COMPORTAMENTO MECÁNICO DE TIERRAS CARBONATADAS PARA CONTRUCCIÓN CON TIERRA

Àngels Castellarnau Visús[1]; María Alegre Esteve [2]

Edra Arquitectura Km0,
[1]angels@edraculturaynatura.com, [2]maria@edraculturaynatura.com

Palabras clave: material carbonatado, comportamiento mecánico, azul de metileno

Resumen

El uso de los materiales carbonatados en construcción en tierra debe estudiarse específicamente, ya que, pese a que la caracterización física del material revele resultados óptimos para su uso, su determinación química influye directamente sobre el comportamiento mecánico que vaya a ofrecer el material, así como su evolución ante las distintas estabilizaciones que puedan darse. Se realiza un análisis comparativo de tres tierras con granulometrías muy parecidas y arcillas similares, es decir, la estructura y el material cohesivo que la sostiene son comparables, sin embargo, el contenido en carbonatos de cada una de las muestras es diferente (87%, 32% y 16%). A las tres tierras seleccionadas para el estudio se les ha realizado una caracterización física, química y mecánica. En la caracterización física se realizan ensayos para conocer la granulometría y consistencia del material (granulometría y límites de Atterberg), en la determinación química principalmente son destacables los ensayos de contenido en carbonatos y azul de metileno, finalmente la determinación mecánica se consigue mediante el ensayo de resistencia a compresión simple.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Arquitectura de tierra

La arquitectura en tierra se ha realizado desde las primeras manifestaciones constructivas del hombre, sin embargo, durante la primera década del siglo XXI ha resurgido en todo el mundo como un material con propiedades sostenibles, de bajo impacto ambiental y de gran capacidad expresiva (Bestraten et al., 2011).

En España ha existido tradicionalmente una profunda tradición de construcción en tierra distribuyéndose por toda su geografía y abarcando por tanto la mayoría de suelos peninsulares. Las técnicas constructivas tradicionalmente se han adaptado a las peculiaridades de cada zona y de cada suelo por lo que la potencialidad de la reintroducción de la construcción en tierra en España se estima enorme. A pesar de ello para la aplicación en la actualidad de las técnicas de construcción en tierra se hace necesario el estudio en profundidad de los suelos de cada zona para adaptarlos a su uso en construcción, teniendo en cuenta su ubicación, composición física y química y comportamiento mecánico.

Tradicionalmente el manejo de los suelos para construcción en la península se ha realizado mediante el traspaso del conocimiento orgánico del recurso. Hoy en día esta trasmisión de conocimiento se ha perdido en la mayoría de los casos y la necesidad del cumplimiento de la regulación normativa que atañe a la construcción obliga a la caracterización y parametrización del comportamiento del material.

Es por ello que en cada zona y en cada suelo se hace preciso un estudio en profundidad de las características fisicoquímicas del suelo y su formulación precisa para su uso en construcción y en cumplimiento de la normativa vigente.

La arquitectura de tierra en la Península Ibérica y concretamente en el noreste peninsular ocupa un lugar representativo en el patrimonio arquitectónico tradicional que se encuentra disperso en todo su territorio (Dipasquale et al., 2011), es por ello que es de especial interés el estudio de las tierras empeladas para construcción en lugares con larga tradición de

arquitectura en tierra. Se seleccionan para el presente estudio tres ubicaciones en las que la tradición avala la construcción en tierra como lo refleja su cuantioso patrimonio construido en diferentes técnicas.

En toda la zona de pre pirenaica, de la cual proviene la muestra de Abiego, el uso de la tierra en construcción es universal en combinación con la mampostería de piedra arenisca. En este territorio se observa tanto construcción de muros de carga de adobe como de tapia. Así mismo el territorio monegrino más próximo al valle del Ebro, del cual es la muestra de la Cartuja, es un territorio donde la construcción tradicional en tierra ocupa también una posición principal. En concreto el inmenso edificio de la Cartuja de las Fuentes fue levantado en muros de tapia en el siglo XVIII con la tierra del propio lugar (Burriel, 1979).

