

“Evolución del comportamiento mecánico de bloques y baldosas de tierra comprimida estabilizada sometidas a heladicidad”



Prototipo de viviendas
modulares para profesores.
Gando. Francis Kéré [1]

Realizado por ALBA MACÍAS ESPADA

Grupo Docente D:

- M^a del Carmen MArtínez Quesada
- Zacarías de Jorge Crespo
- Carmen Galán Marín (Tutora)

Universidad de Sevilla
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE ARQUITECTURA (E.T.S.A)



PRÓLOGO

- Abstract. Palabras claves.....	1
- Introducción.....	2
A. Antecedentes y consecuencias.....	2
B. Motivación.....	3
- Objetivos generales y específicos.....	4
- Metodología de trabajo.....	6

ÍNDICE

1. Construcción con tierra.....	9
1.1 Introducción.....	9
1.2 Principios básicos. Tierra como material de construcción.....	10
1.3 Sistemas constructivos.....	12
- Paredes monolíticas.....	13
o Cob o modelado directo.....	13
o Bahareque.....	14
- Diseños especiales.....	14
o Muros con tubos de cartón.....	15
o Muros de mangueras rellenas con barro.....	15
o Muros de estacas enrolladas en barro.....	16
o Muros de barro proyectado.....	16
- Unidades de construcción.....	17
o Adobes.....	17
o Adobones y muros antisísmicos de adobe.....	17
o Bloques de tierra comprimida (BTC)	18
o Bloques de tierra comprimida estabilizada (BTCE).....	19
2. Problemática existente.....	20
2.1 Cambio de conciencia.....	22
2.2 Materiales industrializados frente al barro. Ventajas e inconvenientes.....	24

3. BTCE en la actualidad.....	28
3.1 ¿Qué es un BTCE?.....	28
3.2 Componentes.....	29
- Suelos.....	29
- Agua.....	32
- Estabilizantes: mecánicos, químicos y físicos.....	32
3.3 Otras investigaciones.....	38
4. Planteamiento experimental.....	42
4.1 Introducción metodológica.....	42
4.2 Proceso de elaboración de probetas.....	42
4.3 Dimensiones de las probetas.....	45
4.4 Ensayos de caracterización.....	47
- Densidad aparente.....	47
- Ultrasonidos.....	51
4.5 Ensayos de comportamiento frente al agua.....	54
- Resistencia a ciclos de hielo/deshielo.....	54
4.6 Ensayos de comportamiento mecánico.....	61
- Resistencia a flexión tras heladicidad.....	61
- Resistencia a compresión tras heladicidad.....	67
5. Conclusiones.....	77
- Líneas futuras de investigación.....	80
6. Apéndice.....	82
A. Índice de ilustraciones.....	82
B. Índice de tablas.....	87
7. Bibliografía y referencias.....	87

Muro realizado mediante bahareque [2]



AGRADECIMIENTOS:

Tras la realización de este positivo trabajo de investigación, le agradezco la realización y conclusión de este trabajo :

A mi tutora de TFG Carmen Galán Marín, quien junto al Departamento de Construcciones Arquitectónicas y otros profesores de la Universidad de Sevilla y colaboradores, apostaron por este nuevo proyecto de investigación, y quienes con sus esfuerzos y dedicación han conseguido que esta vía de obtención de un nuevo material respetable con el medio ambiente siga avanzando. Además, agradezco que, tanto con el trabajo de mis compañeros como el mío, hayamos podido unirnos a una buena causa.

Al profesor Carlos Rivera, también considerado tutor, quien con sus explicaciones, disponibilidad y saber ha conseguido que la fase experimental y por consiguiente el desarrollo del trabajo saliese hacia delante. Gracias también a nuestros compañeros de clase y trabajo en laboratorio, Javier y Elena, quienes nos proporcionaron su ayuda durante la elaboración de probetas.

Pero sobre todo a mi familia y amigos, quienes me han ayudado y empujado para ir solventando mis metas granito a granito.

Muro de la biblioteca del colegio
de Gando realizado con BTCE [3]



Resumen:

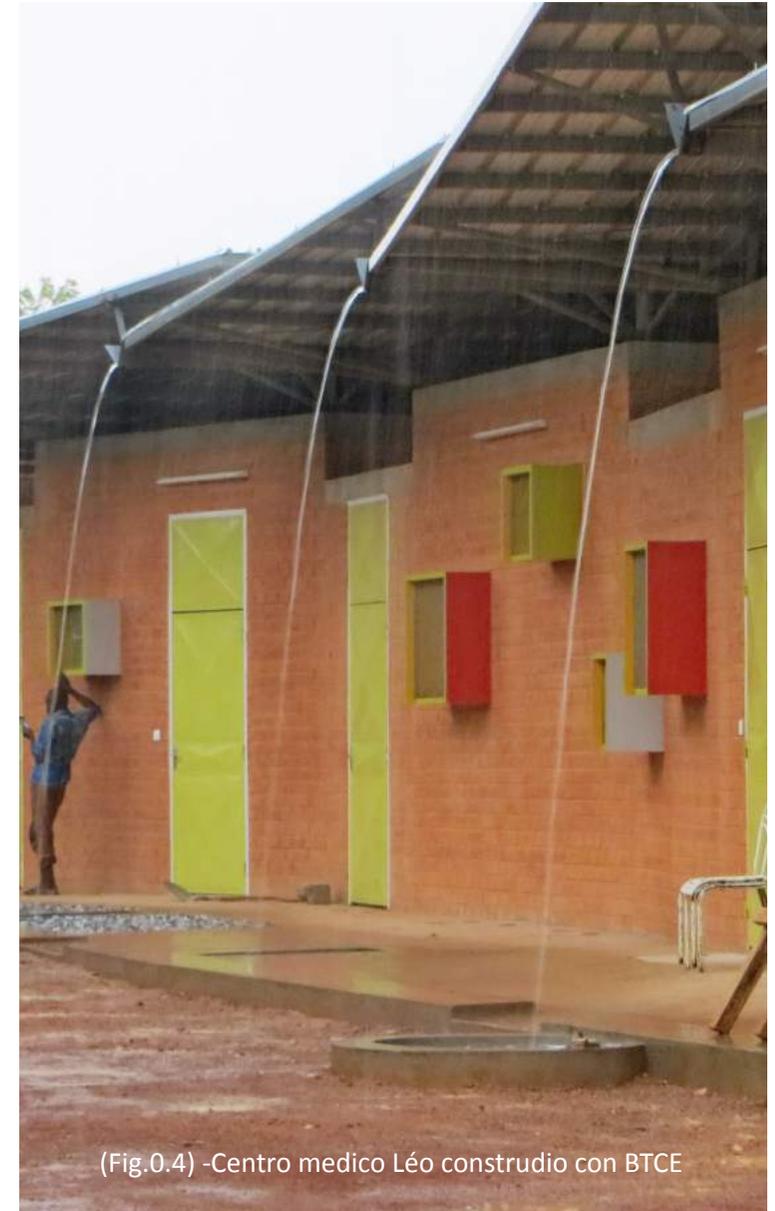
El presente estudio de investigación trata de evaluar el comportamiento de un nuevo bloque de tierra comprimida estabilizada mediante compuestos naturales frente la acción del hielo, pretendiéndose así conseguir un nuevo material respetable con el medio ambiente. Además, se han realizado los ensayos de resistencia mecánica tras haber sufrido ese proceso. Para ello se han utilizado dos piezas de diferente tamaños compuestas de agua, alginato como polímero natural, refuerzo con fibras naturales de lana de oveja y tres tipos de arcilla diferentes (Rubia, Roja y Negra) procedentes de la localidad andaluza de Bailén. En ambos casos de tamaños, las dosificaciones utilizadas son las mismas.

Se ha partido de una recopilación de información sobre la construcción con tierra, basada en diversas geografías del mundo, hasta llegar a nuestros días donde la nueva visión sostenible de la arquitectura ha dado lugar a la revisión tanto de los materiales como los medios utilizados. Con ello, se pretende evitar la contaminación y destrucción de los medios naturales disponibles con los que hoy en día contamos. Además, se han recogido las diferentes técnicas constructivas centrándonos más específicamente en los bloques de tierra comprimida estabilizada.

Con el fin de saber el comportamiento que estos bloques pueden tener frente a condicionantes de exposición exterior tales como el agua y las bajas temperaturas (Fig. 0.4), se han realizado los ensayos de caracterización referentes a la densidad real y a la prueba de ultrasonidos. Posteriormente, tras verse sometidas todas las probetas a ciclos de hielo/deshielo, se han obtenido los resultados mecánicos (flexión y compresión) de las diferentes piezas. Además, se han comparado los resultados con otros trabajos relacionados con el tema de investigación realizados en otras zonas del mundo.

Palabras clave:

Bloque de tierra comprimida (BTC); bloque estabilizado; polímero natural; hielo/deshielo; resistencias mecánicas



(Fig.0.4) -Centro medico Léo construido con BTCE



(Fig.0.5) Almacenes construidos con adobes, templo de Ramses II



(Fig.0.6) Proceso de extracción de arcilla en canteras



(Fig.0.7) Túnel de secado y cocción de ladrillos convencionales

INTRODUCCIÓN:

A. ANTECEDENTES Y CONSECUENCIAS:

Desde los primeros rastros de civilización, existe constancia de que el ser humano utilizaba la tierra para construir y levantar sus ciudades. Como ejemplo de ello, podemos remitirnos a las construcciones habitacionales egipcias y funerarias donde se realizaban los bloques a mano y se dejaban secar al sol durante un determinado tiempo (Fig. 0.5). Con el tiempo, el avance tecnológico y otros factores de relevancia han originado que la construcción con tierra fuese en detrimento con respecto a otros medios de construcción. Sin adentrarnos en la utilización de madera, acero, entre otros, la construcción con tierra ha derivado en nuestros días en la elaboración de ladrillos cocidos, los cuales se consiguen cuando la arcilla finalmente experimentan un proceso de transformación como su cocción.

En la actualidad, es primordial conseguir el bienestar de los habitantes mediante construcciones con unos mínimos de calidad y confort. Para ello, se están elaborando y utilizando masivamente ladrillos cocidos. La obtención y elaboración de este material de construcción, muy demandado sobre todo en las últimas décadas con el boom inmobiliario, está originando numerosos inconvenientes a lo largo de su ciclo de vida. Comenzando con la propia extracción de la materia prima (Fig. 0.6), donde su acelerada desnaturalización produce graves impactos ambientales y visuales en la naturaleza. Esto además, se ve agravado por el ser humano cuando la actividad productiva cesa y no se realiza ninguna otra actividad de reconstrucción o mejora del medio natural.

Debido a su necesidad de cocción a altas temperaturas para alcanzar sus características de resistencias óptimas, es necesario una elevada cantidad de consumo de combustibles que den funcionamiento a las calderas. Con ello, se consigue un alto aporte de gases nocivos al medio ambiente durante su actividad (Fig. 0.7). Por último, tras su vida útil en los edificios y tras su repercusión en el medio ambiente, deberíamos promover su posible reutilización o biodegradado de manera que se redujese al máximo el daño realizado al ecosistema una vez terminada su función. Esto se desarrollará más extendidamente en el apartado 2.2 del presente documento.

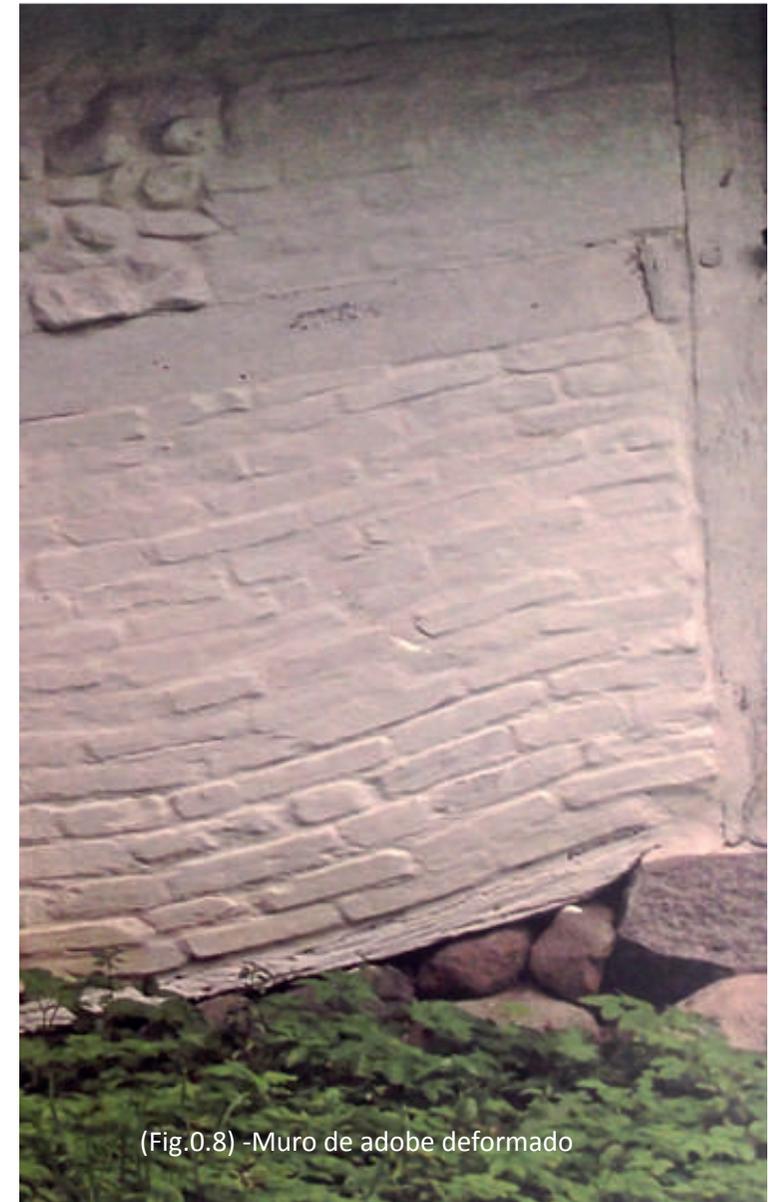
B. MOTIVACIÓN:

Hoy en día, el proceso de construcciones sin medida ha originado un bucle en el que la necesidad de ladrillos cocidos se ha convertido en una actividad tan rentable para los fabricantes, que no se está teniendo en cuenta las consecuencias que ello está originando. Se podría decir que si este ritmo de construcciones y modificaciones al medio ambiente sigue, podríamos llegar al punto en el que nosotros mismos destruyamos nuestro entorno.

A pesar del desconocimiento por mi parte acerca del tema tratado, y posiblemente al igual que el de otras muchas personas, se pretende conseguir el estudio, análisis y propuesta de nuevas posibilidades de mejora y ayuda al medio ambiente. Esto me ha llevado a conocer la aparición de nuevas vías de trabajo con otros materiales sostenibles que sustituyan al ladrillo convencional y a su proceso de elaboración.

Por ello, siguiendo la línea del grupo de investigación TEP-206 "*Tecnologías de los Materiales y Sistemas Constructivos: Caracterización, Mantenimiento, Restauración y Sostenibilidad*" de la Universidad de Sevilla se trabajará en el nuevo proyecto "*Particiones Arquitectónicas, Naturales, Ecoeficientes y Ligeras (PANEL)*" como Proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía con referencia P12-TEP-1988, para conseguir la realización de un nuevo producto, obtenido a partir de elementos naturales que no necesiten cocción y que puedan tener las mismas prestaciones que un ladrillo convencional. Este nuevo producto podemos conocerlo como "bloque de tierra comprimida estabilizada" (BTCE). Se trata de un elemento dejado en el olvido y que comienza a resurgir en la actualidad. Para ello, el estudio de numerosas variantes en todo el mundo está dando lugar a la aparición de multitud de resultados aún por analizar. En nuestro caso, se utilizan suelos estabilizados a base de polímeros naturales (alginato) y fibras animales (lana de oveja) de manera que se consiga una alternativa más ecológica.

Los estudios realizados hasta el momento, han supuesto el comienzo del trabajo en una dosificación de compuestos ya establecida y analizada, basada en intentos previos de otros autores [1][2][3][4] y siempre viéndose respaldada por la norma española UNE 41410-2008 [5] de "*Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*" elaborada por el comité técnico AEN/CTN 41 Construcción de AENOR.



(Fig.0.8) -Muro de adobe deformado



(Fig.0.9) Construcción tradicional realizada con adobe sobre zócalo de piedra

Objetivos generales y específicos:

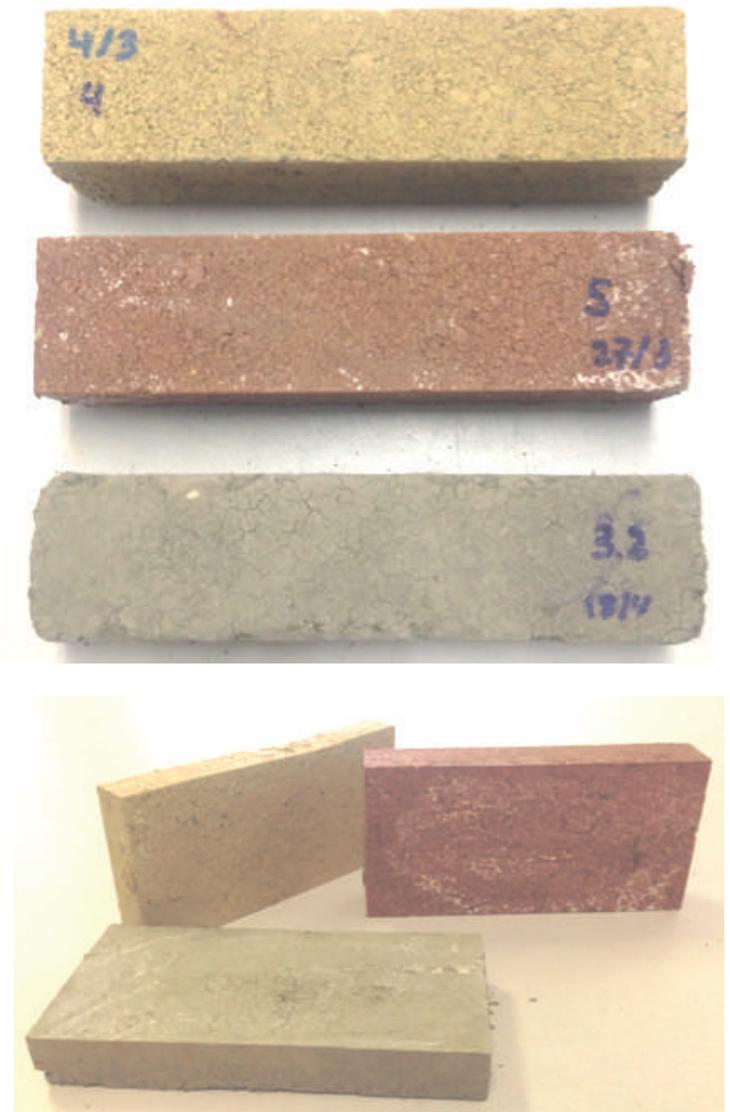
Tras el estudio desarrollado hasta el momento por el grupo de trabajo del departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Sevilla y partiendo de la breve introducción planteada y la problemática existente destacada, podemos decir que se establecen una serie de objetivos para el trabajo propuesto.

De una manera más amplia y general se propone:

- Debido a las carencias a lo largo de mi proceso formativo acerca de las construcciones con tierra y en relación a la variedad de posibilidades que ésta puede ofrecer, se pretende conseguir nuevos conocimientos sobre la construcción con tierra cruda, sus procesos constructivos e incluso las ventajas e inconvenientes que estas pudieran conllevar.
- Continuando con el trabajo que ha conseguido realizar hasta el momento el grupo de investigación de la Universidad de Sevilla en el proyecto "Particiones Arquitectónicas, Naturales, Ecoeficientes y Ligeras (PANEL)" acerca de la elaboración de nuevos bloques de tierra comprimida estabilizada, se pretende desarrollar una fase experimental partiendo de los datos hasta ahora conocidos y alcanzar el nivel de desarrollo de la investigación.
- Una vez alcanzado el nivel de cualificación necesaria para la continuación de este estudio se pretende avanzar con una metodología de trabajo experimental que aporte nuevos logros al proyecto financiado por la Junta de Andalucía
- Dadas las carencias con las que contamos a lo largo de nuestra formación académica acerca de pruebas a las que se ven sometidos los productos para comprobar el buen o mal comportamiento de los mismos, se pretende realizar diferentes actividades en el laboratorio que me permitan conocer los métodos de ensayo y validación de normas, tales como las UNE-EN de aplicación.

Por otro lado, de una **manera mucho más específica**, y en relación con los nuevos elementos creados:

- Dado que se van a realizar dos tipos de piezas mediante métodos y tamaños diferentes (Fig. 0.10), se pretende analizar cómo pueden influir los diferentes tamaños de las piezas en el comportamiento final de las mismas.
- Se pretende analizar los nuevos bloques frente a una situación en un ambiente exterior alterado por un condicionante climático como es la heladicidad, hasta este momento desconocidos en este tipo de producto.
- Una vez que las diferentes probetas han sido ensayadas frente a heladicidad se propone cuantificar la pérdida de resistencia que un bloque ha podido sufrir en relación a otro que se encuentra inalterado.
- Y por último, según los resultados obtenidos, en el caso que estos no fuesen adecuados, establecer las bases de su posible mejora posterior.



(Fig.0.10) Diferentes tamaños y suelos de las probetas a ensayar



(Fig.0.11) Conjunto de probetas realizadas para ensayar

Metodología de trabajo:

Todo material que deba utilizarse en la construcción debe someterse a diferentes ensayos según las normas UNE-EN, comprobando así que son aptos para su utilización. Con estos ensayos, se muestran las características físicas y mecánicas, así como su comportamiento frente a otros factores de relevancia. Ejemplos de estos otros factores son el comportamiento a la intemperie frente al agua y a las bajas temperaturas entre otros. Para conocer con más exactitud el comportamiento a lo largo de la vida útil de un nuevo material, debemos conseguir el máximo de datos posibles que nos ayuden a paliar sus carencias e imperfecciones.

Por ello, la elaboración del presente estudio se realiza siguiendo las tres fases siguientes: en primer lugar, una fase previa de investigación y documentación, seguida de una fase de trabajo experimental en el laboratorio y se finaliza con la fase de análisis, comparación y conclusión.

En la primera de las fases, la de investigación, se comienza con el estudio necesario para la obtención de artículos e información acerca del tema a tratar. Se realiza un análisis exhaustivo sobre la composición utilizada hasta el momento para la elaboración de los diferentes bloques en otros países, junto a los materiales utilizados. A partir de ello, se investiga sobre las propiedades, ensayos y resultados obtenidos por los expertos de la materia.

Una vez conocida toda la información necesaria acerca del tema a tratar y en paralelo se procede con la fase experimental donde se comienza a elaborar al menos 36 probetas que sirven para ensayar posteriormente. Éstas son elaboradas a partir de tres tipos de arcilla diferentes (Rubia, Roja y Negra) procedentes de la localidad andaluza de Bailén. Deberá haber un número mínimo de 6 probetas tipo prismáticas y otras 6 de tipo baldosa de cada tipo distinto de suelo a ensayar de manera que se tengan en cuenta sus tiempos de secado para posteriormente someterlas a ensayo. (Figura 0.11)

Una vez transcurrido su tiempo de curado (28 días), y tras adquirir las impresiones previas con respecto a su trabajabilidad, su capacidad de absorción de agua durante el amasado y sus aspecto inicial, se procede a someterlas a una serie de ensayos de caracterización que nos proporcionen los datos referentes a sus densidad aparente y velocidad de ultrasonidos. (Según la norma

UNE 12504-4. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.) [6]

Posteriormente se procederá con el ensayo de resistencia a ciclos de hielo/deshielo de todas las probetas previamente secadas en estufas. Para ello, en referencia a cómo deben comportarse los bloques de tierra comprimida en muros y tabiques no existe especificación concreta alguna en la normativa *UNE 41410-2008*, por lo que esta normativa te remite a cada fabricante para evaluar sus prestaciones. Como consecuencia, se tomará como referente la norma *UNE 67028:1997* donde se definen las directrices del ensayo de *heladicidad en bloques cerámicos de arcilla cocida* y se propondrá una adaptación experimental que sirva para establecer los criterios necesarios de comportamiento de nuestro bloques. [7]

Una vez obtenidos los resultados frente a heladicidad se procederá a calcular las resistencias tanto a flexión como a compresión de las probetas afectadas (Figura 0.12), realizando posteriormente una comparación entre los datos obtenidos de las probetas alteradas y otras no alteradas. Por la falta de datos recogidas en la UNE de bloques de tierra comprimida, se tomarán como referencias para este apartado la *UNE 1015-11:2000 .Métodos de ensayo de morteros para albañilería. Parte 2. Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido [8]; UNE 772-1. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión. [9]*

Por último, y una vez obtenido todos los resultados pertinentes de los ensayos realizados se procederá a la creación de tablas que recojan todos esos datos y que nos faciliten la correcta comparación entre los tres tipos distintos de probetas realizadas a partir de diferentes arcillas, obteniendo como conclusión aquella que sea la que mejor se comporte a tales inclemencias. Por otro lado, se pretende comparar dichas probetas con las elaboradas con diferentes materiales en otras zonas de mundo. En cuanto a los resultados obtenidos del ensayo de ultrasonidos se procederá a la comparación de datos antes y después de verse sometidas a heladicidad. Por otro lado, en relación a las resistencias de compresión y flexión también se procederá a su análisis para detectar la pérdida de resistencias originada por los ciclos de hielo/deshielo. Además, de una manera menos detallada se propondrá, en el caso en que los resultados no fuesen aconsejables, una alternativa de mejora.



(Fig.0.12) Prensa multiensayo para realizar los ensayos de compresión y flexión

(Fig. 0.13) Muro levantdo mediante sistema constructivo de tierra



1 CONSTRUCCIÓN CON TIERRA

1.1 INTRODUCCIÓN

Desde que existe constancia de la aparición de las primeras civilizaciones antiguas, podemos decir que ya se utilizaba la tierra como material de construcción, sobre todo en aquellos en los que contaba con un clima seco-cálido y templado. Se puede decir que la tierra es el material natural para construir más utilizado e importante en las zonas del mundo.[13]

Siempre ha existido una relación muy estrecha entre las personas y la tierra ya que se consideraba y considera aún hoy en día, como el principal elemento de sustento desde el cual se extraían los alimentos y el material para elaborar enseres. Con la sedentarización de los grupos y el desarrollo de la agricultura, se buscaron nuevos lugares que les protegiesen de las inclemencias del tiempo y los depredadores, llevándoles a la creación de refugios más duraderos. La relación de estos asentamientos con la cercanía a los ríos originó que se utilizase la tierra húmeda para la fabricación de estos espacios. Existe constancia de ello, y de su mezcla con plantas y pastos en los hallazgos arqueológicos de la civilización nurágica encontrados en Cerdeña que datan de la Edad de Bronce Medio (Siglo XIV a.C) [5]

Según algunos autores [14] [15] se estima que las diferentes técnicas de construcción con tierra se originaron de una manera independiente en cada lugar pero que con el movimiento de los pueblos se difundió y perfeccionó el desarrollo de dichas técnicas .(Fig. 1.1.) El paso del tiempo afianzó los nuevos conocimientos de utilización de tierra consiguiendo así en algunas ocasiones altos niveles de confort y calidad climática. Ello originó mejoras económicas y ambientales, además de permitir una gran capacidad y variabilidad estética y formal.

Estas construcciones antiguas no serian solo utilizadas para la creación de viviendas como por ejemplo el caso de los yacimientos de vacceo de Pintia en Padilla del Duero (Valladolid) que datan del siglo IV a.C, (Fig.1.2) sino también para la creación de fortalezas y obras religiosas. Se pueden destacar como algunos claros ejemplos del uso de la tierra para la construcción en las bóvedas realizadas con adobes en el Templo Mortuorio de Ramsés II en Egipto (Fig. 0.5); La Ciudadela Arg-é



(Fig. 1.1) Zonas de origen del uso de la tierra como material de construcción. Difusión de las técnicas de construcción en todo el mundo.



(Fig. 1.2) Excavación arqueológica de estructuras de tierra cruda



(Fig. 1.4) La ciudad de Ara-Bam en Irán. LA mayor estructura de tierra del mundo con zonas de hasta 2500 años.



(Fig. 1.5) Ciudades fortificadas construidas con tierra en el Valle de Draa (Marruecos, siglo XVIII)

Bam en Irán (Fig 1.4) o las ciudades fortificadas construidas con tierra en el Valle de Draa (Marruecos, s. XVIII) (Fig. 1.5). [16]

1.2 PRINCIPIOS BÁSICOS. TIERRA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.

Hasta el momento se ha hablado acerca de la construcción con tierra pero para ir adentrándonos un poco más en el tema, se puede decir que , a pesar de haberle dado diferentes nombres a lo largo del tiempo, a esta tierra utilizada se le conoce como barro. [16]

Según G. Minke [17] se describe al barro como una tierra arcillosa utilizada en estado crudo para la construcción y compuesta principalmente por la unión de arcilla, limo, arena y otros agregados en menos medida como la grava. Todos ellos se consideran partículas de tamaño inferiores a 20mm ideales para la construcción siendo las restantes descartadas. En relación a la función que cada uno de sus componentes puede aportar a la unión, se puede decir que la mayor de las piezas es la grava, oscilando su tamaño entre los 20 y 2mm. Le proporciona la estabilidad al suelo y no sufre cambios significativos cuando es afectada por el agua. Por otro lado, la arena cuenta con 2-0,06mm. También se considera como una parte estable del suelo que al encontrarse en estado seco no muestra signos de cohesión pero que al verse afectadas ligeramente por el agua, la tensión superficial entre las partículas origina cohesión. Otro elemento que funciona de igual manera en referencia a la cohesión pero que se ve alterada con diferentes modificaciones de humedad originando cambios en el volumen son los limos (0,06-0.002mm). Y por último nos encontramos con la arcilla (>0,002mm). Es la parte más fina e inestable del suelo al originar grandes variaciones de volumen frente a la aparición de agua. Sufre ante la presencia de agua el hinchamiento y la fuerte contracción al secarse. [15]

La arcilla según su composición mineralógica se considera un mineral de estructura laminar hexagonal. Según esta composición mineralógica se pueden clasificar de diferente manera. (Figura 1.6) En primer lugar podemos encontrar la caolinita, con una firme unión entre sus partículas que impide la penetración de las moléculas de agua entre ellas y de ahí su estabilidad en presencia de agua. Por ello, cuenta con un bajo poder aglutinante y una baja retracción al secarse.

En segundo lugar nos encontramos con la montmorillonita, la cual cuenta con una unión entre retículas de mineral muy débil por lo que se permite el paso de las moléculas de agua originando así posibles inestabilidades. Por el contrario a la anterior, esta presenta un alto poder aglutinante y una elevada retracción al secarse.

Y por último nos encontramos con las illitas, de estructura parecida a la anterior pero con la capacidad de formar grumos al unirse con el agua reduciendo de esta manera su expansividad y mejorando mecánicamente su comportamiento. [18]

PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS:

Actualmente, para la utilización de un suelo como material de construcción, debe contar con el reconocimiento, aprobación y análisis de los resultados obtenidos en laboratorios especializados. Gracias a ello, se pueden establecer las propiedades tanto generales (físico y químicas) como específicas del material. Al no tratarse de un material estandarizado, su composición dependerá siempre del lugar de extracción, de ahí la importancia de controlar mediante ensayos sus características para poder modificarlas en el caso que fuese necesario.

