. Ensayo de compactación. Proctor normal”.

Se parte de una muestra de suelo seca a la que se le añade una cierta cantidad de agua y se amasa para obtener una distribución homogénea de la humedad.

Seguidamente, se introduce una primera capa de suelo húmedo en el molde, ligeramente por encima de $1/3$ de la altura del molde. A continuación, se compacta mediante 26 golpes con una maza normalizada, repartidos equitativamente por toda la superficie. Este proceso de llenado y compactación se repite otras dos veces hasta llenar el molde por completo.

Finalmente, se calcula por pesada (y conociendo el volumen del molde) la densidad del material compactado, y la humedad del mismo recogiendo una muestra en la zona central del cilindro y sometiéndola a pesada en húmedo y tras desecación en estufa.

Proctor modificado

El ensayo Proctor modificado se diseñó porque el desarrollo de maquinaria más pesada tras la Segunda Guerra Mundial hacía que los valores obtenidos a partir del Proctor normal subestimaran las densidades realmente conseguidas en obra. Así, la diferencia entre ambos procedimientos experimentales reside en la energía de compactación aplicada.

En concreto, el Proctor modificado tiene como objetivo determinar la máxima densidad seca y su humedad correspondiente, aplicando en este caso una energía de compactación normalizada de 2.632 J/cm^3 . Se realiza mediante la norma UNE 103501:1994 “Geotecnia. Ensayo de compactación. Proctor modificado”.

Al igual que en el caso del Proctor normal, se parte de una muestra de suelo seca a la que se le añade una cierta cantidad de agua y se amasa para obtener una humedad homogénea.

Posteriormente, se introduce una primera capa en el molde, de forma que su espesor tras la compactación sea $1/5$ de la altura del molde. A continuación, se compacta mediante 60 golpes de la maza repartidos equitativamente por toda la superficie. Este proceso de llenado y compactación se repite otras cuatro veces hasta llenar el molde por completo.

Por último, se calcula por pesada (y conociendo el volumen del molde) la densidad del material compactado, y la humedad del mismo recogiendo una muestra en la zona central del cilindro y sometiéndola a pesada en húmedo y tras desecación en estufa.

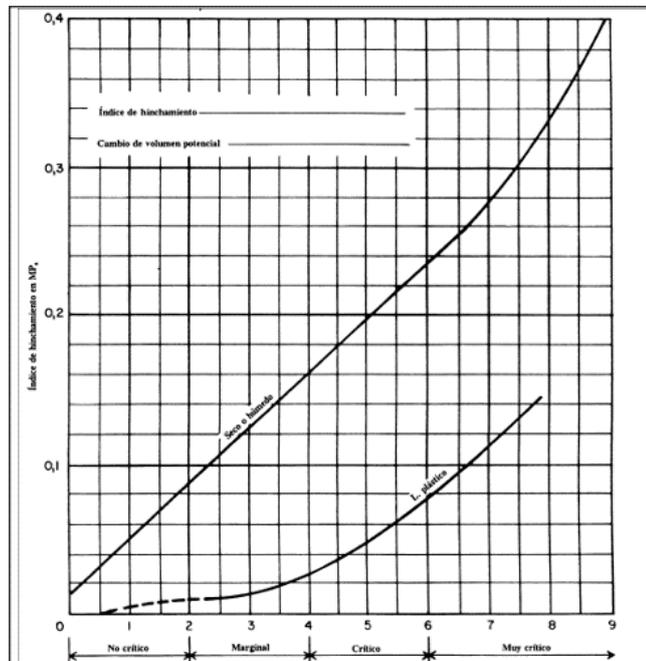
Ensayo de expansividad Lambe

En ensayo Lambe es un ensayo de laboratorio que permite obtener la presión de hinchamiento que presenta una probeta de suelo compactado en unas ciertas condiciones de humedad. Se realiza mediante la norma UNE 103 600:1996: Determinación de la expansividad de un suelo en el aparato de Lambe.

El ensayo contempla 3 posibles estados de humedad: la humedad correspondiente al límite líquido, la humedad resultante de mantener el suelo a una humedad relativa del 100 % durante 48 horas, denominado estado húmedo y por último, la humedad resultante de mantener el suelo a una humedad relativa del 50 % durante 48 horas, denominado estado seco.

Para la realización del ensayo es necesario cuartear y tamizar la muestra por un tamiz de 2,00 mm de luz de malla. Posteriormente, se aplica la humedad necesaria y se introduce en un molde realizando un número de capas y una compactación por capa variable para cada estado de humedad. El suelo compactado se introduce en el molde entre dos placas porosas y se instala en anillo dinamométrico para medir la fuerza de expansión del suelo. Por último, se añade agua hasta cubrir la célula, pasadas dos horas se comprueba la lectura del anillo dinamométrico.

Los resultados de este ensayo se expresan mediante dos cocientes, el índice de hinchamiento que corresponde a la presión ejercida por el suelo y se calcula dividiendo la fuerza registrada entre el área de la célula. Con el valor del índice de hinchamiento y las condiciones iniciales de humedad se entra en la gráfica 1, obteniéndose un valor de cambio de volumen potencial, que se expresa como no crítico, marginal, crítico y muy crítico.



Gráfica 1: grafica para el cálculo del cambio de volumen potencial de un suelo (eje de ordenadas) a partir del índice de expansividad del mismo en MPa (eje de abscisas).

Ensayo de rotura a compresión simple

El ensayo de rotura a compresión simple tiene como objetivo caracterizar el esfuerzo que es necesario aplicar al suelo para generar la rotura del mismo, así como de caracterizar e identificar los límites elástico y plástico de deformación. Este ensayo se realiza mediante la norma UNE 103400:1993: Geotecnia. Ensayo de rotura a compresión simple de probetas de suelo.

Para la realización de este ensayo se ha partido de una probeta resultante de ensayo Proctor, realizada con la humedad de compactación óptima para cada mezcla. Posteriormente, se dejó secar al aire a lo largo de un mes y se introdujo en la prensa.