Finalmente, Palma de Mallorca es una ciudad cuyo casco histórico está compuesto por numerosos edificios monumentales y tradicionales, así como innumerables edificios diseminados por la isla.

Este estudio se centra en la influencia del contenido de carbonatos en suelos para su utilización como material de construcción de edificaciones de arquitectura en tierra. En concreto en el estudio comparativo de tres tipos de suelos con granulometrías aparentemente aptas, superficies específicas similares y contenidos de carbonatos dispares.

1.2 Importancia de los carbonatos en las tierras para construcción

El contenido en carbonatos de la Península Ibérica puede variar mucho dependiendo de su procedencia (Lamas, 2003), tal y como puede observarse también en el contenido en carbonatos de cada una de las muestras escogidas.

Pese a que se han publicado bastantes trabajos sobre los materiales carbonatados, en general, adolecen de informaciones poco detalladas sobre la influencia de la fricción de los carbonatos en el comportamiento mecánico de los suelos (Airey; Fahey, 1991).

Las clasificación existentes en la actualidad para para el comportamiento mecánicos de los suelos son de uso generalizado y no tienen en cuenta cuestiones tan importantes en lo suelos calcáreos como el índice de vacío intrapartícula, la susceptibilidad de aplastamiento o la naturaleza de la cementación calcárea, las cuales pueden alterar los resultados de los ensayos fundamentales para la clasificación como son los límites de Atterberg y las curvas granulométricas (Nacci et al., 1974; Datta et al., 1981). A demás Georgiannou et al. (1991) apuntan que las propiedades de estos suelos no solo dependen de la composición en carbonatos, sino que también varían con la cantidad, forma de agregación y tipo de carbonatos que exista en la mezcla, junto con los minerales de la arcilla presentes.

A parte de las características citadas anteriormente también es importante exponer la importancia del contenido en agua de este tipo de suelos ya que de forma generalizada solo se mide el contenido interpartícula y no el intrapartícula (tan presente en este tipo de materiales) asociada directamente al comportamiento mecánico de las muestras (Haberfiel; Jhonstton, 1990).

Dada la amplitud del tema este estudio se centra concretamente en el contenido de los carbonatos y su potencial estabilización para la construcción en tierra.

1.3 CIC y superficie específica de las arcillas

La arcilla es el producto de la erosión del feldespato y otros minerales, dependiendo de la composición del feldespato se obtendrán un tipo distintos de arcilla. Los minerales de la arcilla tienen usualmente una estructura laminar hexagonal y cristalina. Las láminas están constituidas por diferentes capas que usualmente se forman alrededor de un núcleo de silicio o aluminio, las capas de silicio tienen la carga negativa y por tanto mayor capacidad aglutinante (Minke, 2005).

La caolinita tiene dos láminas formadas por pocas capas de silicio por lo tanto tiene una capacidad aglutinante baja, por el contrario, la montmorillonita tiene tres capas con abundantes capas de silicio y tiene una capacidad aglutinante muy alta (Minke, 2005).

La mayoría de los minerales de la arcilla tienen cationes intercambiables. La capacidad aglutinante y la resistencia compresión de la tierra dependen de la capacidad aglutinante y de la cantidad de cationes (Minke, 2005).

Por otro lado, la superficie específica de un suelo es formada por la suma de la superficie de todas sus partículas, siendo los minerales de la arcilla los que mayor superficie tienen, a mayor superficie específica de la arcilla mayor serán las fuerzas internas de adhesión que resultan importantes para la capacidad aglutinante y la resistencia a la compresión y tensión (Minke, 2005).

1.4 Breve descripción de los procesos de carbonatación, des carbonatación y la presencia de carbonatos en los suelos de la península ibérica.

Según Moreno et al (2011) los minerales carbonatados son aquellos formados por el radical $(CO_3)^{-2}$ presentándose en la corteza terrestre de muchos modos debido principalmente a la asociación con otros minerales para dar lugar a rocas (calcitas, dolomitas y aragonito, entre otras).

