

## **Influencia del tipo de suelo en el comportamiento frente al agua de bloques BTCE para su utilización como material de construcción.**



## Indice

1. Resumen .....	1
2. Palabras Claves.....	2
3. Introducción .....	2
4. Objetivos.....	2
5. Metodología .....	3
6. Estado de la cuestión.....	4
6.1 Arquitectura con tierra.....	4
6.2 Tipos de Construcción con Tierra cruda. ....	6
6.3 Antecedentes .....	11
6.4 Normativa UNE .....	12
7. Materiales y Métodos.....	13
7.1. Materiales .....	13
7.1.1. Suelo.....	13
7.1.2. Fibra; Lana de oveja .....	14
7.1.3. Alginato.....	15
7.1.4. Agua .....	16
7.2 Fabricación de probetas.....	16
7.2.1 Probetas prismáticas .....	18
7.2.2 Probetas baldosas .....	19
8 Ensayos de Caracterización .....	20
8.1 Densidad Aparente .....	22
8.1.1 Introducción .....	22
8.1.2 Procedimiento.....	22
8.1.3 Resultados y Discusión.....	23
8.2 Densidad real.....	25
8.2.1 Introducción .....	25
8.2.2 Procedimiento.....	25
8.2.3 Resultados y discusión .....	26
8.3 Ultrasonidos .....	27
8.3.1 Introducción .....	27
8.3.2 Procedimiento.....	27
8.3.3 Resultados y discusión .....	27
9. Ensayos Hídricos .....	30
9.1 Ensayo de Resistencia a ciclos de humectación/secado .....	30
9.1.1 Introducción .....	30

9.1.2 Procedimiento .....	31
9.1.3 Resultados y Discusión.....	33
9.2 Ensayo de Absorción de agua por capilaridad.....	34
9.2.1 Introducción .....	34
9.2.2 Procedimiento.....	36
9.2.3 Resultados y Discusión.....	39
9.3 Ensayo de Resistencia a la erosión .....	40
9.3.1 Introducción .....	40
9.3.2 Procedimiento.....	42
9.3.3 Resultados y Discusión.....	44
10. Conclusiones .....	47
11. Futuras líneas de investigación.....	50
12. Bibliografía .....	51

## 1. Resumen

Las construcciones de tierra cruda se han utilizado en el mundo desde las primeras civilizaciones. Era un tipo de construcción sencilla y manual, que no necesitaba de demasiada herramienta ni un coste demasiado elevado. Con el paso de los años, fue evolucionando, apareciendo nuevos tipos de construcciones de tierra cruda. Con la aparición de nuevos materiales con mejores características como el ladrillo y el hormigón, la construcción con tierra cruda fue siendo cada vez menos frecuente. Aunque se ganó mucho a nivel de mejoras constructivas, se perdieron bastantes ventajas con las que sí contaban este tipo de construcciones.

No ha sido hasta hace pocos años que este material ha comenzado a salir nuevamente a la luz, con una vista a este antiguo método de construcción pero desde una mirada moderna. Para ello es necesario mejorar su resistencia mecánica y especialmente ante el agua, intentando reducir la absorción del agua, uno de los mayores inconvenientes de las construcciones de tierra cruda. Para suplir este y otros inconvenientes, se le añade a la fórmula básica de arcilla más agua algunos componentes que ayuden a superarlos, como hacen en otros materiales la armadura de acero, como pueden ser fibras naturales (lana de oveja, fibra de coco, fibra de palma,...) y estabilizantes o aditivos naturales, (el alginato o la saliva de termita sintética.)

Estos componentes de mejora se dan en un tipo de construcción con tierra cruda llamada bloque de tierra comprimida estabilizada (BTCE), enfocado a una construcción más sostenible, ecoeficiente y ecológica, que nos permite construir grandes edificios sin afectar de un modo tan agresivo al medio ambiente. Estos BTCE son los tratados en este trabajo y con los cuales se realiza el estudio, añadiéndole fibra de lana de oveja y alginato como componentes extra que estabilicen y realcen las características del material.

A lo largo de este estudio se ha observado y analizado el comportamiento de distintas variedades de BTCE dependiendo del suelo arcilloso base del que están formados y del formato en que están fabricados. Para ello se han creado dos formatos distintos de probetas y se han utilizado tres tipos de suelos arcillosos.

Por un lado se realizan ensayos de caracterización como la densidad real y densidad aparente para ver la porosidad de los distintos tipos de suelo que se han estudiado, además de un ensayo de ultrasonidos para comprobar la homogeneidad de las probetas. Por otro lado se realizan ensayos de carácter hídricos, con el objetivo de analizar y estudiar el comportamiento de este nuevo tipo de BTCE ante un factor que es tan agresivo hacia él como puede ser el agua.

Tras el análisis de los resultados, la diferencia entre el tipo de formato no es relevante, sacando ambos formatos resultados heterogéneos en el ensayo de erosión, concluyendo que la compactación del material no es influyente, pero sí el grosor de las probetas. De los tres tipos de suelo trabajados, el suelo negro obtiene resultados peores que los obtenidos en el suelo rubio y rojo y se concluye que la diferencia de suelo arcilloso en la base del material influye en el comportamiento de este.

## 2. Palabras Claves

Arcilla, ensayos hídricos, ecológico, absorción, BTCE

## 3. Introducción

Los ladrillos cerámicos son uno de los materiales más usados en el mundo de la construcción desde su aparición en Egipto entre 1539 – 1514 a.C. (Cultrone, 2004)<sup>1</sup>. Pero son unos materiales poco respetuosos con el medioambiente debido a varios factores determinantes. Quizás uno de los más relevantes sea la necesidad someterlos a unas temperaturas en ocasiones mayores a los 1000 °C para poder cocerlos (Cultrone, 2004). Esto produce un gran uso de calor y por lo tanto un alto gasto de energía, que es perjudicial para el medio ambiente, encareciendo también el proceso de fabricación del producto. Además, los ladrillos cerámicos, junto a otros sistemas constructivos usados hoy en día, como puede ser el hormigón, no son fácilmente reciclables, produciendo una gran cantidad de residuos que o no desaparecen de la naturaleza o tardan años en hacerlo. Creando así grandes vertederos de materiales de construcción usados y demolidos.

Por ello, se presenta el material que será objeto de esta investigación: unos bloques de tierra comprimidos estabilizados (BTCE) ecoeficientes que no necesitan ningún tipo de cocción, secándose al aire en un proceso que dura varios días. Son totalmente naturales, ecológicos y ecoeficientes. Al ser totalmente naturales, una vez después de utilizarlos para una construcción, pueden ser reutilizados o en su defecto pueden reciclarse y devolverse a la naturaleza, generando pocos o ningún residuo. Además, debido a que se curan, se secan al aire y no necesitan ningún tipo de cocción, se ahorra la energía empleada en los hornos de cocción para los materiales cerámicos actuales. Al estar compuestos por materiales accesibles y abundantes, hace su coste bastante menor de lo que cualquier otro material de construcción puede ofrecer.

A lo largo de este estudio se observará y estudiará el comportamiento de distintas variedades de BTCE dependiendo del suelo arcilloso base del que están formados y del formato en que están fabricados. En este estudio el material será sometido a distintos ensayos hídricos y de densidad real y se comprobarán posteriormente los resultados para determinar si sus características son aptas para ser bloques de tierra comprimida estabilizados (BTCE) usados en la construcción.

## 4. Objetivos

En este trabajo se han desarrollado los siguientes objetivos:

---

<sup>1</sup> “Los primeros ladrillos cocidos datados con seguridad se encuentran en el Museo Británico de Londres. Están hechos con limo del Nilo y llevan marcados los nombres de los reyes de la decimoctava dinastía Thumosis I, Thumosis III y Amenhotap III (1539- 1514 a.C.)”. (Cultrone, 2004)

## **Generales**

- Adquirir conocimientos sobre los suelos estabilizados con polímeros y fibras naturales para producir materiales de construcción compuestos, no tóxicos, con materiales naturales y de sencilla obtención. Que sean además sostenibles y respeten el medio ambiente. Comprobar su eficiencia y resistencia al agua.
- Aprendizaje del uso del laboratorio para la realización de trabajos experimentales.
- Avanzar en la metodología de un trabajo experimental en el seno del grupo de investigación: *'Tecnología de los Materiales y Sistemas Constructivos: Caracterización, Mantenimiento, Restauración y Sostenibilidad'*.
- Continuar en las labores del proyecto de investigación, financiado por la Junta de Andalucía, *"Particiones Arquitectónicas Naturales, Ecoeficientes y Ligeras (PANEL)."*

## **Específicos**

- Caracterizar el material mediante ensayos de densidad aparente, densidad real y lectura de ultrasonidos.
- Analizar el comportamiento del material frente al agua a través de la realización de distintos ensayos hídricos:
  - *Resistencia a ciclos de humectación / secado.*
  - *Absorción de agua por capilaridad.*
  - *Resistencia a la erosión.*
- Descubrir las similitudes y diferencias del comportamiento del suelo a través del análisis de los distintos tipos de suelo y formatos en relación a los ensayos realizados.
- Demostrar la viabilidad de utilización del nuevo material biocomposite comprobando su eficiencia y resistencia al agua.

## **5. Metodología**

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos, se ha realizado la siguiente metodología:

- **Trabajo de investigación.** Buscar, estudiar y analizar la información de revistas, artículos y tesis para obtener datos actualizados sobre el estado de la cuestión de este material y los ensayos que se están llevando a cabo estos años. Por otro lado buscar, estudiar y analizar la normativa UNE que afecta a los ensayos experimentales que se realizan en este trabajo. Tras

conocer los ensayos, materiales y objetivos resultantes de los mismos, determinar el número de probetas necesarias para cada ensayo a realizar.

· **Trabajo experimental** en el laboratorio, para realizar las probetas necesarias en cada uno de los cuatro ensayos con los tres tipos de suelo de los que se dispone, suelo rubio, negro y rojo, y los dos tipos de formatos que tenemos, prismáticas y baldosas. Caracterizar el material mediante los ensayos de densidad real y aparente y la lectura de ultrasonidos. Posteriormente realizar batería de ensayos relacionados con la resistencia al agua:

- *Resistencia a ciclos de humectación / secado.*
- *Absorción de agua por capilaridad.*
- *Resistencia a la erosión.*

· **Análisis los resultados** siguiendo las pautas de la normativa UNE para posteriormente comparar entre los resultados de las probetas de distinto tipo de suelo y de los diferentes formatos de probetas.

## 6. Estado de la cuestión

### 6.1 Arquitectura con tierra

#### ***Definición***

La arquitectura con tierra cruda usa como materia prima la tierra que no ha sido sometida a ningún proceso de cocción o térmico. Este sistema es el más antiguo, usado casi desde el inicio de las civilizaciones como material de construcción. Un material muy utilizado en el transcurso de los años, pero que tras progresos y nuevos descubrimientos ha sido olvidado a lo largo de este último siglo (Bestraten, Hormías, & Altemir, 2011), quedando a la sombra de otros materiales más modernos, aunque también más contaminantes.

En este punto, estudiaremos el origen y desarrollo de este tipo de material, sus usos y tipologías. Además de las ventajas y desventajas que ha tenido y el porqué de su olvido con el transcurso de los años. Aunque, actualmente, parece que este tipo de materiales se están volviendo a poner en el punto de mira de la investigación para su mejora.

#### ***Origen***

La aparición de la construcción con tierra cruda se remonta a los años 9000 y 8000 a.C en el Creciente Fértil. Concretamente los primeros testimonios que se conservan son en los cursos bajos del río Éufrates y Tigris. Estableciéndose su uso en Sumeria sobre el milenio IV a.C (Hoz Onrubia et al., 2003). En su inicio consistía en bloques de barro moldeados y dejados secar al sol.

Tras esto, se extendió por el Próximo Oriente hacia Asia, África y Europa. Donde poco a poco su uso fue estableciéndose y normalizándose. Su utilización, forma y características iban cambiando según el lugar y la época y no es hasta el siglo V a.C cuando se estandariza de algún modo una homogeneidad en su forma y tamaño (Hoz Onrubia et al., 2003). Con el paso de los años cada una de las culturas que hacían uso de este material fue añadiéndole distintas características y usos.

Encontramos muchos ejemplos de construcciones antiguas realizadas con este material y que hoy en día continúan en pie, algunas en mejor estado que otras, como puede ser el Zigurat de Ur (Irak) [Figura 1.A] (datado entre 2150-2015 a. C.), cuyo interior está completamente hecho de adobe, aunque su exterior está construido en ladrillos cocidos, seguramente para protegerlo de los factores climáticos y su localización (Ramos, 2015). O la Mezquita de Djenné [Figura 1.B] en la región del Sahel, en Djenné (Malí), (datado entre el año 1200 o 1330) construida con adobe y revestida con masilla de barro (Prieto, 2012).



A.



B.

Figura 1: A. Zigurat de Ur. (Ramos, 2015). B. Mezquita de Djenné. (Prieto, 2012)

Otro ejemplo a gran escala de las construcciones que han ido surgiendo a lo largo de la historia de las arquitecturas con tierra cruda y un gran referente de las capacidades de este material, es la antigua ciudad de rascacielos, Shibam en Yemen, [Figura 2] construida desde el año 300 d.C hasta después del 1532. Esta ciudad de altos edificios está hecha con ladrillos de adobe y fue construida inicialmente para proteger a los ciudadanos de ataques exteriores. Tiene edificios de ocho plantas realizadas enteramente de adobe (MacLeod, 2015).



Figura 2: Shibam. (MacLeod, 2015)

En el último siglo, este material ha caído en el olvido por sus desventajas frente a otros materiales actuales, como puede ser el ladrillo cocido o el hormigón. Sin embargo, en los últimos años ha vuelto a salir a la luz y mediante investigaciones se busca aprovechar las ventajas que nos ofrece y suplir sus desventajas.

## 6.2 Tipos de Construcción con Tierra cruda.

En la clasificación que realiza (Keable, 1995) identifica doce métodos distintos de construcción con tierra cruda, cada uno de ellos con técnicas constructivas distintas. A lo largo de los años muchos de estos han ido apareciendo con la evolución de sus procesos de fabricación. Ya con la industrialización de estos mejoran sus características naturales, ofreciendo una mejor calidad a la hora de su utilización y construcción con este material.

Entre todos estos métodos vamos a analizar los tres que afectan más directamente a este estudio y de los cuales provienen las probetas que vamos a utilizar en él: el adobe, el tapial y los bloques de tierra comprimida (BTC), tres tipos que a su vez se dividen en varios subtipos con características y ventajas distintas (Yuste, 2009).

### Adobe

El adobe [Figura 3.A] es un bloque macizo de masa de barro, con un alto contenido de agua y obtenido de la mezcla de arcillas, gravas, arenas y frecuentemente con fibras vegetales, como pueda ser la paja. En otras ocasiones no llevan fibras vegetales, lo que empeora su rendimiento y debilita su resistencia. La masa de barro se deposita en un molde normalmente sin fondo, metálico o de madera y se prensa con las manos o pequeños utensilios [Figura 3.B]. Tras esto se deja secar al sol antes de desmoldarlo. Una vez seco y desmoldado puede utilizarse para construir el muro o edificio.



A.



B.

Figura 3: A. Adobe (Salinas, 2014). B. Molde de Adobe (Yuste, 2009)

Dos de los tipos de adobe son:

*Adobe estabilizado:* A este adobe se le incorpora otros materiales como pueda ser cemento u otros con el objetivo de mejorar sus características frente a la humedad.

*Adobe armado:* Esta variante surge para mejorar su comportamiento ante el sismo. Introduciéndole refuerzos normalmente de acero, bambú, caña u otros tipos de maderas. [Figura 4.A]

El proceso de fabricación puede dividirse en tres fases principalmente: mezclado de tierra, moldeado y secado.

*Mezclado de tierra:* Preparación de la mezcla añadiéndole los elementos como puedan ser la fibra de origen vegetal y el agua.

*Moldeado:* Una vez la mezcla está preparada se echa en el molde, de nombre adobera, de metal o madera [Figura 4.B]. Pudiéndose añadirle cera, agua o arena para facilitar el proceso de desmoldado.

*Secado:* Se dejan dejar al sol durante varios días, entre 7 y 15 días (Yuste, 2009). Una vez seco se puede desmoldar, aunque en ocasiones puede desmoldarse tras la fase de moldeado antes de dejarse a secar.