La prensa (figura 6) aplica un esfuerzo de compresión uniaxial de tal forma que la velocidad de deformación sea constante hasta que se produzca la rotura del material ensayado. Como resultado se obtiene una gráfica de fuerza aplicada frente a desplazamiento de los platos de la prensa.

Para obtener el esfuerzo, se divide el área de la sección del molde por la fuerza aplicada por la prensa, obteniendo el valor de esfuerzo en KPa. Por último, para calcular los datos de deformación unitaria, se divide el acortamiento sufrido por la longitud inicial de la muestra.

De esta forma se puede representar una gráfica de esfuerzo-deformación unitaria y, a su vez, el módulo de Young. Este último, se define como la pendiente de la recta en la que un material se comporta sufriendo una deformación elástica, es decir, indica a partir de qué valor de esfuerzo la deformación sufrida es permanente.



Figura 6: Prensa para ensayos a compresión simple del laboratorio de materiales de la EUPLA.

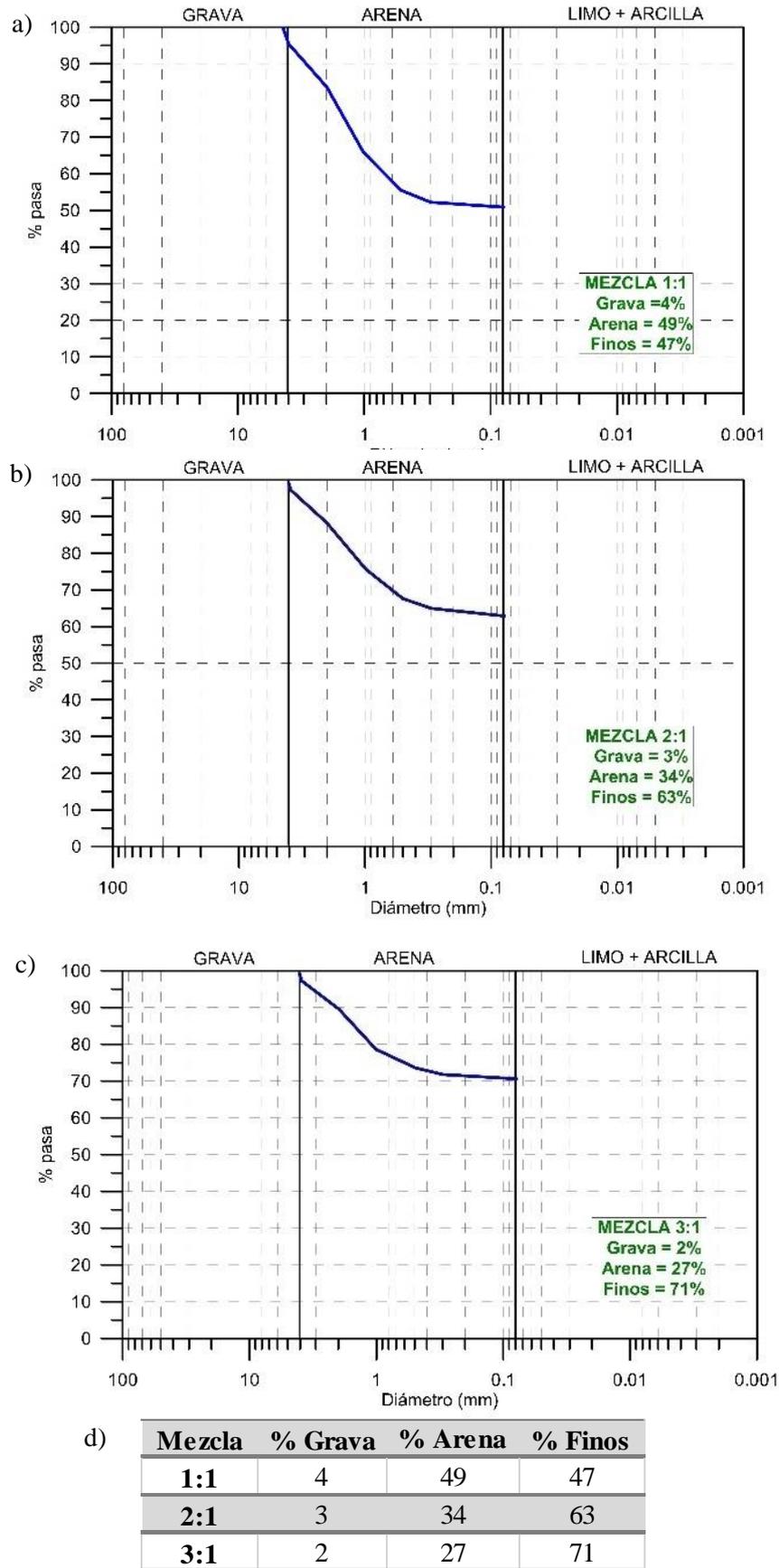


Figura 8: Graficas resultantes y tabla resumen de los ensayos granulométricos realizados para las diferentes mezclas. a) Mezcla 1:1, b) Mezcla 2:1, c) Mezcla 3:1, d) tabla resumen.

Límites de Atterberg

El material lutítico presenta los siguientes resultados, mostrados en la tabla 3, de límites de Atterberg obtenidos de la caracterización de materiales de la A-23 (Ministerio de Fomento, 2001).

Límite Líquido (LL)	31-59 %
Límite Plástico (LP)	17-37 %
Índice de plasticidad (IP)	12-25,5 %

Tabla 3: Datos de límites de Atterberg procedentes del tramo Paniza-Torrubia de la A-23 (Ministerio de Fomento, 2001).

También se han obtenido los siguientes datos a partir de ensayos de límites de Atterberg realizados para este trabajo (tabla 4), concretamente sobre la muestra de suelo empleada para las mezclas.