La característica más importante entre los carbonatos es la de formar mezclas isomorfas, con sustituciones de los cationes Mg^{+2}, Zn^{+2}, Fe^{+2} y Mn^{+2} entre otros. Su presencia en la península ibérica es un factor a tener en cuenta en el desarrollo de los perfiles de suelos aplicables para construcción.

La calcita ($CaCO_3$) cuyo nombre proviene del latín *calx* y que significa cal viva, es un carbonato de calcio. Es muy estable y presenta una variedad enorme de formas y colores, aunque el blanco vítreo es el más común. Esa variedad de colores es debido principalmente a las impurezas de iones metálicos asociados, puesto que suele aparecer asociado a otros minerales en función del contexto geológico.

La dolomita es un mineral cuyo nombre se debe al mineralogista francés Dolomieu (1750-1801) que fue quien en los Alpes franceses descubrió y anotó la no efervescencia en HCl en frio de una roca calcárea. Como mineral carbonatado, la dolomita es un carbonato de calcio y magnesio [$Ca\ Mg\ (CO_3)_2$], que se forma por la sustitución e intercambio iónico de un catión Ca^{2+} por otro catión Mg^{2+} en los carbonatos cálcicos. Suele asociarse a calcita, cuarzo y minerales de arcilla y en este sentido es complicada de identificar.

El aragonito, es una de las formas cristalinas en las que se puede presentar el carbonato de calcio ($CaCO_3$). Puede encontrarse en forma de estalactitas y también en la concha de casi todos los moluscos, así como en los corales.

El par aragonito/calcita fue el primer caso de polimorfismo mineral reconocido; ambos tienen idéntica composición química, pero diferente estructura cristalina. Debido a esta diferencia en la estructura, el aragonito es la forma del $CaCO_3$, más soluble en el agua e inestable a temperatura y presión ambiente). Asociado principalmente a calcita, dolomita, yeso, celestina, cuarzo y minerales de arcilla, depende de dicha asociación el contexto geológico del yacimiento, siendo los procesos de formación muy variados (Rebollar; Rewitzer, 2022).

Calcita, dolomita y aragonito, están muy presentes en la península ibérica, son minerales característicos de las fracciones limosas y arcillosas de los suelos jóvenes; principalmente en regiones áridas donde el déficit de agua impide su disolución y lavado hacia capas profundas. En estas condiciones de ambientes áridos y xéricos frecuentemente se desarrollan horizontes cálcicos ricos en calcita.

Los procesos de carbonatación/des carbonatación (figura 1) son el resultado de la insolubilidad de los carbonatos en contraste con la solubilidad de los bicarbonatos. El agua del suelo está cargada de CO_2 y puede disolver los carbonatos pasándolos a bicarbonatos

que pueden profundizar en el suelo y en consecuencia precipitar produciendo acumulaciones de carbonatos, generalmente constituidos por calcita.

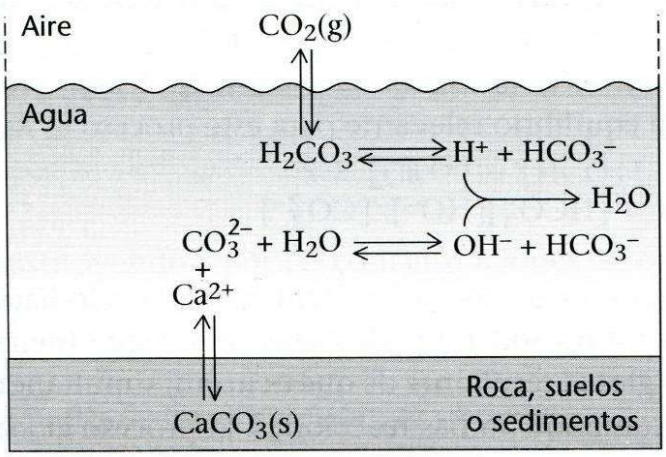

Figura 1. Procesos de carbonatación/descarbonatación (Baird, 2001).