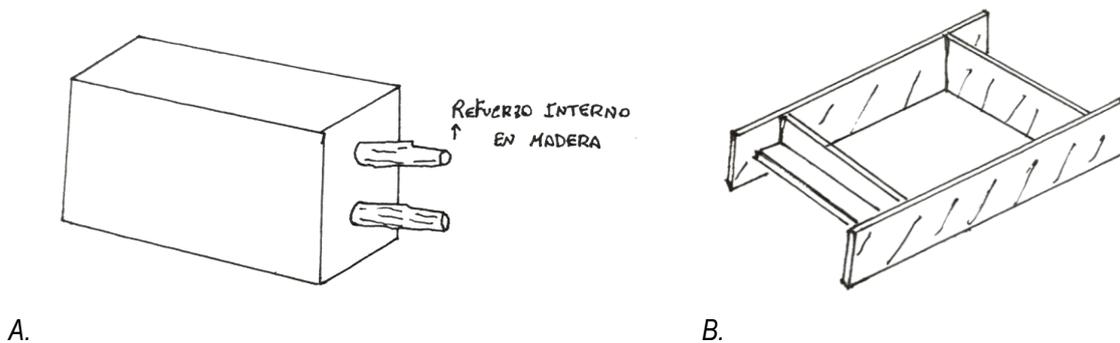


Figura 4: A. Esquema adobe armado. B. Esquema adobera.

## **Tapia**

La tapia son muros de tierra húmeda compactada, [Figura 5.B] ya sea por métodos manuales o mecánicos, dentro del molde de tablones de madera, de nombre tapial. Al igual que el adobe, la cantidad necesaria para su fabricación depende del suelo usado y las características de este. Es una de las técnicas de construcción de tierra más antiguas que existen, siendo un ejemplo, parte de la Gran muralla china (Yuste, 2009). La primera parte de esta muralla construida en el periodo de los Reinos Combatientes, (siglo V a.C) está construida con tapia en su totalidad. Aunque con el avance de los años y cambios de dinastía, esta se acabó de construir con otros materiales.

Algunos de los tipos de tapia son: tapia de tierra simple, tapia de tierra calicostrada y tapia mixta (tapia valenciana, tapia con brencas, tapia de tierra y piedra, tapia de tierra y machones) (Mileto, Vegas, & López, 2011) .

*Tapia de tierra simple:* Es el tipo más sencillo, el material que rellena los tapias es simplemente arcilla mezclada en ocasiones con arena o grava. Esta es apisonada por tongadas, para compactarla y añadiendo nuevamente hasta rellenar la altura deseada. Puede variar la mezcla añadiéndole paja (Yuste, 2009).

*Tapia de tierra calicostrada (Falceto, 2012) :* A la mezcla interior se le añade en su cara exterior mortero o cal para protegerla. Primero se le añade la cal o mortero en las caras interiores del tapial para posteriormente añadir la tongada de tierra. [Figura 5.A]

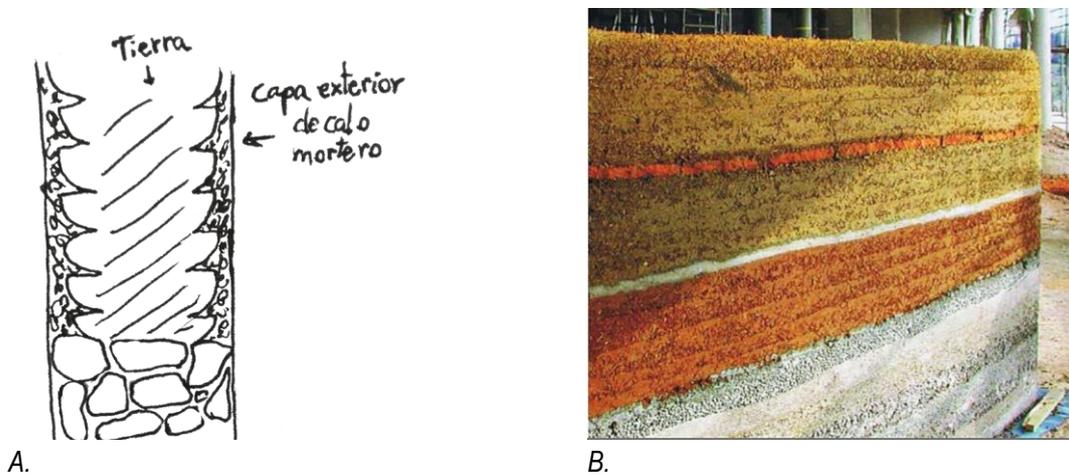


Figura 5: A. Esquema tapia de tierra calicostrada. B. Tapia (Yuste, 2009)

*Tapias mixtas:* Son aquellas tapias que se les añade otro material para mejorar sus características y resistencia. Como la tapia Valenciana (realizada con un paramento de ladrillo exterior), tapia con brencas (son aquellas tapias reforzadas con yeso, más económico que la cal) y la tapia de tierra y piedra (en el cual se refuerza el exterior con tableros mampuestos o losas de piedra).

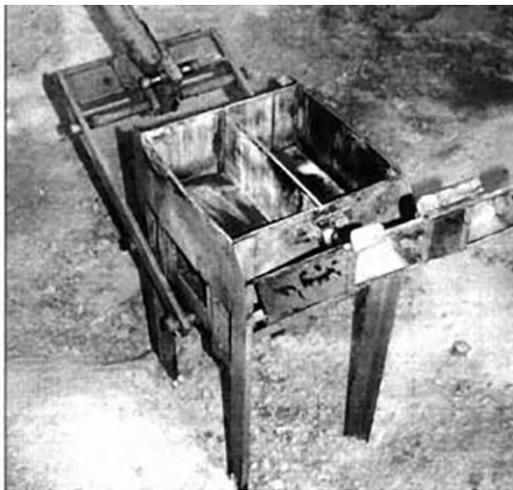
### **Bloque de tierra comprimida. (BTC)**

Los bloques de tierra comprimida (BTC) [Figura 6.B] son similares al adobe. La diferencia mayor entre ambos es que, mientras en el adobe se coloca la mezcla en el molde hasta rellenarlo y luego se dejan secar al sol, los BTC se fabrican por compresión mecánica mediante prensado gracias a una adobera, una prensa o similar. Tras este proceso, los BTC se dejan secar de igual modo que los adobe durante varios días sin necesidad de cocción. Una variante de este material es el bloque de tierra comprimido estabilizado (BTCE) que contiene estabilizantes o aditivos (vegetales o animales) para mejorar sus propiedades o alcanzar una resistencia mayor.

Los BTCE son el centro de investigación de los materiales de tierra cruda en los últimos años, se buscan las variantes con distintas fibras o estabilizantes (orgánicos e inorgánicos) que se encarguen de mejorar el material y lograr suprimir las desventajas que tiene.

El proceso de fabricación de los BTC y BTCE es similar al del adobe, añadiendo únicamente el prensado mecánico [Figura 6.A], proporcionándole nuevas características añadidas con las que no cuenta un adobe normal. Estas nuevas características son una mayor resistencia a la humedad, a la intemperie y a los esfuerzos, debido a que están compactados mecánicamente y no únicamente dejados secar al sol.

Este estudio se dedica concretamente a los BTCE y los ensayos hídricos que se realizarán serán sobre probetas de este tipo de material, prensadas y obtenidas de estabilizantes y distintos tipos de suelo.



A.



B.

Figura 6: A. Adobera (Maldonado Ramos, et Al. , 2001). B. BTC (Cruz Vasquez, 2015)

## **Ventajas y desventajas de los BTCE**

### **Ventajas**

- Los BTCE tienen buenas características en cuanto a aislamiento térmico debido a su porosidad, mejores que la de otros materiales usados para la construcción. Lo que permite una climatización del edificio más sencilla con menos gasto de energía y recursos (Falceto, 2012).
- Debido a los elementos que forman los BTCE y el espesor de este tipo de materiales también tiene buenas características en cuanto a aislamiento acústico (García, 2011).
- Usa elementos para su fabricación que abundan y son comunes en el lugar de producción. No usa armadura de acero como refuerzo y aquellas fibras o los estabilizantes que se usan son abundantes y de bajo costo, además de ser de fácil acceso. No necesita cocción por lo que

ahorra en energía usada. Por todas estas cosas, el BTCE, tiene bajo coste de adquisición y fabricación en comparación a otros materiales (Yuste, 2009).

- Una de las ventajas que actualmente es más importante, es el hecho de ser ecológico. Su fabricación no interfiere con el medio ambiente y es un material limpio que no necesita de grandes consumos de energía para su fabricación (Yuste, 2009).
- El BTCE es además reciclable, que una vez usado y derribado el edificio, puede volver fácilmente a su estado original, generando pocos o nulos residuos que queden en el exterior a la espera del paso de los años. Esto es una gran ventaja frente a otros materiales como el ladrillo o el hormigón (Falceto, 2012).
- Produce un impacto visual menor que el de otros materiales como puede ser el hormigón, permitiendo que si es visto se integre mejor con el paisaje (Falceto, 2012).
- Puede ser usado en zonas de poco poder adquisitivo o con poco acceso de recursos, dado que al ser económico y sin necesidad de grandes maquinarias, puede ser fabricados de forma artesanal y con mano de obra común (Yuste, 2009).

### **Desventajas**

- El BTCE está sujeto al posible colapso producido por inundaciones. El agua es una de las desventajas mayores de este material. Al no estar cocido no es tan compacto o resistente como los ladrillos y el agua puede deshacerlos o deteriorarlos hasta el punto de entrar en colapso (García, 2011).
- Los BTCE necesitan un tiempo de secado al aire libre antes de poder ser utilizados.
- Sus características de resistencia ante agentes externos y otro tipo de los mismos es bastante inferior al de materiales ya nombrados como el ladrillo cerámico o el hormigón. Esto es debido a que es un material que no tiene cocción, ni refuerzos como pueda ser el acero.
- Su fabricación es principalmente artesanal y requiere además superficies amplias y despejadas, además de aireadas para que el secado sea correcto y las piezas no se deterioren en este tiempo.
- El paso del tiempo produce mayor impacto en este tipo de materiales que en otros como el hormigón o el ladrillo cerámico, viéndose más afectados por la erosión con el paso del tiempo.
- Dificultad para construir varias plantas, aunque como se pudo ver antes, existen viviendas en Yemen con ocho plantas, construidas íntegramente de tierra cruda (MacLeod, 2015).

### 6.3 Antecedentes

Desde que comenzaron las investigaciones con BTCE se han probado distintas variantes en sus componentes: distintos suelos, distintas fibras, distintos estabilizantes. Pero todas con el mismo objetivo, mejorar los BTCE de arquitectura con tierra cruda y llegar a la construcción ecoeficiente y de costes reducidos.

Inicialmente se han dado prioridad a los refuerzos con fibras naturales, como son la fibra de coco (Hassan, 2010), deshechos de caña de azúcar (Mahzan, Bahtiar, & Mohamad, 2014), paja (Parisi, et al. 2015), deshechos del pinus roxburghii (Sharma, Vinayak, & Marwaha, 2015), cáscaras de arroz, deshechos de platanero, algodón (Danso, 2015), entre otros. Pero se está abriendo el campo de investigación a fibras de origen animal por los beneficios que estas producen frente a las anteriores (Galán-Marín et al., 2013), como por ejemplo las plumas de ave (A. Ş. Zaimoğlu, et al. 2016) o la lana de oveja (Galán-Marín et al., 2013), con la que se trabaja en la línea de investigación de este estudio.

Los estabilizantes más comunes han sido siempre los inorgánicos, como la cal, aunque se está abriendo la investigación a los estabilizantes orgánicos. En este estudio se utiliza el alginato en polvo, pero no es el único estabilizante orgánico de este tipo de materiales ya que también podemos encontrar BTCE con carrageenan, un tipo de alga roja (Nakamatsu et al., 2017), la saliva de termita sintética (Synthetic termite saliva) (Corrêa et al., 2015), entre otros.

Centrándonos en los orígenes de la investigación de la que forma parte este estudio, se han sucedido una serie de estudios y ensayos para poder averiguar las proporciones necesarias de cada uno de los componentes para poder crear un material estable. Modificando en varias ocasiones la cantidad de lana o el tipo de alginato o de suelo necesario para que la probeta de un resultado aceptable para continuar la investigación con ella (Rivera-Gómez, Galán-Marín, & Bradley, 2014). Inicialmente se trabajan con cuatro tipos de suelos, uno de ellos, el blanco fue desechado de la investigación debido a los malos resultados obtenidos de los materiales fabricados con este suelo. (Rivera-Gómez, Galán-Marín, & Bradley, 2014)

Una línea de esta investigación se trabaja también desde Glasgow, UK (Galán-Marín, Rivera-Gómez, & Petric, 2010). Donde se colabora con la universidad de Sevilla para avanzar con los resultados de este estudio. En ella trabajan también con suelos arcillosos, pero de origen inglés (Bradley, Galán-Marín, Rivera-Gómez, 2012) y uno de sus objetivos busca descubrir la influencia del tipo de suelo en el comportamiento del material, aunque en su caso lo someten a ensayos mecánicos (Galán-Marín et al., 2013).

Existen otros estudios de este tipo de material que han realizado algunos de los ensayos que se tratan en este trabajo, además de realizar otros ensayos y sacar sus propias conclusiones (Falceto, 2012)(García, 2011). Con lo que cabe la posibilidad de comparar ambos estudios y ver similitudes y diferencias.

Estos estudios nos demuestran que este campo de investigación cada vez es más amplio y gana relevancia con el paso de los años, ya que es un tema de interés e importancia en el desarrollo de la arquitectura y del medioambiente que va cobrando importancia.

#### 6.4 Normativa UNE

El BTC, al ser un material que estaba en desuso, no tenía normativa actualizada para su construcción o para la realización de ensayos. Sin embargo, en los últimos años está siendo más valorado como material de construcción al ver sus cualidades. Muchos países intentan normalizar su uso, creando normativas actuales y acordes con este material, que eviten posibles problemas producidos por la ausencia de normativa que fije unas pautas y requerimientos comunes para todas las construcciones y ensayos de este material. A pesar de esto, aún es necesario crear adaptaciones experimentales de algunas normativas que no cuentan con un apartado para la tierra cruda.

En España, la normativa de construcción de bloques de tierra ha sido realizada por la **Asociación Española de Normalización y Certificación. (AENOR)**. Esta es la que ha fijado las normas y puntos que se deben seguir para la fabricación y ensayos en los BTC.

Por ello, en este estudio se seguirá esta normativa para realizar los ensayos correspondientes. Concretamente las normas que se han consultado para ello son:

- **La UNE 41410** - *Bloques de tierra comprimida (BTC) para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.*

Esta norma da los conceptos básicos para la construcción con BTC, los materiales necesarios, las especificaciones, la descripción de los mismos, marcado y entrega y los distintos ensayos a los que recomienda someter los materiales para estudiar sus características. (AENOR 2008)

Esta normativa te direcciona a otras que pueden ser de interés o que de algún modo están relacionadas con esta, como es el caso para la realización del ensayo de la absorción de agua por capilaridad que exponemos a continuación.

- **La UNE – EN 772-11** – *Métodos de ensayo de piezas para la fábrica de albañilería.*

*Parte 11: Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería de hormigón celular curado en autoclave, piedra artificial y natural, y de la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería.*

Esta norma es la versión oficial, en español, de la **Norma Europea EN 772-11-2011**, que anula y sustituye a las antiguas normas: *UNE-EN 772-11:2001* y *UNE-EN 772-11:2001/A1: 2006*. (AENOR 2011)

Con ella realizaremos el ensayo de absorción de agua por capilaridad y determinaremos los distintos parámetros y pasos que debemos seguir para obtener los resultados correctos y posteriormente analizarlos.

Aunque actualmente no existe una normativa concreta dirigida a los BTC o BTCE para la realización del ensayo de absorción de agua por capilaridad. Únicamente en la **UNE 41410** nombrada anteriormente vienen algunos parámetros para realizarlos, sin embargo no son suficientes y se ha debido adaptar el ensayo de forma experimental para poder realizarlo en los BTC.

## 7. Materiales y Métodos

### 7.1. Materiales

#### 7.1.1. Suelo



A.

B.

C.

Figura 7: A. Suelo Rubio. B. Suelo Negro. C. Suelo Rojo.