Límite Líquido (LL)	45 %
Límite plástico (LI)	33 %
Índice de plasticidad (IP)	12 %

Tabla 4: Resultados del ensayo de límites de Atterberg

Estos datos están representados en la figura 9, en la que se observa las clases de materiales, expuestos en el PG-3, en función de los límites de Atterberg; ésta no es una clasificación definitiva, puesto que hay que evaluar otras características del suelo.

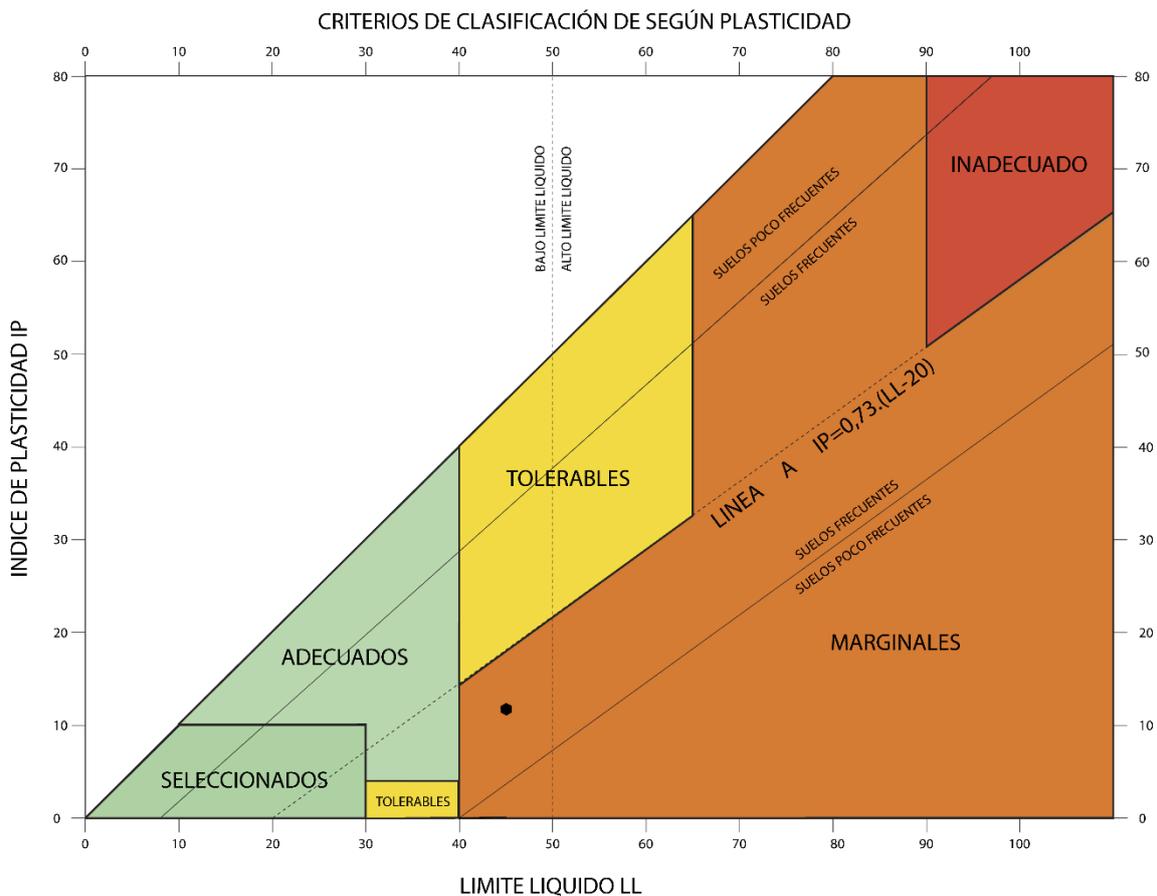


Figura 9: Gráfica de clasificación de suelos en función del índice de plasticidad y del límite líquido. El punto representa las lutitas obtenidas en el punto de muestreo mencionado con anterioridad.

Modificado de Parrilla Alcaide A. (2006).

Proctor y Proctor modificado

A continuación, se exponen los resultados de los ensayos Proctor realizados sobre el suelo (figura 10), el árido (figura 11) y las diferentes mezclas (tabla 5).

Proctor suelo:

El suelo presenta una alta plasticidad que hace complicada su compactación con el aumento de humedad. Al incrementar el contenido de humedad aumentaba de forma considerable la plasticidad, generando problemas a la hora de realizar el ensayo y de compactarlo.

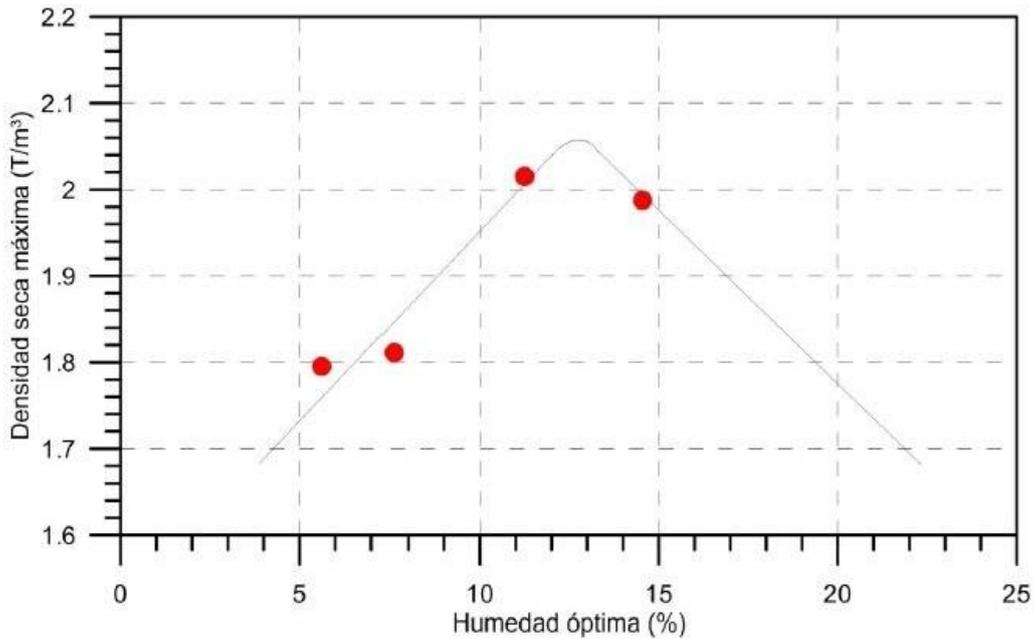


Figura 10: Gráfica de resultados del ensayo Proctor del suelo.