En referencia a las propiedades físicas del barro se puede destacar su color, el cual dependerá, de su composición y lugar de procedencia como ya se ha especificado anteriormente. Otros aspectos a resaltar son su resistencia en seco, contracción al secarse el agua intersticial de sus poros, densidad aparente y permeabilidad.

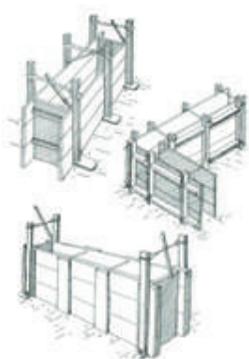
Por otro lado, las propiedades específicas del material se pueden relacionar con la *granulometría*, *cohesión*, *compresibilidad* y *plasticidad*. La *granulometría* establece las características en cuanto a tamaño y composición y se considera relativamente importante ya que clasifica el tipo de material a la hora de elegir la técnica constructiva más adecuada. La *plasticidad* tiene que ver con la capacidad de la tierra a ser moldeada mientras que la *compresibilidad* es por otro lado la capacidad que consigue reducir su cantidad de poros.



(Fig.1.6) -Ejemplos de arcillas de diferentes composiciones mineralógicas



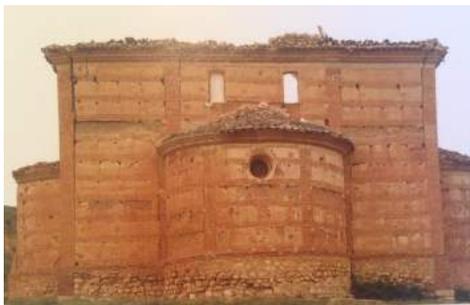
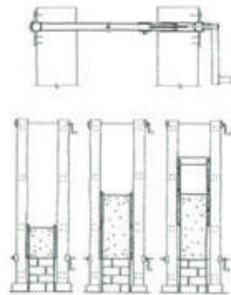
(Fig. 1.7) Construcción tradicional con muros de tapia



(Fig. 1.11) Encofrado ascendente de madera



(Fig. 1.8) Encofrado y mazos tradicionales para la ejecución de tapia



(Fig.0.9) Bandas de compactación, elevaciones entre cajas de encofrado y agujeros de travesaños.



Como conclusión de las principales características con las que cuenta este material se puede decir que su *resistencia a compresión* cuando el material se encuentra seco es alta mientras que al verse sometido a la acción del agua este se ve disminuido. [15] No presenta grandes prestaciones ante la *resistencia a tracción* y *deslizamiento*, y frente a la abrasión suele ser media en una consistencia seca y muy baja cuando se ha humedecido. La absorción capilar está relacionada con la densidad con la que cuenta el material de manera que si esta es alta la absorción será menor y si esta varía y es baja su posibilidad de absorción capilar aumentará. En relación a su comportamiento térmico se puede decir que se trata de un material con capacitación para almacenar el calor, contando con una conductividad y dilatación térmica media. Cuenta con la capacidad de absorber y desorber humedad muy rápido y en cantidades elevadas consiguiendo regular el clima interior. [15]

1.3 SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

El uso de la tierra cruda a lo largo de la historia para elementos constructivos derivó de la presencia y disponibilidad del material en el propio lugar sin la necesidad de tener que realizarle mucha transformación a la materia prima, no tener que transportarlo largas distancias y no necesitar excesivos conocimientos ni medios para proceder con la actividad. Se considera "tierra cruda" a aquella que no ha sufrido ninguna transformación industrial para su utilización en comparación con la tierra cocida que si ha conllevado un proceso de cambio industrializado como la cocción. [15] La evolución de los sistemas de construcción con tierra cruda se puede relacionar con la evolución de los materiales de construcción y los avances tecnológicos. [6] Por ello, existe un gran abanico de posibilidades de métodos de construcción.

Para clasificar los numerosos métodos y sus posibles variantes se dividirán en tres grupos. En primer lugar estará el grupo de las paredes monolíticas las cuales se conocen de dicha manera por la actividad de construir in situ una pared homogénea y lo más continua posible. Dentro de este grupo encontraremos el tapial, cob o modelado directo y el bahareque.

Por otro lado destacamos el grupo de construcciones especiales cuando se utilizan otros elementos alternativos que acompañen al barro para realizar los elementos, consiguiendo así una mejor

1. Construcción con tierra

configuración de montaje y adaptabilidad. Este grupo lo conforma por ejemplo los métodos de muros con tubos de cartón, mangueras rellenas con barro, estacas enrolladas en barro o un método más sofisticado como la proyección de barro.

Y por último, se destaca el tercero de los grupos, la construcción de unidades independientes que después se traban para conformar un determinado elemento. Dentro de este grupo encontraremos los adobes, los adobones y los bloques de tierra comprimido junto a su variante, los bloques de tierra comprimidos estabilizados.

1.3.1 PAREDES MONOLÍTICAS DE TIERRA

A. TAPIA:

La técnica del tapial o también conocida como *tapia*, *terre pisé* o *rammed earth*, consiste en la colocación de un encofrado en el que se va vertiendo tongadas de 10-15 cm de barro húmedo compactado mediante un pisón. [13] (Figura 1.7-13) Existe constancia de su utilización en Asiria por los restos encontrados en cimientos datados del año 5000 a.C. [16]

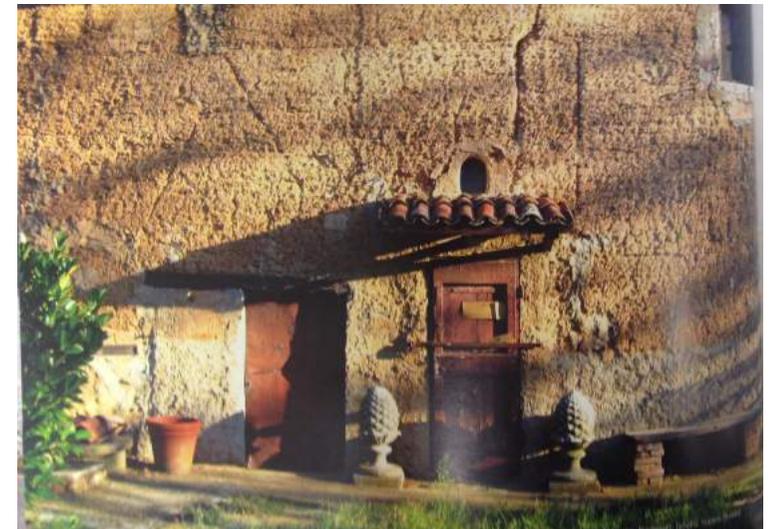
Para su ejecución se disponen de dos tablonces desmontables de madera paralelos, separados y unidos mediante travesaños que atraviesan el muro completamente. (Figura 1.8) Estas oquedades originadas durante su elaboración, una vez concluido el trabajo deben ser rellenados. (Figura 1.9). Actualmente el avance de las técnicas constructivas y los medios han originado encofrados más sofisticados y medios de apisonamiento mecánicos más cómodos. (Figura 1.10) La tierra que se utiliza para realizarla se puede distinguir de la utilizada para los adobes. Esta se considera más arenosa y con una dosificación granulométrica con gran diversidad de áridos de todos los tamaños. [15]

Existe una variante de este método el cual incorpora de manera experimental bambú en el interior del tapial para solventar los posibles problemas sísmicos y consiguiendo una mayor resistencia a la fuerza horizontal. Las grietas que posteriormente aparecieran tras su secado funcionarían como juntas de dilatación de la misma. (Figura 1.12)



(Fig 1.10) Muros de tapia circulares, con oquedades de travesaños.

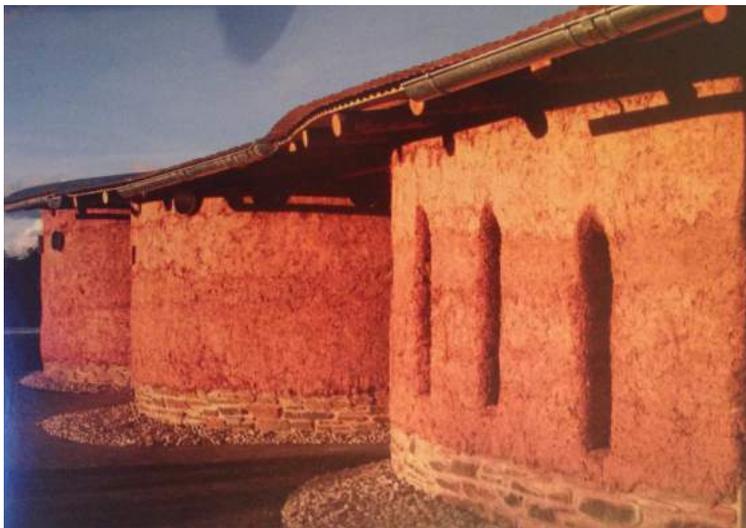
(Fig 1.12) Tapia estabilizada frente al sismo con bambú.



(Fig 1.13) Muro de tapia en granja. Piedmont.



(Fig. 1.14) Vivienda realizada mediante Cob



(Fig 1.15) Vivienda moderna construida de forma circular.

B. COB O MODULADO DIRECTO:

Método de construcción que consiste en la aplicación de la mezcla de suelo húmedo con paja directamente sobre el terreno. En este caso el suelo tiende a ser más arenoso que el que se utiliza para la construcción de adobes. Contiene paja corta o hierba agregada a la mezcla de manera que se consigue aumentar la resistencia [14] y reducir el agrietamiento por retracción durante el secado, considerado como su principal desventaja. [17] En este caso las tongadas suelen ser de mayores dimensiones abarcando entre los 40-60 cm de espesor (Fig. 1.14). Se aplica a base de una sucesión de bolas de barro que también necesitan ser apisonadas. Antes del aporte de la mezcla para la siguiente tongada deben dejarse secar la tongada previa. Suelen contar con espesores entre 0,5 y un metro de espesor, medida que puede ir estrechándose conforme se va levantando en altura. Debido a su moldeabilidad y deformabilidad, este material proporciona la posibilidad de crear elementos curvos tanto en su plano horizontal como vertical. (Fig.1.15)

C. BAHAREQUE:

Técnica de construcción de muros que utiliza el barro lanzado sobre un paramento vertical realizado anteriormente. Necesita de una estructura portante conformada por unos elementos verticales y horizontales que crean una malla. (Fig. 1.16) Los materiales normalmente utilizados para ello suelen ser troncos de madera y ramas más delgadas.

Posteriormente, el barro se mezcla con paja picada o incluso se pueden utilizar otro tipo de fibras (Fig. 1.17). Se realizan pequeñas bolas amasadas que se lanzan y compactan frente a la estructura desarrollada (Fig. 1.18). Esta actuación se repetirá las veces necesarias para que todo el elemento estructural quede recubierto en todo su recorrido con una capa de al menos 2cm de espesor (Fig. 1.19). Esto se debe cumplir ya que tras el proceso de secado, la mezcla sufre fisuras que deben ser reparadas para que su durabilidad sea mayor. [16] Para comprobar si la consistencia de la mezcla utilizada es la adecuada se tira una de las bolas desde un metro de altura sobre una plataforma rígida que permita posteriormente la medición del diámetro expandido de la bola tras su colisión. Si el diámetro de esta plasta aumenta hasta los 13-14 cm será apropiada para utilizarse sobre el paramento. Si el barro es muy arenoso y contiene poca arcilla entonces sería mejor el aporte de estiércol a la mezcla consiguiendo así aumentar su adherencia. [17]

- (Fig. 1.16) Moldeado de barro sobre una estructura realizada de madera
(Fig. 1.17) Mezcla de barro con paja fina y estiércol
(Fig. 1.18) Rellenado del paño con mezcla presionada
(Fig. 1.19) Cubrición completa de al menos 2 cm
(Fig. 1.20) Anclaje de tubos de cartón a pórticos de madera
(Fig. 1.21) Recubrimiento de tubos con mezcla de al menos 2 cm



1.3.2 SISTEMAS ESPECIALES :

A. MUROS CON TUBOS DE CARTÓN:

Se trata de una técnica experimental que consiste en un sistema de postes de madera anclados a postes donde se acopian tubos de cartón rellenos de mezcla, a modo de moldes.[17] Estos tubos de cartón suelen ser los desechos de rollos de papeles, telas o plásticos. Los tubos se disponen entre travesaños de madera fijados de manera que entre varios tubos exista una separación de al menos 5 cm entre ellos. (Figura 1.20) Posteriormente se empieza a incorporar la mezcla de paja y arcilla entorno a los tubos de manera que presionándola, los tubos siempre queden recubiertos al menos con una capa de 2 cm. (Figura 1.21) En el caso en que los tubos sean muy lisos y la mezcla no se adhiera correctamente, se propone utilizar tubos que tengan una superficie mas rugosa o pintarlos con una lechada rica en arcilla para solventar el problema. [17] La principal ventaja que este sistema nos puede proporcionar es que con materiales reciclados se puede construir relativamente rápido un muro, secándose con gran rapidez y consiguiendo un buen aislamiento térmico.



(Fig. 1.22) Sacos de polietileno o tela para rellenar de mezcla
(Fig. 1.23) Relleno con bomba



(Fig.1.24) Apisonado y mojado de la saca con el propio material
(Fig. 1.25) Apilado de las diferentes sacos



(Fig.1.26) Construcción de ejemplo mediante sacos rellenos

B. MUROS DE SACOS RELLENOS CON BARRO:

Nueva técnica desarrollada en Alemania por el arquitecto Nader Kalili en 1992.[13] Se trata de la utilización de mangueras de polietileno de sección tubular normalmente utilizadas para el almacenaje y transporte de arroz. (Fig. 1.22) En otros casos, se utilizaron sacos de tela elástica de algodón. La técnica consiste en el relleno de esos sacos con una mezcla de barro alivianado. Para el relleno de las mallas en primer lugar se introduce de forma manual con la ayuda de embudos. (Fig. 1.23) Con el paso del tiempo y la aparición de nuevas maquinarias, se utilizó una bomba para un llenado más rápido. Una vez alcanzada la longitud necesaria se cortan los extremos y se cierran mediante nudo impidiendo la salida del material en su movimiento. (Fig. 1.24) Para colocarlas en su posición final estas mallas se frotan con la intención de que parte del material moje el recubrimiento y al disponerse unas sobre otras consigan adherirse y secarse conjuntamente sin problemas. (Fig. 1.25) Uno de los principales inconvenientes de este método sería su lento proceso de secado el cual origina que solo se puedan disponer entre 3 y 5 capas por día. (Fig. 1.26-27)

C. MUROS DE ESTACAS ENROLLADAS EN BARRO:

Técnica tradicional en los países como Alemania y Francia. Esta técnica consiste en cubrir estacas de madera con una mezcla de paja y bajo de manera que la estaca quede completamente embebida en la mezcla. Esta técnica requiere menos mano de obra que el bahareque y cuenta con la ventaja que al endurecer casi no aparecen fisuras de retracción. [17] Se puede ejecutar de dos formas diferentes. Se puede introducir la estaca cubierta de paja en el barro sacándola con un movimiento giratorio o de manera que la paja quede embebida en barro enrollada en una estaca.

Una variante estudiada en la universidad de Kassel, Alemania, trató sobre la unión de esta mezcla con una malla plástica comúnmente utilizada para reforzar revocos. Para ello, se colocó una capa de 2 cm sobre la malla en ambas caras y se enrolló alrededor de un palo de bambú conformando así el elemento de relleno. De esta manera, la aparición de fisuras de retracción no se produjo. (Figura 1.28-29-30)

1. Construcción con tierra

D. MUROS DE BARRO PROYECTADO:

Se considera una de las técnicas más novedosas de los sistemas constructivos expuestos en este trabajo. La adaptación de la técnica de proyección del hormigón ha supuesto una mejora en la ejecución de muros de tierra también. Por ello, David Easton en California [17], ha propuesto la realización de muros antisísmicos con una mezcla de arcilla estabilizada con cemento que se aplica de manera proyectada sobre una malla electrosoldada situada en un encofrado. Para la realización de este tipo de sistemas es necesario la utilización de materiales más sofisticados tales como por ejemplo un compresor para la correcta proyección del elemento de una manera rápida. (Figura 1.31-32-33)

1.3.3 CONSTRUCCIÓN DE UNIDADES:

En contraposición a los métodos monolíticos de construcción nos encontramos con el grupo de construcción de unidades que consiste en la elaboración de unidades independientes de menor tamaño y manejabilidad. Estas unidades se entienden como bloques construidos a partir de tierra que se dejan secar al sol antes de ser utilizados para una determinada construcción.

A. ADOBES:

Junto a la técnica constructiva del tapial, se trata del sistema constructivo con tierra más arraigado de la Península Ibérica. [13] Un adobe consiste en la elaboración de un bloque de barro prismático de diferentes dimensiones que se realiza mediante la introducción del material en moldes que se dejan secar al sol sin el aporte de compactación. Aunque no exista obligación de tamaños estandarizados, estas piezas realizadas a mano siempre suelen tener tamaños similares para poder ser ensambladas correctamente. Esta estandarización de tamaños sí que se ha visto producida en algunos países. [16]



(Fig. 1.27) Fachada elaborada con mangueras rellenas.

(Fig. 1.28) Aporte de la mezcla sobre malla plástica



(Fig. 1.29) Enrollado del bambú en la mezcla.

(Fig. 1.30) Colocación de las estacas enrolladas en barro



(Fig. 1.31) Nivelación de la mezcla tras la proyección

(Fig. 1.32) Proyectado de la mezcla con bomba



(Fig. 1.34) Bóveda realizada por bloques de adobes
(Fig. 1.35) Adobes reforzados con paja



(Fig. 1.36) Adobes en moldes
(Fig. 1.37) Elaboración de adobe directamente sobre el suelo



(Fig. 1.38) Adobes secándose en el exterior de la mezquita
(Fig. 1.39) Método de secado uniforme para espacios

Su utilización no solo se puede relacionar con los paramentos verticales, sino que pueden conformar elementos curvos como bóvedas o cúpulas, de ahí su amplia variedad. (Figura 1.34). Para la realización de estas piezas, la masa de tierra y agua se suele rectificar con paja para controlar la retracción y mejorar su resistencia a la tracción [15], ya que el suelo utilizado para la construcción de adobe tiende a ser más rico en arcilla y limo que las mezclas de suelo utilizadas para la construcción de tierra apisonada. [14](Figura 1.35) Esta unión de elementos se amasa e introduce en moldes, conocidos como gradillas, mechales o adoberas, los cuales permiten la elaboración de uno o más adobes a la vez.(Figura 1.36-37) Una vez introducida ésta, el molde se retira dejando secar al sol. Para conseguir una superficie mayor expuesta se suelen girar y apoyar sobre sus cabeceras. Esto durará el tiempo suficiente y necesario a la intemperie para conseguir su correcto secado. (Figura 1.38-39)

B. ADOBONES y MUROS ANTISISMICOS DE ADOBE:

Se tratan de una variante de los adobes convencionales. En este caso, estos cuentan con unas mayores dimensiones de manera que su mayor rapidez de colocación le proporcione una ventaja considerable a la hora de estudiar los costos en su ejecución. Para ello se deberá tener en cuenta siempre su tamaño en función de la posibilidad de movilidad. Un inconveniente que puede impedir su utilización es el excesivo peso con el que pueden llegar a contar por lo que se intentan aligerar mediante áridos.[16] (Figura 1.40) Se suelen utilizar moldes desmontables para su ejecución más sofisticados que los simples y convencionales descritos anteriormente. (Figura 1.41)

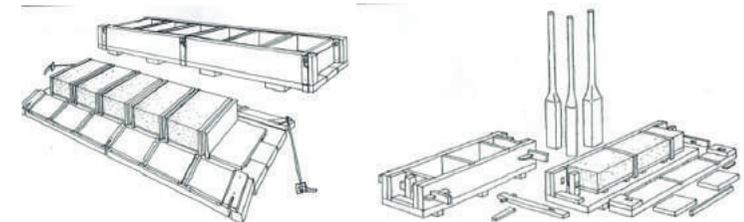
Los muros antisísmicos de adobes se conforman con huecos y ranuras de 5cm de diámetro de manera que la introducción de una caña de bambú por su interior produzca el refuerzo de la trama. (Figura 1.42) Otro método antisísmico puede ser la colocación de alambre de púas en las juntas horizontales de mortero cada cuatro hiladas enrolladas y tensadas a los postes [17] . (Figura 1.43)

1. Construcción con tierra

C. BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC) Y BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADA (BTCE):

Los bloques de tierra comprimida parten también de los adobes. Se entiende como una variante conseguida a lo largo del tiempo originada por la evolución de la tecnología. Se trata de la realización de bloques a partir de una mezcla de barro y agua que se introduce en un molde donde se deja secar a la intemperie pero con la particular variación de que los bloques resultantes se ven sometidos a un esfuerzo de compactación. Para ello, las nuevas tecnologías permiten la creación de nuevos moldes introducidos en máquinas con las que a partir de un esfuerzo de brazo palanca se le aplica compresión al elemento consiguiendo así una ventaja con respecto a un adobe convencional, la necesidad de una menor cantidad de agua para su elaboración y por consiguiente la obtención de un bloque con una densidad más seca. [14] Esto ayudará además, al posible acopio inmediato de las piezas obtenidas. Sería en 1789 cuando el arquitecto francés Francois Cointeraux desarrollara la primera prensa manual conociéndose el sistema en Europa desde el siglo XVIII. [16] (Figura 1.44) Con el trabajo desarrollado con estas prensas, la presión producida se elevaría consiguiendo con ello mayores rendimientos en el trabajo de elaboración.

Por otro lado, una de las principales desventajas que podrían tener estos bloques sería la falta de suficiente cantidad de agua para que la arcilla se active y actúe como aglomerante. Además, una producción con prensa permite que la mezcla utilizada cuente con humedad y composición constante, de manera que la posible variación de su dosificación, cantidad de mezcla utilizada para rellenar los moldes y la presión ejercida no cambien y modifique finalmente la altura y resistencia de los bloques. Por ello, aparecieron los bloques de tierra comprimidos y estabilizados (BTCE), los cuales introducen en su mezcla un aglutinante de manera que con ellos se mejore las propiedades mecánicas de los mismos. (Fig. 1.45) De esta manera junto a la compresión y los estabilizantes incorporados se consiguen bloques de mejores cualidades que necesitan ser curados durante 28 días antes de ser utilizados. (Fig. 1.46) Estos estabilizantes serán clasificados mejor en el siguiente apartado 3.2 referente a los componentes de un BTCE.



(Fig. 1.41) Moldes desmontables para adobes



(Fig. 1.40) Muro exterior construido con adobes aligerados con paja;(Fig. 1.42) Adobes antisísmicos reforzados con bambú



(Fig. 1.43) Adobes reforzados con alambres interiores anti sismo tensados reducidos.



(Fig.1.44) Proceso de compactación de un BTCE
(Fig.1.45) Elaboración de un BTCE



(Fig.1.46) Utilización de BTCE estabilizados con cemento para la realización de viviendas.

1.4 CONCLUSIÓN:

A lo largo de este apartado se ha podido distinguir la diferentes técnicas de construcción con tierra. Se han identificados las tres grandes categorías en las que se puede dividir, y descrito los procesos junto a las ventajas que pueden conllevar. Como primera conclusión se puede decir que independientemente del tipo de construcción para la que se utilice y de la técnica elegida, las construcciones con tierra se forman a partir de un suelo húmedo que posteriormente debe ser secado de manera natural para conseguir una estructura sólida. La utilización de un sistema constructivo u otro dependerá en mayor o menor medida, aparte de los medios disponibles que existan, del tipo de suelo adecuado que tenga un determinado lugar. Aquellos donde el suelo es arcillosos o limoso y donde es accesible en los estratos más superficiales del terreno, se puede decir que domina la construcción con piezas de adobe mientras que aquellos lugares donde puede predominar mayormente un suelo más arenoso, la tierra apisonada puede ser más requerida. En cualquier caso, la evolución de las nuevas tecnologías y su aplicación ha producido que en aquellos países más desarrollados sea mucho más cómoda su fabricación. A su vez, aquellos países donde el avance tecnológico no ha llegado a formalizarse sigue produciéndose , e incluso con mayor continuidad, estos tipos de procesos constructivos.

Dentro de los dos tipos de técnicas más convencionales y desarrollados a lo largo de la historia, se establece que durante el avance de este estudio nos centremos más en la técnica de los bloques comprimidos y en concreto de aquellos que han sido estabilizados. Se ha optado por esta elección por su capacidad de adoptar diferentes dimensiones y formas gracias a la variedad de moldes, y con ello la capacidad de ser mucho más manejables tanto en su elaboración como en transporte frente a las técnicas de paredes monolíticas donde habría que actuar directamente sobre el lugar final. Además, otras de las principales ventajas de los BTCE con respecto a las demás, es su capacidad de secado más rápido, conllevando con ello una mayor facilidad de acopio para su utilización posterior, manejabilidad y rendimiento. A ello hay que añadir también, el costo que supone la mano de obra a la hora de hacer un elemento constructivo a base de bloques siguiendo el mismo proceso de elaboración que en una fábrica de ladrillo convencional actual, frente a la actividad que es necesaria para los demás sistemas.



(Fig. 1.47) Vivienda de adobe



(Fig.2.1) Casa Pompallier realizada con tierra



(Fig.2.2) Gran mezquita de Djenné.



(Fig.2.3) Muros de tapial en el Alcazaba de la Alhambra de Granada.

2 PROBLEMÁTICA EXISTENTE

2.1 CAMBIO DE CONCIENCIA:

A lo largo de la historia, la multitud de métodos conocidos sobre la construcción con tierra cruda se ve influenciada como ya se ha podido ver anteriormente por el lugar y la cultura donde se desarrollaban. Se puede decir que en los continentes y en todas las épocas se ha construido con este material, desde una simple vivienda hasta un majestuoso palacio. [15][14] (Fig. 2.1-2) Según los listados aportados por la UNESCO, el 10% de los bienes del Patrimonio Mundial, se clasifican dentro del mundo de la construcción con tierra. Se puede poner como ejemplo la gran presencia de estas construcciones en centros históricos de ciudades como Córdoba, Oporto, Lyon o Granada destacada por su Alhambra. (Fig. 2.3) [19]

A pesar de ello, estos procesos constructivos empezaron a extinguirse como actividad normal debido a la aparición a inicios del siglo XX, de nuevos productos destinados a la construcción, como es el caso del acero, la aparición del ladrillo cocido o el desarrollo del cemento Portland para la elaboración de hormigones. [13] Esto, junto a su facilidad de transporte, aparición de nuevos especialistas cada vez más ajenos a la construcción local tradicional y la idea de progreso social relacionada con el uso de las nuevas tecnologías, consiguieron que la construcción con tierra fuera quedándose en el olvido y se entendiese como una técnica "pobre" y "subdesarrollada". Por esta razón, esta técnica comenzó a caer en desuso perdiéndose así el conocimiento acerca de la técnica y dejando de heredarse el aprendizaje de padres a hijos. [15]

A pesar de ello, se puede afirmar que nunca llegó a desaparecer del todo y que a comienzos del siglo XXI entre el 15-17% de la humanidad construía con tierra. Esto sobre todo se produjo en aquellos lugares del mundo donde existía la necesidad de realizar construcciones baratas y saludables. [20]

A lo largo de la década de los 70 con la aparición de la "crisis del petróleo" y la "crisis económica" los países industrializados comenzaron a plantearse un cambio de discurso apostando por la reutilización de nuevo de la tierra como material de construcción. Para ello, se comenzaron a desarrollar programas de investigación para avanzar en sus aplicaciones e incluso se regularizaron

2. Problemática existente

Por otro lado, también cabe destacar la repercusión medioambiental que los nuevos materiales están originando. La mayoría de estos materiales convencionales y modernos como el hormigón o el acero entre otros, necesitan de un gran número de operaciones tecnológicas para conseguir su producción a escala industrial de forma asequible y económica. Esto da lugar a la utilización de grandes cantidades de energía incorporada y un consumo de recursos naturales no renovables. Además, su proceso de fabricación libera una alta cantidad de dióxido de carbono a la atmósfera contaminando el medio ambiente y la salud humana. De ahí que la arquitectura sostenible busque materiales de construcción que necesiten menos manipulaciones tecnológicas, que sean renovables o reciclables, y propias del lugar o cercanos consiguiendo así evitar el transporte de largas distancias. [21] Por tanto, la construcción es uno de los principales focos de contaminación del medio ambiente con sus tratamientos a los materiales y por ello se han adoptado medidas políticas para la reducción de consumo de energía como es el caso por ejemplo de la *Directiva 2010/31/UE*. A pesar de ello, no existe tanto control a la hora de la explotación de aquellos recursos que no son renovables. [22]

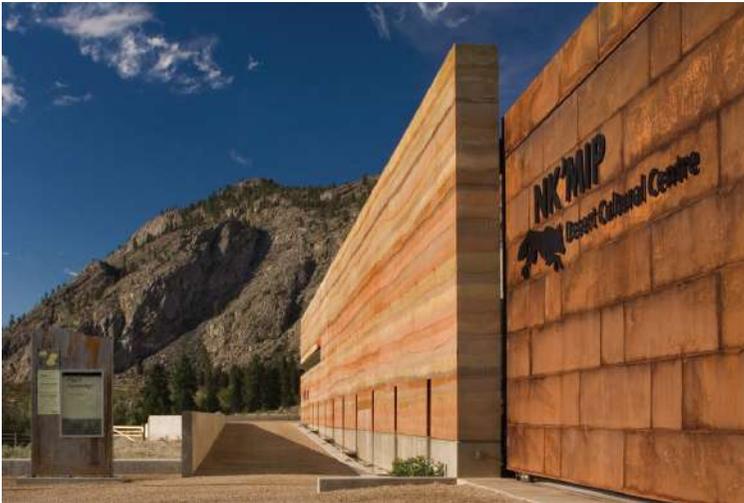
A pesar de la contaminación que el uso del hormigón armado pudiese originar, su utilización ha ido viéndose afectada por tratarse de un elemento poco económico e inapropiado para multitud de lugares por su situación geográfica, repercusión climática o condicionantes sociales. [13]

El interés, estudio y desarrollo de la arquitectura construida con tierra está volviendo a ver su resurgimiento en este contexto donde la concienciación social por la construcción sostenible de nuevos edificios está creciendo, donde aparece un mayor afán por mantener la tradición cultural y donde es de importancia conservar el patrimonio mediante la intervención en edificios antiguos. [15] Todo ello están originando en numerosas investigaciones para obtener productos novedosos, adaptables, rentables y que permitan una adecuada velocidad de construcción. [23]

A pesar de ello, aun sigue existiendo esa concienciación social de que la construcción con tierra es un material ligado a la pobreza, pero lo que de verdad se debería tener en cuenta es que se trata de un material de excelente calidad y confort. [15]



(Fig.2.4) Fábrica de los caramelos Riccola en Suiza por Herzog & Meuron durante su elaboración y finalizado



(Fig.2.5) Centro cultural del desierto NK'MIP por Hotson Bakker Boniface Haden architects

Claros ejemplos de utilización de construcción con tierra en la actualidad por arquitectos conocidos son con la fábrica de caramelos Riccola en Suiza por Herzog & Meuron [50] (Fig.2.4) , el centro cultural del desierto Nk'Mip en Canadá por HBBH Architects (Fig.2.5) [51] o los numerosos trabajos realizados por Francis Kéré en Burkina Faso tales como el centro hospitalario, los colegios con su biblioteca o las casas para los profesores(Fig.2.6-7-8) [3], entre otros.