Para este trabajo como base del material y por tanto de las probetas a realizar, se utilizaron tres suelos que fueron suministrados por la fundación Innovarcilla (Bueno, 2008), (Bailén, España), que promueve las actividades del Centro Andaluz de Tecnología Cerámica (Bailén, España) y colabora con el proyecto de investigación *PANEL* suministrándole los suelos necesarios para esta investigación.

El término “arcilla” es un material que se encuentra en la naturaleza compuesto principalmente por minerales de grano fino, que tiene un comportamiento plástico con contenidos apropiados de agua y que tendrá endurecimiento por secado o cocción (Sánchez Muñoz, Carda Castellò, 2003).

Los tres tipos de suelos arcillosos utilizados en este trabajo han sido identificados según su color predominante; rubio [Figura 7.A], negro [Figura 7.B] y rojo [Figura 7.C] y en los tres casos los suelos procedían de la región sur de España, Andalucía.

Suelo	Límite líquido	Límite plástico
Rubio	32,8 %	11,1 %
Negro	38,8 %	18,6 %
Rojo	25,6 %	14,1 %

*Tabla 1: Valores de Límite líquido y Límite plástico (Bueno, 2008) de los suelos usados en los ensayos.*

Se puede observar [Tabla 1] una clara variación entre los límites de los distintos suelos. Si el suelo tiene un límite de plasticidad muy alto (como en el caso del suelo negro) significa que es muy absorbente, siendo así más seco para trabajar y más difícil de moldear. Esto afecta principalmente a su trabajabilidad y, a la vez, disminuye la resistencia mecánica. Por el contrario, si el índice de plasticidad es bajo (como el caso del suelo rojo), se mejora la trabajabilidad debido a la menor absorción de agua, pero el mayor contenido de humedad aumenta la retracción de la muestra y provoca problemas de adherencia. Esto se comprobará con los resultados de los ensayos a realizar (Rivera-Gómez, Galán-Marín, & Bradley, 2014).

### 7.1.2. Fibra; Lana de oveja



A.



B.

*Figura 8: A. Lana de oveja sin trabajar. B. Lana de oveja siendo preparada*

Los **BTCE** tienen fibras de origen naturales que se suelen obtener de plantas, restos o pelos de animales. En nuestro estudio vamos a usar la lana de oveja [Figura 8.A] como fibra para la formación del material. Esto se debe a varios factores como:

- Las fibras de origen vegetal, como puede ser la fibra de paja (Parisi et al., 2015), la piel de coco, o partículas de bambú (Corrêa et al., 2015) tienen una menor resistencia a la humedad y al calor que las fibras de origen animal ya que están propiamente diseñadas para que el animal se mantenga caliente en tiempo húmedo. Además, estas fibras animales son semipermeables y

tienen un menor desgaste al paso del tiempo que las fibras vegetales (Rivera-Gómez et al., 2014).

· Las fibras semisintéticas que tanto se han usado en los últimos años, como pueden ser las de poliéster o la fibra de vidrio, suponen un coste bastante alto a nivel energético y medioambiental, lo cual no se acerca a nuestro estudio, un BTCE ecoeficiente y con un coste bajo.

Por ello se han abierto investigaciones a otros campos con fibras de origen animal ya que, como comentábamos antes, tienen una mayor resistencia a la humedad y retienen el calor. Además, contienen una proteína llamada queratina (Galán-Marín, Rivera-Gómez, & Petric, 2010), que en algunos ensayos se ha obtenido de las plumas de aves que han sido usadas como fibras (A. Ş. Zaimoğlu, Akbulut, & Arasan, 2016), que proporciona una mayor resistencia a la humedad y al calor.

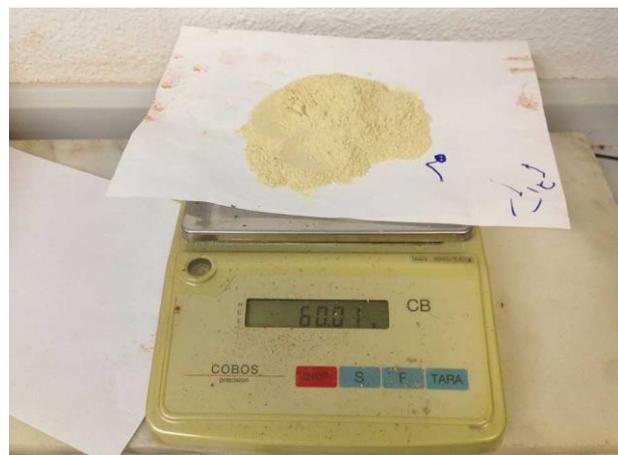
La lana de oveja que también contiene esta proteína se puede obtener de varios animales como pueden ser la llama, la alpaca,... permitiendo una fácil obtención de la misma en una gran variedad de lugares sin que el transporte sea un encarecimiento para su obtención. Además de otras ventajas como buenas propiedades de resistencia, baja densidad, alta tenacidad, buenas propiedades térmicas y lo ya nombrado como amplia disponibilidad y biodegradabilidad.

La lana usada se limpia a mano para eliminar la suciedad y las imperfecciones que pueda tener [Figura 8.B], sin llegar a lavarla con agua para no perder la grasa natural que la propia lana trae impregnada y la cual permite una mejora de su comportamiento ante la humedad.

### 7.1.3. Alginato



A.



B.

Figura 9: A. Alginato. B. Alginato en polvo.

Como estabilizante para nuestro material se utiliza el alginato [Figura 9.A], un polímero orgánico de origen natural, obtenido de algunas "algas marrones", algas de gran tamaño que habitan en los océanos de todo el mundo (Galán Marín Carmen, Rivera-Gómez, 2012).

Estas algas se usan desde hace años en sectores como el médico, la industria alimenticia, farmacéutica o como base para la creación de moldes y actualmente está comenzando su uso en la construcción. Es un material abundante y como en la línea de todos los materiales que se usan en este estudio es natural, respetuoso con el medio ambiente y biodegradable.

En nuestro caso usamos este material en polvo [Figura 9.B], como medio para una mejor integración en la mezcla del material. Este material como comentamos al principio es un estabilizante que se encargará de darle resistencia al BTCE.

#### 7.1.4. Agua



Figura 10: Agua en la báscula para su utilización

Se añadirá el agua [Figura 10] para conseguir la reacción del resto de materiales en el momento de la fabricación de los BTCE. Consiguiendo así que reaccione la capacidad estabilizante del alginato.

#### 7.2 Fabricación de probetas

A continuación se describen los pasos necesarios para la realización de las probetas. La mezcla consta de las siguientes cantidades de los materiales:

Material	Cantidad	Porcentaje
Suelo (Rubio, Negro y Rojo)	3070 gr	76,75 %
Lana de Oveja	10 gr	3,00 %
Alginato	120 gr	20,00 %
Agua	800 gr	0,25 %
Total	4000 gr	100,00%

Tabla 2: Cantidades y porcentajes de materiales de cada amasada

Con esta cantidad [Tabla 2] se realizan dos series de amasados, de las que se obtienen 8 probetas prismáticas aproximadamente. Este resultado varía según el tipo de suelo, debido a las diferentes características propias de los tipos de suelos y que posteriormente afectará en los ensayos.

**Paso 1:** Pesar los materiales necesarios [Figura 11.A]: suelo, alginato, lana de oveja y agua [Figura 11.B].

**Paso 2:** Separar las fibras de lana para eliminar impurezas [Figura 11.C], como por ejemplo paja y mezclarlas con el suelo [Figura 12.A].

**Paso 3:** Añadir el agua a la mezcla de lana y suelo en pequeñas cantidades [Figura 12.B].

**Paso 4:** Añadir el alginato [Figura 13.A] y mezclar hasta que quede integrado homogéneamente [Figura 13.B].

**Paso 5:** Una vez terminada, se deben fabricar las probetas antes de que el alginato acabe de hacer reacción. Una vez fabricadas las probetas tardan en curar 28 días.

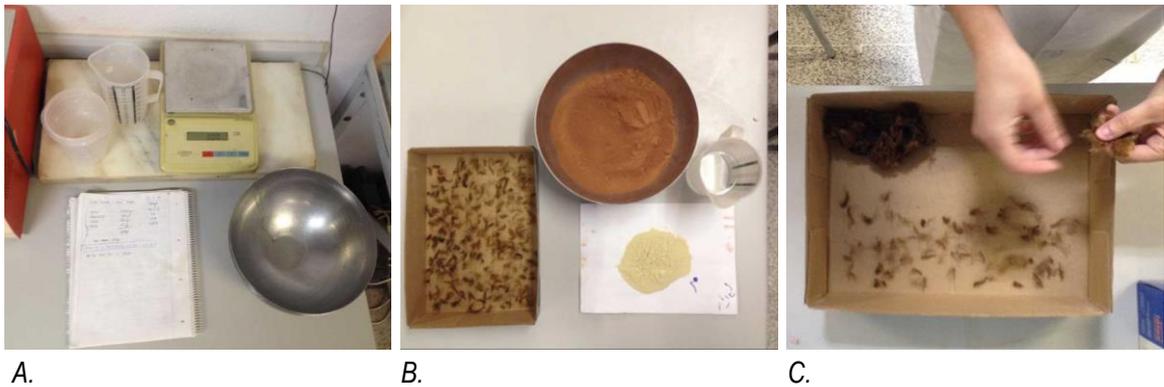


Figura 11: A. Recipientes utilizados y báscula. B. Materiales pesados. C. Lana de oveja deshilachada

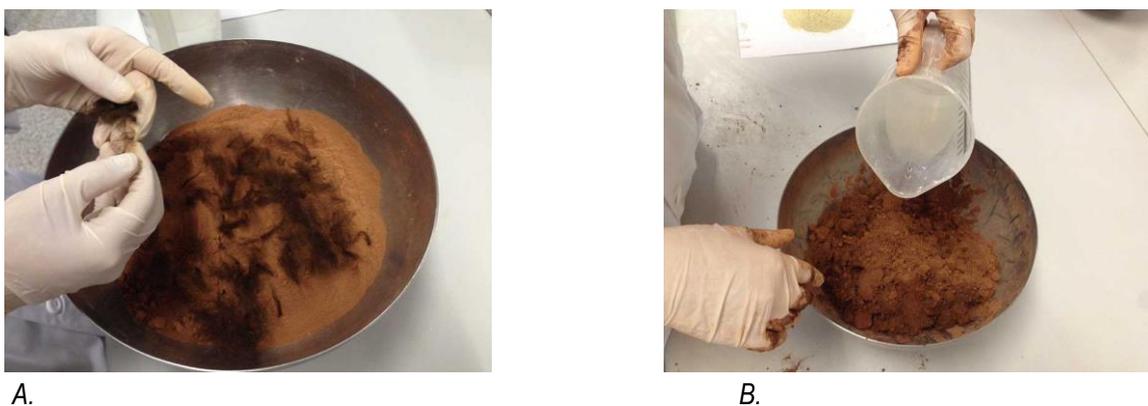


Figura 12: A. Lana de oveja y arcilla. B. Mezcla de lana y arcilla con agua.

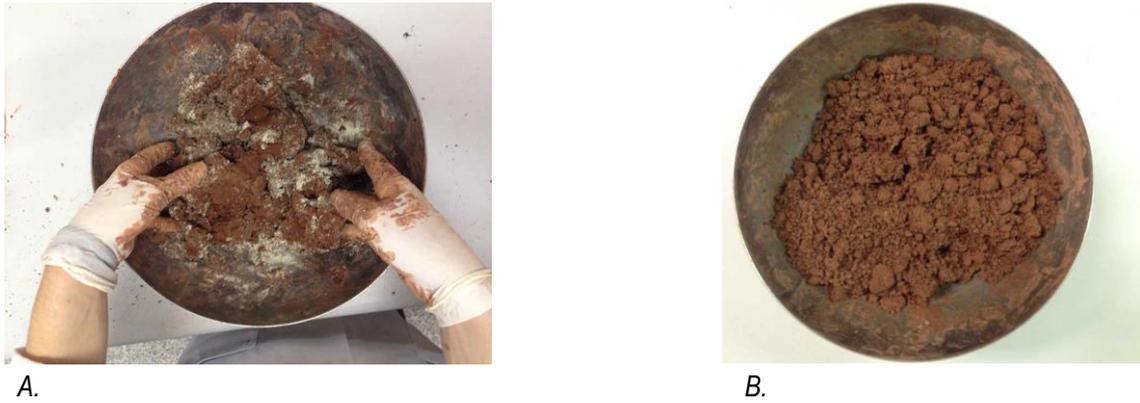


Figura 13: A. Mezcla con alginato. B. Mezcla para las probetas terminada.

### 7.2.1 Probetas prismáticas

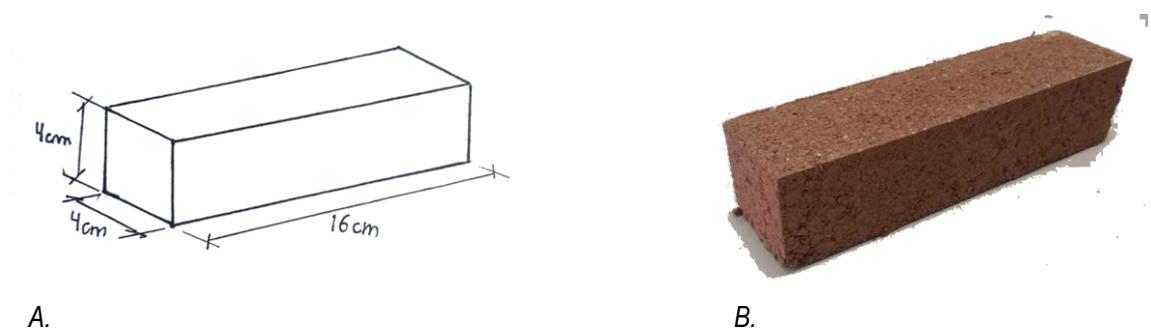


Figura 14: A. Medidas probetas prismáticas. B. Probeta prismática.

Las **probetas prismáticas** (de 4x4x16 cm) [Figura 14] son las de mayor tamaño y están realizadas en una prensa manual. Es el formato principal en el que realizaremos la batería de ensayos hídricos.

Se aplicará cera en el molde de la prensa antes de introducir la mezcla para evitar que se quede adherida a este. Una vez relleno de la mezcla del material, usaremos la prensa para realizar la presión necesaria para crear las probetas prismáticas [Figura 15].



Figura 15: Proceso funcionamiento de la prensa y fabricación de las probetas prismáticas.

Una vez extraídas de la prensa debemos dejar las probetas secar y curar antes de que tengan las condiciones adecuadas para realizar los ensayos hídricos.

Se realizará el mismo proceso con los otros dos tipos de suelo [Figura 16] para que los tres tipos de probetas tengan las mismas características de proceso, cantidad y fabricación. Se observa que para las probetas de suelo rojo se necesita una mayor cantidad de mezcla en la adobera debido a que es un suelo que se comprime más en su prensado. Cuando comencemos con los ensayos podremos observar si los resultados varían dependiendo del tipo de suelo que tengan las probetas.



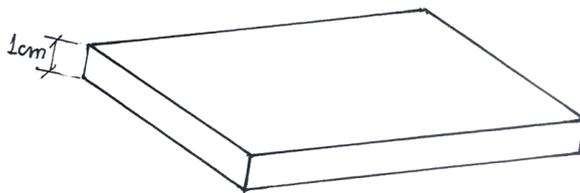
A.



B.

Figura 16: A. y B. Probetas prismáticas terminadas

### 7.2.2 Probetas baldosas



A.



B.

Figura 17: A. Medidas probetas baldosas. B. Probeta baldosa.

Las **probetas baldosas** (de 1 cm de grosor, aunque presentan variaciones en el grosor debido a la propia fabricación, contando con algunas probetas que tienen hasta 1,5 cm de grosor) [Figura 17]. Son probetas pequeñas que están realizadas con una mayor presión al estar realizadas mediante una prensa hidráulica. Es el formato de apoyo que compararemos con los resultados de las probetas prismáticas en el ensayo de la *Resistencia a la Erosión*.

La prensa hidráulica [Figura 18] ejerce una presión de aproximadamente el doble que la ejercida por la prensa manual, un dato que tendremos en cuenta a la hora de realizar los ensayos y comprobar si está presión adicional se ve reflejada en los resultados. Esta prensa realiza las probetas de forma automática.