Proctor árido:

El árido no presenta la típica forma de campana con un máximo de densidad, esto se debe a que la absorción de agua es muy alta, lo que fluidifica la mezcla haciendo imposible su compactación (figura 11).

RCD (Proctor Normal)

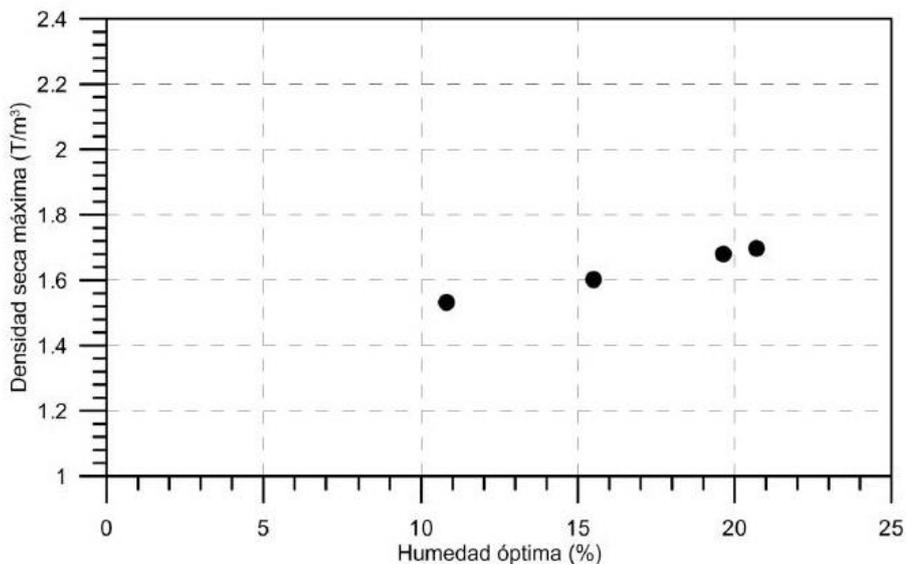


Figura 11: Gráfica de resultados del ensayo Proctor del árido.

Proctor mezclas:

En la figura 12 se puede observar que la mezcla 1:1 sufre un descenso de densidad respecto a la del suelo debido a la menor densidad del árido

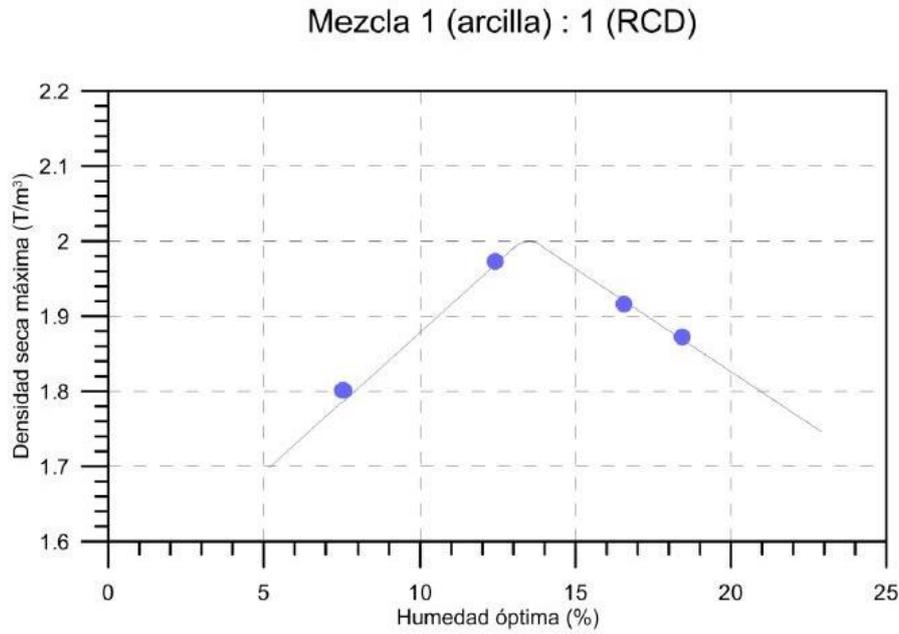


Figura 12: Gráfica de resultados del ensayo Proctor de la mezcla 1:1.

En la figura 13 se pueden observar los resultados del ensayo Proctor y Proctor modificado para la mezcla 2:1, los valores de densidad son mayores para el Proctor modificado debido a la mayor energía de compactación aplicada durante el ensayo.