Sin embargo, unos de los principales problemas que origina la construcción con tierra son su baja durabilidad, su reacción a condiciones de humedad alta y agua y su resistencia frente acciones sísmicas. [23] [24] De ahí que se encuentren en continuo desarrollo de investigación y por ello nuestro pequeño aporte experimental en este trabajo.

2.2 MATERIALES INDUSTRIALIZADOS FRENTE AL BARRO. VENTAJAS E INCONVENIENTES

Hoy en día los países desarrollados conciben como algo negativo el uso de materiales naturales en la actualidad, por su percepción de malas propiedades mecánicas y durabilidad, en comparación con materiales sintéticos como el acero, el hormigón o el ladrillo cocido. [6] Ello también implica como se ha especificado en el apartado anterior, que la utilización de estos estén fomentando el avance descontrolado del cambio climático.

La avanzada evolución tecnológica y necesidad de conseguir mayores rendimientos por las elevadas necesidades, ha originado en nuestros tiempos que se utilice el ladrillo cocido convencional como uno de los sustitutos de la construcción con tierra. [14]

En este caso, el ladrillo se trata de un producto elaborado a partir de la arcilla al que proporcionándole una cocción se transforma en un material cerámico duradero. Acepta cualquier forma en su moldeado aunque se ha visto estandarizada para conseguir un mayor rendimiento en su fabricación. Necesita ser cocido a unas temperaturas que pueden alcanzar los 1200°C, de ahí que el consumo de combustibles que necesita y la contaminación que ello origina, den lugar al aporte de una gran cantidad de gases nocivos al medio ambiente.

2. Problemática existente

Los combustibles que se están utilizando para ello son caucho viejo, carbón de baja calidad, aceites usados, entre otros.

Desde hace mucho tiempo, la industria del ladrillo no le ha dado importancia a la posible mejora que estos pudiesen tener, pero en las condiciones en la que nos encontramos actualmente estas industrias se ven afectadas por el suministro de combustible a precios descontrolados y a la falta de organización y conocimiento del tema. [25] Por ello, parece un trabajo fundamental y de necesidad prioritaria, el aporte y conocimiento de un nuevo material extraído de los medios naturales, tales como la tierra, que palien esas problemáticas.

Si comparamos los materiales industrializados frente a aquellos que son conformados por tierra, podemos establecer una serie de ventajas e inconvenientes que nos pueden servir para inclinar la balanza a favor de un grupo u otro. [16][17]

En cuanto a las desventajas que presenta la utilización de la tierra para la construcción se puede decir que se trata de un material no estandarizado por lo que sus características pueden variar mucho en función de donde se obtenga la materia prima. Además se trata de un material con alta capacidad de retracción, la cual depende del aporte de agua y del tipo de arcilla utilizado, pudiendo ocasionar en algún caso la aparición de fisuras. Por lo general, si se realiza un mantenimiento correcto, las construcciones de tierra pueden durar siglos. [15] Sin embargo, la falta de mantenimiento durante algunos meses puede ser suficiente para que aparezcan en el edificio alguna muestra de deterioro. Por otro lado, uno de los principales problemas que presenta la construcciones con tierra es su poca durabilidad frente al agua al tratarse de un material no impermeable, por lo que debe ser protegido frente a la lluvia, heladas y una fuerte humedad en el ambiente. Para prevenirlos se pueden utilizar aditivos, revocos o pinturas. Este problema también puede conllevar a la aparición de plagas ya que cualquier fisura puede ser un entorno clave para la proliferación de plantas o bichos. [26] Por último, cabe decir que su gran masa lo hace vulnerable al sismo.

A pesar de las numerosas desventajas que presenta la tierra como material de construcción, no se puede afirmar que sean todas cosas negativas, por lo que a favor de su utilización se puede decir que se trata de un material almacenador de calor generando un balance térmico interior



(Fig.2.6) Centro hospitalario Léo en Gando por Francis Kéré



(Fig.2.7) Viviendas modulares para profesores de Francis Kéré.

confortable en casos donde las diferencias de temperaturas a lo largo del día son destacables. También es capaz de regular la humedad ambiental al tener una gran capacidad de absorber y emitir humedad más rápido que el resto de los materiales macizos de construcción. [6] Además, se trata de un material que te permite ahorrar energía y no produce contaminación ambiental en comparación con los materiales industrializado ni tampoco genera efectos dañinos para el ser humano. Para su trabajo, preparación y transporte se necesita solo entre el 1-5% de la energía requerida para la producción y transporte por ejemplo de los ladrillos cocidos. [16] Para su posterior reutilización solo necesita ser triturado y humedecido consiguiendo de esta manera que sea un material ilimitado. Al tratarse de un producto con gran disponibilidad en todo el mundo, elimina aquellos costes excesivos originados por su transporte.

Como conclusión podemos decir que si estas problemáticas, actualmente investigadas para ser solventadas, consiguieran reducir los inconvenientes que la tierra presenta para ser utilizada como material de construcción, conllevaría al cuidado del medio natural que nos rodea.



(Fig.2.8) Colegio de Primaria de Gando por Francis Kéré.



3 USO DEL BTCE EN LA ACTUALIDAD

3.1 ¿QUÉ ES UN BTCE?

Como ya se explico anteriormente en el apartado 1.3.3 referentes a los distintos sistemas de construcción con tierra, los bloques de tierra comprimida estabilizada se tratan de una variante obtenida de los bloques de abobe. Son bloques de tierra que junto al agua y otros compuestos como estabilizantes, han sufrido un proceso de compresión y son capaces de resistir ante unas determinadas circunstancias. Su proceso de elaboración consiste en la mezcla uniforme y homogénea de los materiales para ser introducida en moldes que permitan la compresión del material, para continuar posteriormente con su desmoldado y exposición a la intemperie consiguiendo así su curado. Esta técnica se trata de una de las técnicas más novedosas de los diferentes sistemas constructivos con tierra y a pesar de tratarse de un elemento que queda recogido en las normas UNE-EN, no se considera un elemento habitual para la construcción. Actualmente sigue siendo un producto en el ojo de mira de los investigadores por lo que las numerosas variantes a lo largo de diversos países están dando lugar a múltiples composiciones, reacciones y resultados. Por lo general, el componente principal (arcilla) dependerá del lugar de donde se extraiga. La principal característica que lo hace diferente de los demás sistemas constructivos y de los diferentes destinos de estudio es el estabilizante utilizado. Este último es el que permite obtener las capacidades resistentes del bloque por lo que la modificación de dicho componente supone la obtención de diferentes resultados de resistencia y durabilidad.

Según la normativa UNE-EN 41410 [8] en referencia a los bloques de tierra comprimida, se establece que los BTCs deben cumplir determinadas exigencias según las aplicaciones para las que pueden ser utilizados. Esta norma, a pesar de no prohibir cualquier otro uso novedoso, recoge las aplicaciones comunes que pueden abarcar como son el caso por ejemplo de:

- Fábrica común: aquella que se emplea en exteriores e interiores sin un fin estético de manera portante o no.
- Fábrica protegida: cuando se protege frente a la penetración del agua ya sea portante o no, exterior o interior.

- **Fábrica para revestir:** cuando se recubre con una capa protectora adecuada
- **Fábrica vista:** aquella que cuenta con un fin estético y está realizada con piezas con un fin atractivo y se traba mediante juntas de mortero adecuadas a este tipo de piezas.
- **Fábrica estructural:** aquella que es capaz de soportar cargas además de su peso propio aunque sea también vista, común o revestida. Una fábrica de BTC por sí sola, no es capaz de resistir ante el sismo.

A pesar de todo, deben garantizar las especificaciones necesarias ante un caso de incendio, y ofrecer un buen aislamiento acústico y térmico. Además, en relación a su localización, siempre habrá que asegurar tanto su integridad estructural como funcional.

3.2 COMPONENTES

SUELOS:

Se puede establecer que la materia prima necesaria en una proporción mayor para la realización de un bloque de tierra comprimida estabilizada es la "arcilla". Se trata de un material obtenido de la naturaleza compuesto mayoritariamente por minerales de grano fino ($>0,002\text{mm}$) y con una consistencia plástica que puede llegar a endurecerse si se somete a secado o cocción, obteniendo en este último caso un ladrillo convencional. [27] Es la parte más fina e inestable del suelo al originar grandes variaciones de volumen frente a la aparición de agua. Sufre ante la presencia de agua el hinchamiento y la fuerte contracción al secarse. [15] (Fig. 3.1-2)

La arcilla según su composición mineralógica se considera un mineral de estructura laminar hexagonal, pudiendo clasificarse de diferentes maneras; para mayor detalle, observar el apartado 1.2 de este mismo documento.

La principal característica que puede modificar las propiedades de un tipo de arcilla u otra es su propia procedencia. Dependiendo de donde se extraiga este material contará con características diferentes. Analizando los estudios de investigación realizados en distintas zonas podemos apreciar cómo han sido utilizadas arcillas de Gunma Prefectura (Japón) extraída de un proyecto de terraplén



(Fig.3.1) Suelos de Innovarcilla



(Fig.3.2 Arcilla Roja procedente de Jaén



(Fig.3.3) Tipos de suelos de Escocia y Glasgow



(Fig.3.4) Tipos de suelos de Innovarcilla

de una profundidad de aproximadamente un metro y considerada como un suelo arcilloso de gran plasticidad. [28] En la universidad de Düze (Turquía) se realizaron pruebas con arcillas rojas y amarillas con alto contenido de Sílice y bajo en aluminio, las cuales se distinguían por sus compuestos de hierro en su composición. [29] Por otro lado, en zonas como Ghana, donde la construcción de bloques de tierra es una técnica de construcción muy común para las viviendas de bajo costo, se utilizaron los dos tipos de suelos existentes allí. Fueron uno rojo y otro marrón cada uno con diferentes límites de plasticidad. [21] O incluso el caso de la universidad de Djelfa quienes utilizaron para su investigación suelo de la región de Biska, situada al sureste de Argelia. [30] En todas ellas podemos decir que se constata la importancia del suelo elegido para la obtención de los distintos resultados.

En el caso de las investigaciones realizadas hasta el momento en la Universidad de Sevilla, también se ha procedido a la realización de las investigaciones con suelos diferentes. En primer lugar, se comenzó con tres tipos diferentes de suelos, suministrados por fabricantes de ladrillos escoceses, la arcilla estuarina de Errol (Perthshire), y las arcillas Ibstock y Raeburn, procedentes de Glasgow. (Fig. 3.3) En este caso el Suelo de Errol contenía el límite líquido más alto de los tres y por tanto era el más plástico. Esto podría entenderse por su mayor proporción de arcilla en comparación con el suelo de Ibstock o Raeburn. Este mayor índice de plasticidad conllevó a que se comportara de manera diferente frente a los otros dos tipos de suelos. Además, su mayor contenido de illita originaba una estructura interna cristalina que facilitaba la absorción del agua frente a las estructuras de caolinita de los suelos de Raeburn y Ibstock. [4][31][6]

Posteriormente, se han utilizado suelos suministrados por la Fundación Innovarcilla situada en la localidad andaluza de Bailén (Jaén). Esta fundación es la encargada de reunir a todos los fabricantes de materiales de construcción cerámicos de Andalucía y de promover las actividades vinculadas con el Centro Andaluz de Tecnología Cerámica también situado en la misma localidad.

Rigiéndonos por la clasificación aportada por Innovarcilla acerca de sus productos, se pueden clasificar sus suelos en 4 tipos de arcillas diferentes: Blanca, Rubia, Negra y Roja. [32] (Fig. 3.4) Estas arcillas se pueden clasificar a su vez en dos paquetes:

3. Uso del BTCE en la actualidad

arcillas calcáreas (Negra, Rubia y blanca) las cuales presentan contenidos de carbonatos superiores al 10% y las arcillas poco calcáreas (rojas) con menor del 10% de carbonato cálcico. Podremos caracterizar la materia prima por tanto, según los aspectos siguientes: Granulometría y grado de plasticidad, y contenido de otros componentes que lo conformen.

La plasticidad es la propiedad con la que cuentan todas las arcillas cuando son mezcladas con agua, generando una masa cohesivas que pueden ser más o menos moldeables según los tamaños de partículas y el tipo de mineral arcilloso que lo compongan. A menor tamaño de partículas mas plástico será. Esto estará relacionado tanto con su comportamiento durante el proceso de elaboración como con los defectos o problemas que pudiesen llevarse a cabo.

Atendiendo a la composición mineralógica de las diferentes arcillas, podemos decir que están formadas por filosilicatos, arenas con contenidos variables de cuarzo, feldespatos, carbonatos, yesos, entre otros tales como materia orgánica y sales solubles al agua. Los filosilicatos serán los responsables de dos de las propiedades más importantes: su plasticidad y secado. (Tabla 3.1)

Como podemos apreciar en la tabla 3.2, las arcillas rojas tienen menor cantidad de partículas finas por lo que su plasticidad es menor. El resto de arcillas, cuentan con un I.P. superior a 20 y por tanto una plasticidad superior. En el caso de la arcilla blanca, esta cuenta con menor cantidad de partículas finas que la Rubia pero se entiende mas plástica que ella al estar compuesta por montmorillonita en vez de illita. [33] A pesar de ello, tras la obtención de resultados, el suelo blanco contaba con el contenido más bajos de suelos duros y el mayor porcentaje de compuestos blandos [34] Por ello, y por considerar que se trata de la arcilla que menos prestaciones va a aportarnos se ha considerado que para el estudio presente no se tendrá en cuenta.

Comparando los suelos de Escocia con los resultados obtenidos a partir de los suelos de Innovarcilla a utilizar en el presente estudio podríamos afirmar que los primeros cuentan con características muy similares a la arcilla rubia, roja y negra utilizada, hecho el cual atestigua que podría ser asequible la creación de nuevos bloques más ecológicos en cualquier otra parte del mundo.

Procedencia	Tipo	Composición mineralógica (%)		
		Illita	Caolinita	Clorita
Perthshire	Error	50	38	12
	Ibstock	36	64	3
Glasgow	Raeburn	27	69	4
	Blanca	32	No det.	No det.
Innovarcilla (Bailén)	Rubia	60	No det.	3
	Negra	58	10	No det.
	Roja	66	33	3

(Tabla 3.1) Composición mineralógica de suelos estudiados en la Universidad de Sevilla

Procedencia	Tipo	Características físicas (%)		
		Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de plasticidad
Perthshire	Errol	34,8	19,1	15,7
	Ibstock	25,9	16,4	9,5
Glasgow	Raeburn	25,9	16,8	9,1
	Blanca	45,5	15,5	29,9
Innovarcilla (Bailén)	Rubia	32,8	11,1	21,7
	Negra	38,8	18,6	20,2
	Roja	25,6	14,1	11,5

(Tabla 3.2) Valores de Índice de Plasticidad (I.P) por diferencia entre el Límite Líquido (L.L) y el Límite Plástico(L.P). Expresado en %

AGUA:

El contenido de agua debe ser en su proporción óptima en relación con los demás elementos que forman la masa. Se trata de un elemento muy importante ya que las propiedades de plasticidad dependerán de su correcta dosificación, y si no entra en juego no se producirá la reacción entre los componentes. El contenido de agua de cada suelo se determina utilizando los Límites de Atterberg. [35] En función de la norma *UNE-EN 41410*, los requisitos recomendables para el agua de amasado de un BTC, de manera que no altere sus propiedades son: contener un PH superior a 5 según la Norma *UNE 83952:2008*. Contar con una cantidad de sulfato inferior a 1g/l (*UNE 83953:2008*), de ión cloruro de 3g/l cuando esté armada de acero (*UNE 7178:1960*) o 15g/l de sustancias solubles (*UNE 7235:1971*). En ningún caso podrá contener según la *UNE 7132:1958* nada de hidratos de carbono.

ESTABILIZANTES:

La estabilización de los suelos no es algo que haya aparecido en la actualidad ya que miles de años atrás, mesopotámicos y romanos ya se habían dado cuenta que añadiendo otros componentes a los caminos estos se veían mejorados.[36] En la actualidad y como mejora de las características de resistencia y durabilidad la norma *UNE 41410:2008* reconoce que una tierra estabilizada es aquella que presenta buena resistencia a la deformación y es poco sensible a la presencia del agua.

Frente a la variedad de tipos de estabilizantes posibles a utilizar para la mejora de un suelo, la citada norma establece una serie de criterios para la correcta elección del mismo. Un criterio importante que condiciona su uso es la minimización del impacto ambiental estudiado con la ayuda del ciclo de vida que puede alcanzar. Este ciclo de vida se puede entender como la capacidad de obtener la menor cantidad posible de energía, agua y recursos renovables, y la reducción de emisión de sustancias tóxicas durante la extracción, fabricación, transporte, aplicación y vida útil. Además, otros de los criterios que ayudan a la elección correcta del estabilizante son la disponibilidad regional, los procesos adecuados para su puesta en obra y mantenimiento y como repercute su uso de manera económica.

Atendiendo a la clasificación que se recoge en la norma se puede decir que existen tres tipos de

estabilizantes en función de cómo actúan en el material. Estos tipos son estabilizantes químicos, físicos y mecánicos. [8]

- **Químicos:** Cuando el componente que se añade se trata de un producto que modifica la estructura granular a la que dota de una cohesión que no tenía o disminuye la excesiva plasticidad. Dentro de este grupo se pueden destacar: aceites naturales, silicatos, cal viva o apagada, resinas acrílicas, productos puzolánicos, cementos, yesos o resinas, entre otros. (Tab.X1)

- **Mecánica:** cuando una acción mecánica aumenta la compacidad del material. Esta puede ser estática, dinámica o mixta (proyección, amasado). La eficacia de este sistema dependerá de la granulometría, el grado de compactación y el grado de humedad de la mezcla. Normalmente la estabilización mecánica se consigue por compactación del suelo.

- **Físicos:** cuando el estabilizante mejora las propiedades físicas de la tierra. Como ejemplos de este caso podemos encontrarnos con la estabilización granulométrica realizada con la mezcla de suelos naturales o mediante estabilización con fibras creando un armazón interno y mejorando el reparto de las tensiones en la matriz de tierra. De esta manera se incrementa la resistencia a flexión y cortante y ayuda a evitar la retracción. Dentro de este grupo entrarían las fibras naturales y sintéticas. (Tab.X2)

• Tipos de estabilización química:

Existe una amplia variedad de elementos que se pueden utilizar para estabilizar químicamente un suelo. [36] A continuación se expresa una revisión de algunos de ellos:

CEMENTO: Se considera uno de los mejores estabilizadores para bloques de tierra comprimidos ya que su introducción durante la compactación origina la mejora de características como su resistencia al agua o a compresión. Esta última resistencia dependerá de la cantidad aportada a la mezcla aunque se estima que la adecuada será al menos el 5-6%. Cuando existen casos en los que hay excesivo contenido de arcilla (>20%) el aporte de cemento puede llegar a ser perjudicial. [25] (Fig. 3.5)



(Fig.3.5) Colegio Haj Yousif School, prototipo y en construcción con BTC estabilizados con cemento



(Fig.3.6) Alginato en el recipiente azul utilizado en la Universidad de Sevilla

CAL VIVA: Su principal ventaja es que reacciona positivamente en suelos arcillosos con gran contenido de humedad. No se suele recomendar el uso de este estabilizante para la fabricación de BTCE con bajo contenido de humedad. Se considerará su utilización cuando el cemento no sea posible. La introducción de cal produce la inmediata disminución de plasticidad del suelo. Hay que controlar la cantidad a añadir en relación con el suelo existente. Debe cuidarse mucho su correcta unión con el suelo. En el caso de suelos muy plásticos, la mezcla debe hacerse en dos etapas con uno o dos días entre ellos para conseguir que la cal disminuya los grumos. [24]

ESTIÉRCOL: Elemento muy comúnmente utilizado desde hace siglos, posiblemente de los primeros encontrados. Al introducirse en el suelo de forma húmeda consigue el incremento de cohesión entre las partículas del suelo, las cuales se mantienen tras el secado. La presencia normal de fibras en su interior consigue la reducción de formación de grietas. En cuanto a su posible relación con variaciones de resistencias no existe constancia aún de ello. [24][19]

PRODUCTOS PUZOLÁNICOS: como por ejemplo las cenizas de carbón para conseguir la estabilización de suelos cohesivos. Las propiedades conseguidas dependerá del tipo utilizado y pueden necesitar o no cal para que se produzca la reacción puzolánica.

YESO: Además de funcionar en su posición externa como refuerzo superficial, también es un buen elemento para conseguir más durabilidad en condiciones exteriores al aire libre. Puede conseguir a la vez, aislamiento térmico y acústico y es capaz de regular la humedad interior gracias a su capacidad de absorción. Con su utilización también se alarga el nivel de vida consiguiendo un ambiente de vida más saludable y confortable.[29] Es un elemento con gran potencial para unir partículas y por tanto conseguir resistencia, sobre todo en un ambiente seco. En ambientes húmedos presenta problemáticas de solubilidad en agua por lo que necesita la utilización de un agente de solidificación. [28]

RESINAS Y POLÍMEROS: Pueden ser naturales o artificiales y funcionan como impermeabilización al añadirse pequeñas cantidades en la mezcla. Existe una gran variedad de tipos tales como cementos poliméricos, resinas orgánicas, poliuretano, entre otras. En este apartado se va a destacar como ejemplo la pulpa de tomate utilizada por Daniels en Italia [26], el carragen por la universidad católica de Perú o el alginato en la Universidad de Sevilla (Fig. 3.6)

- **EL CARRAGEN** se trata de un polímero natural biodegradable conocido también como bioaditivo, proporcionando impermeabilidad al agua y resistencia a la erosión por gotas de agua. También mejora considerablemente la resistencia a la compresión y tracción. [26]
- **EL ALGINATO** se trata de un polímero natural utilizado con muchos fines diferentes por su capacidad de retener agua, formar geles y estabilizar emulsiones. [7] Es un material gelificante hidrófilo al igual que la gelatina, carragen, pectina y el almidón. [31] Se obtiene de las paredes celulares de la algas pardas. [6] Son muy versátiles y proporciona una alta capacidad de retención de agua, siendo capaz de absorber de 200-300 veces su contenido en agua. [4] Contribuyen por tanto, a la flexibilidad y resistencia mecánica de los bloques. Es uno de los principales componentes utilizados a lo largo de los estudios en el proyecto de investigación de la Universidad de Sevilla tanto en solución líquida como en polvo y es uno de los componentes utilizados en este estudio para la realización de los BTCE a ensayar.

• Tipos de estabilización física:

Existen dos posibles categorías según la norma UNE para este grupo, en primer lugar la estabilización granulométrica que se consigue mediante la mezcla de suelos naturales combinados y por otro lado la estabilización con fibras creando un armazón interno consiguiendo una mejora en el reparto de las tensiones y contribuyendo a la mejora de la resistencia a flexión y cortante y ayudando a evitar la retracción. Los refuerzos mediante fibras pueden dividirse a su vez en dos categorías. Por un lado, el primero de los grupos contiene fibras de manera aleatoria en el interior del suelo mientras que el segundo consiste en la introducción de materiales fibrosos orientados. [37] a su vez, se puede establecer una clasificación según el tipo de fibra a utilizar de manera que se diferencian por un lado las fibras naturales y por otro las fibras sintéticas.

FIBRAS NATURALES:

La utilización reciente e investigación de productos como fibras naturales está siendo acelerado por la necesidad de encontrar nuevos materiales respetuosos con el medio ambiente. Aunque su utilización cuenta con muchos siglos de historia, en la actualidad están volviendo a renacer. Dentro de este grupo nos encontramos con las fibras vegetales y por otro lado las animales. [37][36]

QUÍMICA	
Elemento	Consigue:
Cemento	Resistencia al agua y compresión
Cal viva	Menor plasticidad
Estiércol	Incremento de cohesión
Puzolanas	Estabilización de suelos cohesivos
Yeso	Mayor durabilidad en exteriores, aislameinto y regulador de humedad
Carragen	Impermeabilización y resistencia a la erosión por gotas
Alginato	Alta retención de agua. Flexibilidad y resistencia mecánica

(Tab.X1) Tipos y características de estabilizantes químicos



(Fig. 3.7) Fibras de coco



(Fig.3.9) Fibras de palma



(Fig. 3.8) Fibras de yute



(Fig. 3.11) Fibras de bambú

FIBRAS VEGETALES:

- Fibra de coco: se trata de la zona rechazable de la fruta y sus fibras compuestas de lignina, celulosa, pectina entre otras sustancias solubles al agua, suelen ser de tamaños entre 50-350mm de largo y aproximadamente 2mm de diámetro. Debido a su alto contenido en lignina su degradación es producida de una manera mucho más lenta que en otros casos. Cuenta con una gran respuesta elástica y mejores prestaciones que las fibras sintéticas. Mantiene gran parte de su resistencia a la tracción cuando está mojado. Ayyar et al. han concluido tras sus estudios que estas fibras tienden a la reducción de hinchazón del suelo. [21] (Fig. 3.7)
- Sisal: es una fibra lingo-celulosa comúnmente utilizada en la elaboración de placas de yeso y obtenida de las hojas de las plantas. Son capaces de absorber mucho agua y cuentan con diámetro de entre 0.06-0.4mm. Con su introducción se aumenta la ductilidad y la resistencia a compresión, a la vez que reduce la densidad seca del suelo y su resistencia al cizallamiento.
- Fibras de palma: son fibras extraídas de las palmeras y cuentan con una serie de características que hacen aconsejable su utilización como son el caso de los costos bajos, plenitud en la región, durabilidad, peso ligero, capacidad de tensión y fuerza contra el deterioro. Tienen baja resistencia a la tracción y módulo de elasticidad y absorción de agua muy elevados. [30][21][23] (Fig. 3.9)
- Yute: Típica en países como Bangladesh, China, India y Tailandia donde existen diferentes variables de cortezas de plantas. Necesitan ser recubiertas por ejemplo con betún para protegerlas frente a ataques microbianos y la degradación. Cuenta con alta resistencia a tracción y buenas propiedades de aislamiento térmico. [38] (Fig. 3.8)
- Paja: Elemento originado en las zonas cultivables de todo el mundo en grandes cantidades. Se han demostrado la menor contracción, reducción de tiempo de curado y aumento de la resistencia a compresión con su introducción. [37] Se considera un elemento de bajo coste y de baja contaminación atmosférica. Además consigue la regularización de la temperatura alcanzando el confort térmico. Tanto las fibras de paja de trigo, paja de cebada y virutas de madera aportan una notable mejoría en la resistencia y ductilidad. [19][21][39][23] (Fig. 3.10)
- Bambú: se trata de una fibra celulosa regenerada compuesta por anti-bacterias propios. En estudios previos se ha averiguado que los rizomas de raíz del bambú son excelentes aglutinantes

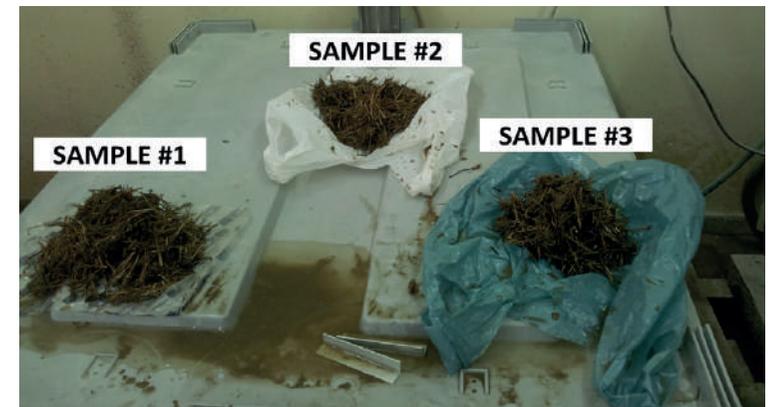
del suelo y pueden ayudar a prevenir la erosión. [36] A pesar de ello, cuenta con bajo modulo de elasticidad y alta absorción de agua. En el caso de estudio de Brasil, comprobaron que el bambú reducía la densidad tras el secado y aumento la porosidad durante la presencia de agua. [40] (Fig. 3.10)

FIBRAS ANIMALES:

La mayoría de de los estudios relacionados con la estabilización natural de bloques se centran en la utilización de fibras celulósicas o vegetales tales como por ejemplo la madera, lino, yute,... pero cabe decir que la aparición de fibras animales propondría otro nuevo punto de investigación acerca de los estabilizantes. En este caso, la estabilización mediante fibras proteicas o de animales no han sido muy detalladas. [4]

En comparación de las fibras vegetales frente a las animales se puede decir que las animales ofrecen más ventajas que las primeras, de manera que cuentan con buenas propiedades de resistencia, bajo coste y densidad, buenas propiedades térmicas, biodegradabilidad, comportamiento no abrasivo y amplia disponibilidad. Por otro lado, los inconvenientes de las vegetales como su poca resistencia a la humedad prolongada originan el actual interés de estudio de las proteicas.

Dentro de este grupo cabe destacar los estudios realizados por Barone, Schmidt y Zaimoglu [41] quienes introdujeron los desechos de pluma de pollo como fibra de queratina. Se observó cómo esta conseguía una mayor resistencia a la humedad y al calor, aunque como desventaja cabe decir que, contaba con poca resistencia a los álcalis. Por otro lado, en los estudios desarrollados en la Universidad de Sevilla y que posteriormente se seguirá analizando en este trabajo, se utilizó la lana de oveja como fibra natural higroscópica. [7][6] Aunque dependiendo del tipo de animal de procedencia de la lana, normalmente suele tener de dimensiones entre 40-127mm de longitud y una forma ondulada que favorece a la unión con los demás componentes. Con el uso de esta nueva fibra se pretende reducir el agrietamiento producido tras la contracción originada por el secado rápido y no uniforme de la mezcla.



(Fig. 3.10) Fibras de paja utilizadas (19)

		FÍSICOS	
		Elemento	Consigue:
NATURALES	Vegetales	Fibra de coco	Reducción de hinchazón del suelo y gran respuesta elástica
		Sisal	Mayor ductilidad y resistencia a compresión
		Palma	Durabilidad, ligereza y bajos costos
		Yute	Alta resistencia a tracción y aislante térmico
		Paja	Menor contracción, mayor resistencia a compresión y alcanza el confort térmico.
	Bambú	Prevenir la erosión	
	Animales	Lana de oveja	Unión de todos los componentes y reducción del agrietamiento
Pluma de pollo		Mayor resistencia a la humedad y calor	
SINTÉTICOS	Plásticos	Propileno (PP)	Son muy contaminantes por lo que se descartarán del estudio
		Poliéster (PET)	
		Polietileno (PE)	
		Alcohol polivinílico (PVA)	
	Acero	No muy utilizadas	
	Vídrio	Resultados no muy favorables	

(Tab.X2) Tipos y características de estabilizantes físicos

FIBRAS SINTÉTICAS:

A pesar de la existencia de numerosas variantes en el grupo de fibras sintéticas, cabe decir que solamente serán nombradas y clasificadas dentro de las categorías de plásticos, metálicos y vidrio, para que exista conciencia de su existencia. Debido a los propósitos que se establecen en este estudio de investigación y de la importancia que hoy en día existe acerca de conseguir una construcción sostenible y que respete el medio ambiente, no vamos a estudiar en profundidad dichos estabilizantes. Con la utilización de estos estaríamos fomentando a la continua destrucción y contaminación del planeta.