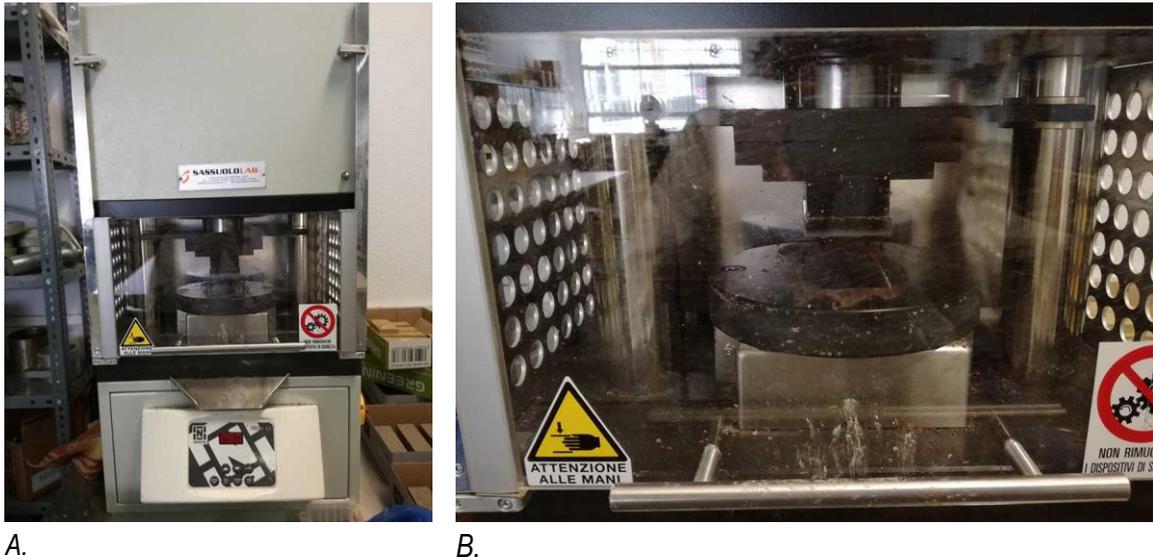


Figura 18: A. y B. Prensadora hidráulica para probetas baldosas.

Se realizará el mismo proceso con los otros dos tipos de suelos [Figura 19] para que los tres tipos de probetas tengan las mismas características de proceso, cantidad y fabricación. Una vez tengamos todas las probetas necesarias curadas podremos comenzar con los ensayos para cada uno de los tipos de suelo y así observar como en un mismo formato pueden variar los resultados según el tipo de suelo del que esté formado y posteriormente, compararlas con las probetas prismáticas y ver como varía el resultado según el formato.

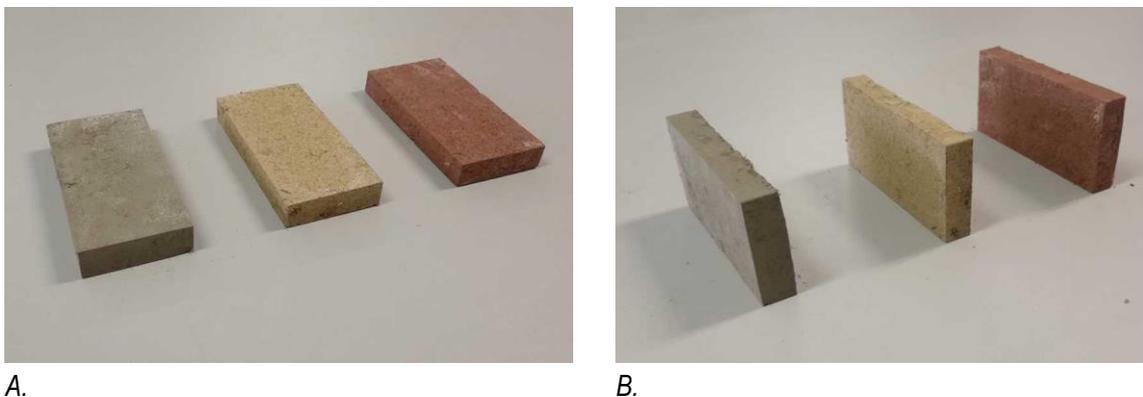


Figura 19: A. y B. Probetas baldosas finalizadas en proceso de secado

## 8 Ensayos de Caracterización

Tras acabar el proceso de moldeado en el laboratorio, realizado durante los meses de marzo a mayo, se cuentan y clasifican las probetas obtenidas [Figura 20] [Tabla 3, 4 y 5], dando un total de treinta y cinco probetas prismáticas y seis probetas baldosas. De este modo según la fecha de fabricación podemos comprobar a partir de qué fecha estas pueden ser ya usadas para realizar ensayos y cuales aún necesitan llegar a los días de curado. También se debe hacer una selección de aquellas probetas que se encuentran en estado óptimo para su uso tras el secado y

cuales debido a imperfectos durante el secado, grietas, curvatura o rotura, no sirven para realizar los ensayos.

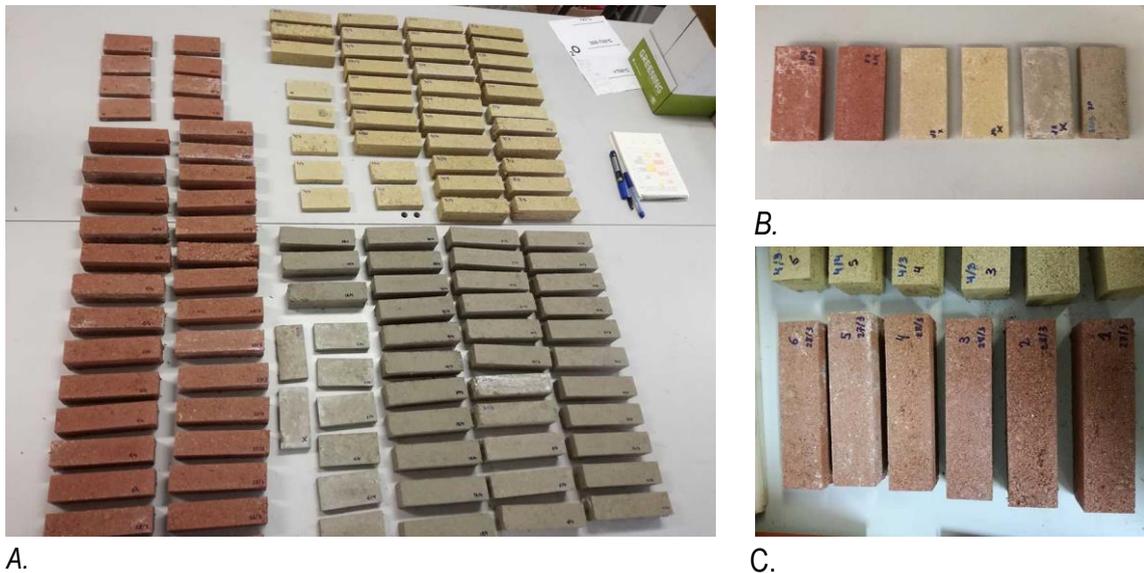


Figura 20: A. Recuento y clasificación de probetas. B. Probetas baldosas. C. Probetas prismáticas

Para nombrarlas [Tabla 3, 4 y 5] se las identifica en primer lugar con la P si son probetas prismáticas y con la B si son baldosas. Tras esta letra se las numera siguiendo un orden de 7 al 16 en el caso de las prismáticas. Aquellas nombradas con un 8.2, o similares, será debido a que la probeta anterior presentó algún fallo y esta la reemplaza para poder tener las probetas con mejores características.

Grisés	Fecha
Prismáticas	12 uds.
P7	18-abr
P7.2	18-abr
P8	21-mar
P8.2	21-mar
P9	06-abr
P10	18-abr
P11	18-abr
P12	21-mar
P13	18-abr
P14	21-mar
P15	18-abr
P16	18-abr
Baldosas	2 uds.
B7	06-abr
B8	06-abr

Tabla 3: Listado de probetas utilizadas para los ensayos

Rojas	Fecha
Prismáticas	12 uds.
P7	28-mar
P8	27-mar
P9	06-abr
P9,2	20-abr
P10	06-abr
P11	27-mar
P12	20-abr
P12,2	06-abr
P13	06-abr
P14	25-mar
P15	06-abr
P16	03-abr
Baldosas	2 uds.
B7	06-abr
B8	27-mar

Tabla 4: Listado de probetas utilizadas para los ensayos

Amarillas	Fecha
Prismáticas	11 uds.
P7	04-abr
P8	04-abr
P9	28-mar
P10	04-mar
P11	04-abr
P11,2	20-abr
P12	28-mar
P13	28-mar
P14	04-abr
P15	20-abr
P16	20-abr
Baldosas	2 uds.
B7	25-mar
B8	25-mar

Tabla 5: Listado de probetas utilizadas para los ensayos

Una vez preseleccionadas las probetas, debemos realizar una serie de ensayos sobre ellas para saber si son aptas para realizar los hídricos o si, por el contrario, estas cuentan con imperfecciones internas como puedan ser fisuras, huecos o rotura. Para ello realizamos tres ensayos: densidad aparente, densidad real y ultrasonidos.

## 8.1 Densidad Aparente

### 8.1.1 Introducción

La densidad de un material compuesto depende de las densidades de sus componentes y de la cantidad de poros con los que cuentan. Por ello realizaremos en primer lugar el cálculo de la densidad aparente de las probetas que hemos preseleccionado. Primero mediremos las probetas y las secaremos en la estufa hasta que lleguen a peso constante para posteriormente obtener su peso seco. Con estos datos obtendremos la densidad aparente del material.

### 8.1.2 Procedimiento

#### Medición

Mediante un pie de rey mediremos la altura, ancho y largo de las probetas para determinar [Figura 21] su volumen. Estas mediciones nos permiten poder observar las variaciones que se hayan producido entre probetas, dado que tras el secado sufren variaciones dimensionales.



Figura 21: Medición de probetas prismáticas y baldosas mediante el uso de pie de rey.

#### Peso seco

Se meterán todas las probetas en la estufa durante 24 horas, después se pesan en una balanza de precisión para obtener su peso seco [Figura 22]. Se observa que las probetas rojas son las más pesadas, siendo las grises las más ligeras.



A.



B.



C.

Figuras 22: A. Pesaje de probeta baldosa. B. y C. Pesaje de probeta prismática

Una vez tenemos todos los pesos secos, con el dato del volumen que hemos obtenido anteriormente, sacamos la densidad aparente mediante la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde  $\rho$  es la densidad,  $m$  la masa en gr y  $V$  el volumen en  $\text{mm}^3$

### 8.1.3 Resultados y Discusión

Una vez obtenido todos los resultados sacamos una media de cada uno [Tabla 7] para poder contrastar como varía la densidad entre los distintos tipos de suelo de una forma más sencilla, pero para obtener un resultado más exacto estudiamos los resultados totales.

Las densidades aparentes obtenidas [Tabla 6] en las prismáticas son algo dispares entre las probetas de distintos suelo. Las probetas rojas son la de mayor densidad, después las amarillas y las de menor densidad, las grises. Esto explicaría el hecho de que a la hora de realizarlas en la prensa, las probetas rojas necesiten una mayor cantidad de mezcla que las demás. En las probetas baldosas los resultados de las rojas y amarillas son bastante homogéneos, siendo las grises las que vuelven a obtener un peor resultado. En cuanto a la diferencia entre formatos, podemos observar que las probetas baldosas tienen una densidad aparente mayor que las prismáticas, esto es debido a que se han realizado mecánicamente con la prensa hidráulica, lo que les proporcionaba una mayor compacidad y por tanto una mayor densidad. Las prismáticas por el contrario están realizadas manualmente y obtienen una menor densidad aparente.

N° Probeta	Color	Fecha	Dimensiones (mm)			Volumen (mm <sup>3</sup> )	Peso Seco (gr)	Densidad gr/mm <sup>3</sup>	Densidad gr/cm <sup>3</sup>
			Largo	Ancho	Alto				
<b>Probetas Prismáticas</b>									
P7	Gris	18-abr	158,0	39,7	36,6	229577,2	345,14	0,00150	1,503
P7.2	Gris	18-abr	158,0	40,0	38,7	244584,0	352,00	0,00144	1,439
P8.2	Gris	21-mar	159,0	40,0	38,5	244860,0	343,33	0,00140	1,402
P9	Gris	06-abr	158,5	45,0	36,0	256770,0	332,93	0,00130	1,300
P10	Gris	18-abr	158,0	40,0	37,5	237000,0	337,01	0,00142	1,422
P11	Gris	18-abr	158,5	40,0	35,5	225070,0	313,93	0,00139	1,395
P12	Gris	21-mar	158,5	40,0	36,0	228240,0	325,23	0,00142	1,425
P13	Gris	18-abr	158,0	40,0	37,0	233840,0	336,24	0,00144	1,438
P14	Gris	21-mar	158,5	40,0	41,5	263110,0	370,80	0,00141	1,409
P15	Gris	18-abr	158,0	39,9	36,3	228842,5	340,31	0,00149	1,487
P16	Gris	18-abr	158,0	39,7	36,6	229577,2	339,58	0,00148	1,479
P7	Roja	28-mar	157,0	40,0	35,0	219800,0	349,99	0,00159	1,592
P8	Roja	27-mar	157,0	40,0	39,0	244920,0	373,07	0,00152	1,523
P9	Roja	06-abr	157,5	40,0	41,0	258300,0	381,10	0,00148	1,475
P9,2	Roja	20-abr	158,0	40,0	40,0	252800,0	379,28	0,00150	1,500
P10	Roja	06-abr	157,0	40,0	39,0	244920,0	374,56	0,00153	1,529
P11	Roja	27-mar	157,0	39,0	37,5	229612,5	360,21	0,00157	1,569
P12	Roja	20-abr	157,0	40,0	39,0	244920,0	355,84	0,00145	1,453
P12,2	Roja	06-abr	157,5	40,0	42,0	264600,0	418,13	0,00158	1,580
P13	Roja	06-abr	157,0	40,0	38,0	238640,0	368,60	0,00154	1,545
P14	Roja	25-mar	157,0	39,5	36,0	223254,0	342,33	0,00153	1,533
P15	Roja	06-abr	157,0	39,6	35,7	221954,0	375,50	0,00169	1,692
P16	Roja	03-abr	157,0	39,6	36,0	223819,2	358,23	0,00160	1,601
P7	Amarilla	04-abr	158,5	40,2	38,5	245310,5	357,90	0,00146	1,459
P8	Amarilla	04-abr	158,5	39,9	39,2	247906,7	369,40	0,00149	1,490
P9	Amarilla	28-mar	159,0	40,4	44,3	284565,5	394,37	0,00139	1,386
P10	Amarilla	04-mar	158,0	31,9	37,7	190015,5	351,57	0,00185	1,850
P11	Amarilla	04-abr	158,0	40,1	40,2	254699,2	358,42	0,00141	1,407
P11,2	Amarilla	20-abr	157,0	40,2	39,4	248669,2	359,59	0,00145	1,446
P12	Amarilla	28-mar	158,0	41,1	40,1	260401,4	380,28	0,00146	1,460
P13	Amarilla	28-mar	159,0	40,2	38,3	244805,9	397,08	0,00162	1,622
P14	Amarilla	04-abr	158,5	40,2	38,3	244036,1	348,28	0,00143	1,427
P15	Amarilla	20-abr	158,0	39,8	37,8	237701,5	361,74	0,00152	1,522
P16	Amarilla	20-abr	158,0	39,8	39,2	246505,3	363,00	0,00147	1,473
<b>Probetas Baldosas</b>									
B7	Gris	-	107,7	53,9	18,2	105651,5	179,53	0,00170	1,699
B8	Gris	-	109,0	53,9	16,3	95764,1	152,60	0,00159	1,593
B7	Amarilla	-	108,2	53,6	11,8	68434,3	113,92	0,00166	1,661
B8	Amarilla	-	108,7	54,2	11,2	65985,2	120,90	0,00183	1,832
B7	Roja	06-abr	107,7	53,9	18,2	105651,5	179,53	0,00170	1,699
B8	Roja	27-mar	107,8	53,2	17,5	100361,8	171,08	0,00170	1,704

Tabla 6: Densidad Aparente de cada probeta

Tipo	Color	Dimensiones (mm)			Volumen (mm <sup>3</sup> )	Peso Seco (gr)	Densidad gr/mm <sup>3</sup>	Densidad gr/cm <sup>3</sup>
		Largo	Ancho	Alto				
Prismáticas	Gris	158,30	40,46	37,36	239284,00	342,92	0,00144	1,435
	Amarilla	158,23	35,79	39,36	222897,71	371,37	0,00152	1,520
	Roja	157,17	39,81	38,18	238885,32	374,08	0,00157	1,568
Baldosas	Gris	108,35	53,90	17,25	100741,12	166,06	0,00165	1,648
	Amarilla	108,45	53,90	11,50	67222,73	117,41	0,00175	1,746
	Roja	107,75	53,55	17,85	102994,72	175,30	0,00170	1,702

Tabla 7: Medias Densidad Aparente por color de probetas

## 8.2 Densidad real

### 8.2.1 Introducción

Tras el cálculo de la densidad aparente, se procede a calcular la densidad real, lo que nos permitirá conocer tanto la compacidad del material como el porcentaje de poros. Gracias a esto podremos observar la diferencia que se produce entre los distintos tipos de suelo, si se da esta diferencia entre ellos o por el contrario obtenemos resultados similares.