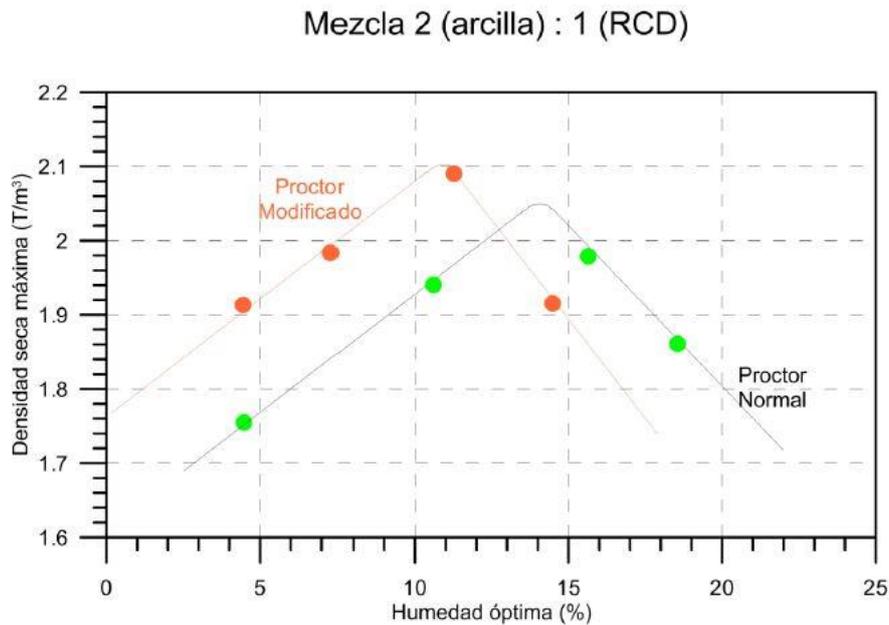


Figura 13: Gráfica de resultados del ensayo Proctor normal y Proctor modificado de la mezcla 2:1.

La figura 14 representa los resultados obtenidos en el ensayo de compactación Proctor para la mezcla 3:1.

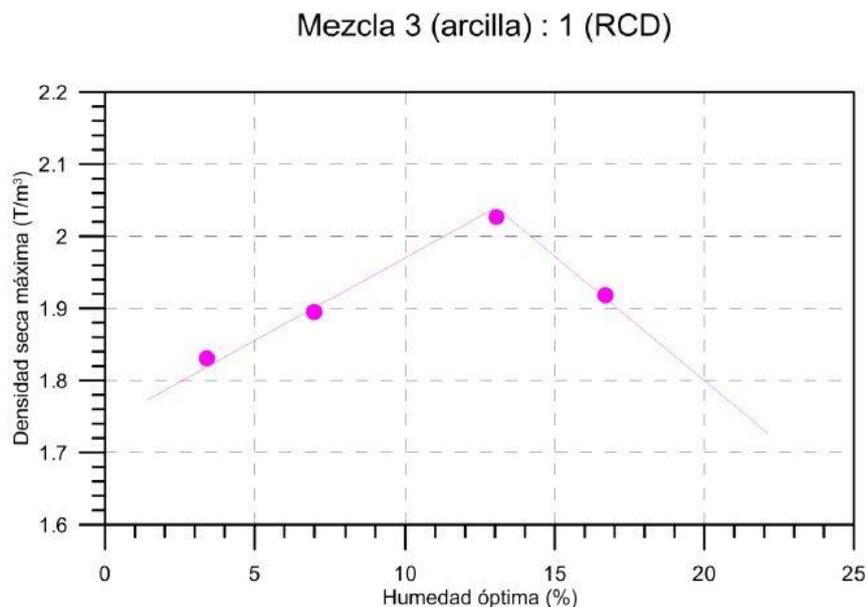


Figura 14: Grafica de resultados del ensayo Proctor normal de la mezcla 3:1.

En la tabla 5 se exponen los resultados de los ensayos Proctor realizados. En dicha tabla no se muestra el resultado del árido debido a los problemas de compactación descritos anteriormente. Si bien, el valor máximo de densidad obtenido es de 1,70 gr/cm³ para una humedad óptima del 20 %.

Mezcla	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima %
Suelo	2,06	13
Árido	---	---
1:1	2,00	14
2:1	2,06	14
2:1 *	2,10	11
3:1	2,04	13

*Resultado de Proctor modificado

Tabla 5: Resultados de los ensayos Proctor.

Ensayo de expansividad Lambe

Del ensayo de expansividad Lambe realizado para el suelo en estado húmedo, se obtiene una presión de hinchamiento de 0 MPa lo que, según la gráfica incluida en la norma (grafica 1), sería un cambio de volumen no crítico. Por ello, cabe concluir que el suelo no presenta expansividad.

Compresión simple

Los resultados de los ensayos a compresión simple se expresan en gráficas de fuerza-desplazamiento y no en una de esfuerzo-deformación unitaria, posteriormente se ha calculado el esfuerzo uniaxial y la resistencia pico de probeta antes de su rotura.

En la figura 15 se muestran las gráficas y resultantes de los ensayos de compresión simple realizados a las mezclas, así como una tabla resumen de los datos obtenidos.