A pesar de ello, las fibras sintética de origen plástico se divide en los siguientes tipos: Fibras de propileno (PP), de poliéster (PET)[20], de polietileno (PE), de Nylon o de alcohol polivinílico (PVA). [36]Por otro lado, nos encontramos con las fibras de acero, poco utilizadas en el caso de BTCE, y las fibras de vidrio, con resultados no muy favorables.

Por tanto, como conclusión justificamos la aplicación del estabilizante natural proteico y en concreto la lana de oveja en nuestra fase experimental, para conocer al máximo los detalles que este estabilizante puedan ocasionar en un bloque de tierra comprimida. Sus características relacionadas con el aumento de resistencia, bajo coste y densidad, buenas propiedades térmicas, capacidad de degradarse con el tiempo sin alterar al medio ambiente y amplia disponibilidad originan puntos a favor para avanzar en el conocimiento tras su escaso estudio hoy en día.

3.3 OTRAS INVESTIGACIONES:

Los distintos procesos de elaboración han sufrido numerosos cambios según el lugar de realización, sus compuestos o incluso los medios con los que se han visto realizados.

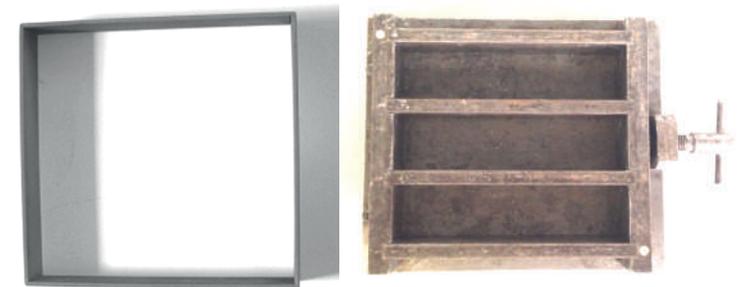
Sobre el caso de Cerdeña (Italia), [19] podemos decir que se trata de un claro ejemplo de intento de conseguir una solución más sostenible y ecológica en otro país desarrollado. En este caso se consideró meramente experimental por la poca certeza en la dosificación y método utilizados. El proceso de fabricación se basó casi completamente en la experiencia del operario obtenida a lo largo de las repeticiones realizadas. Se usó una cortadora de paja donde fue cortada aleatoriamente y una mezcladora donde se introdujeron tanto el agua como la paja de una manera no controlada y en relación con la percepción del fabricante. Posteriormente se introdujo la tierra y se prensaron a mano sin medir el grado de compactación. Por último fueron secados al sol. (Fig. 3.12) Este caso, a pesar de no considerarse certero, es un claro ejemplo de concienciación sobre una mejora de los materiales utilizados para construir.

En el caso de ensayo de Viena [42], para la elaboración de probetas de bloques de tierra comprimidos estabilizados mediante yeso, se procedió previamente al secado del suelo y de las fibras naturales utilizadas (paja de trigo, paja de cebada y virutas de madera). La dosificación se controló según el volumen y se mezclaron manualmente sin agua. Una vez conseguida la homogeneización de la mezcla se le añadió agua, se dejó reposar durante 30 min y se amasó posteriormente hasta su homogeneización. Por último, se añadió el yeso. Una vez conseguida la mezcla se vertió en un molde de acero (Fig. 3.13) sobre una tabla de madera y se le ejerció una presión de 50kg con una placa de carga.

En un caso de ejemplo en Irán publicado a principios de 2017[43], se afina más en la elaboración de los bloques. Con el objetivo de conseguir los resultados más certeros posibles, el porcentaje de arcilla, arena, grava y agua se supusieron constantes mientras que el de fibra se estimó variable. El agua a añadir se determinó en función de la cantidad de arcilla y su estado de saturación. En este caso, todas las probetas se secaron en laboratorio y con la misma temperatura desplazándolas cada 24h y así conseguir su curado por todas sus zonas. El tiempo de curación establecido fue también de 28 días.



(Fig.3.12) BTC elaborados en Cerdeña y estabilizados con paja



(Fig.3.13) Molde de acero para la elaboración de probetas en Viena

(Fig.3.14) Molde de acero para realizar tres probetas prismáticas en la Universidad de Sevilla



Buscando ejemplos estudiados en España, [6] con un proceso de elaboración parecido al desarrollado en el actual estudio, nos podemos referir al estudio previo establecido en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura (ETSA). En ese caso, se realizaron diferentes modificaciones y variantes de los compuestos a expensas de conseguir mediante los resultados de los ensayos que dosificación era la más adecuada. En este caso se utilizó como estabilizante alginato y para mejorar la trabajabilidad en algunos caso se utilizo lignina. Se consiguió la homogeneización de los componentes con un mezclador. Además, se sometieron previamente a un secado en horno a 50°C durante 24h y después se dejaron a temperatura ambiente durante 48h antes de desmoldar. Las primeras probetas contaron con la ayuda de moldes de acero (Fig. 3.14) donde se obtenían tres unidades seguidas. Posteriormente y con la ayuda de las nuevas tecnologías su elaboración evolucionó al uso de la adobera mecánica (Fig. 3.15) e hidráulica(Fig. 3.16), comentadas posteriormente en el apartado 4.3

Con la ayuda de estos estudios desarrollados tanto en España como en el extranjero y después de las diferentes estrategias y dosificaciones, actualmente se ha llegado a la dosificación particular y procedimiento desarrollados a continuación.



(Fig.3.15) Prensa mecánica para elbarorar dos probetas prismáticas

(Fig.3.16) Prensa hidráulica para probetas tipo baldosas

(Fig. 3.17) Vivienda de adobes en Baté Village





(Fig.4.1) Cúpula construida con BTCE

4. PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL:

4.1 INTRODUCCIÓN METODOLÓGICA:

Una vez establecidos los objetivos y metodología propuestos en las fase inicial del trabajo y descrito hasta el momento el estado de la cuestión acerca del tema a tratar, se pretende alcanzar un escalón más en el estudio y trabajo desarrollado hasta el momento por el Grupo de Investigación de la Universidad de Sevilla.

Recordando que, como punto de partida, con la elaboración de este trabajo se proponía el análisis de los bloques de tierra comprimida estabilizada frente a un estado de exposición exterior alterado por las heladas, y conocida toda la información previa relacionada con ella, se establece un orden de actuación experimental. En primer lugar se procederá a la elaboración de todas aquellas probetas que fuesen necesarias para la realización de los ensayos, seguida de su control, acopio y secado para después continuar satisfactoriamente con los ensayos de caracterización. Una vez obtenidos los resultados, se procederá a la realización del ensayo de resistencia a hielo/deshielo alterando la composición de las probetas de una manera irreversible. Conseguidos los ciclos necesarios para la obtención de unos resultados adecuados, estas mismas pobretas se ensayarán para conocer la variabilidad producida en su comportamiento mecánico.

Para concluir, una vez recopilada toda la documentación experimental obtenida se comenzará el análisis, comparación y obtención de resultados para aportar una posible propuesta de mejora y encauzamiento de líneas futuras de investigación.

4.2 PROCESO DE ELABORACIÓN DE PROBETAS:

Para la elaboración del estudio se realizaron dos tipos diferentes de probetas. Todas ellas compartían los mismos compuestos: alginato, agua, fibra natural de lana de oveja y tres tipos diferentes de arcilla (Rubia, Roja y Negra) (Figura 4.2). La preparación de la mezcla se realizó de manera manual en el laboratorio de la ETSA (Universidad de Sevilla) partiendo de las dosificaciones establecidas anteriormente en otros ensayos realizados[4][7]. Tras las sucesivas modificaciones en

4. Planteamiento experimental

las dosificaciones recogidas en los estudios citados, la dosificación final utilizada como punto de partida para la elaboración de los bloques será la recogida en la tabla 4.1. Estas cantidades se verán divididas en dos para hacer más manejable la cantidad de mezcla trabajada y controlar de una mejor manera el tiempo disponible para la obtención de probetas comprimidas.

Material	Cantidad (gr)	%
Suelo (Arcilla)	3070	76,75
Alginato	120	3,00
Agua	800	20,00
Fibra natural (Lana de oveja)	10	0,25

(Tabla 4.1) Dosificación establecida para realizar probetas con un peso total de 4000gr

Para el proceso de fabricación de las probetas utilizaremos una serie de instrumentación básica que nos permitirá pesar y mezclar los elementos de la manera más cómoda posible. (Fig. 4.3) En primer lugar se procederá al pesado de todos los componentes y tratamiento de la lana de oveja. Su forma en onda le proporciona mayor adherencia a la mezcla. Se trata de un pelaje corto de aproximadamente 40-127 mm de longitud y 14-40 μ de ancho [6] (Fig. 4.4). Debido que este elemento se trata de una fibra natural y llega al laboratorio directamente sin tratamiento alguno, debe ser saneado para evitar impurezas indeseadas y separado de manera que al mezclarlo con el resto de componentes se consiga de una manera lo más homogénea posible.

En cuanto a la arcilla, esta proviene directamente de la fábrica de Innovarcilla situada en Jaén (muy cercana a nuestra situación de trabajo) lista para su pesada y utilización. (Fig. 4.5) El comportamiento plástico de los suelos elegidos para la realización de este estudio ya descritos en el apartado anterior 3.2, le proporcionan a la mezcla mayor o menor trabajabilidad. Según las conclusiones obtenidas anteriormente [34] y de acuerdo con la práctica obtenida a través de la realización de numerosas probetas, podemos afirmar que existe una clara relación entre el índice de plasticidad de la arcilla con la absorción de agua y su trabajabilidad. Por tanto, podemos decir que el suelo de arcilla rubia se trata del suelo con mayor índice de plasticidad, por lo que se trata de la



(Fig.4.2)
Componentes para la dosificación



(Fig.4.3)
Instrumentación básica de trabajo
(Fig.4.4) Saneado de la lana





(Fig. 4.5) Suelo rojo de Innovarcilla



(Fig. 4.6) Construcción tradicional realizada con adobe sobre zócalo de piedra

arcilla mas absorbente de las tres, convirtiéndose en el suelo más seco de los suelos usados y más difícil de moldear. Este tipo irá seguido de la arcilla negra y por último de la roja.

Una vez preparada la mezcla previa de arcilla y lana se procederá a la incorporación paulatina del agua generando como reacción inmediata la unión de estas. (Fig. 4.6-7) Esta incorporación debe conseguir la completa humectación de todas las partículas, de manera que, si se incorporase toda la cantidad de agua de un golpe se crearían grumos. Por consiguiente, deberá producirse el amasado y rotura de estas aglomeraciones.

El siguiente elemento a incorporar poco a poco será el alginato (Fig. 4.8). Al igual que en ensayos anteriores realizados en la Universidad de de Sevilla [34] se trata de un polímero seco como sal soluble y con una cantidad de alginato de sodio del 15%, junto a cargas de calcio consiguiendo una notable mejora de resistencia del bloque. Debido a su alta capacidad de retención de agua, una vez que se empieza a verter este material se deben de terminar de mezclar y realizar las probetas con la mayor rapidez posible ya que éste tardará poco tiempo en terminar de reaccionar, y por tanto, de endurecer. En este punto es donde se aprecia la trabajabilidad de la arcilla, ya que ésta puede perder más o menos cantidad de agua y hacer que la mezcla sea menos trabajable. En el caso de los pequeños grumos que se van formando a lo largo del procedimiento, deben ser disueltos para conseguir posteriormente una mejor compactación de la probeta. (Fig 4.9) Sobre ello, y tras la experiencia obtenida en la realización de las mismas, se puede decir que en las probetas realizadas con arcilla amarilla se formaban mayor cantidad de grumos difícilmente separables y que resulta ser el suelo que necesita mayor rapidez de ejecución al disponer de mayor capacidad de absorción de agua y endurecimiento.

Una vez terminada la mezcla homogénea se vierte esta en los diferentes moldes. Previamente al vertido, se deberá proporcionar, sea cual sea el molde a utilizar, un material desencofrante que permita la separación de las probetas posteriormente del molde con mayor facilidad.

Por último, una vez extraídas las diferentes probetas de sus moldes deben retirarse a recipientes que les permitan su correcto secado natural. En nuestro caso, se sitúan en elementos de cartón separadas lo suficientemente una de otras, de manera que el cartón ayude a su secado. Es conveniente que cada cierto tiempo se giren las probetas para que todas las caras tengan el mismo

4. Planteamiento experimental

grado de secado. Se da por entendido además, que la superficie de apoyo de las mismas será plana de tal forma que se evite un secado inadecuado que le origine a la pieza cualquier grieta o imperfección por su curvatura. Las probetas por tanto, se secaron en el laboratorio con un ambiente no controlado entorno a 20-25°C. En el caso de las probetas "baldosas" al tratarse de una pieza de menor espesor que las prismáticas, necesitan menos tiempo de secado aparentemente. A pesar de ello, según normativa, todas las probetas que vayan a ser sometidas a cualquier ensayo, sobretodo de compresión y tracción, deben mantener un tiempo de espera y curado de 28 días para poder ser utilizadas. (Fig.4.11)

Como conclusión podemos decir que la apariencia final y sensaciones obtenidas de las diferentes probetas realizadas en función del tipo de arcilla utilizado no son las mismas. En el caso de la arcilla rubia, a pesar de ser las más difícil de trabajar cuenta con una mejor apariencia final. Ello es debido a que el manejo de un suelo tan seco permita una mejor compactación de la misma. Por otro lado, el suelo gris cuenta de una mayor facilidad de disgregación del material y aparición de fisuras superficiales durante y tras su curado, originadas por la retracción de agua producida en su secado. Aparentemente, las probetas realizadas con la arcilla roja y rubia no presentan variaciones visuales significativas.

4.3 DIMENSIONES DE LAS PIEZAS

En cuanto al tamaño de las piezas podemos decir que los tres tipos de suelos arcillosos se vieron divididos a su vez en dos tipos diferentes de formato, lo que conlleva a un proceso elaboración y a una fuerza de compactación diferentes, originando por tanto diferencias en cuanto a los resultados obtenidos propios de las probetas tales como densidad, resistencia, entre otros. Además, la determinación de las dimensiones de los bloques se establece de acuerdo con la descripción recogida en las Normas UNE-EN 772-16:2011.

En primer lugar nos encontramos con las piezas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm elaboradas mecánicamente en una adobera manual. (Fig.4.13) La tobera cuenta con dos oquedades con fondo movable de manera que según la fuerza de palanca que se le ejerza, el fondo se encontrará en la



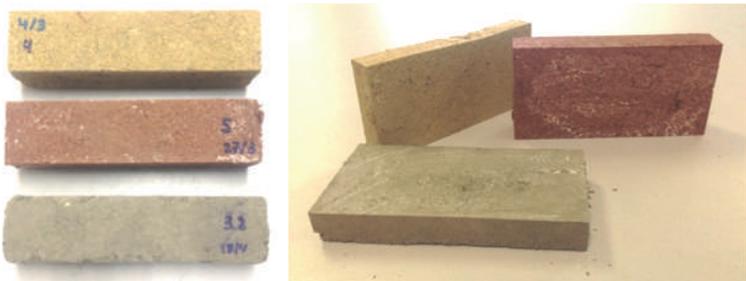
(Fig. 4.7) Mezcla de arcilla y lana
(Fig. 4.8) Unión de alginato a la mezcla



(Fig.4.9) Disolución de los grumos
(Fig. 4.10) Curado de las probetas durante 28 días



(Fig.4.10) Presión manual por tongadas ensayar



(Fig.4.12-13) Obtención de probetas prismáticas con adobera

(Fig.4.14-15) Obtención de baldosas con prensa hidráulica

parte superior elevando las piezas para poder ser retiradas o en la zona más baja permitiendo el llenado del molde con nueva mezcla. (Fig. 4.12) Estas dos piezas se consiguen vertiendo la mezcla en tongadas poco a poco y presionándolas manualmente hasta rellenar el molde(Fig.4.10). Posteriormente se compacta mediante una actividad de presión-palanca y por último, se elevan las piezas ya compactadas. Estas piezas deben separarse del molde mediante translación de forma que las probetas resultantes no sean dañadas en absoluto para depositarlas en su lugar de secado.

Por otro lado, tenemos las probetas "baldosas" de 55 x 15 x 110 mm elaboradas mecánicamente por la prensa hidráulica. Esta máquina cuenta con un molde horizontal en el cual se puede ir modificando la altura en función del espesor requerido y donde se le vierte la cantidad necesaria para conformar la probeta. Una vez introducida la mezcla en el molde, la máquina cuenta con un émbolo al cual se le establece una altura de 15mm y una presión en su cara superior de 120Kg. (Fig.4.14) Una vez finalizada la tarea de prensa se obtiene la pieza correctamente compactada y puede ser retirada para su correcto secado. (Fig. 4.15) En ambos casos, la mezcla aportada se encuentra húmeda y el desmolde se realiza inmediatamente una vez conseguida la compactación de la probeta. Será necesario comprobar si las piezas pequeñas al estar mejor compactadas tendrán mejores resultados que las de mayor tamaño. En la tabla 4.2 aportada a continuación se recogerán las probetas realizadas:

(Tabla 4.2)
Elaboración de probetas

Fecha de Elaboración	Tipos de probetas						Disponibilidad de ensayo
	ROJAS	BAL. ROJOS	AMARILLAS	BAL. AMARILLOS	NEGRAS	BAL. NEGROS	
07.03.17			4				05.04.17
14.03.17	4						12.04.17
21.03.17					9		19.04.17
28.03.17	8	3					26.04.17
30.03.17			3	1	2	1	28.04.17
04.04.17			10	5			03.05.17
06.04.17	4	1			1	6	05.05.17
18.04.17					6		17.05.17
20.04.17	2		2				19.05.17
25.04.17	1	3					24.05.17
TOTAL:	19	7	19	6	18	7	

Se ha previsto la realización de probetas suficientes de los diferentes tipos con previsión de seleccionar aquellas que cuenten con mejores prestaciones y descartar las restantes o deficientes.

4.4 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN:

Se ha procedido a la realización de una serie de ensayos de caracterización de todas las probetas elaboradas de manera se pueda recopilar toda la información referente a las propiedades físicas, los posibles efectos visuales ya comentados anteriormente tales como fisuras, oquedades,..y determinar los índices de compacidad y posibles irregularidades intergranulares existentes en los bloques realizados.

4.4.1 DENSIDAD APARENTE:

- **Introducción:**

Se entiende por densidad aparente como el "cociente entre la masa de la materia seca de un cuerpo poroso y su volumen aparente, expresado en gramos por centímetro cúbico o kilogramos por metro cúbico; entendiéndose el volumen aparente, como la suma de los volúmenes de la materia sólida, los poros abiertos y los poros cerrados dentro de un cuerpo poroso".[44] Podemos decir por tanto que la densidad aparente de los bloques dependerá de las densidades de los materiales que la componen.

Se han tomado dichas densidades de las probetas con el objetivo de comprobar cómo varían los resultados una vez afectados frente al hielo deshielo los bloques elaborados. De esta manera, tendremos los resultados obtenidos antes y después del ensayo.

- **Metodología:**

Para obtener los datos de densidad aparente de las probetas se ha procedido a la medición de todas y cada una de ellas, tanto prismáticas como baldosas con la ayuda de un calibre digital (pie de rey) y una balanza de precisión comprobando y recogiendo así las dimensiones y pesos de las mismas. (Fig. 4.16-17) Este trabajo se ha realizado tanto a los tres tipos de suelos utilizados como a los dos formatos previstos a estudiar. Para la obtención de la compacidad de las diferentes probetas, se utiliza la siguiente expresión: $Compacidad (\%) = (Dap/Dre) \times 100$, donde la densidad real ha sido obtenida con la ayuda de un volumenómetro en laboratorio.



(Fig.4.16) Probetas tipo prismáticas a ensayar



(Fig.4.17) Probetas tipo baldosas a ensayar



(Fig.4.18) Medición de las probetas prismáticas con pie de rey



(Fig.4.19) Pesado de probetas prismáticas en la báscula

• **Resultados:**

A continuación mostramos los resultados obtenidos con respecto a las medidas, densidades aparentes y reales y compacidad de las diferentes probetas. (Tabla 4.3-4). Para ello se ha codificado cada probeta a ensayar según una numeración y la nomenclatura A,R o N en función del tipo de suelo del que se compone (Rubia, Roja o Negra).

Nº	Dimensiones (mm)			Volumen (cm ³)	Pe se (gr)	D apa. (gr/ cm ³)
	Tizón	Gruoso	Soga			
1R	40,0	39,0	157,0	244,92	391,57	1,60
2R	40,0	37,0	157,0	232,36	376,93	1,32
3R	40,0	37,0	156,0	230,88	371,99	1,61
4R	40,0	36,0	157,0	226,08	363,76	1,61
5R	40,0	37,0	157,0	232,36	383,73	1,65
6R	45,0	38,0	157,0	268,47	380,83	1,42
1A	40,0	37,0	158,0	233,84	364,2	1,56
2A	40,0	39,0	158,0	246,48	381,95	1,48
3A	40,0	39,0	158,0	246,48	364,07	1,48
4A	40,0	39,0	158,0	246,48	353,95	1,44
5A	40,0	39,0	158,0	246,48	355,62	1,45
6A	40,0	38,0	158,0	240,16	371,97	1,55
1N	40,0	42,0	158,0	265,44	386,27	1,46
2N	40,0	40,0	158,0	252,80	371,99	1,47
3N	40,0	42,0	159,0	267,12	364,97	1,37
4N	40,0	40,0	158,0	252,80	357,28	1,41
5N	40,0	41,0	158,0	259,12	371,28	1,43
6N	40,0	42,0	158,0	265,44	382,27	1,44

Prismáticas

(Tabla 4.3)- Densidad aparente de las probetas prismáticas

4. Planteamiento experimental

Nº	Dimensiones (mm)			Volumen (cm3)	Pe se (gr)	D apa. (gr/cm ³)	
	Tizón	Grueso	Soga				
1R	53,7	15,7	107,4	90,55	154,6	1,71	
2R	53,7	14,7	107,9	85,18	143,9	1,69	
3R	53,6	14,0	107,7	80,82	136,2	1,68	
4R	53,9	12,1	107,9	70,37	115,9	1,65	
5R	53,9	12,2	107,8	70,89	118,7	1,67	
6R	53,8	12,1	107,7	70,11	116,8	1,67	
Baldosas	1A	54,0	15,4	108,4	90,15	148,2	1,64
	2A	53,7	15,6	108,3	90,73	144,2	1,59
	3A	53,9	17,6	108,6	103,02	166,1	1,61
	4A	53,7	14,5	108,2	84,25	137,8	1,64
	5A	53,4	13,5	108,4	78,15	126,6	1,62
	6A	53,9	17,0	108,3	99,24	161,9	1,63
1N	54,2	15,6	108,6	91,82	150,1	1,63	
2N	54,3	17,0	108,2	99,88	163,0	1,63	
3N	54,1	15,0	108,3	87,89	144,4	1,64	
4N	53,9	15,8	108,8	92,66	151,3	1,63	
5N	54,1	15,8	108,4	92,66	150,8	1,63	
6N	53,9	15,9	108,5	92,99	150,2	1,62	

(Tabla 4.4)- Densidad aparente de las probetas tipo baldosas

- **Análisis de resultados:**

A continuación mostramos una tabla de resultados (Tabla 4.5) de forma resumida, donde se expresan las medias e intervalos entre los que discurren los valores añadidos anteriormente (Tabla 4.3-4). Gracias ella, se puede decir que los valores obtenidos de densidad aparente son muy variables, oscilando entre 1,32 y 1,71 gr/cm³. Se puede apreciar como las densidades en las baldosas son mucho mayores consiguiendo por tanto, una compacidad mucho menor que las



(Fig.4.20) Medicion de las probetas tipo baldosas con pie de rey



(Fig.4.21) Pesado de probetas tipo baldosas en la báscula

prismáticas. Esto se debe, a pesar de tener la misma composición, a la diferencia de presión establecida entre la prensa hidráulica y la prensa mecánica a la hora de ser conformadas.

Por otro lado, en referencia al tipo de arcilla utilizado, se puede deducir que la arcilla negra es propensa a tener más poros intersticiales, seguida de la amarilla y la roja, hecho el cual mermará sus posteriores resistencias y será significativo en cuanto a su comportamiento frente al agua.

Probetas		Densidad aparente (gr/cm ³)		
		Probetas prismáticas	Probetas baldosines	Densidad aparente del material
Arcilla Roja	Intervalo	1,32 - 1,65	1,65 - 1,71	1,32 - 1,71
	Media	1,54	1,68	
Arcilla Rubia	Intervalo	1,44 - 1,56	1,59 - 1,64	1,44 - 1,64
	Media	1,49	1,62	
Arcilla Negra	Intervalo	1,37 - 1,47	1,62 - 1,64	1,37 - 1,64
	Media	1,43	1,63	

(Tabla 4.5)- Densidades aparentes del material. Valores medios

4.4.2 ULTRASONIDOS:

• Introducción:

El análisis por ultrasonidos se considera un ensayo previo a realizar al tratarse de una técnica no destructiva y de ahí su aceptación para conseguir datos previos acerca de la resistencia de los materiales. Esta técnica, con el aporte de ondas ultrasónicas a través del bloque permite la detección del grado de compacidad o disgregación interior. De esta manera, se pueden extraer conclusiones no solo de su aspecto visual sino también de la posible presencia de discontinuidades en el interior de la pieza tales como fisuras o disgregaciones intergranulares. [45]. Según la EHE, en su apartado de "Ensayos de información del hormigón" introducen este ensayo como técnica no destructiva fiable para el análisis del mismo. Por ello, se aplicará a nuestro material de ensayo. También su desarrollo queda recogido en el la UNE 12504-4. "Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos".[9]

• Metodología:

Cabe decir previamente que los ultrasonidos son oscilaciones micromecánicas que se propagan a través de medios elásticos, ya sean éstos sólidos, líquidos o gaseosos. Para ello se emplea un rango de frecuencia que oscila entre 20 KHz-1MHz. [45]

Para la realización de este ensayo, y al igual que en trabajos previos en la Universidad de Sevilla, se ha utilizado un modelo ultrasónico BPV Krautkramer. [6] Consiste en la medición de la velocidad de las ondas longitudinales a través de la probeta desde que sale de una sonda hasta que llega a la siguiente. Para ello, el equipo cuenta con transductores cilíndricos de 36 mm de diámetro (uno emisor y otro receptor) que emiten ondas con una frecuencia de 50KHz. Para conocer el tiempo transcurrido este equipo cuenta con una pantalla de cristal líquido donde se expresa el resultado con una precisión de μ s.

Para el correcto aporte de resultados, es preciso conseguir una transmisión de ondas adecuadas entre los palpadores y la probeta por lo que la unión entre ellos debe estar lo mejor conectada posible sin que ningún otro elemento entre en contacto con la pieza a ensayar. No hay que olvidar



(Fig.4.22) Modelo ultrasónico con transductores cilíndricos y piezas de tarado



(Fig.4.23) Medición a ultrasonidos a probetas de baldosas



(Fig.4.24) Medición a ultrasonidos a probetas prismáticas

(Tabla 4.6-7)- Resultados de ultrasonidos

Nº	Distancia	Tie. Ultra.	Velocidad
	mm	µs	m/s
1R	107,4	86,8	1237,33
2R	107,9	89,0	1212,36
3R	107,7	89,8	1199,33
4R	107,9	86,8	1243,09
5R	107,8	89,2	1208,52
6R	107,7	87,6	1229,45
1A	108,4	73,3	1478,85
2A	108,3	72,7	1489,68
3A	108,6	78,3	1386,97
4A	108,2	73,6	1470,11
5A	108,4	73,7	1470,83
6A	108,3	77,5	1397,42
1N	108,6	75,5	1438,41
2N	108,2	73,8	1466,12
3N	108,3	72,3	1497,93
4N	108,8	72,6	1498,62
5N	108,4	73,8	1468,83
6N	108,5	74,4	1458,33

Nº	Distancia	Tie. Ultra.	Velocidad
	mm	µs	m/s
1R	157,0	158,4	991,16
2R	157,0	165,1	950,94
3R	156,0	156,5	996,81
4R	157,0	160,0	981,25
5R	157,0	159,5	984,33
6R	157,0	156,2	1005,12
1A	158,0	136,8	1154,97
2A	158,0	145,7	1084,42
3A	158,0	160,0	987,50
4A	158,0	165,0	957,58
5A	158,0	159,0	993,71
6A	158,0	134,0	1179,10
1N	158,0	177,7	889,14
2N	158,0	165,0	957,58
3N	159,0	233,0	682,40
4N	158,0	199,0	793,97
5N	158,0	180,5	875,35
6N	158,0	166,4	949,52

que la presión ejercida sobre la probeta debe ser siempre un valor constante que permita la veracidad del resultado elegido final, y para ello, se han tarado los transductores durante la toma de datos repetidas veces.

Para conocer la velocidad de los trenes de ondas, se debe calcular en función del tiempo empleado en alcanzar una distancia determinada por lo que tendrá que regirse en base a la ecuación: $V=d/t$, siendo d la distancia entre el palpador de emisión y receptor y coincidiendo en nuestro caso con las dimensiones longitudinales de las probetas ensayadas, y t el tiempo en microsegundo obtenido con el modelo ultrasónico.

• **Resultados:**

A continuación la tabla 4.6-7 recogerá los valores obtenidos en µs y los valores de velocidades calculados tanto para las piezas prismáticas como baldosas en los tres tipos de suelos.

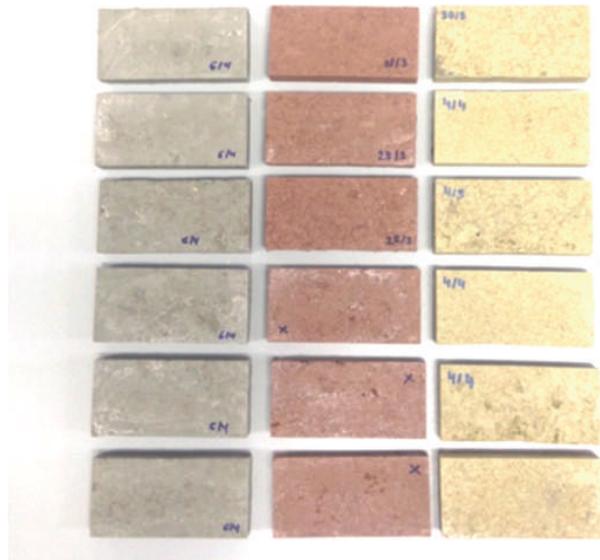
- **Análisis de resultados:**

Dado que con el ensayo de ultrasonidos solo se obtienen tiempos que nos ayudan a saber si nuestro material es homogéneo o cuenta con dispersiones interiores, se puede decir que se trata de un ensayo más cualitativo que cuantitativo. Según los datos en casos de estudio [45] se podría asignar una correlación fiable entre la resistencia del material, su compactación, porosidad y la velocidad obtenida de propagación de ultrasonidos.