Realizaremos este ensayo con tres probetas, una de cada color, las cuales han sido secadas en la estufa hasta peso constante antes de realizar el ensayo. Para realizar la densidad real se utilizará un volumenómetro de Le Chatelier [Figura 23.A] de cristal.



A.



B.

Figura 23: A. Volumenómetro de Le Chatelier. B. Volumenómetro preparado para el ensayo.

### 8.2.2 Procedimiento

Se tomarán parte de las probetas, se pesarán y se triturarán [Figura 24] para poder introducirla en el volumenómetro, que se encontrará con el nivel de agua en el punto 0 antes de ello [Figura 23.B].



A.



B.

Figura 24: A. Probeta roja molida para el ensayo. B. Probeta amarilla molida para el ensayo.

De este ensayo obtendremos el volumen real que utilizaremos para obtener posteriormente la densidad real mediante la siguiente expresión:

$$\rho_r = \frac{P_s}{V_r}$$

Donde  $\rho_r$  es la densidad real en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ ,  $P_s$  es el peso seco en gr y  $V_r$  el volumen real en  $\text{cm}^3$ . Una vez obtenida la densidad real usamos la siguiente expresión para obtener la porosidad real de cada tipo de suelo:

$$Pr = \frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r} \times 100$$

Donde  $Pr$  es la porosidad real en %,  $\rho_r$  la densidad real en  $\text{gr}/\text{cm}^3$  y  $\rho_a$  la densidad aparente en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

### 8.2.3 Resultados y discusión

Probeta	Color	Volumen aparente ( $\text{cm}^3$ )	Peso Seco (gr)	Densidad aparente ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	Volumen Real ( $\text{cm}^3$ )	Densidad Real ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	Porosidad Real (%)
P16	Roja	223,810	358,23	1,600	142,830	2,508	36,20%
P14	Amarilla	244,036	348,28	1,427	156,549	2,224	35,84%
P16	Gris	229,577	339,58	1,479	154,230	2,202	32,83%

Tabla 8: Resultados densidad real de cada probeta

En la tabla 8 se observa la variación entre la densidad aparente y la real de cada tipo de probetas. Obteniendo una mayor densidad real en las probetas rojas y con un resultado bastante inferior se encuentran las probetas amarillas y grises en ese orden. Esto nos lleva a la conclusión de que, aunque la medida de poros en las probetas de suelo negro es menor; las características

del propio suelo (su índice de plasticidad) y la posible existencia de una serie de microfisuras no computables a través del volumenómetro, que son debidas al secado interno, explicarían el mal comportamiento del suelo negro frente no solo al rojo sino también al rubio.

### 8.3 Ultrasonidos

#### 8.3.1 Introducción

El ensayo de ultrasonidos es no destructivo por lo que podemos realizarlo en todas las probetas que posteriormente utilizaremos para los ensayos hídricos. Este ensayo se realiza con un equipo de pulso ultrasónico que tiene un emisor y un receptor de ultrasonidos. Es decir, se transmiten con intervalos de un segundo aproximado, impulsos eléctricos que desde el emisor son propagados en forma de vibraciones de ultrasonido, atraviesan las probetas y son recibidas por el receptor que nuevamente las convierte en impulsos eléctricos y mide el tiempo, en microsegundos, que ha tardado desde el emisor al receptor.

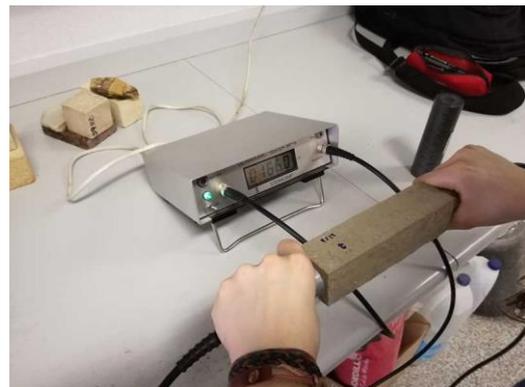
Gracias a los resultados que obtendremos, podremos no solo detectar defectos a simple vista en los materiales (desgaste, desprendimiento, fisuras, huecos, etc), si no saber si las probetas son óptimas o no para la realización de los ensayos hídricos.

#### 8.3.2 Procedimiento

Tomamos las probetas que hemos preseleccionados y hacemos una lectura con ellas. Cogemos la probeta del lector de sonido primero para establecer la presión adecuada que se debe ejercer sobre cada probeta, que debe ser constante, para obtener una lectura correcta. Posteriormente se repite el proceso con las probetas y se van leyendo los resultados obtenidos [Figuras 25]



A.



B.

Figura 25: A. Lectura de probetas baldosas mediante el lector de ultrasonidos. B. Lectura de probetas prismáticas mediante el lector de ultrasonidos.

#### 8.3.3 Resultados y discusión

Tras realizar el ensayo con todas las probetas observamos los resultados iniciales obtenidos. En este momento podemos ver que probetas de las preseleccionadas pueden servirnos y cuales,

por el contrario, debemos desechar. Esta discriminación es posible gracias a las lecturas de compacidad mediante ultrasonidos. Aquellas probetas que den valores de velocidad menores serán eliminadas en la preselección debido a que la probeta en su interior estará seguramente fisurada o tiene hueco o rotura y por tanto no es óptima para realizar la batería de ensayos. Esto es debido a que gracias a los ultrasonidos detectamos otros aspectos a parte de los visuales como puede ser el índice del grado de compacidad.

Las probetas que han dado más fallos y que se han tenido que reemplazar más han sido las de suelo negro, ya que varias de ellas daban números muy altos o incluso a simple vista podían verse las fisuras. Las probetas por el contrario que menos problemas han dado han sido las de suelo rubio.

A continuación podemos ver una tabla con los resultados obtenidos en la lectura de ultrasonidos. Viendo también la velocidad que tiene cada probeta. La cual se calcula con el tiempo de propagación empleado en recorrer la probeta y la distancia entre emisor y receptor, es decir, la longitud.

$$V = \frac{l}{t}$$

Siendo  $l$  la longitud de la probeta, distancia entre emisor y receptor, medida en metros y  $t$  el tiempo que ha tardado en recorrer la probeta, medido en segundos.

Podemos ver en la tabla 10 que las probetas que han obtenido un mejor resultado son las probetas amarillas, seguidas de las grises y por último aquellas con unos resultados peores son las fabricadas con suelo rojo. Esto quizás sea debido a las propias características del suelo o las probetas seleccionadas, dado que si nos fijamos en la tabla 9, los valores más bajos son igualmente los obtenidos por las probetas rojas.

Pero hay una probeta de suelo negro que ha obtenido en la lectura el peor resultado de transmitancia acústica, siendo eliminada del resultado para no contaminar la media y de los ensayos por estar posiblemente fisurada en su interior.

Nº Probeta	Color	Fecha	Dimensión Longitud (mm)	Transmitancia acústica (µs)	Transmitancia acústica (sg)	Velocidad Acústica (m/s)
<b>Probetas Prismáticas</b>						
P7	Gris	18-abr	158,0	147,6	0,000148	1070,461
P7.2	Gris	18-abr	158,0	167,3	0,000167	944,411
P8	Gris	21-mar	-	246,0	0,000246	-
P8.2	Gris	21-mar	159,0	174,9	0,000175	909,091
P9	Gris	06-abr	158,5	166,5	0,000167	951,952
P10	Gris	18-abr	158,0	166,1	0,000166	951,234
P11	Gris	18-abr	158,5	163,8	0,000164	967,643
P12	Gris	21-mar	158,5	174,4	0,000174	908,830
P13	Gris	18-abr	158,0	156,6	0,000157	1008,940
P14	Gris	21-mar	158,5	172,9	0,000173	916,715
P15	Gris	18-abr	158,0	157,7	0,000158	1001,902
P16	Gris	18-abr	158,0	148,5	0,000149	1063,973
P7	Roja	28-mar	157,0	162,8	0,000163	964,373
P8	Roja	27-mar	157,0	164,8	0,000165	952,670
P9	Roja	06-abr	157,5	188,1	0,000188	837,321
P9,2	Roja	20-abr	158,0	181,2	0,000181	871,965
P10	Roja	06-abr	157,0	163,1	0,000163	962,600
P11	Roja	27-mar	157,0	150,8	0,000151	1041,114
P12	Roja	20-abr	157,0	189,6	0,000190	828,059
P12,2	Roja	06-abr	157,5	152,4	0,000152	1033,465
P13	Roja	06-abr	157,0	161,7	0,000162	970,934
P14	Roja	25-mar	157,0	169,5	0,000170	926,254
P15	Roja	06-abr	157,0	147,1	0,000147	1067,301
P16	Roja	03-abr	157,0	154,6	0,000155	1015,524
P7	Amarilla	04-abr	158,5	151,7	0,000152	1044,825
P8	Amarilla	04-abr	158,5	135,6	0,000136	1168,879
P9	Amarilla	28-mar	159,0	150,0	0,000150	1060,000
P10	Amarilla	04-mar	158,0	145,3	0,000145	1087,405
P11	Amarilla	04-abr	158,0	170,2	0,000170	928,320
P11,2	Amarilla	20-abr	157,0	153,1	0,000153	1025,474
P12	Amarilla	28-mar	158,0	135,8	0,000136	1163,476
P13	Amarilla	28-mar	159,0	138,2	0,000138	1150,507
P14	Amarilla	04-abr	158,5	157,7	0,000158	1005,073
P15	Amarilla	20-abr	158,0	143,3	0,000143	1102,582
P16	Amarilla	20-abr	158,0	144,9	0,000145	1090,407
<b>Probetas Baldosas</b>						
B7	Gris	06-abr	107,7	89,2	0,0000892	1207,399
B8	Gris	06-abr	109,0	75,2	0,0000752	1449,468
B7	Roja	06-abr	107,7	89,2	0,0000892	1207,399
B8	Roja	27-mar	107,8	86,7	0,0000867	1243,368
B7	Amarilla	25-mar	108,2	73,6	0,0000736	1470,109
B8	Amarilla	25-mar	108,7	73,3	0,0000733	1482,947

Tabla 9: Resultados lectura de ultrasonidos en cada probeta

Tipo	Color	Transmitancia acústica ( $\mu$ s)	Transmitancia acústica (sg)	Velocidad acústica (m/s)
Prismáticas	Gris	170,20	0,000170	962,47
	Roja	165,47	0,000165	955,96
	Amarilla	147,80	0,000148	1075,18
Baldosas	Gris	82,20	0,0000822	1328,43
	Roja	89,45	0,0000880	1225,43
	Amarilla	73,45	0,0000735	1476,53

Tabla 10: Media resultados de ultrasonidos de cada tipo de probeta

## 9. Ensayos Hídricos

### 9.1 Ensayo de Resistencia a ciclos de humectación/secado

#### 9.1.1 Introducción

Este ensayo tiene como principal objetivo ver la reacción de los BTCE ante el contacto con el agua y como varía el resultado dependiendo del suelo que tengan de base las probetas que usemos.

En este ensayo vamos a centrarnos en los ciclos de humectación/secado y si las probetas logran resistirlo o por el contrario sufren la influencia del agua ofreciendo malos resultados. El deterioro provocado por estos ciclos en la superficie de la probeta, ante la sumersión continua de las probetas en agua durante pequeños periodos de tiempo, hace que aumente la descomposición del material velozmente y sufra por tanto otros imperfectos a raíz de este.

Con este ensayo obtendremos si este deterioro es significativo en las probetas y por tanto cómo reaccionan ante el agua, posteriormente con los siguientes ensayos iremos probando otros comportamientos de este material frente al agua.

#### Metodología

Para realizar este ensayo se ha seguido la norma española **UNE 41410: Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques** (AENOR 2008). En este caso al tratarse una norma específica para los bloques de tierra comprimida puede seguirse el ensayo sin variaciones y así observar los resultados obtenidos si son aptos o no siguiendo las indicaciones de la norma Une.

De acuerdo con la norma, el equipamiento necesario será: una bandeja, de dimensiones suficiente para el BTC; y un soporte, de 3 mm de altura.

Seguiremos la siguiente **metodología** para la realización del ensayo:

- **Muestreo** y elección de probetas.
- **Procedimiento**. Sumergir las probetas durante seis ciclos de 30 sg.
- **Tiempo de secado**
- **Resultados** para clasificar como apto o no aptas las probetas siguiendo el criterio detallado en la norma, que especifica que es necesario verificar que, tras seis ciclos de humectación/secado, no se observan ninguna de las siguientes condiciones (AENOR 2008):
  - *Modelo de grietas aleatorio.*
  - *Modelo de grietas en estrella.*
  - *Hinchamiento local.*
  - *Picado local en al menos cinco zonas.*
  - *Pérdida general o local de capas de suelo.*
  - *Penetración de agua en más del 70% de la anchura del BTCE.*
  - *Perdida de fragmentos mayores a 50 mm, excepto los que provengan de la parte comprendida entre los bordes y 50 mm hacia adentro.*
  - *Eflorescencia en la superficie.*

Según este criterio se obtendrán los resultados de este ensayo que posteriormente se analizarán (AENOR 2008).

### 9.1.2 Procedimiento

A continuación desarrollaremos el proceso seguido para la realización del ensayo de humectación/secado en los BTCE estudiados. Se han usado únicamente probetas prismáticas para este ensayo, por lo que se tiene por objetivo ver cómo se comportan cada una según el tipo de suelo del que están compuestas y por consiguiente si son aptas después de realizarles el ensayo.

#### · **Muestreo**

Siguiendo lo estipulado en la norma se eligen dos probetas de cada uno de los tipos de suelo [Figura 26] para ser sometidas al siguiente ensayo. Procurando que todas ellas tengan las características adecuadas y se encuentren en perfectas condiciones. De estas dos probetas por suelo se utilizará una de ellas como referencia, sometiéndose al ensayo únicamente la otra.



Figura 26: Probetas para el ensayo de humectación/secado

### · Procedimiento

Se prepara el equipo necesario para la realización de este ensayo y se realiza el siguiente procedimiento con cada una de las probetas: se le añade agua a la bandeja hasta que esta quede sumergida hasta 10 mm, se coloca la cara de la probeta vertical dentro de la bandeja y se mantiene sumergida durante 30 segundos [Figura 27].



A. B. C.  
Figura 27: A. Probeta amarilla durante la realización del ensayo. B. Probeta roja durante la realización del ensayo. C. Probeta gris durante la realización del ensayo.

Se deja secar al aire hasta que iguale el color de la probeta de referencia y se observa su estado, anotando si aparecen las condiciones de rechazo. Se repite 6 veces este ciclo [Figuras 28] de inmersión – secado – observación. Tras el último ciclo se deja secar completamente y se observan las condiciones finales de cada probeta.



A. B. C.  
Figura 28: A. Primer ciclo. B. Tercer ciclo. C. Quinto ciclo.

### 9.1.3 Resultados y Discusión



A. B. C.  
Figura 29: A. Ciclo seis, probeta gris. B. Ciclo seis, probeta roja. C. Ciclo seis, probeta amarilla.

A lo largo del ensayo, se van anotando las variaciones que se aprecian en las probetas que no son las condiciones de rechazo para finalmente sacar las conclusiones más precisas. Tras el sexto ciclo [Figura 29], se observan las condiciones de rechazo que tienen y se comparan con las probetas de referencia. Tras el secado [Figura 30], todas las probetas presentan grandes grietas por toda la zona que durante el ensayo había entrado en contacto con el agua.



A. B. C.  
Figura 30: A. Probeta roja tras el secado. B. Probeta amarilla tras el secado. C. Probeta gris tras el secado

Se crea una tabla [Tabla 11] reuniendo las condiciones de rechazo que han sufrido las probetas en cada ciclo, de este modo se puede comprobar cuáles son aptas y cuáles no.