La translocación de carbonatos está gobernada por el balance de reacción entre carbonatos (insolubles) y bicarbonatos (solubles) de acuerdo con la ecuación 1:

$$CaCO_{3(s)} + CO_{2(g)} + H_20_{(l)} \leftrightarrow Ca^{2+}{}_{(ac)} + 2HCO_3^-{}_{(ac)} \quad (1)$$

La enorme importancia de la concentración de agua en el comportamiento de los carbonatos en el suelo se deduce de la ecuación anterior. De este balance dependerá la incidencia del agua en las futuras mezclas de tierra para la construcción.

Un aumento de agua producirá un desplazamiento del equilibrio hacia la derecha, con la consiguiente disolución de los carbonatos, mientras que una disminución producirá la correspondiente precipitación e inmovilización de los carbonatos.

- incorporación de agua → disolución de los carbonatos
- disminución de agua → precipitación de los carbonatos

Así mismo, los cambios en el pH afectarán al sistema ya que al aumentar el contenido de CO_2 en agua también aumentará proporcionalmente la acidez y la disolución de los carbonatos tendrá lugar. Lo contrario ocurrirá si aumenta la alcalinidad.

- aumento del pH → precipitación de los carbonatos
- disminución del pH → disolución de los carbonatos

Estos efectos habrán de tenerse en cuenta para posibles estabilizaciones de los suelos de arcillas poco activas dado que la adición de estabilizantes como la cal o el cemento modifican el pH de la muestra siendo este factor un "facilitador" de la estabilización.

Por otra parte, la cal hidráulica natural está compuesta por una parte de $Ca(OH)_2$ (hidróxido cálcico) que carbonata en presencia de CO_2. Su hidraulicidad se debe a que está compuesta por silicatos cálcicos y aluminatos cálcicos que, al hidratarse, forman sustancias insolubles y muy estables químicamente (silicatos cálcicos hidratados, aluminatos cálcicos hidratados y silicoaluminatos cálcicos hidratados).

2 OBJETIVO

El objetivo general de este trabajo es comparar la influencia de los carbonatos en la resistencia mecánica de tierras mediante el análisis de tres tierras con granulometrías aptas para construcción con distinto contenido en carbonatos.

4 ESTRATEGIA METODOLÓGICA

Las tierras han sido ensayadas para su caracterización física, química y mecánica a los efectos de la presente investigación según las siguientes normas:

3.1 Caracterización física

Las tierras comparadas son la muestra 1 que se corresponde con tierra de Palma de Mallorca (Islas Baleares), muestra 2 que proviene de Abiego (Huesca, Aragón) y muestra 3 que pertenece a tierra de La Cartuja (Huesca, Aragón).

Para conocer las características físicas del material se llevan a cabo los siguientes ensayos:

- Granulometría: Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado según la norma UNE-EN 933-1 (2012).
- Sedimentometría: Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro según la norma UNE 103102 (1995).
- Límites de Atterberg: Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 12: Determinación del límite líquido y del límite plástico según la norma UNE-EN ISO 17892-12:2019/A1 (2022).

3.2 Caracterización química

La determinación química del material se ha realizado mediante los siguientes ensayos:

- Contenido en carbonatos: Determinación del contenido de carbonatos de un suelo según UNE 103200 (2021).
- Azul de metileno: Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 9: Evaluación de los finos. Ensayo de azul de metileno según la norma UNE-EN 933-9:2010+A1 (2013).

3.3 Comportamiento mecánico

Para conocer el comportamiento mecánico del material, se sometió al ensayo de compresión simple según la norma UNE-EN ISO 17892-7 (2019).

3.4 Elección y comparación de tierras

Se ha procedido a realizar una comparación de tres muestras procedentes de zonas con una larga tradición de construcción en tierra. Las muestras analizadas han sido reformuladas para conseguir granulometrías similares, además también han sido escogidas dadas sus características tan parecidas de los finos (parte activa) que contienen.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de las muestras

Se seleccionan tres muestras de tierras cuya granulometría entra dentro de los parámetros que tipifican tierras aptas para la construcción en tapia del gráfico de CRAterre. Así mismo la superficie específica de la fracción fina de las tres tierras obtenida mediante el ensayo del azul de metileno es muy baja. Todas se encuentran en un rango de 3 a 5 m^2/g. Esto delata que en los tres casos las arcillas son poco activas y por tanto su índice de plasticidad es muy bajo.