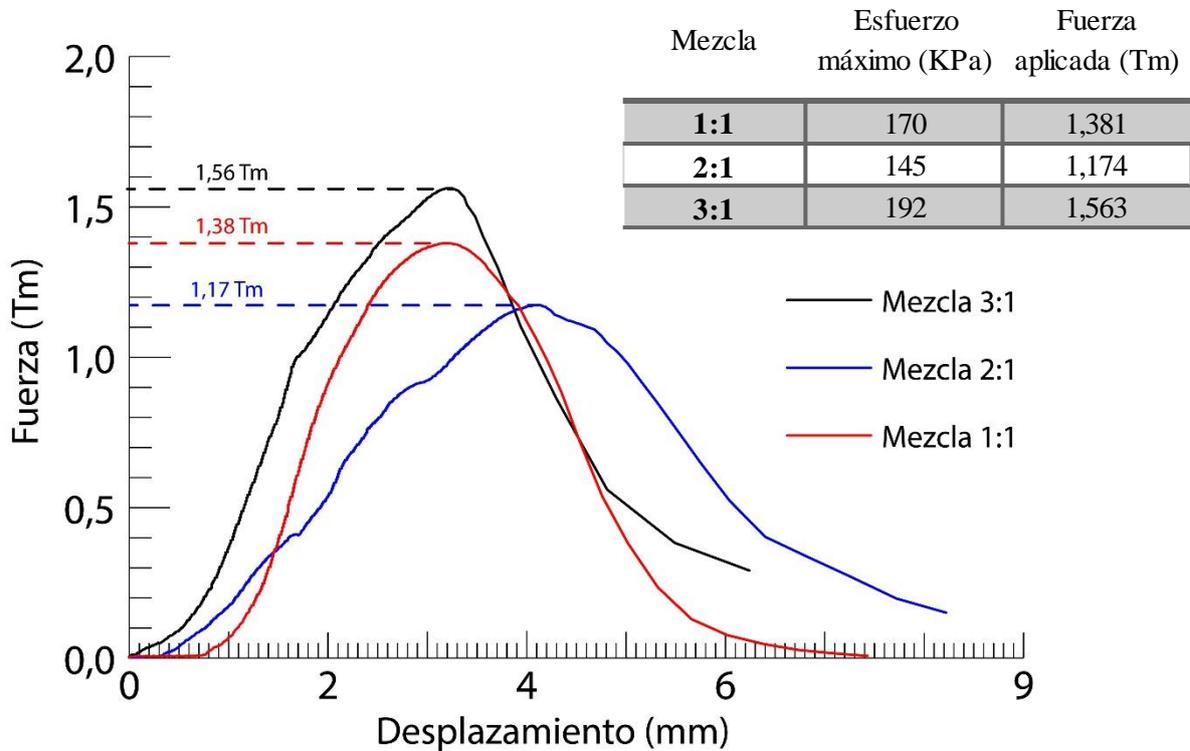


Figura 15: Resultados de los ensayos de compresión simple.

En la tabla 6 se expone la relación entre la densidad máxima obtenida en los ensayos Proctor y la resistencia a compresión de las mezclas.

Mezcla	Densidad (Kg/cm ³)	Resistencia a compresión (KPa)	Módulo de Young (KPa)	Límite Elástico (KPa)
Mezcla 1:1	2,00	170	15378	106
Mezcla 2:1	2,06	145	7318	110
Mezcla 3:1	2,04	192	12823	123

Tabla 6: Datos de densidad, resistencia a compresión, Módulo de Young y Límite elástico de las mezclas.

Estos resultados se han obtenido a través de las gráficas de compresión expuestas anteriormente, trazando una recta que indica el campo en el que el material se comporta de forma elástica; es decir, que al cesar la fuerza aplicada, el material recupera la deformación sufrida.

El límite elástico es el punto en el cual la curva del ensayo de compresión se separa de la recta trazada por el campo elástico. A partir de este punto el material sufre una deformación plástica, es decir, permanente.

Los datos también permiten calcular el módulo de Young, que informa de la relación entre esfuerzo-deformación unitaria dentro del campo de comportamiento elástico.

Cuanto más alto es el valor del módulo de Young mayor será la carga que puede soportar un material sin sufrir una deformación permanente, factor importante a la hora de determinar si un material es apto

para una cierta estructura y evitando así futuras deformaciones de la misma.

La recta de color rojo representada en las gráficas esfuerzo-deformación figura 16, figura 17 y figura 18, representan el campo elástico del material.

El punto en el que dicha recta se separa de la curva resultante del ensayo a compresión, se denomina límite elástico; es decir, el esfuerzo máximo que puede soportar el material sin sufrir una deformación permanente.

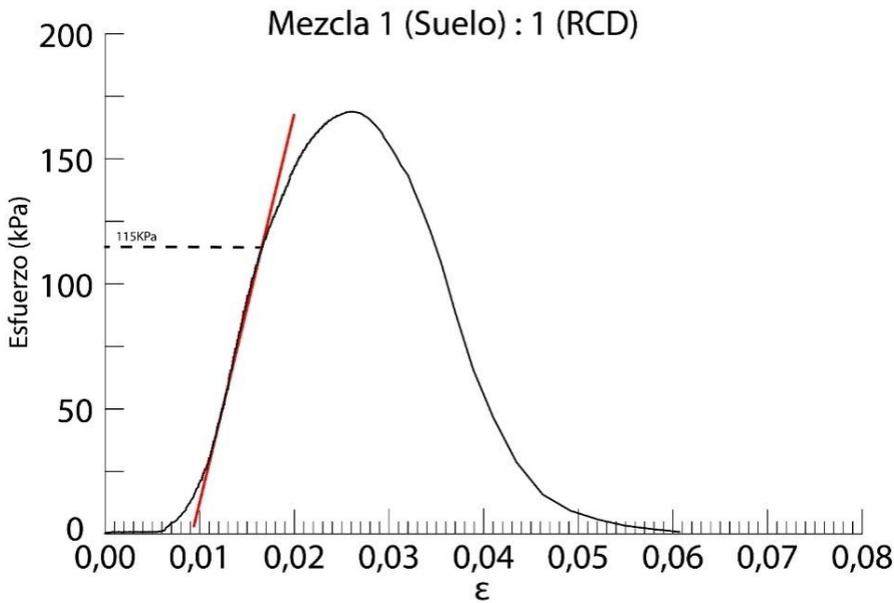


Figura 16: Gráfica esfuerzo-deformación de la muestra 1:1.

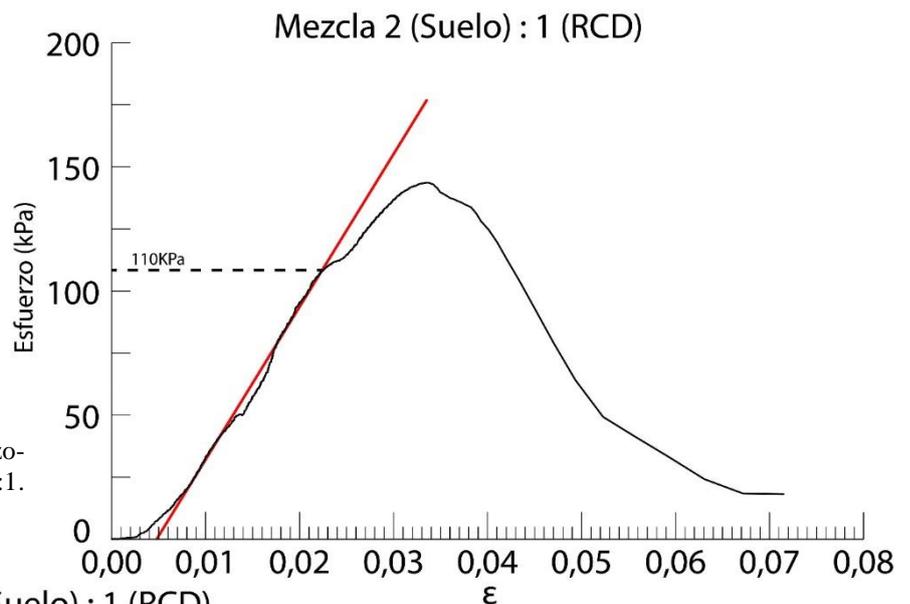


Figura 17: Gráfica esfuerzo-deformación de la muestra 2:1.