Probetas	Probeta roja						Probeta amarilla						Probeta gris					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Modelo de Grietas Aleatorio					■	■					■	■	■	■	■	■	■	■
Modelo de Grietas en Estrella					■						■		■	■	■	■	■	■
Hinchamiento Local				■						■	■		■	■	■	■	■	■
Picado local en menos de 5 zonas					■						■	■	■	■	■	■	■	■
Pérdida general o local de capas de suelo													■	■	■	■	■	■
Penetración del agua más del 70% de la anchura					■						■		■	■	■	■	■	■
Perdida de fragmentos mayores a 50 mm													■	■	■	■	■	■
Eflorescencias en la superficie													■	■	■	■	■	■

Tabla 11: Marcado en color de los defectos presentados en cada ciclo del ensayo de humectación/secado

Según la tabla 11, podemos observar cómo ha sido el proceso de cada probeta a lo largo de los distintos ciclos. Comprobamos que la probeta roja en el ciclo 5 ha presentado modelo de grietas aleatorio e hinchamiento local, por lo que esta probeta a partir de este ciclo ya no sería apta. La probeta amarilla en el ciclo 4, presenta hinchamiento local, por lo tanto, desde este ciclo deja de ser apta. Finalmente, la probeta gris, desde el primer ciclo presenta un modelo de grietas aleatorio e hinchamiento local.

Por lo tanto, aunque ninguna de las probetas ha acabado el ensayo siendo apta y todas sufren varias de las condiciones de rechazo, especialmente tras el ciclo 6, podemos observar como algunas de las probetas han aguantado sin presentar condiciones de rechazo más ciclos, antes de ser consideradas no aptas. Por tanto, dentro de esto, encontramos una mejor resistencia a los ciclos de humectación secado en las probetas rojas y amarillas, mientras que las grises desde el primer ciclo presentaban desperfectos.

## 9.2 Ensayo de Absorción de agua por capilaridad

### 9.2.1 Introducción

La absorción de agua por capilaridad suele ser uno de los principales problemas de deterioro de los materiales de construcción y de la aparición de humedades en los muros de las viviendas actualmente y por tanto uno de los principales problemas que puede ir desde daños en los revestimientos y desprendimientos de estos, hasta daños estructurales que puedan peligrar la estabilidad de la vivienda. El agua asciende desde el propio terreno, ya sea por filtraciones, tuberías rotas, lluvia o aguas freáticas. En épocas de lluvias además esto se ve incrementado por la constante caída de agua, que no solo encharca el terreno de agua, si no que golpea los cerramientos desde fuera antes de que el agua caiga al terreno. Además el agua contiene minerales y sales que pueden resultar todavía más destructivas para nuestro material (Galán Marín, 2001).

El agua asciende por los capilares producto de la porosidad del material. Esto produce como comentábamos deterioro del material, desprendimiento de los revestimientos, apariciones de humedades por capilaridad e incluso deterioro en la estructura que provoque peligro estructural del propio edificio.

Este ensayo de absorción por capilaridad es adecuado para medir el volumen real de huecos y el volumen de los poros capilares para BTCE que estamos estudiando y con esto podremos comprobar dos aspectos importantes en los resultados. Por un lado observaremos si estas probetas resisten el agua por capilaridad, o por el contrario absorben demasiada agua, lo cual provocaría problemas si se construyesen con ellos. Por otro lado observaremos la diferencia entre los propios suelos, comprobando si cada tipo de suelo responde de una forma distinta según las características iniciales, si unos pueden resistir el ensayo y otros no, mostrando un mal comportamiento ante el agua.

## Metodología

Para realizar este ensayo se ha seguido la norma española **UNE-EN 772-11: Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería** (AENOR 2011). Se han realizado ciertas adaptaciones del ensayo al no contar con un apartado específico para materiales de tierra cruda sin cocción.

En la norma **UNE 41410: Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques** (AENOR 2008) vienen algunas especificaciones para BTCE referidas a este estudio, aunque no son suficiente para la completa realización de este. Por ello, se adoptará un procedimiento experimental para comprobar la respuesta de este material a este tipo de ensayos.

Siguiendo la norma necesitaremos para este ensayo distintos aparatos que son: bandeja grande, con una profundidad de 20 mm; dispositivo de soporte, para mantener la probeta por encima de la base de la cubeta; cronómetro, para medir el tiempo en segundos (siguiendo la norma para BTC se contarán 10 min de ensayo.); estufa ventilada, que pueda mantener una temperatura de 70 °C para obtención del peso seco; y balanza.

Con esto será suficiente para la realización del ensayo (AENOR 2011).

Seguiremos la siguiente **metodología** para la realización del ensayo:

- **Muestreo** y elección de probetas.
- **Secado** de las probetas para la obtención del peso seco.
- **Procedimiento de ensayo** atendiendo a las dos normas.

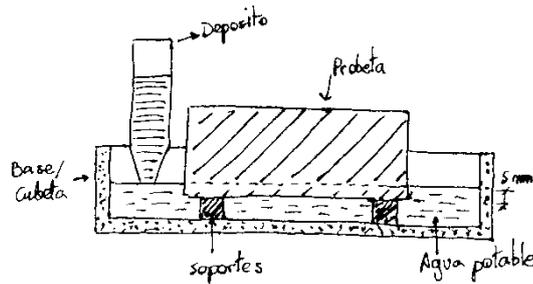


Figura 31: Esquema de la norma UNE, ensayo de Capilaridad.

· **Cálculo y expresión de los resultados.**

Debido a no contar con un cálculo concreto para los BTC, se calculará en este caso la tasa inicial de absorción de agua por capilaridad de las piezas de arcilla cocida.

· **Evaluación de los resultados** y discusión de ellos.

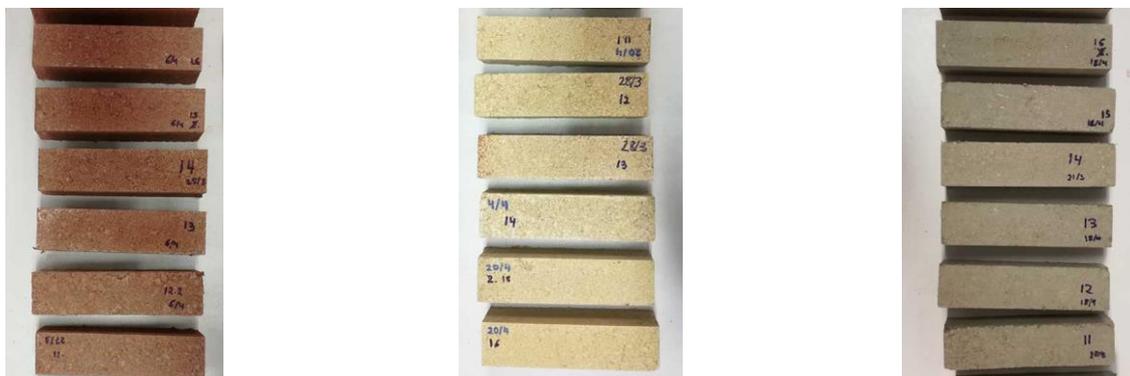
A continuación en el procedimiento podrán observarse estos pasos desarrollados.

### 9.2.2 Procedimiento

A continuación desarrollaremos el proceso seguido para la realización del ensayo de capilaridad en los BTCE estudiados. Se han usado únicamente probetas prismáticas para este ensayo, por lo que se tiene por objetivo ver la reacción de estas ante este ensayo y cómo se comportan cada una según el tipo de suelo del que están compuestas.

· **Muestreo**

Siguiendo lo estipulado en la norma se eligen 6 probetas de cada uno de los tipos de suelo [Figura 32] para ser sometidas al siguiente ensayo. Procurando que todas ellas tengan las características adecuadas y se encuentren en perfectas condiciones y estar su proceso de curación terminado.



A.

B.

C.

Figura 32: A. Probetas de suelo rojo. B. Probetas de suelo rubio. C. Probetas de suelo negro.

### · **Secado**

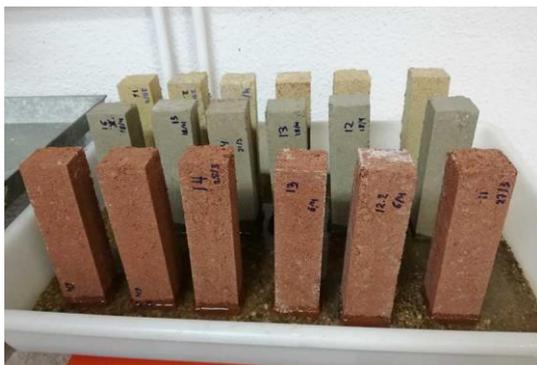
Se secan las probetas seleccionadas del ensayo en una estufa ventilada [Figura 33] hasta una masa constante, a una temperatura de 70°. Las probetas se mantienen en la estufa durante 24h. Una vez pasado este tiempo, se retiran y se dejan enfriar. Tras esto se pesan para obtener su peso seco, el cual será posteriormente referente en el ensayo para la obtención de los resultados.



Figura 33: Probetas tras pasar las 24h en la estufa ventilada.

### · **Procedimiento de ensayo**

Para empezar a realizar propiamente el ensayo de capilaridad, se coloca la bandeja con arena al fondo como soporte para evitar que las probetas toquen el fondo y se echa agua hasta sumergirlo a una profundidad de 5 mm durante toda la duración del ensayo [Figura 34]. De este modo se intenta que toda la superficie sumergida esté en contacto con el agua. Al tener caras regulares esto no nos supondrá un problema.



A.



B.

Figura 34: A. Probetas sumergidas en agua al inicio del ensayo. B. Probetas durante el ensayo.

Se activa el cronometro y se mantienen las probetas en el agua durante un tiempo de 10 min, el estipulado en la normativa **UNE 41410: Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques** (AENOR 2008) para BTCE manteniendo el nivel del agua constante.

Mientras pasa el tiempo y transcurre el ensayo se puede observar como las probetas absorben el agua y está van subiendo por capilaridad [Figura 35]. Se tiene cuidado para evitar que estas

se caigan por el desgaste de la base de las mismas, se observa que las probetas que más están sufriendo el ensayo son las de suelo negro, que no solo están absorbiendo una gran cantidad de agua, sino que además comienzan a desgastarse por la base con mayor velocidad que los otros dos tipos de probetas.



A.



B.



C.

Figura 35: A. B. y C. Probetas durante los 10 minutos del proceso de ensayo.

Pasado los 10 min se retiran del agua las probetas, y se pesan en la báscula [Figura 36.A] para obtener el peso húmedo y poder así luego sacar los resultados necesarios para este ensayo. Al pesar se procura tener cuidado con no perder masa en el transporte de las probetas de la bandeja a la báscula. [Figura 36.B]



A.



B.

Figura 36: A. Peso en la báscula de las probetas tras el ensayo. B. Aspecto de las probetas tras el ensayo

### 9.2.3 Resultados y Discusión

Una vez terminado el ensayo se debe calcular la tasa inicial de absorción de agua de cada probeta que hemos sometido al ensayo, para obtenerla realiza la siguiente expresión:

$$C_{w,i} = \frac{m_{so,s} - m_{seco,s}}{A_s t} \times 10^3 \text{ [Kg/(m}^2 \times \text{min)]}$$

Donde **C<sub>w,i</sub>** es la tasa inicial de absorción de agua de las probetas, **m<sub>so,s</sub>** es el peso después de la inmersión en gr, **m<sub>seco,s</sub>** es el peso seco en gr, **A<sub>s</sub>** es la superficie bruta de la cara de la probeta sumergida en mm<sup>2</sup> y **t** es el tiempo de inmersión en segundos. (AENOR 2011)

De esta fórmula obtenemos los resultados para las probetas de cada uno de los tipos de suelo:

Rojas	As (mm <sup>2</sup> )	Tiempo (sg)	Peso húmedo (gr)	Peso Seco (gr)	Tasa inicial de absorción de agua por capilaridad
P11	1462,5	600	367,31	360,21	0,0081
P12.2	1680,0	600	427,31	418,13	0,0091
P13	1520,0	600	377,56	368,60	0,0098
P15	1413,7	600	383,75	375,50	0,0097
P16	1425,6	600	365,71	358,23	0,0087
Media					0,0091

Amarillas	As (mm <sup>2</sup> )	Tiempo (sg)	Peso húmedo (gr)	Peso Seco (gr)	Tasa inicial de absorción de agua por capilaridad
P11	1612,02	600	372,39	358,42	0,0144
P12	1648,11	600	393,36	380,28	0,0132
P13	1536,66	600	410,44	397,08	0,0145
P14	1539,66	600	361,60	348,28	0,0144
P15	1504,44	600	372,16	361,74	0,0115
P16	1560,16	600	374,86	363,00	0,0126
Media					0,0134

Grises	As (mm <sup>2</sup> )	Tiempo (sg)	Peso húmedo (gr)	Peso Seco (gr)	Tasa inicial de absorción de agua por capilaridad
P07	1453,02	600	368,21	345,14	0,0265
P12	1440,00	600	349,62	325,23	0,0282
P13	1480,00	600	355,61	336,24	0,0218
P14	1660,00	600	407,20	370,80	0,0365
P15	1448,37	600	369,60	340,31	0,0337
P16	1453,02	600	363,03	339,58	0,0269
Media					0,0289

Tabla 12: Resultados de capilaridad de cada probeta

Para evaluar los resultados sacamos la media de la tasa inicial de absorción de agua por capilaridad de las probetas de cada tipo de suelo [Tabla 12], de las probetas rojas se elimina una de ellas por dar resultados contradictorios al resto y así evitar dispersiones a la hora de sacar la media.

Con las medias se puede apreciar que la diferencia de la tasa inicial de absorción de agua por capilaridad que sufre cada suelo es bastante significativa. Las probetas con mayor tasa de absorción de capilaridad son las grises, con una media de 0,0289, las siguientes con un resultado mayor son las probetas amarillas, cuyo resultado es la mitad aproximadamente que el de las grises. Por último las probetas rojas obtienen una media de 0,0091, lo cual es mucho menor que las dos anteriores. Llegando a la conclusión por tanto de que las probetas rojas tienen un índice de capilaridad mucho menor que el resto, lo que les proporciona mejor comportamiento frente al agua y un mejor resultado, las grises por el contrario, no obtienen resultados satisfactorios al tener demasiado alta la tasa de absorción por capilaridad.

### **9.3 Ensayo de Resistencia a la erosión**

#### **9.3.1 Introducción**

Como en el resto de ensayos realizados en este trabajo, se tiene como principal objeto de estudio la reacción de los BTCE ante el agua y como mejoran o empeoran sus respuestas dependiendo del tipo de suelo del que está formado la probeta. Siendo el agua uno de los elementos que más daño le provoca a los materiales de construcción en general, el daño producido es más severo y dañino en aquellos materiales que no tienen una cocción y por tanto una peor resistencia al desgaste o el agua, como es el caso de nuestro material de estudio.

En este caso vamos a someter a las probetas, según la normativa UNE 41410 (AENOR 2008), a una exposición severa y continua de caída de agua constante durante 10 min en un punto concreto de la probeta, para ver el desgaste que este le produce.

Este ensayo es una forma de ver la respuesta y el aguante que tendrían las construcciones con BTCE ante filtraciones en el muro, ya sea por rotura de una tubería, lluvia o filtración de agua desde el exterior y observar así el desgaste que se produzca. Dado que como comentábamos antes, otros materiales pueden resistir mejor al agua al estar cocidos y no sufrir un desgaste tan directo, los BTCE no cuentan con esa ventaja.

Por tanto observaremos si las probetas pueden resistir el ensayo completo y como lo resisten.Cuál es el desgaste que sufren y por tanto si podrían servir para un futuro uso en la construcción. También observaremos que tipo de suelo resisten mejor el ensayo, si hay diferencia entre ellos y a que puede deberse. Además este ensayo se realizará tanto en las probetas prismáticas como en las baldosas de modo que podremos ver si la diferencia de compactación y formato afecta en este experimento o por el contrario, no se ven variaciones de forma considerables.

## Metodología

Para realizar este ensayo se ha seguido la norma española **UNE 41410: Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques** (AENOR 2008). En este caso al tratarse una norma específica para los bloques de tierra comprimida puede seguirse el ensayo sin variaciones y así observar los resultados obtenidos si son aptos o no siguiendo las indicaciones de la norma UNE.