El criterio aplicado para la selección de las tierras ha consistido en comparar tierras conocidas tras realizar una reformulación granulométrica (figura 2) según el ábaco de CRAterre (Doat et al, 1983), y que tuviesen disparidad en los contenidos de carbonatos y similitud en la superficie específica.

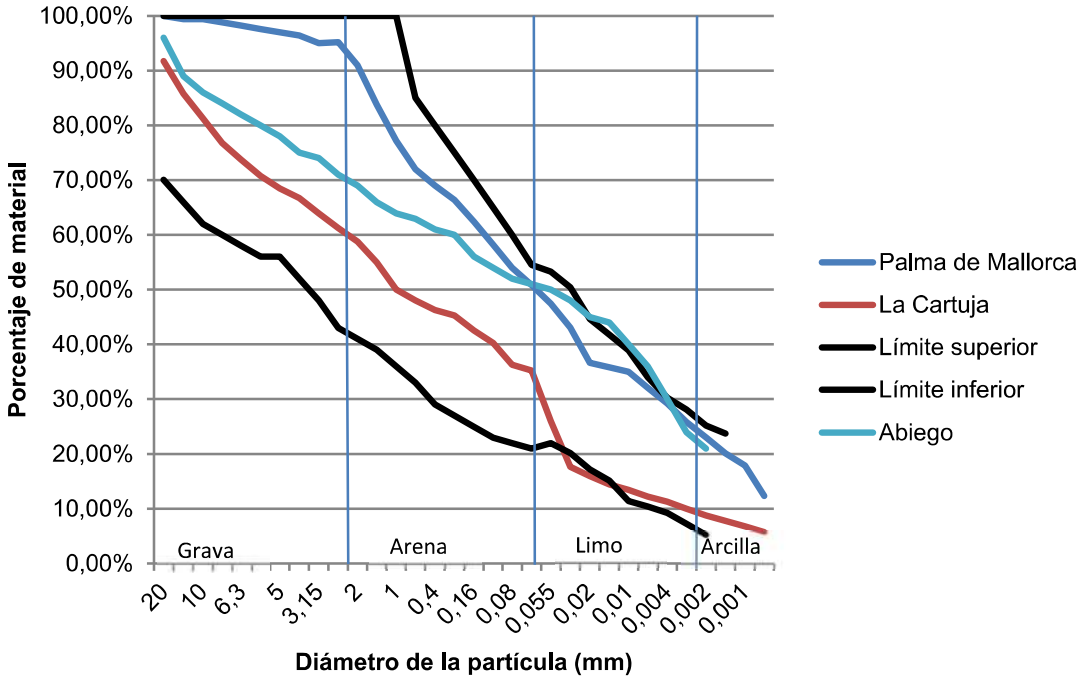

Figura 2. Muestras reformuladas granulométricamente según el ábaco de Doat et al. (1983)

Según las curvas granulométricas de las tierras reformuladas mostradas en la figura 4, la composición aproximada de las muestras sería (tabla 1):

Tabla 1. Composición aproximada de las muestras estudiadas

Muestra		grava >2,0mm	arena 0,006 a 2 mm	limo 0,002 a 0,006mm	arcilla < 0,002 mm
1	Palma de Mallorca	5%	50%	10%	25%
2	Abriego	30%	25%	15%	25%
3	La Cartuja	40%	45%	5%	10%

La actividad de las partículas arcillosas (parte que actúa como conglomerante) va a depender de su capacidad de intercambio catiónico (CIC), la cual está asociada con la superficie específica de la partícula, de esta manera, cuanta más superficie específica más CIC tiene la partícula y mayor plasticidad le ofrece a la muestra (Santamirna et al., 2002). La caracterización de estas capacidades se realiza mediante el ensayo de azul de metileno (figura 3) y de los límites de Atterberg.