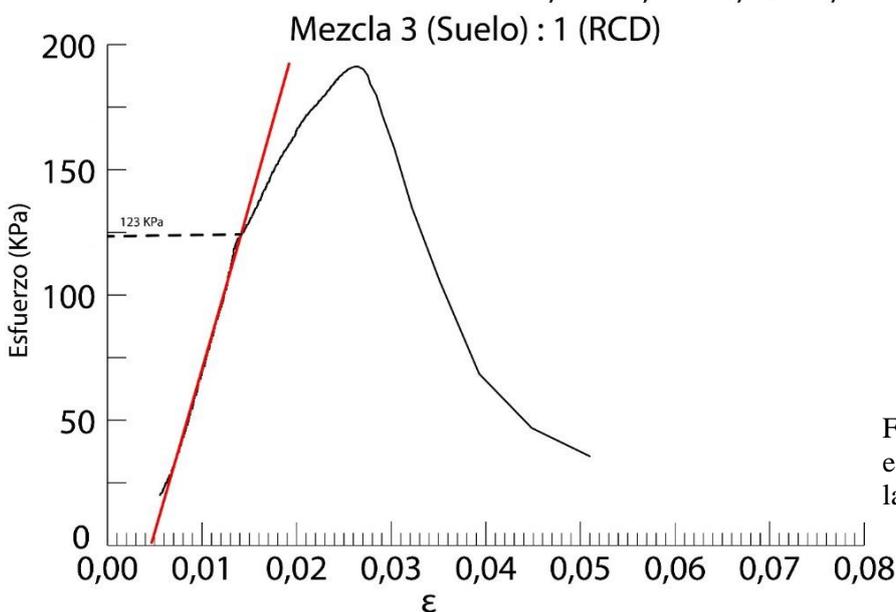


Figura 18: Gráfica esfuerzo-deformación de la muestra 3:1.

Discusión

El origen de la clasificación de este suelo como marginal se debe exclusivamente a la alta fracción arcillosa-limosa (entre el 60 y el 100 %) y a su relativamente alta plasticidad (45 % para el límite líquido y 12 % para el índice de plasticidad). Esto hace que un material sin grandes problemas geotécnicos, de cara a las condiciones de puesta en obra para su reutilización en obra civil, sea clasificado como un suelo marginal, principalmente, debido a la dificultad de realizar una compactación eficaz.

La principal problemática que presenta este suelo reside en su elevada plasticidad, lo que deriva en una mala trabajabilidad. Por otro lado se descarta el riesgo de expansividad, dado que el ensayo Lambe da una presión de hinchamiento de 0 MN.

La puesta en obra de materiales como los estudiados en este trabajo requiere un exhaustivo control, y especialmente, la compactación de materiales plásticos que requiere, salvo que se realicen tratamientos de mejora de suelos como los comentados en apartados anteriores, de una maquinaria especial (compactadora de “patas de cabra”).

Sin embargo, la mezcla del suelo plástico con un RCD, que en origen no tenía ningún uso, hace que la plasticidad y la trabajabilidad de la mezcla se mejoren notablemente, especialmente, esta última, abriendo la posibilidad de realizar la compactación con la maquinaria común. La compactación de las mezclas mediante ensayos Proctor no revela una gran mejora de la densidad, pero sí da datos muy importantes de su comportamiento y de su plasticidad, que sí revelan una notable mejora. En cualquier caso, los valores de densidad obtenidos en los ensayos de compactación en laboratorio son adecuados para su puesta en obra.

El origen de la mejora del suelo está causada por una mejor granulométrica del material y no por el posible aporte de cemento no fraguado de la mezcla procedente del RCD, ya que la cantidad es mínima y el efecto no será relevante. Si bien, la gran capacidad de absorción del árido podría reducir la cantidad de agua disponible en la mezcla, reduciendo la humedad de la fracción limosa-arcillosa y reduciendo así su plasticidad, lo que a su vez mejoraría la estabilidad de la mezcla en condiciones de humedad.

Desde un punto de vista mecánico, los valores obtenidos para el módulo de Young en cada una de las mezclas, muestran variaciones notables. Se obtiene una variación máxima del 110 %, sin embargo, esta variación no es tan acusada en el límite elástico, en la que la variación no supera el 12 %.

Estos datos sugieren que la mezcla 1:1 presenta un mejor comportamiento mecánico en función de su módulo de Young, aunque presenta un límite elástico más bajo. Lo que indica que la mezcla sufriría una menor deformación dentro del campo elástico pero se alcanzaría antes el campo de deformación plástica.

Por otro lado, la mezcla 3:1 presenta un módulo de Young más bajo en comparación con la muestra 1:1 por el contrario, muestra un límite elástico más alto. Lo que permitiría soportar una mayor carga sin sufrir una deformación permanente. La ligera menor densidad de estas mezclas (figura 12 y figura 14) no sería un factor crítico, ya que su diferencia es mínima (≈ 3 %) y resulta más importante la variación de la resistencia a compresión y el módulo de Young, ya que estos parámetros tienen una buena correlación con otros parámetros importantes como la resistencia al corte del material.