El nombre completo del ensayo que vamos a realizar es: **Ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET)**.

Siguiendo la norma necesitaremos para este ensayo distintos aparatos que formen la siguiente estructura:

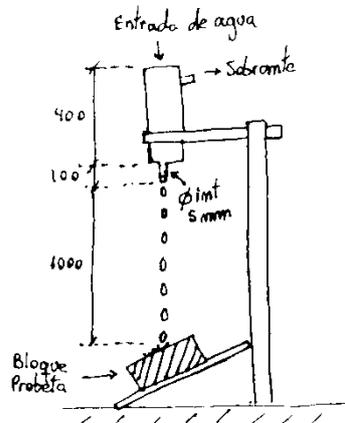


Figura 37: Esquema de la norma UNE, ensayo de erosión

Podemos observar [Figura 37] que será necesario: tanque de agua de nivel constante con un tubo de 5 mm de diámetro, un soporte para colocar la probeta que la mantenga inclinada a 27° respecto al plano horizontal y una varilla para medir posteriormente la profundidad de las oquedades producidas por el agua en la probeta.

Seguiremos la siguiente **metodología** para la realización del ensayo:

- **Muestreo** y elección de probetas.
- **Procedimiento**.
- **Tiempo de secado**
- **Resultados** para clasificar como apto o no aptas las probetas siguiendo el criterio detallado en la norma (AENOR 2008).

Propiedad	Criterio	Resultados
D, (profundidad de la oquedad, en mm)	$0 \leq D \leq 10$	Probeta Apta
	$D > 10$	Probeta No Apta

Tabla 13: Normativa erosión, clasificación de resultados. (AENOR 2008)

Según este criterio se obtendrán los resultados de este ensayo que posteriormente se analizarán (AENOR 2008).

### 9.3.2 Procedimiento

A continuación desarrollaremos el proceso seguido para la realización del ensayo de erosión en los BTCE estudiados. Se han usado probetas prismáticas y probetas baldosas para este experimento, por lo que se tiene por objetivo ver cómo se comportan cada una según el tipo de suelo del que están compuestas y la diferencia de resultados entre las probetas baldosas y prismáticas. Si su nivel de compactación o su formato son influyentes a la hora de resistir el ensayo o por el contrario la diferencia no es apreciable y ambas tienen resultados similares.

#### · Muestreo

Seleccionamos para este ensayo dos probetas de cada color y cada formato [Figura 38], teniendo un total de 12 probetas para someter a los ensayos. Las probetas seleccionadas han pasado los 28 días de curado y han dado resultados óptimos en los ensayos de caracterización.



A.

B.

Figura 38: A. Probetas baldosas. B. Probetas prismáticas.

#### · Procedimiento.

Se prepara el equipo para la realización del ensayo. La probeta se coloca con una inclinación de  $27^\circ$  con respecto al plano horizontal.

Para realizar el ensayo se deja caer una corriente continua de agua sobre la probeta durante un periodo de 10 minutos apuntando a un punto fijo de la probeta. Para que el agua incida siempre en el mismo punto y con la misma presión sobre la probeta, cae desde un tanque de agua a nivel constante, cuya cabecera está a una altura aproximada de 1,5 m de la cara de la probeta.

*Probetas prismáticas*



A.



B.



C.



D.

Figura 39: A. y B. Probetas prismáticas rojas durante la realización del ensayo. C. y D. Probetas prismáticas grises durante la realización del ensayo.

Se realiza el experimento con las dos probetas prismáticas de cada suelo anotando su comportamiento y su evolución a lo largo de los 10 min que dura el experimento para cada una [Figura 39]. Una vez terminado este ensayo se retiran las probetas y se dejan secar antes de pesarlas y sacar resultados.

*Probetas baldosas*



A.



B.



C.



D.

Figura 40: A. B. C. y D. Probetas baldosas grises durante el ensayo.

Se realiza el experimento posteriormente con las dos probetas baldosas de cada tipo de suelo [Figura 40] apuntando su comportamiento y su evolución a lo largo de los 10 min que dura el experimento para cada una. Una de las probetas grises no puede terminar los 10 min del experimento y se detiene el cronómetro a los 8,35 minutos debido a que se ha deshecho toda la probeta [Figura 40.D]. Una vez terminado este ensayo se retiran las probetas y se dejan secar antes de pesarlas y sacar los resultados.

### 9.3.3 Resultados y Discusión

#### *Probetas prismáticas*

Durante el ensayo en las probetas prismáticas se ha observado que existe una gran diferencia dependiendo del tipo de suelo que compone la probeta. Las probetas rojas han resistido el ensayo con un desgaste mínimo, por lo que a primera vista parece que serán aptas. Las probetas amarillas aunque con un desgaste algo mayor, de igual modo, han aguantado los 10 minutos sin problema. Las grises por el contrario, desde el inicio del ensayo se ha observado una mala resistencia en su comportamiento. Pasado pocos minutos desde el inicio, el desgaste ha sido bastante alto, llegando incluso a perder gran parte de la masa cuando aún quedaban varios minutos [Figura 41].



A.



B.



C.

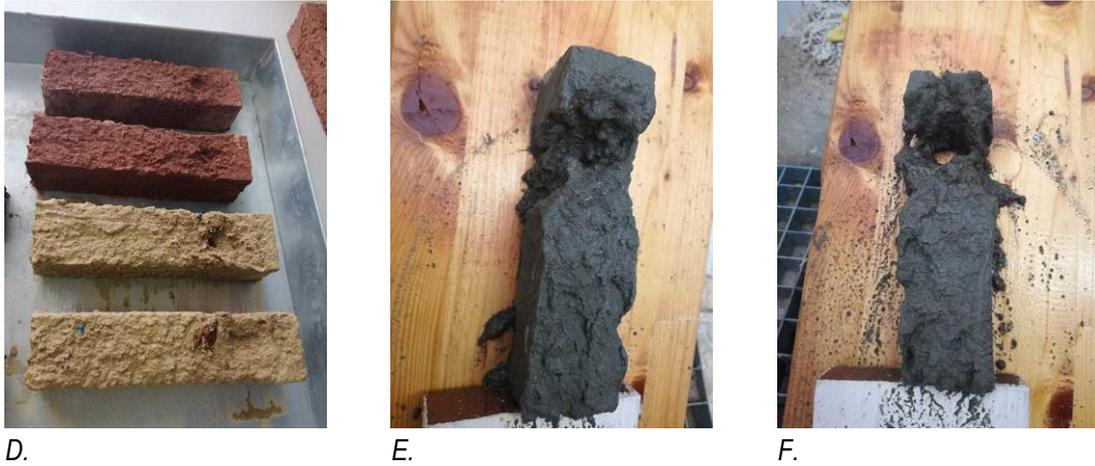


Figura 41: A. Probetas prismáticas tras el ensayo. B. C. E. y F. Probetas prismáticas grises tras el ensayo. D. Probetas prismáticas rojas y amarillas tras el ensayo.

Tras el ensayo comprobamos lo que ya estábamos observando durante el desarrollo del mismo: las probetas rojas [Figura 42.C] son las que han resistido con mejores resultados el experimento, dando a primera vista un apto. Por otro lado las probetas amarillas [Figura 42.B], con una oquedad algo mayor, también han tenido una buena respuesta aunque la profundidad es mayor que las anteriores. Sin embargo, las probetas grises [Figura 42.A], han tenido una mala respuesta siendo incluso una de ellas atravesadas por completo. Podemos observar cómo estas probetas han perdido una gran cantidad de masa. Estas probetas serán calificadas como no aptas, pues al ser atravesadas al completo, crea una oquedad de 4 cm, que supone cuatro veces más que la profundidad límite para ser considerado apto. [Tabla 13]



Figura 42: A. Probetas grises secas tras el ensayo. B. Probetas amarillas secas tras el ensayo. C. Probetas rojas secas tras el ensayo.

### Probetas Baldosas

Las probetas baldosas por su parte han tenido un comportamiento que ha seguido en la línea de las prismáticas con unos resultados similares.

Durante el ensayo, las probetas rojas no sufren mucho desgaste [Figura 43.B], las probetas amarillas sufren más durante el ensayo y acaban más deterioradas. En el caso de las probetas grises, al igual que ocurrió con las prismáticas, son las que más han sufrido. Pero en este caso, a pesar de que las probetas baldosas están fabricadas con mayor compresión, estas tienen una peor resistencia al ensayo que las probetas prismáticas, tal vez por la diferencia de grosor. La probeta gris de grosor mayor [Figura 43.A] sufre bastante desgaste en todas sus dimensiones aunque el agua no llega a atravesarla por completo. Por el contrario, la baldosa gris más fina, es la que más sufre y el agua logra atravesarla cuando el ensayo lleva 6 minutos y cuando aún quedan 1,24 minutos de duración se detiene el ensayo, debido a que la erosión es tal que la probeta prácticamente ha desaparecido del soporte [Figura 43.C], impidiendo la finalización del ensayo.

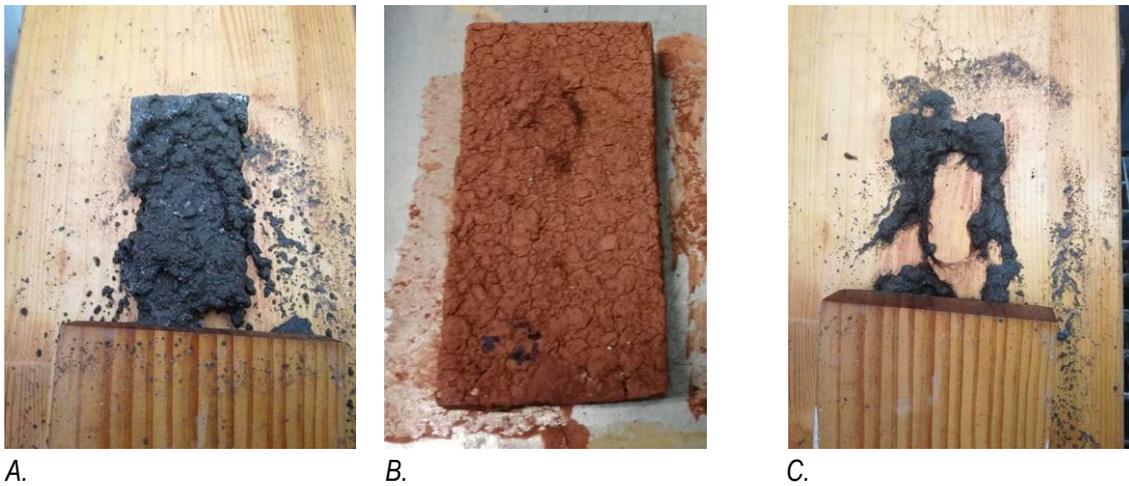


Figura 43: A. Probeta baldosa gris tras el ensayo. B. Probeta baldosa roja tras el ensayo. C. Probeta baldosa gris tras el ensayo.

Tras el ensayo, se observan finalmente que los resultados son bastantes similares a los obtenidos en las probetas prismáticas: las probetas rojas [Figura 44.A] han sido las que menos desgaste han sufrido, con una pequeña oquedad poco apreciable. Las probetas amarillas [Figura 44.B] han sufrido un poco más que las rojas, con un desgaste más apreciable aunque sin ser atravesadas por el agua. Por el contrario, nuevamente las probetas grises [Figura 44.C] han sido las que han sufrido un mayor desgaste durante el ensayo, siendo incluso imposible acabarlo con una y la otra aunque ha resistido, ha acabado en muy malas condiciones.



Figura 44: A. Probetas baldosas rojas secas. B. Probetas baldosas amarillas secas. C. Probetas baldosas grises secas.

Tras acabar el ensayo se dejan secar antes de pesarlas y estudiar si son aptas o no y se obtienen estos datos:

Tipo	Nº Probeta	Color	Peso Seco antes del ensayo	Peso Seco tras el ensayo	Apto o No apto
Prismáticas	P7.2	Roja	349,99	338,82	Apto
	P8.2	Roja	373,07	359,73	Apto
	P7	Amarillo	357,90	330,05	Apto
	P8	Amarillo	369,40	342,84	Apto
	P7.2	Gris	352,00	291,66	No apto
	P8.2	Gris	343,33	264,75	No apto
Baldosas	B7	Roja	179,53	169,44	Apto
	B8	Roja	171,08	160,07	Apto
	B7	Amarillo	113,92	94,29	Apto
	B8	Amarillo	120,90	98,52	Apto
	B7	Gris	179,53	-	No apto
	B8	Gris	152,60	94,22	No apto

Tabla 14: Resultados de los ensayos de erosión

En la tabla 14 podemos observar los resultados finales del ensayo de erosión: las probetas rojas y amarillas han cumplido ambas, pero como ya se pudo ver durante la realización del ensayo, las probetas grises no han cumplido en ningún caso. Si observamos el peso seco antes del ensayo y el peso tras el ensayo, comprobamos que este ha variado bastante especialmente en el caso de las probetas grises donde la pérdida de masa ha sido bastante mayor que en el caso de las rojas o las amarillas.

Pueden extraerse dos conclusiones finales que dan respuesta a lo que planteamos en el inicio: los distintos formatos no han creado una gran diferencia de comportamiento en este ensayo, obteniéndose datos bastante igualados en ambos formatos. Pero sí que ha tenido relevancia el tipo de suelo, donde se ha podido observar que las mejores eran las probetas rojas, tanto en mayor resistencia, como menor pérdida de masa, seguidas por poca diferencia por las amarillas todo lo contrario que las fabricadas por suelo negro, donde ninguna ha cumplido con los requerimientos de la norma [Tabla 13] ni ha estado cerca de ello.

## 10. Conclusiones

### Introducción a las conclusiones

Haber realizado este trabajo, me ha permitido poder experimentar dos ámbitos nuevos y desconocidos para mí en estos cinco años de carrera:

Uno de ellos a nivel experimental en el laboratorio, me ha permitido entrar en un campo totalmente desconocido para mí, aprender a manejarme en un laboratorio, usar los aparatos y

materiales, aprender de un material y un sistema constructivo desde la base, creando yo misma este material y sometiéndolo a ensayos, para ver con mis propios ojos los resultados que se obtenían de esto. Una forma práctica y didáctica de aprender, más amena de lo que acostumbrábamos en las aulas. Me ha permitido adquirir bastantes nuevas competencias en todas las horas de este cuatrimestre que he estado trabajando en el laboratorio. Un campo que desde que entré por primera vez en el laboratorio, en primero de carrera, siempre había querido probar y descubrir y que al final me ha resultado una experiencia muy positiva a nivel personal y a nivel de estudios.

El otro campo que he experimentado con este trabajo es aprender a buscar en revistas y artículos, la lectura de los mismos y aprender a comprenderlos, además de aprender su estructura y jerarquía. También he mejorado con esto mi nivel de redacción, aprendiendo a redactar desde un nivel más científico, más dirigido hacia este campo y este tipo de trabajos. He aprendido el funcionamiento de este mundo de la investigación que también es algo ajeno en las aulas de clase.

Otra cosa que me ha permitido conocer este trabajo es el mundo de la arquitectura de tierra cruda, los materiales que derivan de él y la importancia que están adquiriendo en estos años. Creo que es un tema muy interesante de investigar y desarrollar y aunque este sea un pequeño trabajo, es un paso hacia esta investigación.

### **Conclusiones generales**

En este estudio se presentan las características de tres tipos de suelos estabilizados con alginato y reforzados con fibra de lana de oveja. Sobre los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados a partir de los tres tipos de probeta de tierra estabilizada y los dos formatos, prismáticas y baldosas, se pueden obtener las siguientes conclusiones como resultado del estudio del trabajo:

En los ensayos de caracterización se comenzó a ver que las probetas rojas obtenían resultados mejores, seguidas de las probetas amarillas y las grises. En el ensayo del cálculo de la densidad real se ha podido observar la diferencia de porosidad entre los tres tipos de suelo, obteniendo la porosidad más alta en las probetas de suelo rojo y la porosidad más baja en las de suelo gris. A pesar de estos valores de porosidad, el comportamiento de las probetas de suelo negro en todos los ensayos hídricos a los que se han sometido indica que las características de los suelos arcillosos negros son menos aptos que los rojos y rubios para la realización de BTCE. Debido, posiblemente a compuestos minerales que modifican sus índices de plasticidad.

Tras realizar los tres ensayos hídricos, resistencia a la erosión, resistencia a ciclos de humectación secado y absorción de agua por capilaridad, se han podido obtener unos resultados homogéneos de todos ellos.