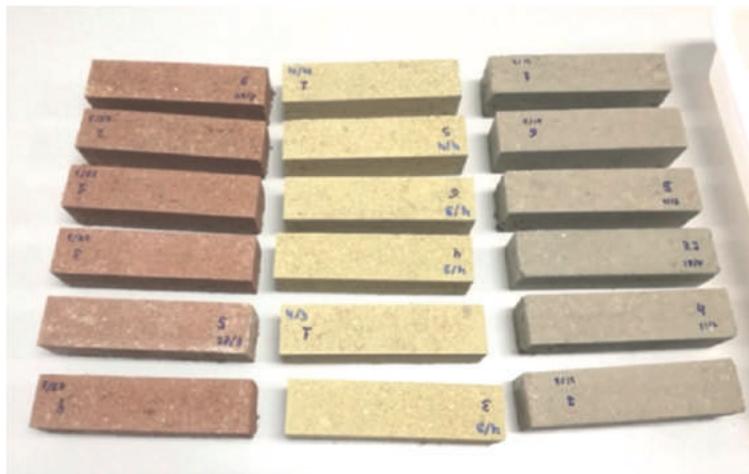
Por tanto, podemos decir que una mayor velocidad de propagación de ultrasonidos da lugar a que la probeta ensayada sea más compacta y por tanto, cuente con un menor índice de poros, aumentando su valor de resistencia. En nuestro caso, según los datos recogidos en la tabla 4.8, las baldosas cuentan con valores de velocidades mucho mayores que las prismáticas resultado derivado de la compactación ejercida durante su proceso de elaboración. En cuanto a las diferencias en este caso entre suelos, la variación no ha sido significativa en las probetas tipo baldosas por lo que esa correlación entre la velocidad y resistencia no ha sido representativa. Esto se puede corroborar con los resultados de resistencias expresados en los apartados próximos. Por otro lado, en el caso de las piezas prismáticas, sí que se puede apreciar una distinción de valores oscilando entre los 950 a 1180m/s según el material.

Baldosas					Prismáticas				
MEDIA	Distancia	Tie. Ultra.	Velocidad	D apa.	MEDIA	Distancia	Tie. Ultra.	Velocidad	D apa.
	mm	μs	m/s	(gr/cm ³)		mm	μs	m/s	(gr/cm ³)
R	107,73	88,20	1221,68	1,68	R	156,83	159,28	984,93	1,54
A	108,37	74,85	1448,98	1,62	A	158,00	150,08	1059,55	1,49
N	108,47	73,73	1471,38	1,63	N	158,17	186,93	857,99	1,43

(Tabla 4.8)- Datos medios de ultrasonidos y densidades aparentes



(Fig.4.25) Elección de 6 probetas baldosas por suelo para realizar el ensayo



(Fig.4.26) Elección de 6 probetas baldosas por suelo para realizar el ensayo.

4.5 ENSAYOS DE COMPORTAMIENTO FRENTE AL AGUA:

Siempre se ha establecido que una de las principales desventajas que presenta la construcción con tierra y por consiguiente de estos bloques al entrar en contacto con el agua son la expansión producida al estar en contacto con mucha cantidad de agua y su retracción al secarse.[8] Por ello, la normativa *UNE 41410-2008 para Bloques de tierra comprimida en muros y tabiques* establece una serie de criterios acerca del comportamiento de estos bloques en relación con el agua. Para comprobar si estos bloques son aptos o descartables, esta norma UNE establece cuatro tipos de ensayos diferentes: *el ensayo de resistencia a ciclos de humectación/ secado, resistencia a la erosión por un chorro continuado de agua, la capacidad de absorción de agua por capilaridad y por último, la resistencia que ofrece un bloque frente a ciclos continuados de hielo/ deshielo.* Debido a la importancia que confiere el agua y las bajas temperaturas para los bloques del presente estudio y según los objetivos especificados al comienzo del mismo, el trabajo se centrará en la heladicidad de las probetas y las repercusiones que ello conlleva. Quedará descartado en este caso el resto de ensayos relacionados con agua para su estudio en otro momento por otro de los compañeros de trabajo del laboratorio.

4.5.1 RESISTENCIA A CICLOS DE HIELO/DESHIELO:

- **Introducción:**

Para comprobar si los bloques de tierra comprimida estabilizada realizados cumplen ante los ciclos de hielo y deshielo, en primer lugar, debemos establecer los criterios de exposición para los que se tiene previsto su utilización. En este caso, estos bloques se estudian para comprobar su correcta utilización en un ambiente de exposición exterior donde hay riesgo continuado de agua y heladas en determinadas épocas del año.

A pesar de la existencia de una norma UNE referente a los bloques de tierra comprimida [8] y contar con un apartado relacionado con el ensayo de resistencia a heladicidad, no existe especificación alguna en relación a los condicionantes a cumplir ni al tipo de ensayo que debe realizarse. La norma establece que en función de los usos para los cuales haya sido elaborado un

BTC, el propio fabricante deberá evaluar y declarar la resistencia del material, haciendo referencia a la experiencia previa de utilización en la zona de uso hasta la próxima norma europea que salga disponible. En este caso, la norma establece la posibilidad de aplicación de algún revestimiento superficial que ayude a proteger el bloque. Esta recomendación se tendrá en consideración en el caso de obtención de resultados negativos tras el ensayo.

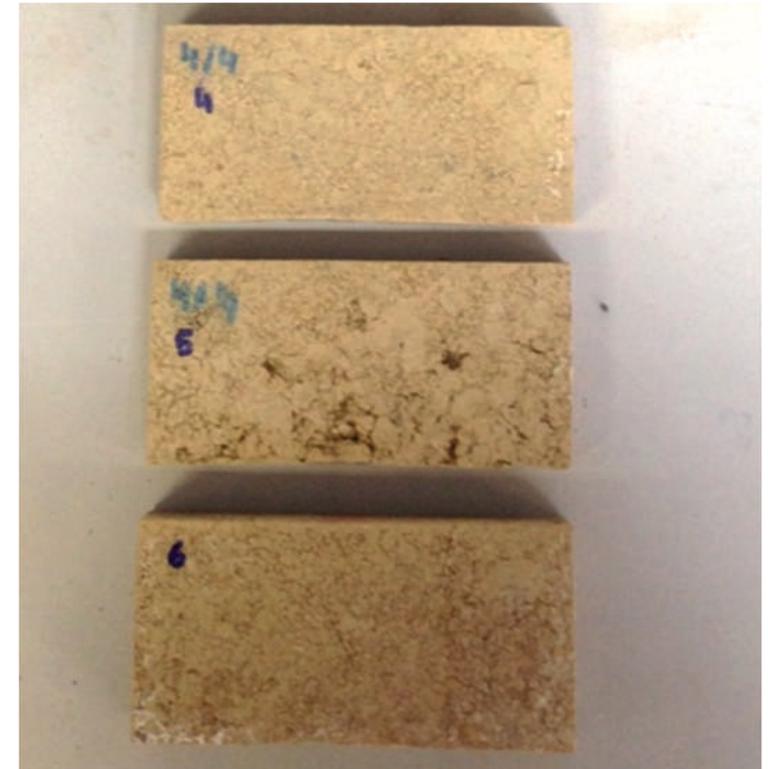
Conocida la falta de información en referencia a la determinación de la resistencia a heladicidad por parte de la norma europea para BTC nos regiremos por las consideraciones establecidas en la *UNE 67028:1997 para ladrillos cerámicos de arcilla cocida*. [10]. Se trata de una norma específica para la determinación de ladrillos cocidos frente a la heladicidad. Al no tratarse del mismo producto objeto de ensayo, se propone la modificación del proceso establecido en la norma de ladrillos cocidos con las adaptaciones de los parámetros necesarios para ensayar un BTCE. [10]

- **Metodología:**

Para la obtención de los resultados adecuados, esta norma UNE establece un procedimiento de actuación riguroso en cuanto a duraciones y temperaturas se refiere.

En cuanto a las muestras necesarias para realizar el ensayo, la norma establece la utilización de 6 muestras completas, es decir, en nuestro caso serán 6 probetas de cada arcilla elaborada. De la misma manera, se elegirán las dos tipologías de probetas realizadas. (Fig. 4.25-26) Previo a la realización del ensayo, y una vez obtenido todos los resultados de caracterización de las probetas, se procede a una detallada inspección visual de las mismas. De esta manera, se comprueba que todas las baldosas a utilizar no cuentan con irregularidades tales como por ejemplo fisuras, que puedan condicionar el ensayo. (Fig. 4.27)

Una vez seleccionadas las probetas, teniendo en cuenta que para ello también se han utilizado los datos de caracterización obtenidos anteriormente, se procede al secado en estufa de las mismas. Se realiza el secado de las piezas a 70°C hasta alcanzar un peso constante. Posteriormente, se dejan aclimatar a temperatura ambiente. (Fig. 4.28) Para la parte experimental de heladas se requerirán los siguientes aparatos: una cámara frigorífica y un tanque de deshielo. La cámara frigorífica debe



(Fig.4.27) Probeta descartada y repuesta por apreciarse irregularidades en su cara



(Fig.4.28) Secado en estufa hasta peso constante



(Fig.4.29) Humectación de las caras de las probetas

ser capaz de alcanzar la temperatura de $-15^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ en un periodo máximo de 7h. Por otro lado, el tanque de deshielo debe contar con las medidas necesarias para permitir la descongelación completa de las probetas.

Una vez obtenidos los pesos secos de las probetas estas se verán sometidas a ciclos completos de 24h durante los cuales se realiza la humectación de las mismas, se introducen en la cámara frigorífica y se sacan para descongelar. (Fig. 4.29) Esta repetición se producirá durante 10 días completos. En el caso en que por falta de disponibilidad los ciclos tuviesen que ser interrumpidos, las probetas se deberán mantener en la cámara frigorífica a una temperatura de $-15^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Por tanto, las probetas se rocían con una cantidad de agua potable tal que permitan la cubrición de todas las caras superficiales de las probetas. (Fig. 4.30) Una vez que estas se han humedecido se procede a su introducción en la cámara frigorífica durante un periodo de tiempo de 18h a temperatura constante especificada anteriormente. Transcurrido ese periodo de congelación las probetas se sacan al tanque de deshielo donde disponen de una manera separada tal que permita la descongelación y recuperación de temperatura ($15^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) de las probetas (Fig.4.31-32). Esta descongelación a temperatura ambiente en el interior del laboratorio se mantiene durante las siguientes 6h restantes del ciclo. La disposición de las probetas para su correcto secado se ha previsto vertical de manera que exista la menor superficie en contacto apoyada. (Fig. 4.33)

Una vez transcurrido el ciclo se procede de nuevo al pesado de las mismas y al comienzo de nuevo de la actividad.

- **Resultados:**

Una vez transcurrido los días requeridos para el ensayo y tras realizar un secado en estufa de nuevo hasta conseguir peso constante, se obtuvieron estos datos:

4. Planteamiento experimental

Nº	Pe Seco	Ciclos 24h										Pe Seco	Apeso
	(gr)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	(gr)	(%)
1R	154,6	151,8	153,9	156,1	156,1	158,0	158,5	159,1	159,4	160,5	163,8	152,3	-1,49
2R	143,9	141,1	144,3	146,0	146,0	148,9	148,8	149,7	149,5	151,1	154,2	141,7	-1,53
3R	136,2	133,9	136,7	138,7	137,5	139,6	140,2	140,9	141,5	143,7	146,6	134,3	-1,40
4R	115,9	114,3	116,5	119,0	118,4	120,6	121,0	121,4	121,8	123,0	125,9	114,8	-0,95
5R	118,7	117,6	119,5	121,3	121,1	121,9	120,6	123,4	123,9	124,5	127,1	117,5	-1,01
6R	116,8	115,1	117,7	119,7	119,3	120,4	122,1	121,9	121,4	122,9	124,9	115,5	-1,11
1A	148,2	146,1	148,4	149,9	149,3	150,4	150,7	151,9	151,6	152,1	154,8	146,5	-1,15
2A	144,2	141,9	144,7	146,9	145,8	146,4	146,6	146,8	147,1	148,1	150,9	142,3	-1,32
3A	166,1	164,1	166,7	168,3	167,3	168,8	168,9	170,0	169,6	170,5	173,3	163,8	-1,38
4A	137,8	136,2	138,8	139,6	138,7	140,5	140,5	140,9	140,5	141,2	143,8	135,7	-1,52
5A	126,6	124,7	127,1	129,0	128,2	128,7	128,8	128,9	129,0	129,0	131,0	124,9	-1,34
6A	161,9	160,1	162,6	164,2	163,0	164,6	164,7	165,0	165,0	166,7	169,2	159,8	-1,30
1N	150,1	147,7	149,9	151,6	151,5	152,5	152,4	153,9	154,5	156,1	159,2	146,9	-2,13
2N	163,0	160,3	162,4	164,3	163,7	164,8	165,2	166,3	166,7	167,7	171,3	159,6	-2,09
3N	144,4	142,3	144,2	146,8	145,5	147,2	147,6	149,3	149,2	150,4	153,2	141,1	-2,29
4N	151,3	149,2	151,1	153,5	153,0	154,0	154,3	156,4	157,0	158,5	161,1	148,0	-2,18
5N	150,8	148,5	150,8	153,6	152,9	153,2	153,8	154,6	154,2	155,8	159,9	147,6	-2,12
6N	150,2	148,1	150,6	153,4	152,3	152,5	153,3	154,8	154,7	155,9	158,9	147,5	-1,80

(Tabla 4.9)- Pesadas de Ciclos de hielo/deshielo en baldosas



(Fig.4.30) Absorción de las probetas del agua superficial



(Fig.4.31) Congelación de las probetas humedecidas



(Fig.4.32) Preparación para introducir las en el congelador



(Fig.4.33) Separación de probetas que permitan su secado

Nº	Pe seco	Ciclos 24h										Pe seco	Apeso
	(gr)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	(gr)	(%)
1R	391,6	385,9	388,5	391,2	391,4	392,7	394,9	398,0	398,0	399,9	407,7	385,5	-1,55
	376,9	369,4	372,5	376,1	375,7	377,3	379,2	381,9	382,1	383,6	389,9	369,4	-2,00
	372,0	366,1	369,1	372,1	372,0	373,6	375,5	378,2	378,0	380,9	386,2	366,1	-1,58
	363,8	357,4	360,5	363,9	363,9	365,8	367,5	369,5	369,6	371,7	378,5	357,7	-1,67
	383,7	377,3	380,3	383,2	383,5	385,3	387,6	389,8	390,5	392,2	400,1	377,1	-1,73
	380,8	377,6	376,2	379,6	379,6	380,8	382,2	385,5	386,0	388,2	394,6	373,4	-1,95
2A	364,2	358,3	361,1	363,7	363,2	364,1	366,2	367,3	367,9	368,9	371,8	358,4	-1,59
	382,0	375,1	377,4	380,0	379,7	380,4	382,2	384,0	383,9	386,9	389,3	374,3	-1,99
	364,1	357,9	360,1	363,2	363,0	363,1	364,9	367,6	366,6	368,3	372,4	357,6	-1,78
	354,0	348,5	351,9	354,0	353,2	354,2	355,9	357,7	357,0	358,8	364,2	348,1	-1,65
	355,6	350,3	353	355,1	355,1	355,62	357,3	360,4	359,3	360,6	365,8	349,6	-1,69
	372,0	366,7	369,1	371,5	371,5	372,3	373,7	375,6	375,4	376,7	381,7	366,7	-1,42
3N	386,3	381,8	383,6	386,4	385,9	385,7	387,4	386,3	385,7	387,3	391,2	375,8	-2,71
	372,0	367,4	369,7	372,4	371,5	371,6	373,3	374,2	373,3	374,4	379,4	363,9	-2,17
	365,0	338,3	341,1	343,0	342,3	342,8	343,7	344,0	343,7	345,4	349,2	333,9	-8,51
	357,3	353,2	355,3	356,6	356,7	356,7	357,3	356,9	356,5	357,9	362,2	347,8	-2,65
	371,3	366,7	369,2	370,9	370,8	370,5	371,8	371,5	370,3	371,6	375,6	361,9	-2,53
	382,3	377,9	380	381,6	381,1	381,9	383,2	383,4	383,0	384,8	389,0	375,1	-1,88

(Tabla 4.10)- Pesadas de Ciclos de hielo/deshielo en probetas prismáticas

Una vez completados los ciclos establecidos, y procedido el secado en estufa de nuevo hasta conseguir un peso constante para la eliminación de cualquier resto de agua intersticial que se hubiese quedado, se procede a la inspección ocular de las piezas. Se comprueba que durante el ensayo no se han producido roturas, exfoliaciones, ni desconchados de dimensión media superior a 15mm de cualquier parte de la pieza según lo establecido en la norma UNE 67019.[46]. La aparición durante el ensayo de cualquiera de los defectos citados, en algunas de las probetas del ensayo o más de una pieza fisurada calificará al bloque como heladizo.

4. Planteamiento experimental

- **Análisis de resultados:**

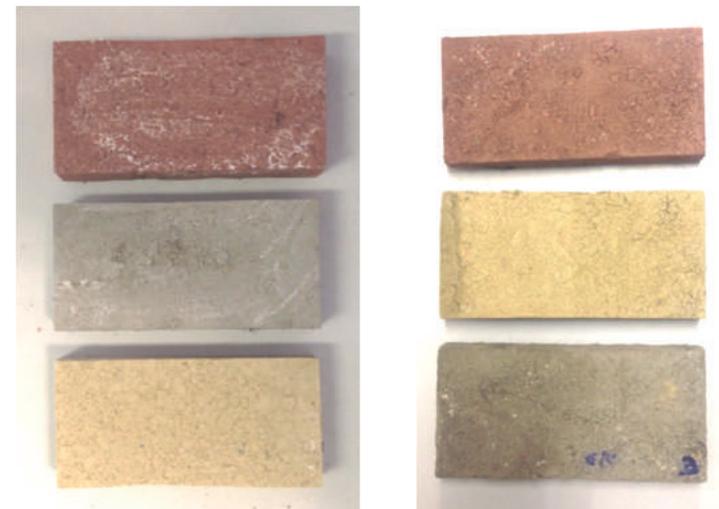
Dado el aporte continuado de agua a las probetas durante el ensayo y en relación a la experiencia vivida se puede decir en primer lugar que aparentemente todas estaban resistiendo adecuadamente a excepción de aquellas elaboradas a base de arcilla negra las cuales en cada ciclo se iban viendo un poco más deterioradas. Durante la actividad se puede apreciar como el agua produce la disgregación de las aristas de las probetas y su fácil deformabilidad. (Fig. 4.34) Por otro lado, al producirse el rociado de la mismas se puede apreciar como la absorptividad varía en función del tipo de arcilla utilizado. Las arcillas negras cuentan con una mayor rapidez de absorción del agua pulverizada seguidas de la rubia y la roja.

Tras la finalización de los ciclos, en la fase final de descongelación de las probetas y previo a la introducción de las mismas en la estufa de secado, pudimos apreciar que los bloques habían sufrido ya algunos deterioros. Pensando previamente que las baldosas (Fig. 4.35) en relación a su mayor compactación iban a funcionar mejor que las prismáticas (Fig. 4.36), podemos decir que ambas tipologías han sufrido las mismas patologías. Han aparecido en las caras superficiales pequeñas fisuras de retracción junto a la pérdida de material sobre todo en las aristas pero sin ninguna pérdida sustancial que clasifique los bloques de heladizas. Esto solo se puede decir que se cumple en los realizados a base de arcilla rubia y roja ya que aquellas que se fabricaron con la arcilla negra si han visto mermadas todas sus esquinas. La pérdida de material no se puede considerar excesivamente alarmante, pero se puede presuponer que con el avance de unos futuros ciclos más de aporte agua y congelado, estas acabarían considerándose como heladizas.

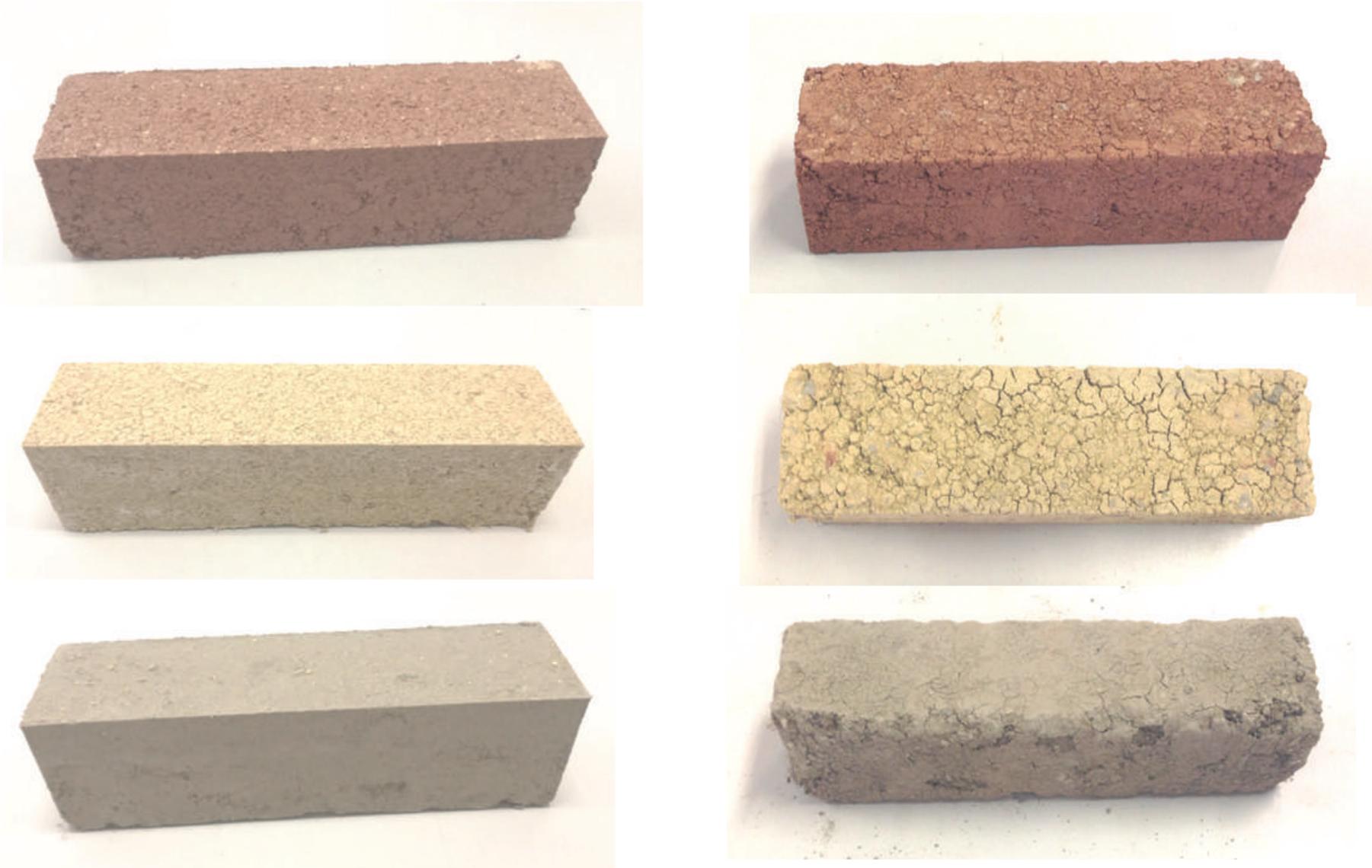
Una vez sacadas las probetas de la estufa, se ha vuelto a pesar y cuantificar la pérdida exacta que en ellas se ha producido y se ha recogido también en las tablas anteriores 4.9-10. Con ello, se puede corroborar que el material que más se ve afectado y reacciona perdiendo una mayor cantidad de materia son los bloques prismáticos de arcilla negra oscilando las pérdidas entre 1,8-2,7%. En este caso, el valor de la probeta 3N se considera fuera de rango y por lo tanto se descarta de los datos concluyentes obtenidos. A continuación de las prismáticas negras, continúan sin mucha variación las prismáticas rojas y amarillas oscilando sus valores entre los 5 -7 gr. Por otro lado, las baldosas han perdido una cantidad más reducida de material variando sus valores entre el 1-3%. Se concluye por tanto que la presión ejercida sobre las probetas a la hora de su elaboración sigue siendo significativa frente a su comportamiento frente al agua.



(Fig.4.34) Deformación y disgregación del material



(Fig.4.35) Aspecto visual antes y después del los ciclos de hielo/deshielo en baldosas



(Fig.4.36) Aspecto visual antes y después del los ciclos de hielo/deshielo en prismáticas

4.6 ENSAYOS DE COMPORTAMIENTO MECÁNICO:

Una vez que las probetas se han visto alteradas por la acción del agua, y el aumento-contracción de esta en su interior por el efecto de la bajada de temperaturas, se va a proceder a comprobar cómo esto ha podido alterar la resistencia tanto a compresión como a flexión de los respectivos bloques. Para ello, en estos apartados solo se utilizarán las probetas prismáticas. Una vez obtenido los resultados, con la ayuda de los resultados obtenidos por otros compañeros sobre la rotura a compresión y flexión de otra batería de probetas realizadas con la misma dosificación y en las mismas condiciones de laboratorio, se pueda comprobar el antes y después de la resistencia de los bloques.

De la misma manera que para los ensayos de agua, los bloques de tierra comprimida cuentan, en su norma *UNE 41410-2008 en el apartado de evaluación de conformidad*, con un requisito de resistencia a compresión para poder ser clasificado como apta su utilización.

Para la realización del ensayo, la norma UNE especifica la utilización de la norma *UNE-EN 772-1:2011* sin aplicación de algunos de sus apartados. No ocurre lo mismo en este caso con la resistencia a flexión, la cual cuenta para ello con la norma *UNE 1051-11:2000 Sobre "Métodos de ensayos de morteros para albañilería. Parte 2: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido"*.

4.6.1 RESISTENCIA A FLEXIÓN TRAS SER SOMETIDO A HELADICIDAD:

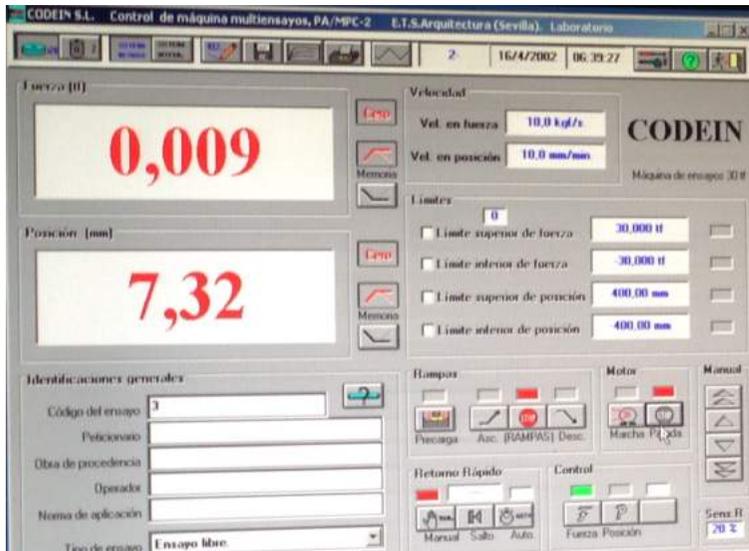
- **Introducción:**

En este apartado se describe la realización del ensayo encaminado a determinar la resistencia a flexión y deformación de las probetas prismáticas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm realizadas y ensayadas a hielo/deshielo de los tres tipos diferentes de suelo. La incorporación de fibras naturales como ya se ha explicado anteriormente a la mezcla le incorpora al bloque un aumento de su resistencia.

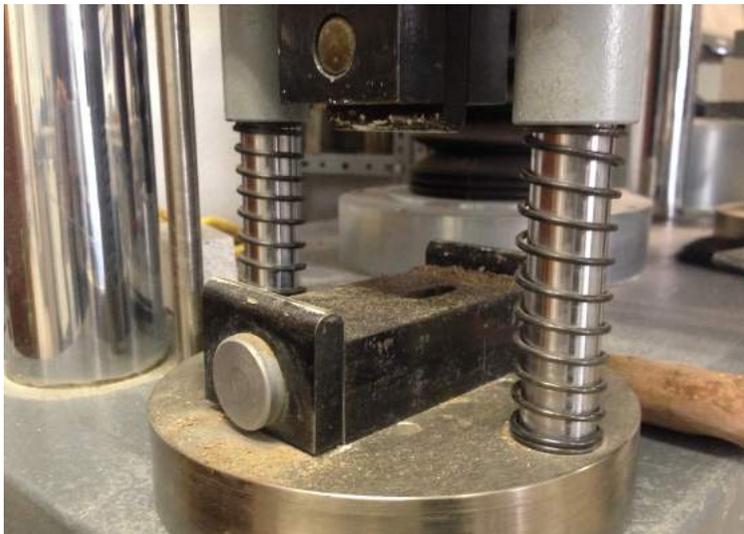
Además para comenzar cabe decir que la resistencia a flexión de los bloques se determina aplicándole una carga en tres puntos de los prismas hasta su rotura. [11]



(Fig.4.37) Prensa multiensayo para realizar los ensayos de compresión y flexión



(Fig.4.38) Programas informáticos para la obtención de resultados



(Fig.4.39) Máquina con dos rodillos de apoyo paralelo y uno central de carga

La no aparición de un apartado referido al cálculo a flexión de los bloques de tierra comprimidos tendremos que regirnos por la norma *UNE 1051-11:2000 Sobre "Métodos de ensayos de morteros para albañilería. Parte 2: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido"*. En este caso, según las especificaciones de la norma, solo vienen contempladas las especificaciones para las probetas prismáticas por lo que solo ensayaremos estas de los tres tipos diferentes de suelos.

- **Metodología:**

Para la obtención de los resultados de resistencia a flexión se ha utilizado de la misma manera que en casos anteriores [45][5][6], una prensa multiensayo de 300 kN, de la casa Codein S.L, modelo MCO-30, numero de serie 139. (Fig. 4.37) Con ella se puede obtener la carga de rotura, la deformación de la probeta y está adaptada y conectada a un software que permite el control y obtención de datos a través del ordenador. Con la ayuda de otros programas de cálculo, estos datos aportados pueden ser modificados, analizados y trabajados. (Fig. 4.38)

El ensayo a realizar a las probetas se conoce como ensayo de tres puntos aplicándole una carga máxima de 10KN a una velocidad estimada de 0,5MPa/s de tal modo que la rotura se produzca entre 30-90 s, cumpliendo de esta manera con las especificaciones detalladas en la UNE descrita con anterioridad. La maquina está provista de dos rodillos de apoyo en acero, con una longitud de 45mm y un diámetro de 10mm, separados entre sí 100mm, y de un tercer rodillo de carga de la misma longitud y diámetro instalado centralmente entre los rodillos de apoyo, (Fig. 4.39). Los tres planos verticales son paralelos y se confirma que estos permanecen paralelos durante todo el ensayo entre sí y con la probeta colocada. Para evitar un esfuerzo de torsión, uno de los rodillos de apoyo y el de carga pueden oscilar ligeramente de manera que se cree una distribución uniforme.

La norma especifica que todas la probetas a ensayar deben haber sido curadas, en este caso al haber realizado ya previamente el ensayo de hielo, las probetas ya habían alcanzado los 28 días y por si fuese necesario se han secado en estufa de nuevo hasta alcanzar su peso constante. Se ha cuidado mucho que la superficie de contacto entre las probetas y los rodillos estuviesen exentas de cualquier partícula adherida. Para su disposición sobre los rodillos se ha dispuesto de igual manera de como se obtuvo de la adobera. (Fig. 4.40).