En resumen, la mezcla óptima debería de contemplar una buena trabajabilidad y una buena resistencia mecánica, además de resultar económicamente rentable. Por estos motivos, la muestra 3:1 se podría considerar la óptima para la mejora de este tipo suelo, aunque no presenta una mayor densidad (2,04 gr/cm³ para el Proctor normal) sí que presenta una resistencia a compresión y un módulo de Young altos (192 KPa y 12823 KPa, respectivamente) lo que según la tabla 7 correspondería con un suelo blando

(según el módulo de Young) o medio (según el valor de resistencia a compresión) (Ministerio de Vivienda, 2006).

Tabla D.23. Valores orientativos de N_{SPT} , resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad de suelos

Tipo de suelo	N_{SPT}	q_u (kN/m ²)	E (MN/m ²)
Suelos muy flojos o muy blandos	< 10	0 - 80	< 8
Suelos flojos o blandos	10 - 25	80 - 150	8 - 40
Suelos medios	25 - 50	150 - 300	40 - 100
Suelos compactos o duros	50 - Rechazo	300 - 500	100 - 500
Rocas blandas	Rechazo	500 - 5.000	500 - 8.000
Rocas duras	Rechazo	5.000 - 40.000	8.000 - 15.000
Rocas muy duras	Rechazo	> 40.000	>15.000

Tabla 7: Tabla D.23. del CTE que correlaciona el tipo de suelo con el número de golpes de SPT (N_{SPT}), el valor de resistencia a compresión (q_u) y el módulo de Young (E) (Ministerio de Vivienda, 2006).

También hay que tener en cuenta que para tratar un volumen grande de suelo sería necesario una gran cantidad de RCD y en este sentido, la mezcla 3:1 presenta una ventaja a la hora de su aplicación en un caso real, ya que el volumen de suelo tratado con una misma cantidad de RCD sería muy superior en comparación con las otras mezclas estudiadas.

En cualquier caso, la aplicación de estos métodos a un caso real necesitaría un exhaustivo control y caracterización del suelo, de los materiales y de las mezclas a realizar, para así determinar la dosificación correcta de RCD para cada tipo de suelo.

Conclusions

Marginal soils must be adequately characterized to determine if it is possible their use, because there are marginal soils that do not have geotechnical problems as expansiveness or collapsibility, but it is known to have problems in placing and requires specialized machinery.

The soil it is classified as marginal because it has a high content in silt-clay particles and also for the high plasticity, this characteristic it is shown in the Atterberg limits and in the Proctor test. The soil does not indicate evidences of expansiveness. For this reasons, the soil it is classified as marginal.

The data presented in this essay, confirm that the addition of the fine fraction of construction and demolition waste (CDW) in a correct ratio, gives to the silty soil a higher workability and also reduce the plasticity of the mixtures. The improvement of the technical characteristics of the soil is given by the improvement in the particle size of the mixture and not reactive oxides which came from the concrete.

The mixtures 3:1, made by three parts of soil and one parts of RCD, seems to be optimal for this type of soils because it does not show an increment in the density. However, this mix has a high workability and an average Young's modulus and also, the highest compression strength. For this reasons, it has the highest elastic limit, which are important to avoid deformations in the future use.

The use of CDW in the stabilization and improvement of marginal soil implicate a reduction in the waste generation of the concrete recycling plants and the associated environment improvement.

This improvement came from the reduction of the volume of waste material transported to landfills. Also we have to consider the higher quality materials removed to replace the marginal soil, which involves the extraction of borrow materials.

This process could make a considerable reduction of economic costs of the construction, reducing the costs of extraction, transport and replacement of the problematic soils. In conclusion, the use of CDW could reduce the cost and the duration of the construction sites where the marginal soils are involved, as long as the soil has the suitable characteristics to implement this technique.

Finally the advantages of this soil treatment are an improvement of the technical proprieties of marginal soils furthermore, makes unnecessary the use of special machinery during compaction. This kind of treatments could reduce the waste generation and the associated environmental advantages in the construction projects, whit the associated decrement in the extraction of good quality materials to fill the poor quality soil. At least, the soil treatments could reduce the economic cost of projects and also, make possible lessen the duration of projects.

Bibliografía

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.

IGN (2011): Serie cartográfica nacional a escala 1:25.000, hoja nº 411-1 (Muel), Madrid.

Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) (2011): *Guías Prácticas: Suelocemento in situ*. 15 p.

Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) (2013): *Guías Técnicas: Estabilización de suelos con cemento*. 12 p.

Jofré, C., Kraemer, C., Sampedro, A., López-Bachiller, M., Ateinsa, M., Díaz Minguela, J., Fernandez Cuenca, J., Garrido, L., Navarro, J., Rueda, R., Salas, M., Segura, P., Sierra, M. Vera, M. (2008): *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Madrid, 216 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.

Ministerio de Fomento (2001): Proyecto de construcción autovía de Levante a Francia por Aragón. N-330. Tramo: Paniza-Torrubia.

Ministerio de Vivienda (2006): Código Técnico de Edificación. Documento básico seguridad estructural-cimientos.

Parrilla Alcaide, A. (2006): *Materiales marginales en el PG-3*. Dirección General de Carreteras – Ministerio de Fomento. 29p.

Proyecto GEAR (2011): *Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD)*. 292 p.

Salesa Bordonaba, A. 2014. *Propiedades físico-mecánicas del hormigón tras dos ciclos de reciclado*. Tesis Doctoral, Univ. Alfonso X El Sabio, 438p.

Normas:

UNE 103101:1995: *Análisis granulométrico de suelos por tamizado*.

UNE 103103:1994: *Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande*.

UNE 103104:1993: *Determinación del límite plástico de un suelo*.

UNE 103400:1993: *Geotecnia. Ensayo de rotura a compresión simple de probetas de suelo*.

UNE 103500:1994: *Geotecnia. Ensayo de compactación. Proctor normal*.

UNE 103501:1994: *Geotecnia. Ensayo de compactación. Proctor modificado*.

UNE 103 600:1996: *Determinación de la expansividad de un suelo en el aparato de Lambe*.

UNE-EN 933-1:2012: *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado*.