En resistencia a erosión, las probetas de suelo negro no han resultado aptas, ofreciendo unos resultados peores durante todo el ensayo que el resto de probetas, por el contrario, las probetas

de suelo rojo y amarillo, han obtenido mejores resultados de los esperados. En este ensayo además se realizó con ambos formatos, pero tras finalizar el ensayo se llegó a la conclusión de que esta diferencia no es relevante en los resultados y ambas, las prismáticas y las baldosas, han sacado resultados muy heterogéneos, siendo la compacidad una característica que no ha variado los resultados, pero si el grosor de las probetas, sufriendo estas más cuanto más finas eran.

En resistencia a los ciclos de humectación/secado todas las probetas han resultado no aptas al finalizar el ensayo. Pero dentro de estos resultados las probetas de suelo negro habían resultado no aptas desde el ciclo 1 en el comienzo del ensayo, por el contrario, las probetas de suelo rubio resistieron aptas sin presentar ninguna de las condiciones negativas estipuladas por la norma hasta el ciclo 4 y las probetas de suelo rojo hasta el ciclo 5 no presentaron condiciones tampoco. Esto nos muestra que dentro de los malos resultados obtenidos en este ensayo vuelve a mostrarse una gran diferencia entre las probetas de suelo rojo y rubio y las probetas de suelo negro.

En el ensayo de absorción de agua por capilaridad los resultados obtenidos siguen la misma línea general que los ensayos anteriores. Tras obtener la tasa media de absorción de agua por capilaridad se ha podido observar que las probetas de suelo rojo han sacado un resultado muy bajo, y por tanto adecuado, frente a los resultados obtenidos en las probetas de suelo rubio y las probetas de suelo negro, además las grises presentan el doble de la tasa media de absorción por capilaridad que en el caso de las probetas amarillas.

Observando la relación homogénea de resultados de los tres ensayos podemos apreciar la siguiente gradación de resultados en función del suelo utilizado en la mezcla:

Probeta roja > Probeta amarilla > Probeta gris

En vista de estos resultados obtenidos en este estudio podemos añadir, como conclusión final, que la diferencia de los suelos usados como base para los BTCE es muy relevante a la hora de un buen funcionamiento y una resistencia óptima como material de construcción. No lo es tanto la presión de compactación de las probetas según su formato, pero si el grosor de las mismas: cuanto menor es su grosor, menor es la resistencia que obtienen a la erosión. En el caso concreto de nuestros tres tipos de suelo, se obtiene como conclusión final que las características del suelo rojo y rubio pueden llegar a ser aptas para un futuro uso en la construcción, aunque para ello deben mejorarse y ser sometidas a más ensayos, el suelo negro por el contrario ha dado resultados bastante negativos por lo que en futuras investigaciones este suelo se eliminará, al igual que aquellos con un límite plástico y un índice de poros similar, pues se ha comprobado que no obtienen buenos resultados.

## 11. Futuras líneas de investigación

Las conclusiones obtenidas en este estudio son solo una parte de la investigación sobre este material y por tanto se dispone de distintas ramas para continuar con esta investigación:

- Seguir sometiendo a los BTCE a otro tipo de ensayos, hídricos, mecánicos, técnicos; para comprobar la respuesta de este material a estos nuevos ensayos.
- Realizar más ensayos con las probetas de formato baldosa, para comprobar si el cambio de formato afecta al comportamiento, características y resultados de las baldosas frente a las prismáticas en otros ensayos.
- Modificar las proporciones de lana de oveja y alginato, además de los tipos de este último, para comprobar si varía el comportamiento de los BTCE.

## 12. Bibliografía

### Libros

- Cultrone, G. (2004). *Estudio mineralógico-petrográfico y fisico-mecánico de ladrillos macizos para su aplicación en intervenciones del Patrimonio Histórico. Mineralogía y Petrología.*
- Hoz Onrubia, J. de., Maldonado Ramos, L., & Vela Cossillo, F. (2003). *Diccionario de construcción tradicional : tierra.* Nerea.
- Keable, J. (1995). *Earth construction: a comprehensive guide. Habitat International.* London : Intermediate Technology Publications.
- L. Sánchez Muñoz, J. B. Carda Castellò, "Materias primas y aditivos cerámicos. Vol. 2.2". Faenza Editrice Ibérica S. L., Castellón (2003).

### Artículos

- Bestraten, S., Hormías, E., & Altemir, A. (2011). Construcción con tierra en el siglo XXI. *Informes de La Construcción*, 63(523), 5–20. <https://doi.org/10.3989/ic.10.046>
- Bradley, Fiona , Galán Marín, Carmen, Rivera Gómez, C. (2012). a Combination of Sem and Edx Studies on a Clay-Based Natural Composite With Animal Fibre and Its, (June), 24–28.
- Bueno, S. (2008). *Estudio de Caracterización Tecnológica de Materias Primas Cerámicas.* Informe Sin Publicar. Fundación Innovarcilla. Bailén (Jaén).
- Corrêa, A. A. R., Mendes, L. M., Barbosa, N. P., De Paula Protásio, T., De Aguiar Campos, N., & Tonoli, G. H. D. (2015). Incorporation of bamboo particles and "synthetic termite saliva" in adobes. *Construction and Building Materials*, 98, 250–256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.009>
- Danso, H. (2015). Use of agricultural waste fibres as enhancement of soil blocks for low-cost housing in Ghana, (March).
- Galán-Marín, C., Rivera-Gómez, C., & Petric, J. (2010). Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and Building Materials*, 24(8), 1462–1468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.008>
- Galán-Marín, C., Rivera-Gómez, C., Bradley, F., Rivera-Gómez, C., & Bradley, F. (2013). Ultrasonic, Molecular and Mechanical Testing Diagnostics in Natural Fibre Reinforced, Polymer-Stabilized Earth Blocks. *International Journal of Polymer Science*, 2013, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2013/130582>
- Hassan, W. H. B. W. (2010). Strength Characteristic Of Soft Soil Reinforced With Coir Fibres, (December).
- Mahzan, S., Bahtiar, W. M., & Mohamad, Z. (2014). Investigation on the Tensile Strength of Treated and Untreated Woven Sugar Palm Fibre Reinforced Composites, 660, 588–592. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.660.588>
- Mileto, C., Vegas, F., & López, J. M. (2011). Criterios y técnicas de intervención en tapia. La restauración de la torre Bofilla de Bétera (Valencia). *Informes de La Construcción*, 63(523), 81–96. <https://doi.org/10.3989/ic.10.014>

- Nakamatsu, J., Kim, S., Ayarza, J., Ramírez, E., Elgegren, M., & Aguilar, R. (2017). Eco-friendly modification of earthen construction with carrageenan: Water durability and mechanical assessment. *Construction and Building Materials*, 139, 193–202. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.062>
- Parisi, F., Asprone, D., Fenu, L., & Prota, A. (2015). Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers. *Composite Structures*, 122, 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.060>
- Rivera-Gómez, C., Galán-Marín, C., & Bradley, F. (2014). Analysis of the Influence of the Fiber Type in Polymer Matrix/Fiber Bond Using Natural Organic Polymer Stabilizer. *Polymers*, 6(4), 977–994. <https://doi.org/10.3390/polym6040977>
- Sharma, V., Vinayak, H. K., & Marwaha, B. M. (2015). Enhancing compressive strength of soil using natural fibers. *Construction and Building Materials*, 93, 943–949. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.065>
- Zaimoğlu, a. Ş., Akbulut, R. K., & Arasan, S. (2016). Effect of Freeze-Thaw Cycles on Strength Behavior of Compacted Chicken Quill-Clay Composite in Undrained Loading. *Journal of Natural Fibers*, 13(August), 299–308. <https://doi.org/10.1080/15440478.2015.1029188>

### **Normativas**

- AENOR (2008). Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones métodos de ensayo. UNE 41410. Madrid (España)
- AENOR (2011). Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11: Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería de hormigón celular curado en autoclave, piedra artificial y natural, y de la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería. UNE-EN 772-11. Madrid (España)

### **Tesis**

- Falceto, J. J. (2012). Durabilidad de los bloques de tierra comprimida. Evaluación y recomendaciones para la normalización de los ensayos de erosión y absorción. *Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid*, 800, 1–5.
- Galán Marín, C. (2001). Caracterización de un mortero polimérico con resina de poliéster insaturado y árido de albero para su aplicación en construcción / <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/23931>
- García, M. A. (2011). Desarrollo De Un Nuevo Ladrillo De Tierra Cruda, Con Aglomerantes Y Aditivos Estructurales De Base Vegetal Trabajo, 60.
- Yuste, B. (2009). *Arquitectura de tierra*. Trabajo fin de máster Arquitectura Energía y Medio Ambiente.

### **Patentes**

- Galán Marín Carmen, Rivera-Gómez, C. (2012). Patente WO2012101299A1.

## Revistas Virtual

MacLeod, F. (2015). "Manhattan del desierto": Shibam, la antigua ciudad de rascacielos de Yemen | Plataforma Arquitectura. Retrieved April 24, 2017, from <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/771311/manhattan-del-desierto-shibam-la-antigua-ciudad-de-rascacielos-de-yemen>

Prieto, N. (2012). Mezquita de Djenné | TECTÓNICAblog. Retrieved April 24, 2017, from <http://tectonicablog.com/?p=52731>

Ramos, V. (2015). Zigurat de Ur Comentario - Aula de Historia. Retrieved April 24, 2017, from <http://www.auladehistoria.org/2016/01/zigurat-de-ur-comentario.html>

## Imágenes

[Figura 1]: A. Zigurat de Ur. Ramos, V. (2015). Zigurat de Ur Comentario - Aula de Historia. Retrieved April 24, 2017, from <http://www.auladehistoria.org/2016/01/zigurat-de-ur-comentario.html>  
B. Mezquita de Djenné. Prieto, N. (2012). Mezquita de Djenné | TECTÓNICAblog. Retrieved April 24, 2017, from <http://tectonicablog.com/?p=52731> (Página 5)

[Figura 2]: Shibam. MacLeod, F. (2015). "Manhattan del desierto": Shibam, la antigua ciudad de rascacielos de Yemen | Plataforma Arquitectura. Retrieved April 24, 2017, from <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/771311/manhattan-del-desierto-shibam-la-antigua-ciudad-de-rascacielos-de-yemen> (Página 5)

[Figura 3]: A. Adobe. Salinas, E. (2014). Adobe la forma artesanal de hacer casas | Noticiasnet. Retrieved April 24, 2017, from <http://old.nvnoticias.com/oaxaca/vida/tendencias/224620-adobe-forma-artesanal-hacer-casas>  
B. Molde de Adobe. Yuste, B. (2009). *Arquitectura de tierra*. Máster Arquitectura Energía y Medio Ambiente. (Página 6)

[Figura 5]: B. Tapia. Yuste, B. (2009). *Arquitectura de tierra*. Máster Arquitectura Energía y Medio Ambiente. (Página 8)

[Figura 6]: A. Adobera. Maldonado Ramos, L., Castilla Pascual, F., Vela Cossío, F., Rivera Gómez, D., & Gómez, D. R. (2001). Performance and energetic cost in the construction of adobe and compressed soil block walls. *Informes de La Construcción*, 53(473), 27–37.  
B. BTC. Cruz Vasquez, J. C. (2015). Construcciones en Bct, Bse &quot;bloques en Tierra en Suelo Estabilizado&quot; | Ideas Construcción Casa. Retrieved June 14, 2017, from <https://proyectos.habitissimo.com.co/proyecto/construcciones-en-btc-bse-bloques-en-tierra-en-suelo-estabilizado> (Página 9)

## Imágenes de la autora

[Figura 4]: A. Esquema adobe armado. B. Esquema adobera. (Página 7)

[Figura 5]: A. Esquema tapia de tierra calicostrada. (Página 8)

[Figura 7]: A. Suelo rubio. B. Suelo negro. C. Suelo rojo. (Página 13)

[Figura 8]: A. Lana de oveja sin trabajar. B. Lana de oveja siendo preparada. (Página 14)

[Figura 9]: A. Alginato. B. Alginato en polvo. (Página 15)

[Figura 10]: Agua en la báscula para su utilización. (Página 16)

[Figura 11]: A. Recipientes utilizados y báscula. B. Materiales pesados. C. Lana de oveja deshilachada. (Página 17)

[Figura 12]: A. Lana de oveja y arcilla. B. Mezcla de lana y arcilla con agua (Página 17)

[Figura 13]: A. Mezcla con alginato. B. Mezcla para las probetas terminada. (Página 18)

[Figura 14]: A. Medidas probetas prismáticas. B. Probeta prismática. (Página 18)

[Figura 15]: Proceso de funcionamiento de la prensa y fabricación de las probetas prismáticas. (Página 18)

[Figura 16]: A. y B. Probetas prismáticas terminadas. (Página 19)

[Figura 17]: A. Medidas probetas baldosa. B. Probeta baldosa (Página 19)

[Figura 18]: A. y B. Prensadora hidráulica para probetas baldosas. (Página 20)

[Figura 19]: A. y B. Probetas baldosas finalizadas en proceso de secado. (Página 20)

[Figura 20]: A. Recuento y clasificación de probetas. B. Probetas baldosas. C. Probetas prismáticas. (Página 21)

[Figura 21]: Medición de probetas prismáticas y baldosa mediante el uso de pie de rey. (Página 22)

[Figura 22]: A. Pesaje de probeta baldosa. B. y C. Pesaje de probetas prismáticas. (Página 23)

[Figura 23]: A. Volumenómetro de Le Chatelier. B. Volumenómetro preparado para el ensayo. (Página 25)

[Figura 24]: A. Probeta roja molida para el ensayo. B. Probeta amarilla molida para el ensayo. (Página 26)

[Figura 25]: A. Lectura de probetas baldosas mediante el lector de ultrasonidos. B. Lectura de probetas prismáticas mediante el lector de ultrasonidos. (Página 27)

[Figura 26]: Probetas para el ensayo de humectación/secado. (Página 32)

[Figura 27]: A. Probeta amarilla durante la realización del ensayo. B. Probeta roja durante la realización del ensayo. C. Probeta gris durante la realización del ensayo. (Página 32)

[Figura 28]: A. Primer ciclo. B. Tercer ciclo. C. Quinto ciclo. (Página 32)

[Figura 29]: A. Ciclo seis, probeta gris. B. Ciclo seis, probeta roja. C. Ciclo seis, probeta amarilla. (Página 33)

[Figura 30]: A. Probeta roja tras el secado. B. Probeta amarilla tras el secado. C. Probeta gris tras el secado. (Página 33)

[Figura 31]: Esquema de la norma UNE, ensayo de capilaridad. (Página 36)

[Figura 32]: A. Probetas de suelo rojo. B. Probetas de suelo rubio. C. Probetas de suelo negro. (Página 36)

[Figura 33]: Probetas tras pasar las 24 horas en la estufa ventilada. (Página 37)

[Figura 34]: A. Probetas sumergidas en el agua al inicio del ensayo. B. Probetas durante el ensayo. (Página 37)

[Figura 35]: A. B. y C. Probetas durante los 10 minutos del proceso de ensayo. (Página 38)

[Figura 36]: A. Peso en la báscula de las probetas tras el ensayo. B. Aspecto de las probetas tras el ensayo. (Página 38)

[Figura 37]: Esquema de la norma UNE, ensayo de erosión. (Página 41)

[Figura 38]: A. Probetas baldosas. B. Probetas prismáticas. (Página 42)

[Figura 39]: A. y B. Probetas prismáticas rojas durante la realización del ensayo. C. y D. Probetas prismáticas grises durante la realización del ensayo. (Página 43)

[Figura 40]: A. B. C. y D. Probetas baldosas grises durante el ensayo. (Página 43 - 44)

[Figura 41]: A. Probetas prismáticas durante el ensayo. B. C. E. y F. Probetas prismáticas grises tras el ensayo. D. Probetas prismáticas rojas y amarillas tras el ensayo. (Página 44 - 45)

[Figura 42]: A. Probetas grises secas tras el ensayo. B. Probetas amarillas secas tras el ensayo. C. Probetas rojas secas tras el ensayo. (Página 45)

[Figura 43]: A. Probeta baldosa gris tras el ensayo. B. Probeta baldosa roja tras el ensayo. C. Probeta baldosa gris tras el ensayo. (Página 46)

[Figura 44]: A. Probetas baldosas rojas secas. B. Probetas baldosas amarillas secas. C. Probetas baldosas grises secas. (Página 46)