Figura 3. Ensayo de azul de metileno

La primera muestra proviene de Palma de Mallorca (Islas Baleares) es una tierra originalmente (sin reformular) con mucha cantidad de material fino (un 70%); de este material fino la proporción de arcillas es un 20%. Esta muestra presenta un alto contenido en carbonatos (87%) y capacidad nula de hinchamiento y plasticidad.

La segunda muestra se ubica en Abiego (provincia de Huesca, zona de Guara) es un material que está constituido únicamente por partículas finas (por debajo de 0,02 mm), embargo de las cuales el 89,3% corresponde a arcillas. El porcentaje de carbonatos que presenta esta muestra es bastante bajo (16,1%).

Finalmente, la tercera muestra pertenece a La Cartuja (provincia de Huesca, zona de Monegros), en este caso la muestra presenta variabilidad granulométrica; en concreto un 35% de finos de los cuales un 8,75% son arcillas. Esta muestra presenta un contenido en carbonatos considerable (32%), en lo que respecta a su plasticidad los límites de Atterberg revelan resultados muy bajos.

Se reformulan granulométricamente las tierras para corregir su estructura. Al realizar las pruebas mecánicas (ensayo de compresión simple) se observa que los resultados son demasiado bajos en las tres muestras para su uso en construcción sin estabilizar, no llega a 1 MPa en ningún caso.

El análisis comparativo de las tres muestras delata distintos comportamientos.

Pese a que granulométricamente las tierras sean adecuadas, la composición de sus partículas de tamaño arcilla (parte activa de la muestra que actúa como conglomerante) afecta directamente al correcto comportamiento mecánico de ésta. Se realiza el ensayo de azul de metileno con el fin de caracterizar la superficie específica de las arcillas de cada muestra (a menos superficie específica, menor capacidad de intercambio catiónico y menos actividad), en este caso los resultados obtenidos son muy bajos (tabla 2).

Tabla 2. Superficie específica e índice de plasticidad de las arcillas de las muestras analizadas

Muestra		Carbonatos (%)	Superficie específica (m^2/g)	Índice de plasticidad (%)
1	Palma de Mallorca	87	4,96	0
2	Abiego	16	3,78	22
3	La Cartuja	32	4,28	8

Dado que las tierras cuyas arcillas cuentan con una superficie específica muy baja y cuentan con poca actividad será preciso estabilizarlas para conseguir resistencias mecánicas suficientes para su puesta en obra en construcción.

Cabe recordar que las tres tierras proceden de zonas donde es tradicional la construcción en tierra por lo que en su uso en la arquitectura tradicional bien se ha procedido a su estabilización, bien se ha corregido esta baja capacidad resistente por el diseño de estrategias de refuerzo estructural. El presente estudio no se adentra en estas estrategias de refuerzo estructural.

Las muestras sin estabilizar se rompen a compresión simple a 7 días se observa una mejor resistencia mecánica a compresión de las tierras con mayor contenido en carbonatos. Se deduce que la baja resistencia mecánica general se debe a la poca actividad de las arcillas y su bajo índice de plasticidad, pero no únicamente. Se estima precisa una investigación más profunda de los posibles efectos no solo de la cantidad de carbonatos sino de su agregación y del tipo de carbonatos y su solubilidad.

Las pruebas de compresión simple una vez estabilizadas las muestras constan de tres fases: rotura a 7, 28 días y 60 días, teniendo en cuenta que cuánto más tiempo de curado y fraguado más resistencia ofrecen las probetas a su rotura.

Se plantean estabilizaciones con cal hidráulica NHL 3.5 (Tigre) y con cemento blanco en distintas dosificaciones (tabla 2). Dado el alto contenido en carbonatos de la muestra 1 (Palma de Mallorca) se plantean tres estabilizaciones:

- Muestra 1.1: 10% de cemento
- Muestra 1.2: 8% de cemento y 2% de cal hidráulica
- Muestra 1.3: 5% de cemento y 5% de cal hidráulica
- Muestra 1.4: 10% de cal hidráulica

La muestra procedente de Abiego (muestra 2) con menor contenido en carbonatos se estabiliza con un 8% de cal y para la muestra estabilizada en la Cartuja se proponen dos estabilizaciones:

- Muestra 3.1: 10% de cal hidráulica
- Muestra 3.2: 8% de cemento y 2% de cal hidráulica

Los resultados obtenidos en las tres muestras son presentados en la tabla 3.