4. Planteamiento experimental

Una vez partidas las probetas y registrados los datos necesarios en el ordenador, se guardarán las mitades de las probetas rotas para su posterior rotura a compresión. La resistencia a flexión final se calculará con la expresión siguiente: $f=1,5 \cdot (Fl/bd^2)$ donde b y d son la altura y anchura de las probetas y Fl la carga por la longitud entre apoyos (Fig. 4.41).

• Resultados:

Una vez obtenidos los resultados (Fig. 4.42-43-44-45) aportados por el programa informático y aplicada la formulación correspondiente al cálculo de la resistencia a flexión obtenemos la siguiente tabla 4.11 de resultados:

Nº	PROBETAS ROJAS			PROBETAS RUBIA			PROBETAS NEGRAS		
	CARGA MÁX.	TENSIÓN	DEFORMA.	CARGA MÁX.	TENSIÓN	DEFORMA.	CARGA MÁX.	TENSIÓN	DEFORMA.
	kg	N/mm ²	mm	kg	N/mm ²	mm	kg	N/mm ²	mm
1	29	0,68	1,9	37	0,87	0,82	12	0,28	1,94
2	31	0,73	1,71	38	0,89	0,63	21	0,49	2,36
3	36	0,84	0,76	23	0,54	0,66	-	-	-
4	29	0,68	0,68	20	0,47	0,61	9	0,21	2,23
5	32	0,75	1,73	26	0,61	0,73	15	0,35	1,92
6	38	0,89	0,75	40	0,94	0,68	14	0,33	2,45
MEDIA	32,5	0,76	1,26	30,67	0,72	0,69	14,20	0,33	2,18

(Tabla 4.11)- Resistencia a flexión de las probetas prismáticas

En el caso de la probeta N3, se encontraron incoherencias en los mismos y de ahí que se hayan descartado para este estudio. Según los resultados obtenidos en la tabla, con la ayuda de los valores medios de las probetas rubias con un valor de 0,72 N/mm² y las probetas rojas con 0,76 N/mm², se puede observar que el comportamiento a rotura de cada probeta es diferente en función del tipo de arcilla. A continuación se representan las curvas de tensión-deformación de las probetas ensayadas de cada material sometido al flexión. (Fig. 4.46-47-48)



(Fig.4.40) Colocación paralela a la base de apoyo



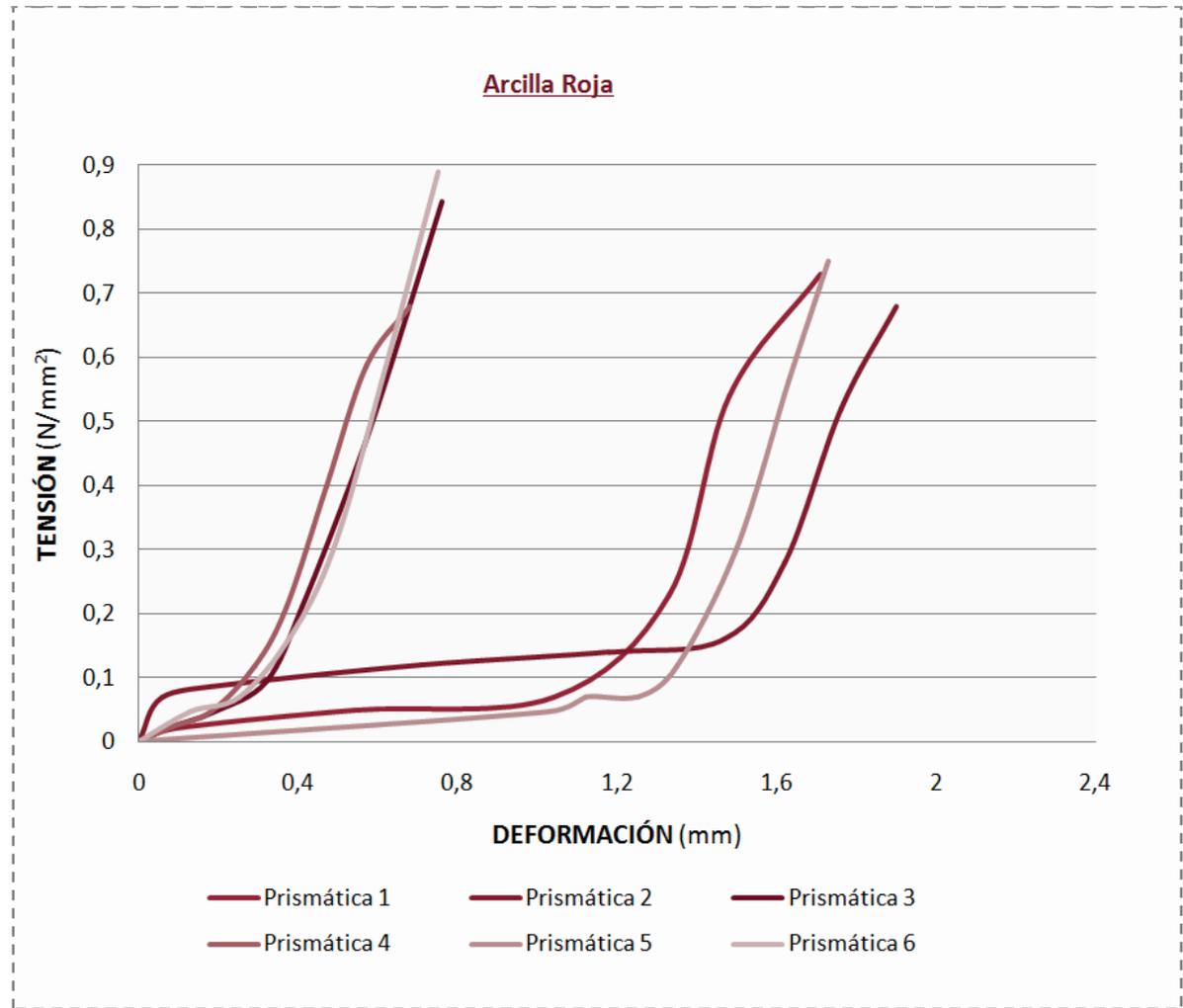
(Fig.4.41) Rotura de la probeta a flexión



(Fig.4.42) Probeta de suelo rojo rota a flexión

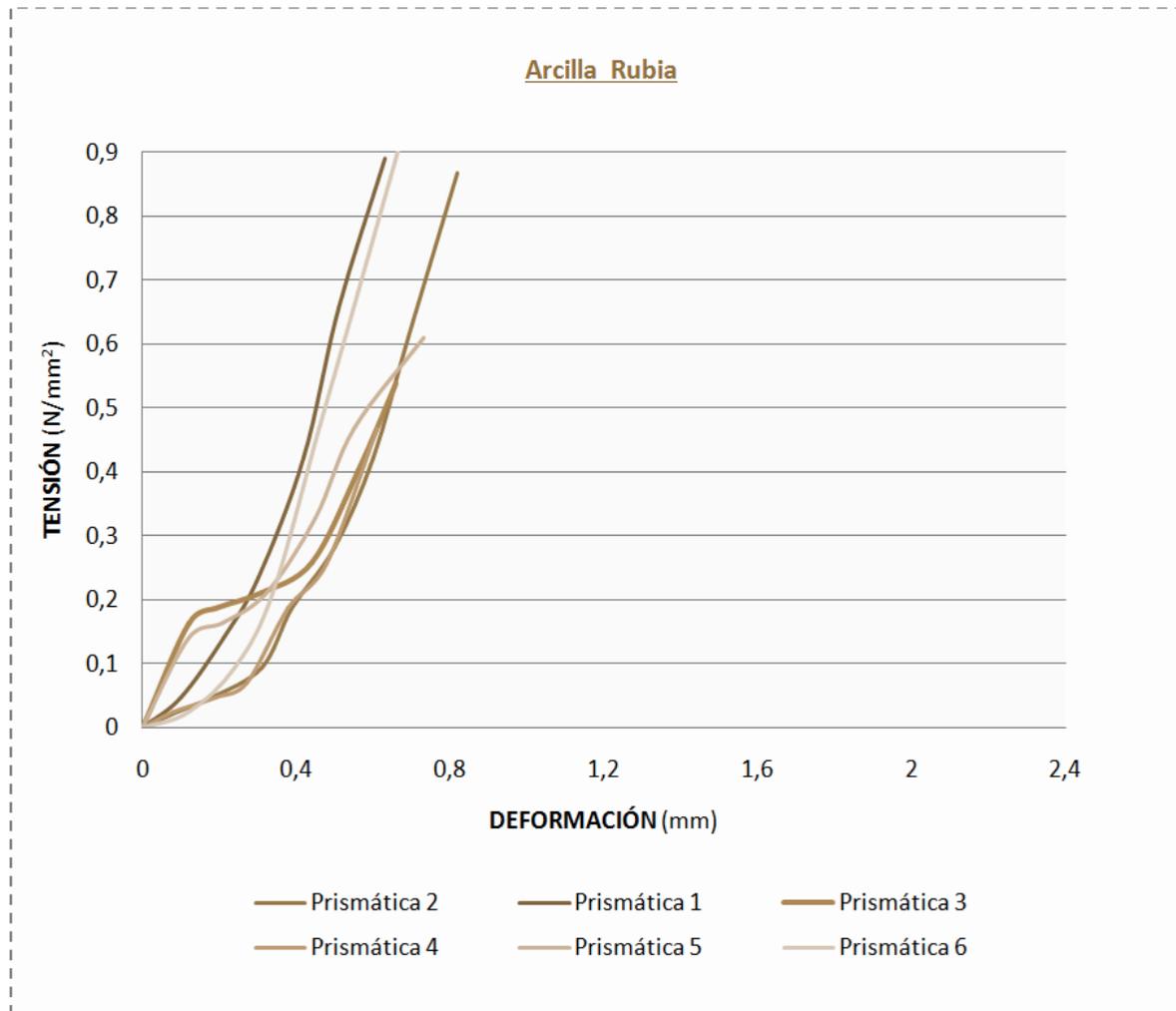


(Fig.4.43) Resultado tras la rotura de las probetas



(Fig.4.46) Gráfica tensión/deformación de las probetas prismáticas de arcilla roja
Ensayo a resistencia a flexión

4. Planteamiento experimental



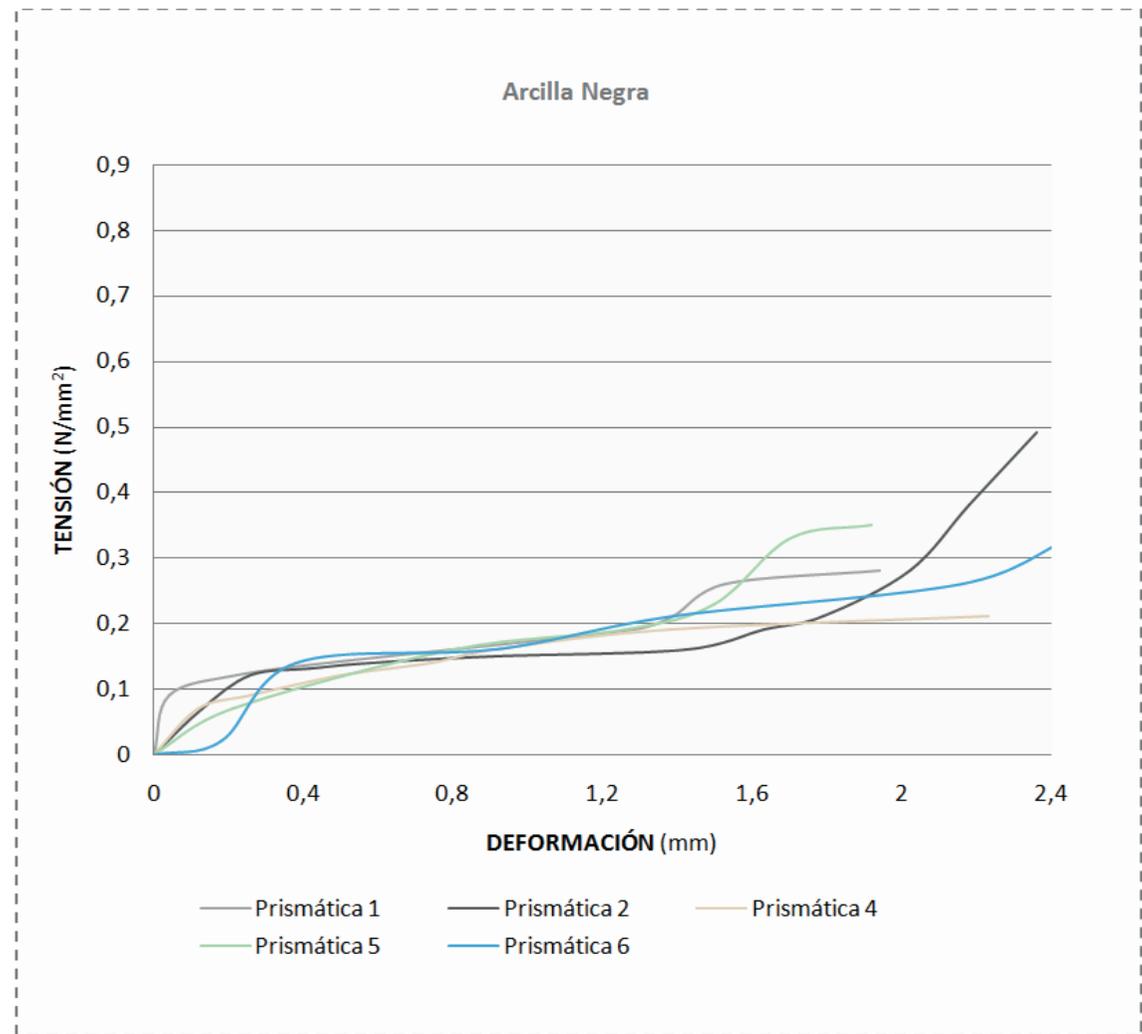
(Fig.4.47) Gráfica tensión/deformación de las probetas prismáticas de arcilla rubia
Ensayo a resistencia a flexión

(Fig.4.44) Probetas de suelo rubio rotas a flexión





(Fig.4.45) Probetas de suelo negro rotas a flexión

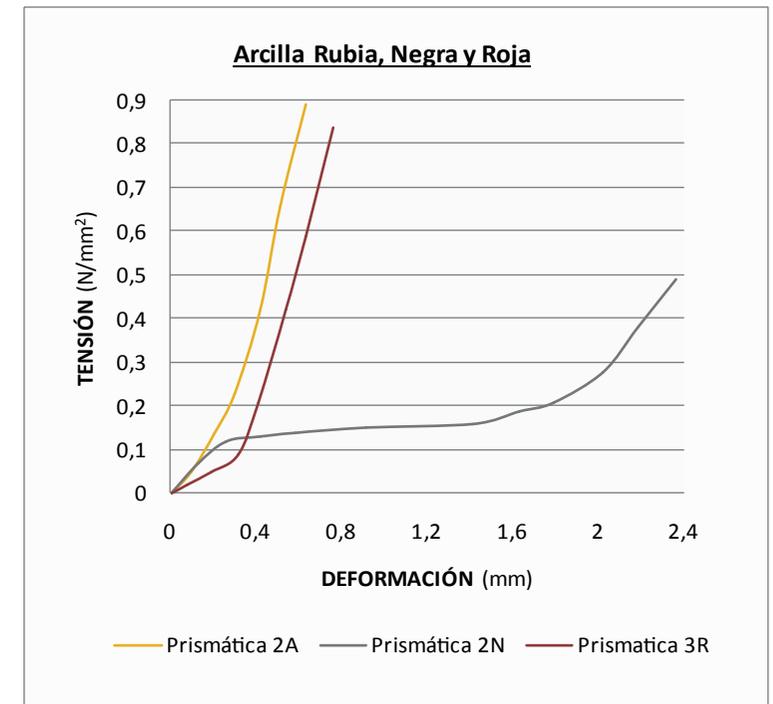


(Fig.4.48) Gráfica tensión/deformación de las probetas prismáticas de arcilla negra
Ensayo a resistencia a flexión

• Análisis de resultados:

Se puede decir que el principal elemento que origina la mejora las propiedades de resistencia en una mezcla es la unión de alginato y fibras, pero estas cantidades no pueden ser desproporcionadas. Un excesivo contenido de fibra conseguiría que la muestra fuese más difícil de manejar e influyese en los resultados finales. Se ha demostrado que la proporción óptima es del 0,25%, [34] por lo que una mayor cantidad de lana no significaría que el valor de resistencia siguiese aumentando paulatinamente sino que afectaría no solo a los resultados de flexión sino que también daría lugar a una mayor contracción del material. En estudios anteriores se ha podido comprobar cómo la adición de alginato o fibra por si solas no mejoraba la resistencia a flexión. Se debía producir la unión de lana y alginato para que pudiese aumentarse. [5]

En nuestro caso, a igual dosificación tanto de agua, alginato, arcilla y lana, se han producido diferencias en las capacidades de carga máxima posibles por cada uno de los materiales, ocasionado por los tipos de arcilla utilizados. Se puede ver como la arcilla negra cuenta con una menor capacidad resistente. (Fig. 4.49) En cuanto a las graficas de resultados aportadas de tensión-deformación, se puede apreciar como el suelo negro alcanza una gran deformabilidad en poco tiempo en relación a los otros dos tipos. Por el contrario, entre las probetas de arcilla rubia y roja no suele existir gran variación de resultados.



(Fig.4.49) Selección de probetas representativas

4.6.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN TRAS SER SOMETIDO A HELADICIDAD:

• Introducción:

En este apartado se describe la realización del ensayo encaminado a determinar la resistencia a compresión de las probetas prismáticas de dimensiones 40 x 40 x 160 mm realizadas y ensayadas a hielo/deshielo de los tres tipos diferentes de suelo. Para ello, se tomará una de las dos mitades obtenidas anteriormente en el ensayo a flexión. (Fig.4.50) La incorporación de fibras naturales como ya se ha explicado anteriormente a la mezcla le incorpora al bloque un aumento de su resistencia.

Al tratarse la resistencia a compresión de un indicativo de calidad del material se pretende obtener estos valores para poder conocer la durabilidad y posible deterioro futuro del mismo.



(Fig.4.50) Probeta rota a flexión. Elección de una parte a ensayar a compresión.



(Fig.4.51) Base para la aplicación de la carga

Siguiendo la norma referente, *UNE 41410-2008*, para los bloques de tierra comprimida en su apartado de evaluación de conformidad, existe un requisito de resistencia a compresión para poder ser clasificado como apta su utilización. Desde este mismo apartado, la norma te remite a la *UNE-EN 772-1:2011 +A1* sobre "Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión" donde se comenta de una manera más detallada el procedimiento de ensayo y evaluación de sus resultados.

Además se buscará con este estudio y con ayuda de los datos obtenidos por compañeros en otros estudios la apreciación de pérdida o no de resistencia una vez que el bloque ha sufrido el proceso de hielo/deshielo. Para ello, las dosificaciones establecidas para la realización de los bloques, condiciones ambientes y maquinaria de elaboración serán las mismas pudiendo solamente verse modificada por el proceso de elaboración de amasado de la mezcla.

- **Metodología:**

Para la obtención de los resultados de resistencia a compresión se ha utilizado de la misma manera que en casos anteriores [45][5][6], y al igual que para el ensayo a flexión una prensa multiensayo de 300 kN, de la casa Codein S.L, modelo MCO-30, numero de serie 139. Con ella se puede obtener la carga de rotura, la deformación de la probeta y está adaptada y conectada a un software que permite el control y obtención de datos a través del ordenador. Con la ayuda de otros programas de cálculo, estos datos aportados pueden ser modificados, analizados y trabajados.

En este caso la diferencia existente con el ensayo de flexión es la manera con la que se aplica la carga, de tal manera que si en el de flexión se le aplicaba en base a tres puntos, en este caso la presión la ejerce un rectángulo de 40 x 40 mm de dimensiones en el centro de la pieza (Fig. 4.51). En todo caso, la máquina de ensayo cuenta con la capacidad suficiente para la rotura de todas la probetas de ensayo. Esta máquina dispone de dos platos de soporte de acero con una dureza Vickers mínima de 600 HV, medida según la norma *EN ISO 6507-1*. La rigidez de estos platos y el modo de transferir la carga son tales que la deflexión cumple lo establecido en la norma.[12] A la misma vez, uno de estos platos debe ser basculante para poder adaptarse a la probeta mientras que el segundo debe ser un bloque plano no basculante sin desviación mayor a 0,05mm de una superficie plana.

La norma especifica que todas la probetas se deben ensayar en la dirección perpendicular a la cara de apoyo y que deben estar curadas antes de proceder al ensayo. En este caso al haber realizado ya previamente el ensayo de hielo, las probetas ya habían alcanzado los 28 días y por si fuese necesario se han secado en estufa de nuevo hasta alcanzar su peso constante. Se ha cuidado mucho que la superficie de contacto entre las probetas y los platos, de manera que las caras de ensayo sean paralelos y no existan impurezas sueltas. Las probetas deben colocarse de manera que queden cuidadosamente alineadas en el centro del plano, de manera que su asiento sea uniforme (Fig. 4.52-53).

Para la realización de este ensayo se aplica una carga máxima de 10KN a una velocidad estimada de 0,5MPa/s de tal modo que la rotura se produzca en un tiempo no inferior a 1min, cumpliendo de esta manera con las especificaciones detalladas en la UNE descrita con anterioridad. En algunos casos, la carga aplicada ha fluctuado varias veces antes de alcanzar la carga máxima de rotura, indicado mediante la disminución de la carga seguida de un aumento hasta un máximo nuevo. De ahí que los valores hayan tenido que ser analizado con detenimiento para no obtener falsos resultados.

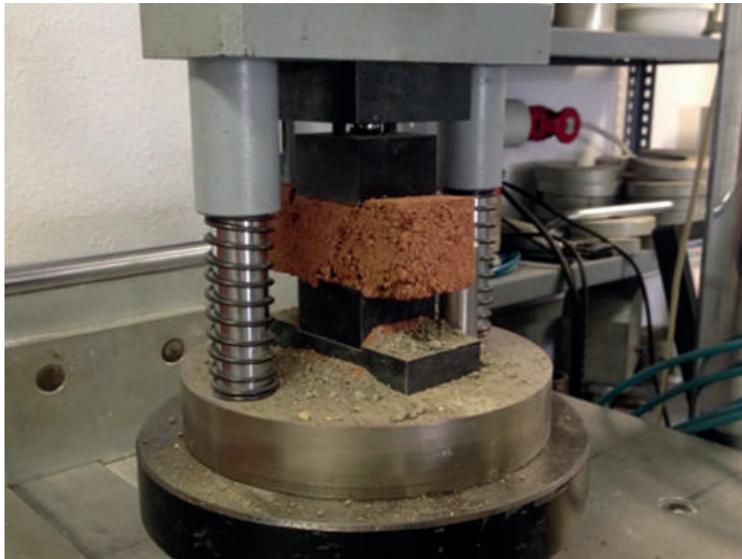
Una vez partidas las mitades de probetas (Fig. 54-4.55-56-57) y registrados los datos necesarios en el ordenador, se procede al cálculo de la resistencia con la expresión siguiente: $f=C/b^2$ donde b son las dimensiones de las placa base y C la carga obtenida a partir de los resultados extraídos del programa informático.

- **Resultados:**

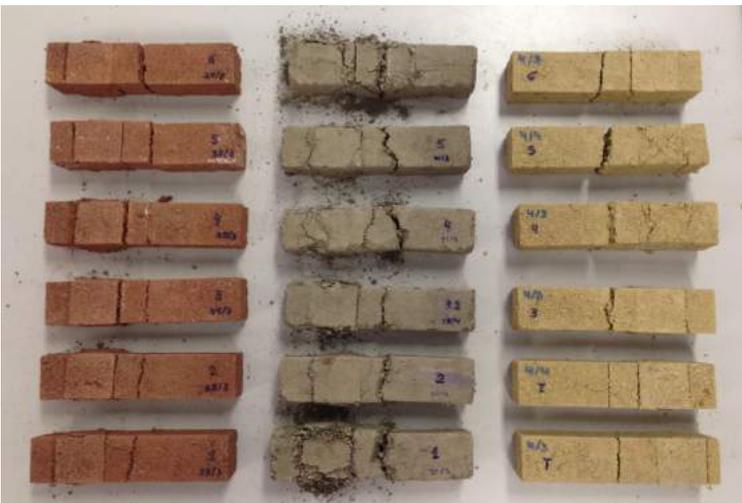
Una vez obtenidos los resultados aportados por el programa informático y aplicada la formulación correspondiente al cálculo de la resistencia a compresión obtenemos la siguiente tabla 4.12 de resultados:



(Fig.4.52) Disposición de probeta sometida a compresión



(Fig.4.53) Rotura de probeta a compresión



(Fig.4.54) Resultado tras la rotura de las probetas

Nº	PROBETAS ROJAS			PROBETAS RUBIAS			PROBETAS NEGRAS		
	CARGA MÁX.	TENSIÓN	DEFORMACIÓN	CARGA MÁX.	TENSIÓN	DEFORMACIÓN	CARGA MÁX.	TENSIÓN	DEFORMACIÓN
	kg	N/mm2	mm	kg	N/mm2	mm	kg	N/mm2	mm
1	486	3,04	3,95	632	3,95	3,36	149	0,93	3,13
2	495	3,09	2,98	539	3,37	2,58	284	1,78	3,72
3	568	3,55	3,43	552	3,45	2,97	370	2,31	3,78
4	473	2,96	2,67	345	2,16	2,74	188	1,18	3,71
5	507	3,17	3,67	358	2,24	3,02	279	1,74	3,35
6	554	3,46	2,50	612	3,83	2,54	202	1,26	2,15
MEDIA	513,83	3,21	3,20	506,33	3,17	2,87	220,40	1,49	3,21

(Tabla 4.12)- Resultados de compresión después de heladicidad

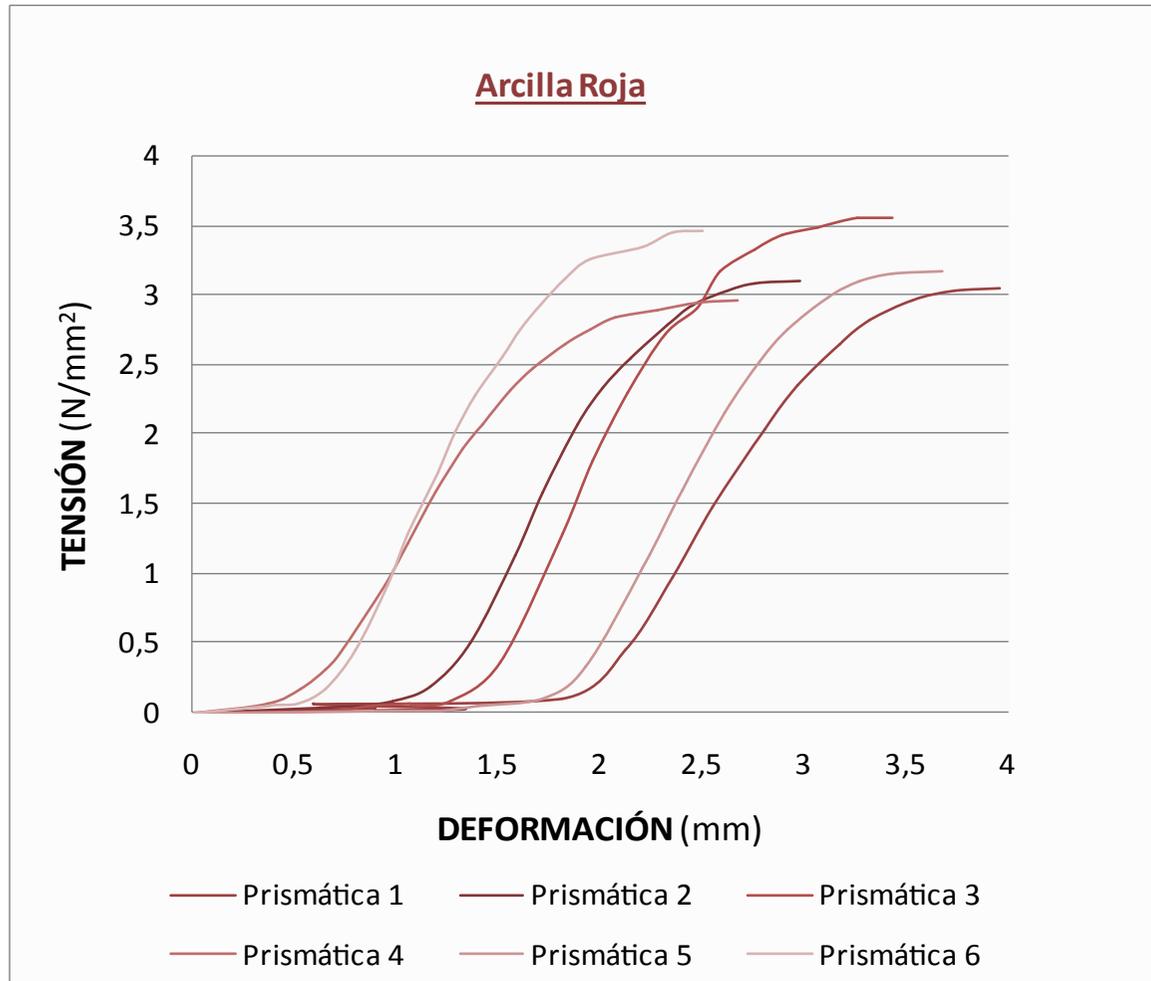
A continuación se representan las curvas de tensión-deformación de las seis probetas ensayadas de cada material sometido a compresión después de haber sido sometidas a los ciclos de hielo/deshielo. (Fig. 4.58-59-60)

Tras los resultados a compresión obtenidos de las probetas se va a proceder a su comparación con los resultados obtenidos por otros compañeros como ya se especificó anteriormente. En dicho ensayo antes de haber sido sometidos a los ciclos de hielo deshielo se obtuvieron los siguientes resultados de rotura a compresión. (Tabla 4.13)

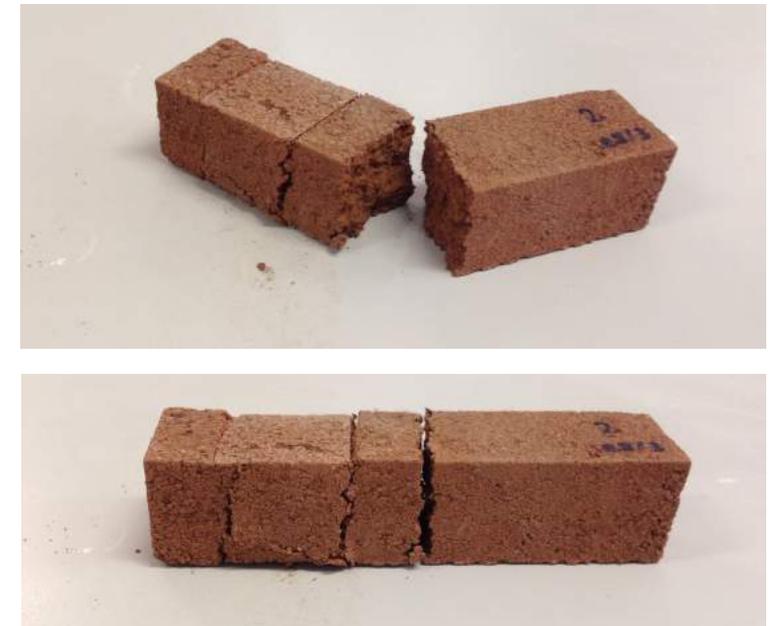
Nº	PROBETAS ROJAS			PROBETAS RUBIAS			PROBETAS NEGRAS		
	CARGA MÁX.	TENSIÓN	DEFORMACIÓN	CARGA MÁX.	TENSIÓN	DEFORMACIÓN	CARGA MÁX.	TENSIÓN	DEFORMACIÓN
	kg	N/mm2	mm	kg	N/mm2	mm	kg	N/mm2	mm
1	412	2,58	1,8	483	3,02	1,78	238	1,49	1,31
2	520	3,25	1,84	446	2,79	1,65	302	1,88	1,42
3	468	2,93	1,26	458	2,86	1,4	231	1,45	1,32
4	349	2,18	1,59	403	2,52	1,47	341	2,13	1,76
5	539	3,37	1,49	407	2,54	1,13	417	2,61	1,26
6	420	2,63	1,65	603	3,77	1,37	219	1,37	1,16
MEDIA	451,33	2,82	1,61	466,67	2,92	1,47	303,40	1,66	1,38