Tabla 3. Resultado de resistencia a compresión simple de las muestras con sus distintas estabilizaciones y sin estabilizar

Muestra	Estabilización		Carbonatos (%)	Sup. Esp. (m^2/g)	Resistencia a compresión (MPa)			
	Cemento	Cal			Sin estabilizar	7 días	28 días	60 días
1.1	10	0	87	4,96	0,7	2,6	3,6	4,3
1.2	8	2				3,1	3,7	4,1
1.3	5	5				2,6	2,9	4,1
1.4	0	10				1,0	2,1	3,9
2	0	8	16	3,78	0,5	0,8	1,8	2,1
3.1	0	10	32	4,28	0,2	0,4	1,4	1,5
3.2	8	2				1,1	1,7	1,9

La resistencia a siete días de las mezclas estabilizadas con cal, como es de esperar, no tiene una mejora sustancial mientras que a los 28 y 60 días se observan mejoras considerables. El fundamento de los tratamientos mixtos con cal y cemento usado en suelos fino reside en las consideraciones de que la cal flocula las partículas arcillosas, formando gránulos con una superficie más reducida, lo que permite obtener luego un mejor resultado de las propiedades aglomerantes del cemento (IECA, 2008).

La estabilización química de cal y cemento ofrece resultados muy distintos en las muestras, en la tierra de Palma de Mallorca (mayor contenido en carbonatos) la estabilización aporta resultados más altos de resistencia. Las otras dos muestras que poseen un contenido mucho menor en carbonatos obtienen resultados mucho más bajos.

6 CONCLUSIONES

Se han estudiado tres tierras con características físicas similares, similar superficie específica de sus arcillas y, pero distinto índice de plasticidad y contenido en carbonatos. Se han ensayado su resistencia tanto estabilizadas como sin estabilizar. De los resultados de estos ensayos se deduce que existe una relación entre la resistencia y la superficie específica de las arcillas (mayor o menor capacidad de intercambio catiónico) y que el contenido en carbonatos influye en la estabilización.

Pese a que con las muestras ensayadas no puede afirmarse que los carbonatos afecten a la resistencia de las muestras si puede observarse que el mayor contenido de éstos en las muestras beneficia la correcta actuación de la estabilización química (cal y cemento).

Se observa que la estabilización mixta (cal-cemento) es apta para la estabilización de suelos con arcillas poco activas, dado que ambos aditivos tienen funciones distintas que se complementan. Por una parte, la cal produce una reacción rápida de intercambio de iones entre la arcilla y la cal, floculación de las partículas de arcilla, y reducción de la cantidad de agua adsorbida. En una segunda etapa, la cal produce una reacción puzolánica de cementación que da lugar a silicatos y aluminatos lo cual supone un aumento de la resistencia de la mezcla a largo plazo (Castelló, 2003).

Por otro lado, la interacción cemento-arcilla también tiene una primera fase de hidratación del cemento en la que se aumenta el pH del agua intersticial y se libera cal (Herzog; Mitchell, 1963), y en una segunda fase la arcilla dadas las condiciones previas forma material cementante secundario (Sánchez, 2014).

Se requiere una de una investigación más profunda de la incidencia de los carbonatos en tierras con arcillas poco activas en relación con las posibles estabilizaciones en cuánto a su formulación química para conseguir las resistencias mecánicas adecuadas en su uso en construcción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Airey, D. W.; Fahey, M. (1991). Cyclic response of calcareous soil from the North-West Shelf of Australia. Geotechnique, 41(1), 101-121.

Baird, C (2001). Química ambiental. Editorial Reverté. University of Western Ontario.

Bestraten, S.; Hormías, E.; Altemir, A. (2011). Construcción con tierra en el siglo XXI. Informes De La Construcción, 63(523), 5–20.

Burriel, G. J. A. (1979). Arquitectura popular de Aragón. Librería General.

Castelló, J. D. B. (2003). Estabilización de suelos con cal. Madrid: Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Datta M.; Rao G.V.; Gulhati S.K. (1981); The nature of carbonate material in marine carbonate soils. First Indian National Conference on Ocean Engineering Madras, 1981; 240-249.

Dipasquale, L.; Mecca, S.; Coreia, M.: Mileto, C. (2011). Terra Europae. Earthen Architecture in European Union. Pisa: Edizioni ETS. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/310448480_TERRA_EUROPAE_Earthen_Architecture_in_the_European_Union

Doat, P.; Hays, A.; Houben, H.; Matuk, S.; Vitoux, F. (1983). Construire en terre. Paris: CRAterre Syros/ editions alternatives.

Georgiannou V.; Hight D.; Burland J. (1991): Behaviour of clayey sands under undrained cyclic triaxial loading"; Géotechnique 41 No 3; 383 – 393.

Haberfield C.; Johnston I. (1990): Determination of the fracture toughnessmof a saturated soft rock. Canadian Geotechnick Journal Vol. 27 Canadian Civil Engineering; páginas: 276 - 284

Herzog, A.; Mitchell, J. K. (1963). Reactions accompanying stabilization of clay with cement. *Highway Research Record*, (36).

IECA (2008). Manual de estabilización con cemento o cal. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.

Lamas Fernández, F. (2003). Influencia del contenido de carbonatos en las características resistentes de materiales margosos usados en la construcción de núcleos impermeables de presas. España: Universidad de Granada

Nacci V.A.; Kelly W.E.; Wang M.C. (1974): Sediments physical and mechanical properties. A. L. Inderbitzen Plenun press New York.

Minke, G. (2005). Manual de construcción en tierra: la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. Uruguay: Editorial Fin de Siglo.

Moreno Ramón, H.; Ibañez Asensio, S.; Gisbert Blanquer, J. M. (2011). Minerales carbonatados. España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural.

Rebollar, M.C; Rewitzer, C. (2022). Atlas de minerales de España. Atlas of Spanish minerals. Prames

Sánchez Albán, M. A. (2014). Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Cacical del cantón Tosagua provincia de Manabí (Bachelor's thesis).

Santamarina, J.; Klein, K.; Wang, Y.; Prencke, E. (2002). Specific surface: determination and relevance. Canadian Geotechnical Journal, 39, p. 233-241. Canada

UNE-EN 933-1 (2012). Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. Asociación Española de Normalización y Certificación.

UNE-EN 933-9:2010+A1 (2013). Evaluación de los finos. Ensayo de azul de metileno. Asociación Española de Normalización y Certificación.

UNE-EN ISO 17892-7 (2019). Ensayo de compresión no confinada. Asociación Española de Normalización y Certificación.

UNE-EN ISO 17892-12:2019/A1 (2022). Determinación del límite líquido y del límite plástico. Modificación 1. Asociación Española de Normalización y Certificación.

UNE 103102 (1995). Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación, método del densímetro. Asociación Española de Normalización y Certificación.

UNE 103200 (2021). Determinación del contenido de carbonatos de un suelo. Asociación Española de Normalización y Certificación.

Autores

Àngels Castellarnau Visús: Arquitecta por la UPC (Universitat Politécnica de Catalunya), especializada en bioconstrucción, arquitectura de bajo impacto ambiental y arquitectura de tierra. Phd por la UPC en Energía natural en la Arquitectura. Investiga sistemas constructivos con material local y la gestión de recursos naturales en el territorio. Fundadora del estudio Edra Arquitectura km0. Miembro de la red PROTERRA. Cofundadora de la plataforma Made in tierra Spain.

María Alegre Esteve: Titulada en el grado en geología promoción 2015-2019, realización de Master de Geología: Técnicas y Aplicaciones y Máster de Profesorado por la Universidad de Zaragoza. Autora y coautora en dos artículos presentados en el EJIP 2020. Actualmente trabaja en EDRA Arquitectura Km.0.