(Tabla 4.13)- Resultados de compresión antes de heladicidad

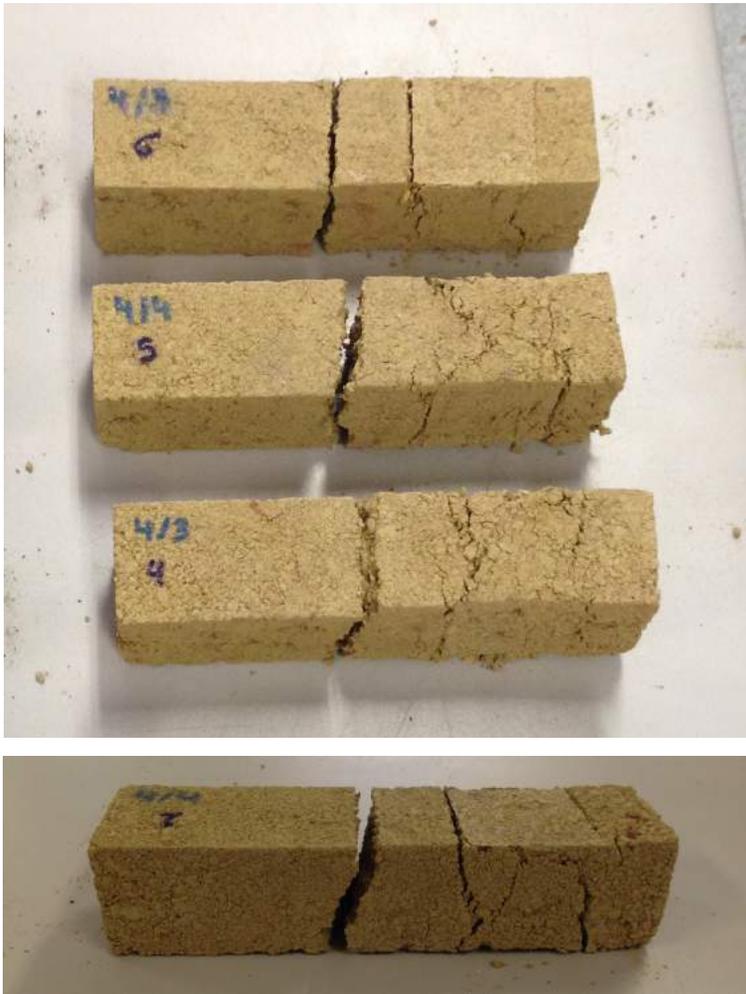
4. Planteamiento experimental



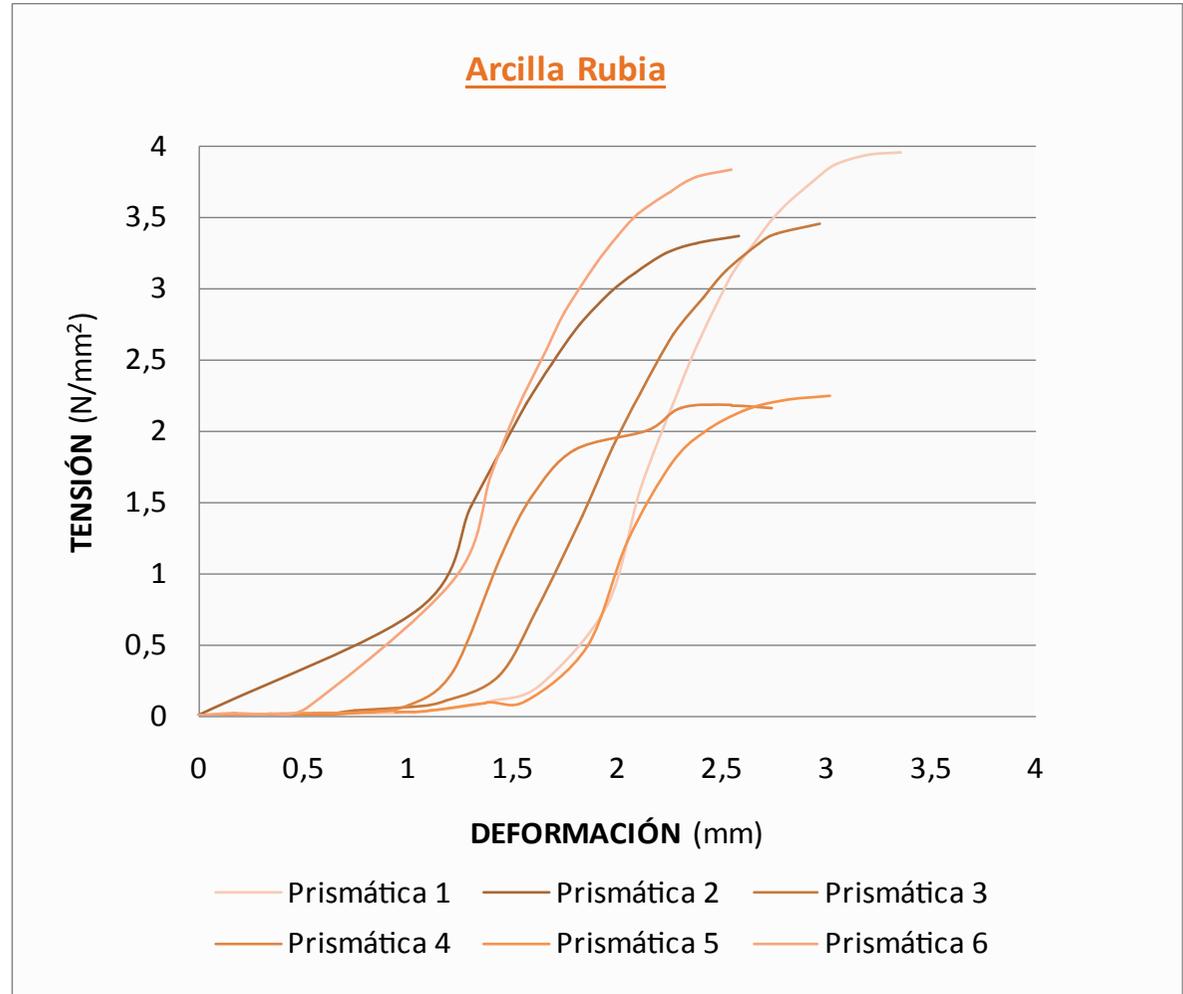
(Fig.4.58) Gráfica tensión/deformación de las probetas prismáticas de arcilla roja
Ensayo a resistencia a flexión



(Fig.4.55) Probetas de suelo rojo rotas a compresión y flexión

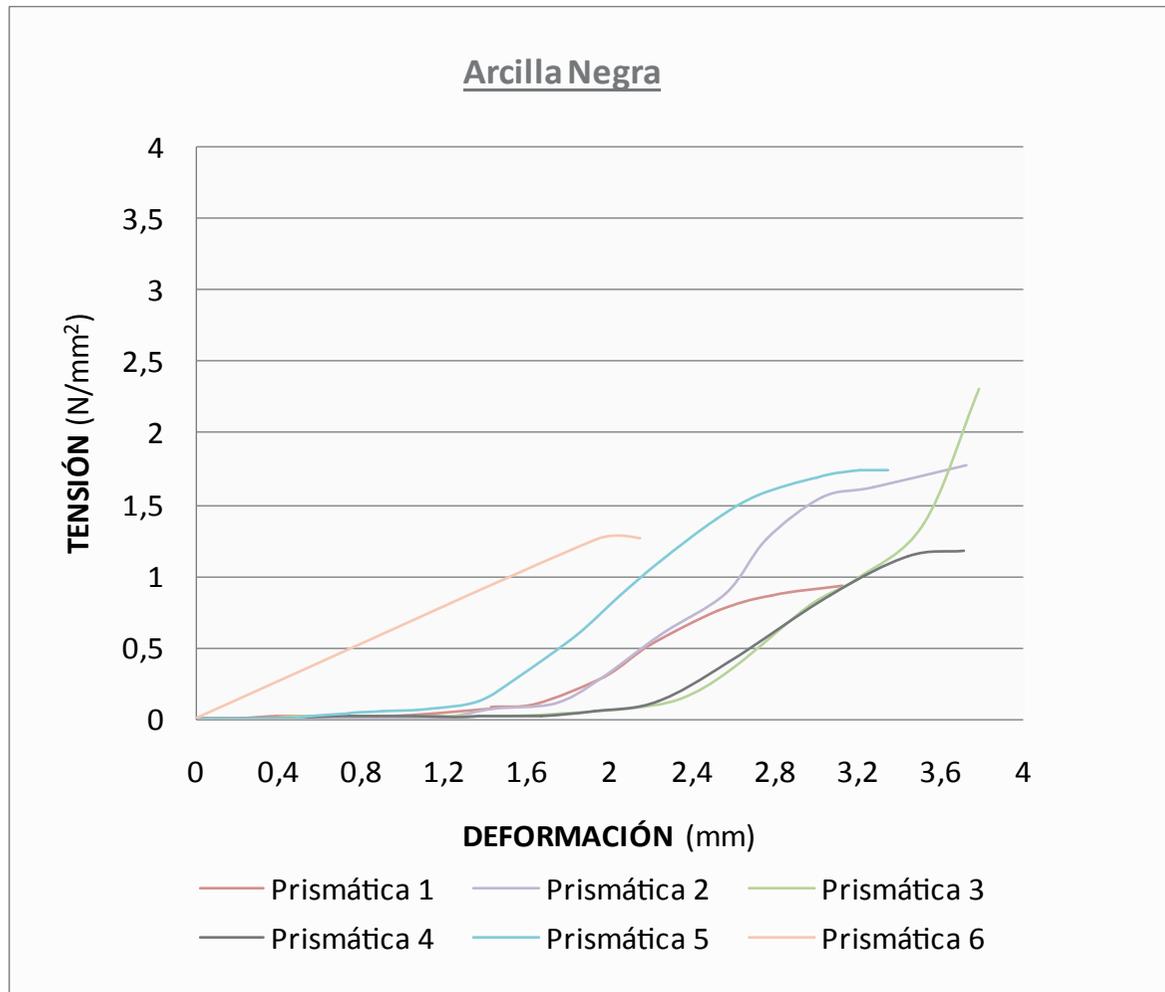


(Fig.4.56) Probetas de arcilla rubia rotas a compresión y flexión



(Fig.4.59) Gráfica tensión/deformación de las probetas prismáticas de arcilla rubia
Ensayo a resistencia a flexión

4. Planteamiento experimental



(Fig.4.60) Gráfica tensión/deformación de las probetas prismáticas de arcilla negra
Ensayo a resistencia a flexión



(Fig.4.57) Probetas de arcilla negra rotas a compresión y flexión

- **Análisis de resultados:**

Tras la obtención de los resultados del ensayo a compresión anteriores y posteriores a los ciclos de hielo y deshielo cabe decir que no se procederá a la comparación entre ambos resultados y por tanto no se podrá obtener la pérdida de resistencia originada tras haberse visto los bloques alterados por el agua y las bajas temperaturas. Como se expresó anteriormente en el apartado 4.2 - "Proceso de elaboración de las probetas", la mano de obra ejecutora de los diferentes bloques de tierra comprimida estabilizada supondría una alteración en las condiciones finales de resistencia de las mismas probetas.

En nuestro caso, todas las probetas ensayadas (Fig. 4.61) a compresión han sido realizadas con las mismas dosificaciones y en las mismas condiciones de trabajo. Sin embargo, el único factor que las puede diferenciar es el procesado, es decir, la mano de obra: el correcto mezclado homogéneo y compactado e las mismas al introducirlas en la adobera. La correcta disolución de los grumos conlleva una mejor compresión de las probetas y por consiguiente obtener una mejoría en las capacidades resistentes del material. Por tanto, observando los valores medios de los resultados obtenidos en las tablas 4.12 y 4.13 podemos confirmar que no se obtienen los resultados esperados. Las probetas pese a haber sufrido un ataque de hielo/deshielo, en los ensayos de resistencia a compresión se obtienen datos mayores que los originales no alterados. (Tabla 4.14) Por ello, podemos concluir que a pesar de nuestro interés en conseguir una correlación de resultados con los compañeros que también están trabajando con los ensayos de BTCE elaborados en el mismo laboratorio, esto ha resultado insatisfactorio y deberá ser objeto en otro caso de estudio del análisis más detallado. Se propone como futura línea de investigación la utilización de una misma batería de probetas para la realización de los ensayos tanto anteriores como posteriores consiguiendo así obtener unos resultados más satisfactorios y coherentes. En este caso se observa que puede ser un factor más condicionante la mano de obra empleada en el proceso de elaboración que la degradación producida durante los diez ciclos de hielo/deshielo a los que se vieron sometidas las probetas.



(Fig.4.61) Probetas ensayadas a compresión y flexión

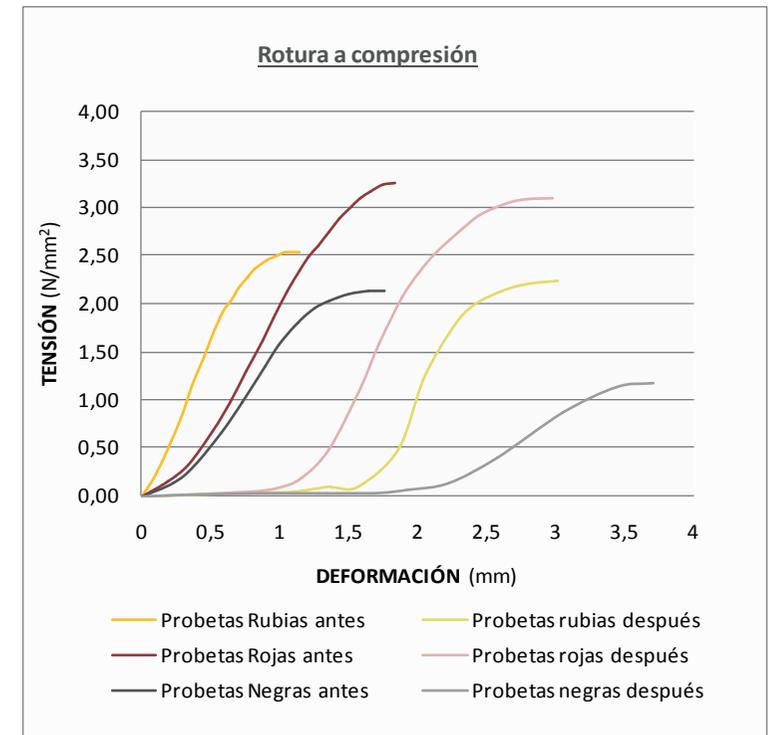
4. Planteamiento experimental

ESTADO (MEDIAS)	PROBETAS ROJAS			PROBETAS AMARILLAS			PROBETAS NEGRAS		
	CARGA MÁX.	TENSIÓN	DEFORMACIÓN	CARGA MÁX.	TENSIÓN	DEFORMACIÓN	CARGA MÁX.	TENSIÓN	DEFORMACIÓN
	kg	N/mm ²	mm	kg	N/mm ²	mm	kg	N/mm ²	mm
ANTES	451,33	2,82	1,61	466,67	2,92	1,47	303,40	1,66	1,38
DESPUÉS	513,83	3,21	3,20	506,33	3,17	2,87	220,4	1,49	3,21

(Tabla 4.14)- Resultados de compresión antes y después de heladicidad

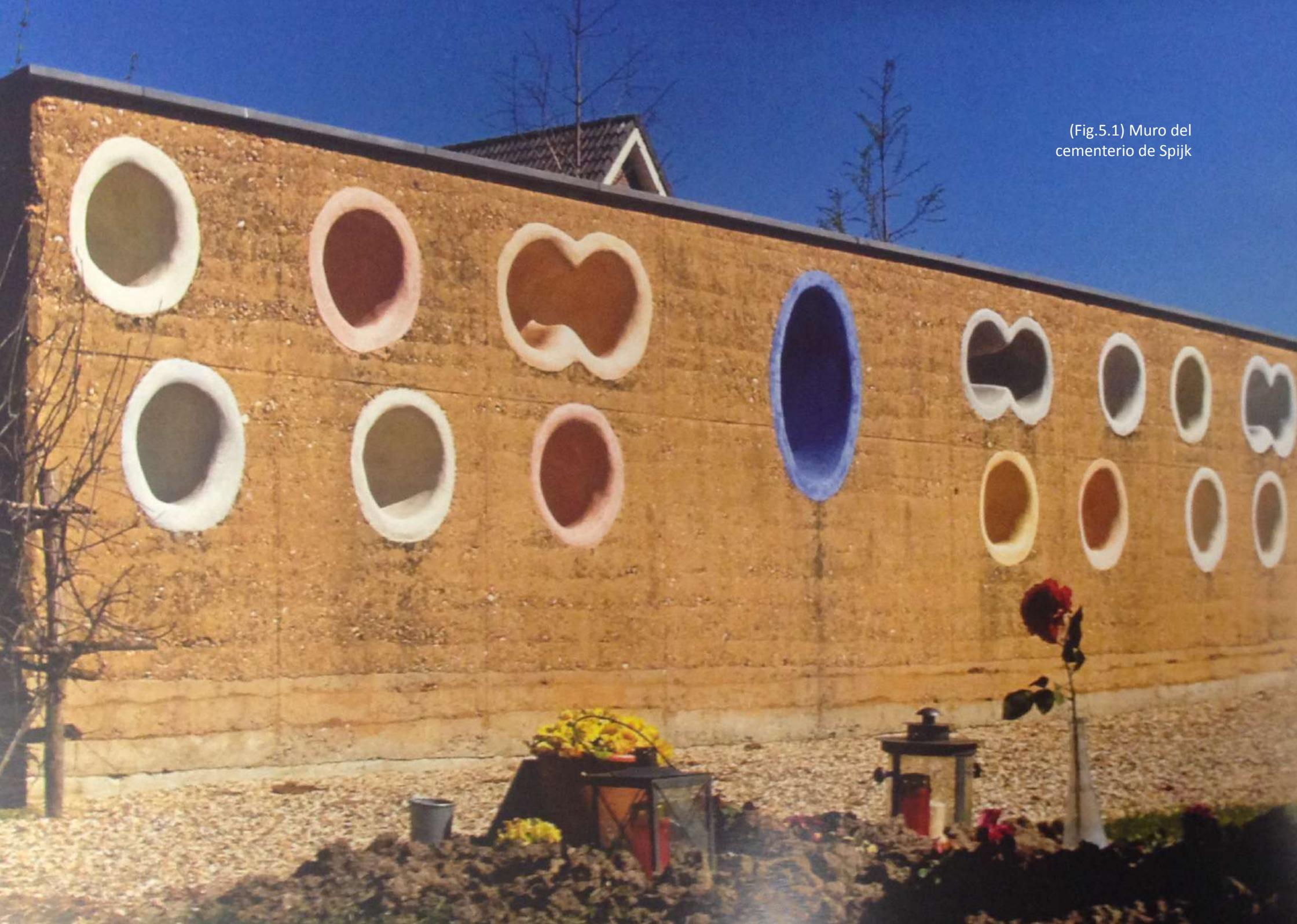
A pesar de ello, podemos decir que según los datos obtenidos de las probetas tras el ensayo hídrico (Tabla 4.12), los suelos no han funcionado de igual manera. En el caso de las probetas elaboradas y ensayadas frente al hielo, el suelo rojo se trata del suelo que mayor carga puede soportar seguida de las probetas realizada con arcilla rubia y negra consecutivamente. La diferencia existente entre los suelos de arcilla roja y rubia no cuentan con demasiada diferencia mientras que las probetas de suelo negro se ven claramente perjudicadas en comparación a las dos anteriores. En el segundo de los casos, las probetas que no han sido alteradas previamente (Tabla 4.13), se establece que aquellas que son capaces de soportar mayores cargas son las de arcillas rubias seguidas de las rojas y por último de las negras. En este caso la alteración en el orden de probetas con resistencia máxima también se verá alterado por el proceso de elaboración y de ahí a esta diferencia.

Por otro lado, con la ayuda de las graficas (Fig. 4.46-47) se puede entender de una manera visual que las probetas de arcilla roja a pesar de ser las que más carga sufren al igual que las de arcillas rubia y negra, deformaciones al ser sometidas al esfuerzo de compresión.



(Fig.4.62) Selección de probetas representativas

(Fig.5.1) Muro del cementerio de Spijk



5 CONCLUSIONES

Una vez desarrollado todo el objeto de trabajo puedo decir que se ha tratado de una experiencia personal positiva. El hecho de poder conocer la existencia de personas que se dedican a la investigación y desarrollo de nuevos materiales que permitan la protección del medio ambiente, y que haya podido poner un pequeño grano de arena ante este tema, origina que tenga mayor curiosidad acerca de esta iniciativa para su posible mejora y evolución.

El conocimiento adquirido acerca de la obtención de textos de investigación, su tratamiento y análisis de información han supuesto un punto de partida para posibles búsquedas futuras de información relacionadas con otros temas. En cuanto al trabajo en laboratorio desarrollado, ha sido una oportunidad perfecta para poder poner en práctica todos aquellos puntos y especificaciones que las propias normas UNE establecen para comprobar si los materiales son adecuados o no. De igual manera, se ha tratado de un proceso de aprendizaje mucho más satisfactorio que las clases teóricas obtenidas a lo largo de los cursos anteriores.

La propia realización y manejo de los materiales y los bloques obtenidos, junto a sus reacciones, y por consiguiente la propia experiencia personal y obtención de conclusiones veraces, han originado a mí entender un enriquecimiento de los objetivos finales del trabajo.

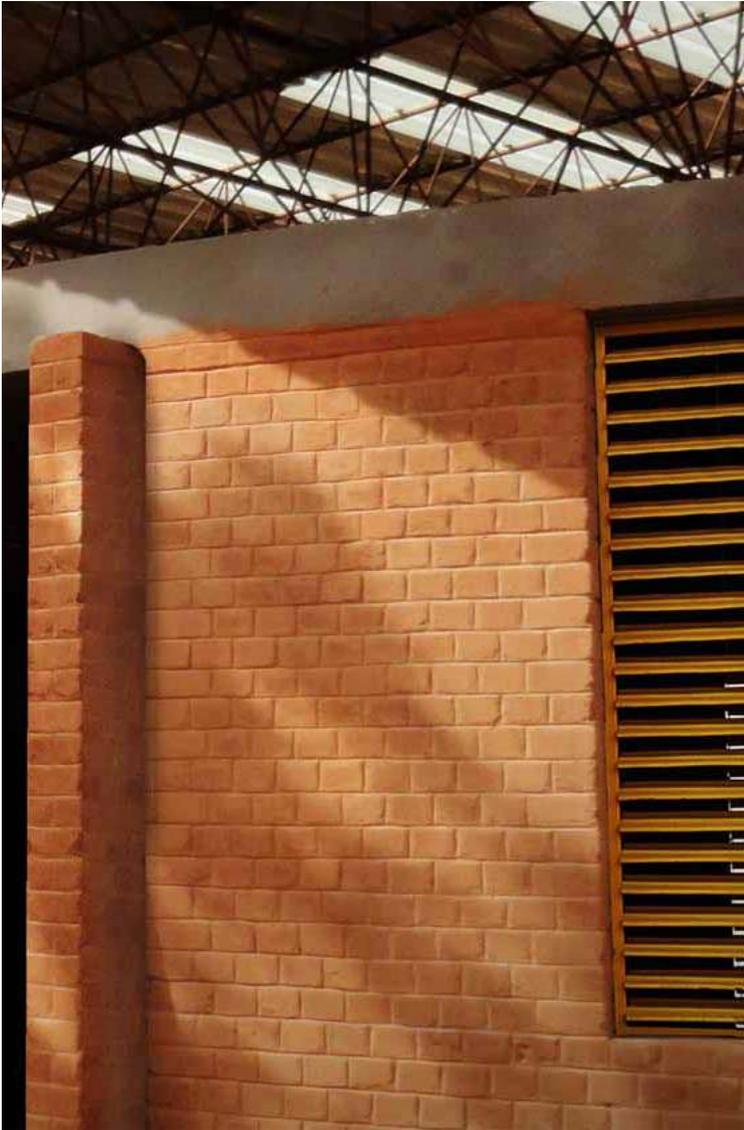
Tras el estudio realizado acerca de la construcción con tierra, puedo decir que a pesar de tratarse de un material con miles de años, éste siguió utilizándose. Sería con la aparición de nuevos materiales tales como el hormigón y el acero, cuando se quedara en el olvido.

A pesar de ello, diversos factores como la necesidad de construcciones baratas y saludables, la crisis, el abuso continuado de consumo de recursos naturales y la contaminación medioambiental, han conseguido un resurgimiento e interés actual de la misma.

Entre la diversidad de sistemas constructivos, la elección de los bloques de tierra comprimida estabilizados se debe a la capacidad que tienen estas unidades de adoptar diferentes dimensiones y formas gracias a la variedad de moldes, y con ello la capacidad de ser mucho más manejables tanto en su elaboración como en transporte frente a las técnicas de paredes monolíticas.



(Fig.5.2) Colegio de primaria de Gando



(Fig.5.3) Colegio de primaria de Gando

Además, cuentan con una capacidad de secado más rápido consiguiendo así mayor facilidad de acopio, manejabilidad y rendimiento. A ello hay que añadir el costo que supone la mano de obra durante su realización.

Durante el estudio del presente proyecto se ha confirmado en numerosas ocasiones que algunos de los principales inconvenientes de los sistemas de construcción con tierra son su baja resistencia frente al agua y al sismo, junto a su baja resistencia mecánica si se compara con materiales sintéticos como el acero, hormigón o el ladrillo cocido. A pesar de ello, puedo decir que las numerosas ventajas que se han especificado en los apartados anteriores equilibran la balanza hacia su utilización. El continuo estudio conllevaría a unas mejoras medioambientales importantes si se continúan aportando nuevos avances y mejoras hasta conseguir unos resultado óptimos.

En cuanto a la realización de las probetas durante la fase experimental, se puede concluir que la apariencia final y sensaciones obtenidas de las diferentes probetas realizadas en función del tipo de arcilla utilizado no han sido las mismas. En el caso de la arcilla rubia, a pesar de ser las más difícil de trabajar consiguió una mejor apariencia final. Ello es debido a que al tratarse de un suelo tan seco permitió una mejor compactación de la misma.

Por otro lado, el suelo negro se disgregó con mayor facilidad durante todo el proceso de manipulación y la retracción producida durante su secado originaron la aparición de fisuras superficiales. Aparentemente, las probetas realizadas con la arcilla roja y rubia no presentaron variaciones visuales significativas. La elección de alginato como estabilizante y la fibra natural de lana de oveja consiguieron el aumento de las propiedades mecánicas y una mejora frente a la retracción. La utilización de estos materiales naturales además, le han proporcionado a los BTC buenas propiedades térmicas y la posibilidad de crearse y degradarse sin alterar al medio ambiente.

Tras los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización de las probetas ensayadas, puedo decir que los valores que se obtuvieron de densidad aparente fueron variables, oscilando entre 1,32 y 1,71 gr/cm³. En este caso, las densidades en las baldosas fueron mucho mayores consiguiendo por tanto, una compacidad mucho menor que las prismáticas. Esto se debió, a pesar de tener la misma composición, a la diferencia de presión establecida entre la prensa hidráulica y

la prensa mecánica a la hora de ser conformas. Por otro lado, en referencia al tipo de arcilla utilizado, la arcilla negra tuvo más poros intersticiales, seguida de la rubia y la roja, hecho el cual repercutió en las posteriores resistencias.

Con el ensayo de ultrasonidos se pudo asignar una correlación fiable entre la resistencia del material, su compactación, porosidad y la velocidad obtenida de propagación de ultrasonidos, de tal manera que la obtención de una menor velocidad de propagación de ultrasonidos nos mostró que las probetas eran más compactas y tenían un menor índice de poros. En nuestro caso, las baldosas contaron con velocidades mucho mayores que las prismáticas resultado derivado de la compactación ejercida durante su proceso de elaboración. En cuanto a las diferencias en este caso entre materiales, la variación no fue significativa. Por otro lado, en el caso de las piezas prismáticas, si que oscilaron los valores según el tipo de suelos utilizado. Esto se corroboró con los resultados de resistencias obtenidos.

Dado el aporte continuado de agua a las probetas durante el ensayo de hielo/deshielo y en relación a la experiencia vivida, puedo decir en primer lugar que, aparentemente todas estaban resistiendo adecuadamente a excepción de aquellas elaboradas a base de arcilla negra que presentaron signos de desmejora. Por otro lado, al producirse el rociado de la mismas, la capacidad de absorción de agua varió en función del tipo de arcilla utilizado. Las arcillas negras lo realizaron con una mayor rapidez seguidas de la rubia y la roja.

Tras la finalización de los ciclos, y previo a su secado, las probetas ya habían sufrido algunos deterioros. Pensando previamente que las baldosas en relación a su mayor compactación iban a funcionar mejor que las prismáticas, pude comprobar cómo ambas sufrieron las mismas patologías: fisuras de retracción y pérdidas de aristas. En principio estas no se consideran excesivamente alarmantes, pero se puede presuponer que con el avance de unos futuros ciclos más, las probetas podrían considerarse como heladizas.

En cuanto a la realización del ensayo de resistencia a flexión, a igualdad de cantidades tanto de agua, alginato, arcilla y lana, se han producido diferencias en las capacidades de carga máxima posibles por cada uno de los materiales, originado por los tipos de arcilla utilizados. Se puede ver como la arcilla negra cuenta con una menor capacidad resistente y una mayor deformabilidad en



(Fig.5.4) Fachada trasera del colegio de primaria de Gando



(Fig.5.4) Fachada trasera del colegio de primaria de Gando

poco tiempo. Por el contrario, entre las probetas de arcilla rubia y roja no suele existir gran variación de resultados.

En el caso de los resultados del ensayo a compresión anteriores y posteriores a los ciclos de hielo y deshielo finalmente no se ha producido la comparación de resultado y por consiguiente conocimiento de la pérdida de resistencia . Esto se ha debido a que a pesar de haber sido todas las probetas realizadas con las mismas dosificaciones y las mismas condiciones de trabajo, la mano de obra ejecutora ha supuesto un factor fundamental para su nivel de resistencia posterior. De esta manera se han obtenido resultados incoherentes siendo las resistencias posterior a los ciclos de hielo/deshielo superiores a las probetas anteriores.

A pesar de ello, el suelo rojo se trata del suelo que mayor carga puede soportar seguida de las probetas realizada con arcilla rubia y negra consecutivamente. La diferencia existente entre los suelos de arcilla roja y rubia no cuentan con demasiada diferencia mientras que las probetas de suelo negro se ven claramente perjudicadas en comparación a las dos anteriores.

- **Líneas futuras de investigación:**

Como posibles líneas de investigación se propone el continuo desarrollo e investigación de esta línea de investigación donde se especifique y concreten más los resultados acerca del comportamiento de los bloques frente a la presencia de agua. Para ello, se deberá proceder a las alternativas de ensayos para los BTCs en su norma *UNE-41410 "Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques"* y su aptitud para utilizarse como material de construcción. Tales son los caso por ejemplo de los ensayos de resistencia de humectación/secado, resistencia a la erosión y absorción de agua por capilaridad.

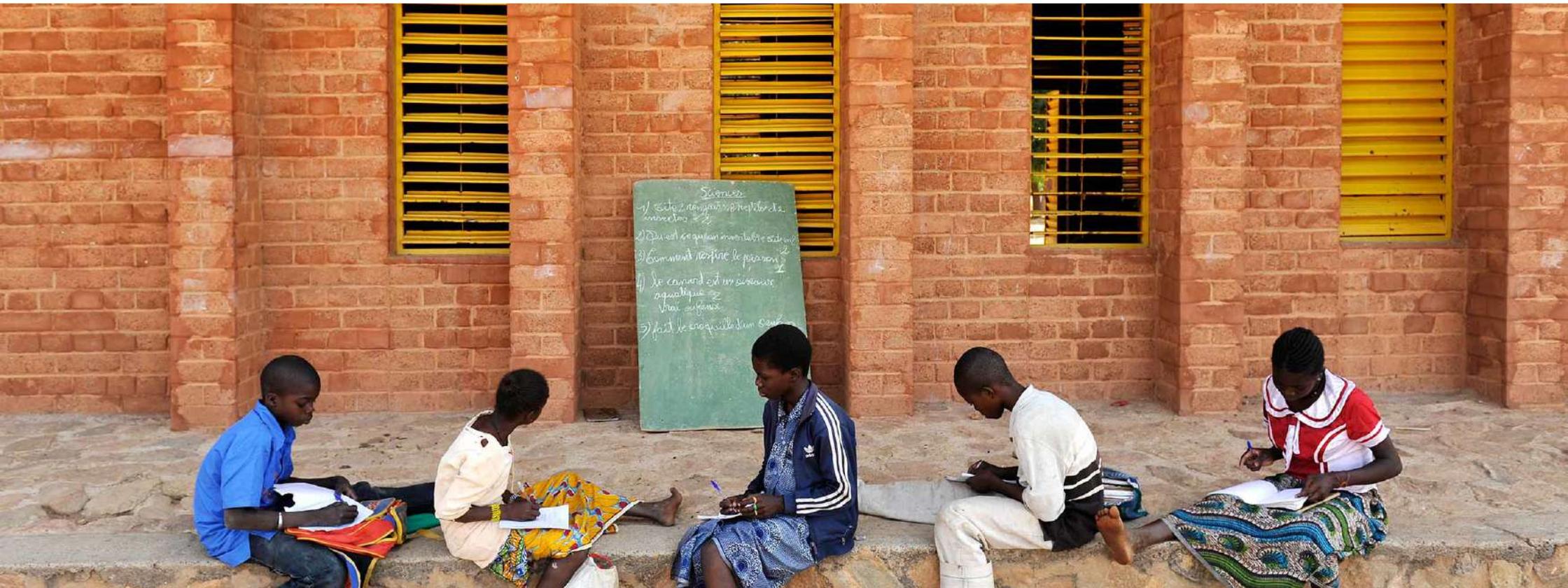
Además, con respecto a la línea de investigación desarrollada a lo largo de este trabajo se debería continuar con su estudio y realizar una comparativa con mayor detalle acerca de los resultados e pérdidas de resistencia antes y después del ensayo de hielo/deshielo habiéndose elaborado para ello una misma batería de probetas con las mismas características que permitan su correcta comparación sin ningún problema. Por otro lado, este ensayo de heladicidad se ha realizado durante un ciclo continuado de 10 días, pero al tratarse de un ensayo experimental sin una norma

5. Conclusiones

que lo regule, se podría comprobar su comportamiento con una consecución de mayor número de ciclos seguidos, como por ejemplo los 25 establecidos en la norma une de arcilla cocida o por ejemplo 100 ciclos como en el caso aportado del Reino Unido [48].

Por otro lado, al observar tras los resultados que los bloques no se terminan de comportar bien frente a la acción del agua, una posible alternativa en futuras líneas de investigación podría ser la búsqueda de algún recubrimiento superficial que permita la protección en el tiempo de la cara superficial de los bloques impidiendo con ello la entrada periódica de agua en su interior y la posibilidad de retracción, deterioro o aparición de agentes bióticos que pudiesen alterar al completo el material produciéndole la pérdida completa de resistencia.

(Fig.5.5) Zona exterior del colegio de primaria de Gando



• **Índice de ilustraciones:**

- **Figura 0.1.** Prototipo de viviendas modulares para los profesores del colegio de Gando. Burkina Faso. Francis Kéré. [1]
- **Figura 0.2.** Muro realizado mediante bahareque. Calatañazor, Soria. Valentina Cristini y José Ramón Ruiz Checa. [2]
- **Figura 0.3.** Muro de la biblioteca del colegio de primaria de Burkina Faso. Gando. Jan Ouwerkerk [1]
- **Figura 0.4.** Centro médico Léo construido con BTCE. Burkina Faso. Kere-architecture. [1]
- **Figura 0.5.** Almacenes construidos con adobes, templo de Ramses II. Gourná, Egipto. [16]
- **Figura 0.6.** Proceso de extracción de arcilla en canteras. Cantera de la fábrica de pastas cerámicas situada en Ampurdán (Girona). Argiles Bisbal
- **Figura 0.7.** Túnel de secado y cocción en Henan, China. Luoyang Runxin Machinery
- **Figura 0.8.** Muro de adobe deformado en Frlandsmuseet, Dinamarca. Mariana Correia, Jacob Merten. [2]
- **Figura 0.9.** Construcción tradicional realizada con adobe sobre zócalo de piedra. Baltanas, Palencia . Félix Jové [15]
- **Figura 0.10.** Diferentes tamaños y suelos de las probetas a ensayar. Universidad de Sevilla. Foto de la autora.
- **Figura 0.11.** Conjunto de probetas realizadas para ensayar. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.

- **Figura 0.12.** Prensa multiensayo para realizar los ensayos de compresión y flexión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora. .
- **Figura 0.13.** Muro levantado mediante un sistema constructivo de tierra. Casa en Palafrugell, España. Letizia Dipasquale. [2]
- **Figura 1.1.** Zonas de origen del uso de la tierra como material de construcción. Difusión de las técnicas de construcción en todo el mundo. Fuente CRATerre, Traité de Construction en Terre Marsella, Parentheses, 1989. [15]
- **Figura 1.2.** Excavación arqueológica de estructuras de tierra cruda. Yacimiento vacceo de Pintia, Padilla de Duero, Peñafiel (España). Conjunto urbano anterior a la llegada de los romanos a la península, siglo IVa. C. Félix Jové. [15]
- **Figura 1.3.** Almacenes, Templo de Ramses II (Gourná,Egipto) construido con adobes hace 3000 años. Minke,G. [16]
- **Figura 1.4.** La ciudades Ara-Bam en Irán. La mayor estructura del mundo con zonas de hasta 2500 años. Minke,G. [16]
- **Figura 1.5.** Ciudades fortificadas construidas con tierra en el Valle de Draa (Marruecos, siglo XVIII) años. Minke,G. [16]
- **Figura 1.6.** Ejemplos de arcillas con diferentes composiciones mineralógicas. Minke,G. [17]
- **Figura 1.7.** Construcción tradicional con muros de tapia. Amayuelas de Abajo, Palencia. Félix Jové. [15]

- **Figura 1.8.** Encofrado y mazos tradicionales para la ejecución de tapia. Félix Jové. [15]
- **Figura 1.9.** Bandas de compactación, elevaciones entre cajas de encofrado y agujeros de travesaños. Villena, España. [14]
- **Figura 1.10.** Interior de un palomar. Muros de tapia circulares , con oquedades de travesaños y oracas para el anidamiento de las palomas. Boada de Campos, Palencia. Félix Jové. [15]
- **Figura 1.11.** Encofrado ascendente de madera. Minke,G [16][17]
- **Figura 1.12.** Tapia estabilizada frente al sismo con bambú. Vivienda en Alhué, Chile. Minke,G. [17]
- **Figura 1.13.** Muro de tapia en una granja de Piedmont. Isidoro Parodi. [2]
- **Figura 1.14.** Vivienda realizada mediante Cob. Cumbria, UK. Paul Jaquin y Charles Augarde. [14]
- **Figura 1.15.** Vivienda moderna construida de forma circular. Metodo Cob. Melon car Park, Eden Project, UK. Jackie Abey y Jill Smallcmbe. [14]
- **Figura 1.16.** Moldeado de barro sobre una estructura realizada de madera. Técnica de Bahareque. Minke,G. [17]
- **Figura 1.17.** Mezcla de barro con paja fina y estiércol. Minke,G. [17]
- **Figura 1.18.** Rellenado del paño con mezcla presionada. Minke,G. [17]

- **Figura 1.19.** Cubrición completa de al menos 2 cm. Minke,G. [17]
- **Figura 1.20.** Anclaje de tubos de cartón a pórticos de madera. C.White [17]
- **Figura 1.21.** Recubrimiento de tubos con mezcla de al menos 2 cm. C.White [17]
- **Figura 1.22.** Sacas de polietileno o tela para rellenar de mezcla. Minke,G. [17]
- **Figura 1.23.** Relleno de mangueras con barro utilizando bomba. Minke,G[16]
- **Figura 1.24.** Apisonado y mojado de la saca con el propio material. Minke,G. [17]
- **Figura 1.25.** Apilado de las diferentes sacas. Minke,G. [17]
- **Figura 1.26.** Construcción de ejemplo mediante mangueras rellenas. Minke,G. [17]
- **Figura 1.27.** Fachada elaborada con mangueras rellenas. vivienda del propio autor del metodo. Tamera, Portugal. [16]
- **Figura 1.28.** Aporte de la mezcla sobre malla plástica. Minke,G. [16]
- **Figura 1.29.** Enrollado del bambú en la mezcla. Minke,G. [16]
- **Figura 1.30.** Colocación de las estacas enrolladas en barro en los paramentos. Minke,G. [16]
- **Figura 1.31.** Nivelación de la mezcla tras la proyección. C.White [17]

- **Figura 1.31.** Nivelación de la mezcla tras la proyección. C.White [17]
- **Figura 1.32.** Proyección de la mezcla mediante manguera y bomba. C.White [17]
- **Figura 1.33.** Acabado final de muros de barro proyectado. C.White [17]
- **Figura 1.34.** Bóveda realizada por bloques de adobes. Resistión al terremoto en Bam, Irán, 2003. Schijns, W. [16]
- **Figura 1.35.** Adobes reforzados con paja. Ait Ben Haddou, Marruecos. [14]
- **Figura 1.36.** Adobes en moldes. Curso de construccion con tierra. Reino Unido. Paul Jaquin y Charles Augarde. [14]
- **Figura 1.37.** Elaboración de adobe directamente sobre el suelo. Minke,G. [16]
- **Figura 1.38.** Abobes secándose en el exterior de la mezquita. Mali, Djenné, 2008. [49]Cole
- **Figura 1.39.** Método de secado uniforme para espacios reducidos. Minke,G. [16]
- **Figura 1.40.** Muro exterior construido con adobones aliviado con paj. Dufter, S. [16]
- **Figura 1.41.** Moldes desmontables para adobones. Fauth 1933. [16]
- **Figura 1.42.** Adobes antisísmicos reforzados con bambú Minke,G. [16]
- **Figura 1.43.** Adobes reforzados con alambres tensados anti sismo Minke,G. [16]

- **Figura 1.44.** Proceso de compactación de un BTCE. Paraguay. Minke,G. [16]
- **Figura 1.45.** Elaboración de un bloque de tierra comprimido estabilizado. Bangalore, India. [14]
- **Figura 1.46.** Utilización de BTCE estabilizado con cemento para realizar casas. Bangalore, India. [14]
- **Figura 1.47.** Vivienda de adobe en Louroukina. Chipre. Saverio Mecca.[2]
- **Figura 2.1.** Casa Pompallier realizada con tierra. Russel, Nueva Zelanda. Robert McClean [14]
- **Figura 2.2.** Gran Mezquita de Djenné. Malí. Carolina Castellanos [14]
- **Figura 2.3.** Muros de tapial en el Alcazaba de la Alhambra de Granada.Patrimonio de la humanidad por la UNESCO. Granada, España. [14]
- **Figura 2.4.** Fábrica de los caramelos Riccola en Suiza por Herzog & MEuron durante su elaboración y una vez finalizado. [50]
- **Figura 2.5.** Centro cultural del desierto NK'MIP por Hotson Bakker Boniface Haden architects. Osoyoos, Canadá. [51]
- **Figura 2.6.** Centro hospitalario Léo en Gando por Francis Kéré. Burkina Faso. [3]
- **Figura 2.7.** Viviendas modulares para profesores de Francis Kéré. Burkina Faso. [3]
- **Figura 2.8.** Colegio de primaria de Gando por Francis Kéré. Burkina Faso. [3]

- **Figura 3.1.** Distintos tipos de suelos de Innovarcilla. [32]
- **Figura 3.2** Arcilla roja procedente de la fábrica de Innovarcilla (Jaén). Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 3.3.** Suelo utilizado procedente de Escocia y Glasgow. [5]
- **Figura 3.4.** Suelo utilizado procedente de la fábrica de Innovarcilla en Bailén. Arcilla Rubia, negra y roja. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 3.5.** Colegio Haj Yousif School en construcción con BTC estabilizados con cemento. Adam and Agib [25]
- **Figura 3.6.** Alginato en recipiente azul utilizado en la Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 3.7.** Fibras de coco. Eugenio Hansn. Fuente: intradix.
- **Figura 3.8.** Fibras de yute. Francesco Nori. [38]
- **Figura 3.9.** Fibras de palma. Eric Bauer. Bolivia.
- **Figura 3.10.** Fibras de paja utilizadas. Viena[19]
- **Figura 3.11.** Fibras de bambú. Ludovic Fery. [16]
- **Figura 3.12.** BTC elaborados en Cerdeña y estabilizados con paja. Cerdeña, Italia. [19]
- **Figura 3.13.** Molde de acero para la elaboración de probetas en Viena. [42]

- **Figura 3.14.** Molde de acero para realizar tres probetas prismáticas en la Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 3.15.** Prensa mecánica para elaborar dos probetas prismática. Universidad de Sevilla. Foto de la autora.
- **Figura 3.16.** Prensa hidráulica para probetas tipo baldosas. Universidad de Sevilla. Foto de la autora.
- **Figura 3.17.** Vivienda de adobes en Baté Village. Fernando Vegas, Camila Mileto. [2]
- **Figura 4.1.** Cúpula construida con BTCE. Guardería La Font de Rieral. 2010. Agenda de la construcción sostenible.
- **Figura 4.2.** Componentes para la dosificación. Proceso de elaboración de probetas. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.3.** Instrumentación básica de trabajo. Proceso de elaboración de probetas. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.4.** Saneado de la lana. Proceso de elaboración de probetas. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.5.** Pesado de la arcilla proveniente de la Fabrica Innovarcilla. Proceso de elaboración de probetas. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.6.** Aporte paulatino de agua. Proceso de elaboración de probetas. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.

- **Figura 4.7.** Eliminación de grumos en la unión de arcilla y lana. Proceso de elaboración de probetas. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.8.** Unión del alginato a la mezcla. Proceso de elaboración de probetas. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.9.** Disolución de grumos en la mezcla. Proceso de elaboración de probetas. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.10.** Compactación por tongadas de la mezcla en el interior de la adobera. Proceso de elaboración de probetas. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.11.** Curado de probetas prismáticas sobre cartón durante 28 días. Proceso de elaboración de probetas. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.12.** Obtención de dos probetas de BTCE mediante adobera mecánica. Proceso de elaboración de probetas. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.13.** Probetas prismáticas de BTCE elaboradas con los tres tipos diferentes de arcillas usadas. Proceso de elaboración de probetas. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.14.** Prensa hidráulica para realización de probetas de baldosas. Proceso de elaboración de probetas. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.

- **Figura 4.15.** Probetas baldosines de BTCE elaboradas con los tres tipos diferentes de arcillas usadas. Proceso de elaboración de probetas. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.16.** Probetas prismáticas a ensayar. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.17.** Probetas tipo baldosas a ensayar. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.18.** Medición de las probetas prismáticas con pie de rey. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.19.** Pesado de probetas prismáticas en báscula. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.20.** Medición de probetas tipo baldosas con pie de rey digital. Ensayos de caracterización. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.21.** Pesado de probetas tipo baldosas en balanza. Ensayos de caracterización. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.22.** Modelo ultrasónico con transductores cilíndricos y pieza de tarado. Ensayos de caracterización. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.23.** Medición a ultrasonidos a probetas baldosas. Ensayos de caracterización. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.24.** Medición a ultrasonidos a probetas prismáticas. Ensayos de caracterización. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.

- **Figura 4.25.** Elección de 6 probetas baldosas por suelo realizado para la elaboración del ensayo. Ensayos de resistencia a hielo/deshielo. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.26.** Elección de 6 probetas prismáticas por suelo realizado para la elaboración del ensayo. Ensayos de resistencia a hielo/deshielo. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.27.** Probeta descartada y repuesta por apreciarse irregularidades en su cara. Ensayos de resistencia a hielo/deshielo. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.28.** Secado en estufa hasta peso constante. Ensayos de resistencia a hielo/deshielo. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.29.** Humectación de las caras de las probetas. Ensayos de resistencia a hielo/deshielo. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.30.** Absorción del agua superficial de las probetas. Ensayos de resistencia a hielo/deshielo. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.31.** Congelación de las probetas humedecidas. Ensayos de resistencia a hielo/deshielo. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.32.** Preparación para introducirlas en el congelador. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.

- **Figura 4.33.** Separación de probetas que permitan su secado. Ensayos de resistencia a hielo/deshielo. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.34.** Disgregación y deformación del material. Ensayos de resistencia a hielo/deshielo. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.35.** Aspecto visual antes y después de los ciclos de hielo/deshielo en baldosas. Ensayos de resistencia a hielo/deshielo. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.36.** Aspecto visual antes y después de los ciclos de hielo/deshielo en prismáticas. Ensayos de resistencia a hielo/deshielo. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.37.** Prensa multiensayos para realizar los ensayos de compresión y flexión. Ensayos de resistencia a flexión. Universidad de Sevilla. Macías, A.
- **Figura 4.38.** Programa informático para obtención de resultados. Ensayos de resistencia a flexión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.39.** Máquina con dos rodillos de apoyo paralelos y uno central de carga. Ensayos de resistencia a flexión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.
- **Figura 4.40.** Colocación paralela a la base de apoyo. Ensayos de resistencia a flexión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora.

- **Figura 4.41.** Rotura de la probeta a flexión. Ensayos de resistencia a flexión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.42.** Probeta de suelo rojo rota a flexión. Ensayos de resistencia a flexión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.43.** Resultado tras la rotura de las probetas. Ensayos de resistencia a flexión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.44.** Probetas de suelo rubio rotas a flexión. Ensayos de resistencia a flexión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.45.** Probetas de suelo negro rotas a flexión. Ensayos de resistencia a flexión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.46.** Gráfica tensión/deformación de las probetas prismáticas de arcilla roja. Ensayos de resistencia a flexión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.47.** Gráfica tensión/deformación de las probetas prismáticas de arcilla rubia. Ensayos de resistencia a flexión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.48.** Gráfica tensión/deformación de las probetas prismáticas de arcilla negra. Ensayos de resistencia a flexión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.49.** Selección de probetas representativas Ensayos de resistencia a flexión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora

- **Figura 4.50.** Probeta rota a flexión. Elección de una parte a ensayar a compresión. Ensayos de resistencia a compresión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.51.** Base para la aplicación de la carga. Ensayos de resistencia a compresión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.52.** Disposición de probeta sometida a compresión. Ensayos de resistencia a compresión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.53.** Rotura de probeta a compresión. Ensayos de resistencia a compresión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.54.** Resultado tras la rotura de las probetas. Ensayos de resistencia a compresión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.55.** Probeta de suelo rojo rota a compresión y flexión. Ensayos de resistencia a compresión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.56.** Probeta de arcilla rubia rota a compresión y flexión. Ensayos de resistencia a compresión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.57.** Probeta de suelo negro rota a compresión y flexión. Ensayos de resistencia a compresión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora

- **Figura 4.58.** Gráfica tensión/deformación de las probetas prismáticas de arcilla roja. Ensayos de resistencia a compresión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.59.** Gráfica tensión/deformación de las probetas prismáticas de arcilla rubia. Ensayos de resistencia a compresión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.60.** Gráfica tensión/deformación de las probetas prismáticas de arcilla negra. Ensayos de resistencia a compresión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.61.** Probetas ensayadas a compresión y flexión. Ensayos de resistencia a compresión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 4.62.** Selección de probetas representativas. Ensayos de resistencia a compresión. Universidad de Sevilla. Fotos de la autora
- **Figura 5.1.** Muro del cementerio de Spijk. Leemwerk. Pier Boer.[2]
- **Figura 5.2.** Colegio de primaria de Gando. Burkina Faso. Iwa Ban.[1]
- **Figura 5.3.** Fachada trasera del colegio de primaria de Gando. Burkina Faso. Iwa Ban.[1]
- **Figura 5.4.** Fachada trasera del colegio de primaria de Gando. Burkina Faso. Iwa Ban.[1]
- **Figura 5.5.** Zona exterior del colegio de primaria de Gando. Burkina Faso. Iwa Ban.[1]

7. Bibliografía:

• Índice de tablas

- 3.1 - Composición mineralógica de suelos estudiados en la Universidad de Sevilla
- 3.2 - Valores de Índice de Plasticidad (I.P) por diferencia entre el Límite Líquido (L.L) y el Límite Plástico(L.P). Expresado en %
- 4.1 - Dosificación establecida para realizar probetas con un peso total de 4000gr
- 4.2 - Elaboración de probetas
- 4.3 - Densidades aparentes, reales y compacidad de las probetas prismáticas
- 4.4 - Densidades aparentes, reales y compacidad de las probetas baldosas
- 4.5 - Densidades aparentes del material. Valores medios
- 4.6 - Resultados de ultrasonidos en probetas prismáticas
- 4.7 - Resultados de ultrasonidos en probetas tipo baldosas
- 4.8 - Datos medios de ultrasonidos y densidades aparentes
- 4.9 - Pesadas de Ciclos de hielo/deshielo en baldosas
- 4.10 - Pesadas de Ciclos de hielo/deshielo en probetas prismáticas
- 4.11 - Resistencia a flexión de las probetas prismáticas
- 4.12 - Resultados de compresión después de heladicidad
- 4.13 - Resultados de compresión antes de heladicidad
- 4.14 - Resultados de compresión antes y después de heladicidad

- [1] D. F. Kéré, A. Lepik, A. Beygo, and G. A. T. Pinakothek der Moderne (Munich, Francis Kéré : radically simple. .
- [2] M. Correia, L. Dipasquale, S. Mecca, and K. Akermann, Terra Europae : earthen architecture in the European Union. Pisa : ETS, 2011.
- [3] “Kéré Architecture :: Projects.” [Online]. Available: <http://kere-architecture.com/projects/>. [Accessed: 24-Jun-2017].
- [4] F. Bradley and S. Soil, “a Combination of Sem and Edx Studies on a Clay-Based Natural Composite With Animal Fibre and Its,” no. June, pp. 24–28, 2012.
- [5,31] C. Galán-Marín, C. Rivera-Gómez, and J. Petric, “Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre,” Constr. Build. Mater., vol. 24, no. 8, pp. 1462–1468, 2010.
- [6] C. Galán-Marín, C. Rivera-Gómez, and F. Bradley, “Ultrasonic, molecular and mechanical testing diagnostics in natural fibre reinforced, polymer-stabilized earth blocks,” Int. J. Polym. Sci., vol. 2013, 2013.
- [7,34] C. Rivera-Gómez, C. Galán-Marín, and F. Bradley, “Analysis of the Influence of the Fiber Type in Polymer Matrix/Fiber Bond Using Natural Organic Polymer Stabilizer,” Polymers (Basel)., vol. 6, no. 4, pp. 977–994, Mar. 2014.
- [8] UNE 41410, “Bloques de tierra comprimida para muros y taboques/Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo,” Aenor, p. 28, 2008.
- [9] UNE-EN 12504-4, “Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos,” AENOR Asoc. Española Norm. y Certificación, 2006.
- [10] UNE-67028, “Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de heladicidad.,” Aenor, p. 3, 1997.
- [11] UNE-EN 1015-11, “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería - Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido,” Aenor, p. 14, 2000.

- [12] UNE-EN 772-1:2011, "Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión.," Normas UNE.AENOR (Asociación Española Norm. y Certificación), no. abril, pp. 1–16, 1999.
- [13] L. Maldonado Ramos and F. Vela Cossío, *Curso de construcción con tierra*. Madrid : Instituto Juan de Herrera, 1999.
- [14] P. Jaquin and C. Augarde, *Earth building : history, science and conservation*. Braqcknell : IHS BRE Press, 2012.
- [15] M. Rocha and F. Jové Sandoval, *Técnicas de construcción con tierra : introducción*. Lisboa : Argumentum, 2015.
- [16] G. Minke, *Manual de construcción de tierra : la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. Teruel : EcoHabitar, 2010.
- [17] G. 1937- Minke, *Muros de barro : sistemas, ejecución, consejos prácticos*. Barcelona : Icaria, 2015.
- [18] R. S. Roux Gutiérrez and R. Gutierrez, *Los bloques de tierra comprimida (BTC) en zonas húmedas*. Madrid : Plaza y Valdés, 2010.
- [19] F. Parisi, D. Asprone, L. Fenu, and A. Prota, "Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers," *Compos. Struct.*, vol. 122, pp. 300–307, 2015.
- [20] H. Binici, O. Aksogan, and T. Shah, "Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 19, no. 4, pp. 313–318, 2005.
- [21] H. Danso, D. B. Martinson, M. Ali, and J. B. Williams, "Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres," *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 797–809, 2015.
- [22] P. Melià, G. Ruggieri, S. Sabbadini, and G. Dotelli, "Environmental impacts of natural and conventional building materials: A case study on earth plasters," *J. Clean. Prod.*, vol. 80, pp. 179–186, 2014.
- [23] M. M. Asghar Vatani Oskouei , Mohammad Afzali, "Experimental investigation on mud bricks reinforced with natural additives under compressive and tensile tests," *Constr. Build. Mater.*, 2016.
- [24] A. B. Ngowi, "Improving the traditional earth construction: a case study of Botswana," *Constr. Build. Mater.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–7, 1997.
- [25] S. Deboucha and R. Hashim, "A review on bricks and stabilized compressed earth blocks," *Sci. Res. Essays*, vol. 6, no. 3, pp. 499–506, 2011.
- [26] J. Nakamatsu, S. Kim, J. Ayarza, E. Ramírez, M. Elgegren, and R. Aguilar, "Eco-friendly modification of earthen construction with carrageenan: Water durability and mechanical assessment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 139, pp. 193–202, 2017.
- [27] L. S. M. J. . Carda, "Materias primas y aditivos cerámicos. Vol 2.2 " Faenza Editrice Ibérica s.L, Castellon (2003)," Faenza Ed. Ibérica S.L. Castellón, vol. 2, 2003.
- [28] A. Ahmed and U. H. Issa, "Stability of soft clay soil stabilised with recycled gypsum in a wet environment," *Soils Found.*, vol. 54, no. 3, pp. 405–416, 2014.
- [29] M. Emiroğlu, A. Yalama, and Y. Erdoğdu, "Performance of ready-mixed clay plasters produced with different clay/sand ratios," *Appl. Clay Sci.*, vol. 115, pp. 221–229, 2015.
- [30] B. Taallah, A. Guettala, S. Guettala, and A. Kriker, "Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 59, pp. 161–168, 2014.
- [32] S. Bueno, "Estudio de 34 Caracterización Tecnológica de Materias Primas Cerámicas," *Inf. sin publicar*. Fund. Innovarcilla. Bailén, 2008.
- [33] I. Gonzalez, "Materias primas del área de Bailén. Impacto ambiental de explotaciones," *Mater. primas y Métodos Prod. Mater. Cerámicos*. Ed.J. Jiménez Millán. Soc. Española Arcillas, pp. 65–87, 2011.
- [35] G. Investigation and and testing—Laboratory testing of Soil, European Committee for Standardization. CEN ISO/TS 17892/12:2004:, vol. Part 12:De, no. March. 2004, p. Available online: www.cen.eu (assessed on 23 March).
- [36] F. B. Carmen Galán-Marín, Carlos Rivera-Gomez, *Brick and Mortar Research*. Chapter 2. INNOVATIVE USES OF UNFIRED BRICKS AND

7. Bibliografía:

CLAYPRODUCTS AS SUSTAINABLE BUILDING SOLUTIONS, Nova Scien.

[37] S. M. Hejazi, M. Sheikhzadeh, S. M. Abtahi, and A. Zadhoush, "A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, pp. 100–116, 2012.

[38] A. Laborel-Préneron, J. E. Aubert, C. Magniont, C. Tribout, and A. Bertron, "Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 111, pp. 719–734, 2016.

[39] M. Palumbo, F. McGregor, A. Heath, and P. Walker, "The influence of two crop by-products on the hygrothermal properties of earth plasters," *Build. Environ.*, vol. 105, pp. 245–252, 2016.

[40] A. A. R. Corrêa, L. M. Mendes, N. P. Barbosa, T. De Paula Protasio, N. De Aguiar Campos, and G. H. D. Tonoli, "Incorporation of bamboo particles and 'synthetic termite saliva' in adobes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 250–256, 2015.

[41] R. K. A. S. A. A. Şahin Zaimoğlu, "Effect of Freeze-Thaw Cycles on Strength Behavior of Compacted Chicken Quill-Clay Composite in Undrained Loading," vol. 20, no. 10, pp. 299–308, 2016.

[42] T. Ashour, H. Wieland, H. Georg, F. J. Bockisch, and W. Wu, "The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 10, pp. 4676–4685, 2010.

[43] Asociación Española de Normalización y Certificación, UNE-EN 12371:2002, métodos de ensayo para piedra natural, determinación de la resistencia a la heladicidad, vol. 142. Elsevier Ltd, 2002, pp. 1–8.

[44] UNE-EN 993-1, "Determinación de la densidad aparente, de la porosidad abierta y de la porosidad total." p. 12, 1996.

[45] C. Galán Marín, "Caracterización de un mortero polimérico con resina de poliéster insaturado y árido de albero para su aplicación en construcción / Tesis realizada por Carmen Galán Marín ; bajo la dirección de Manuel Olivares Santiago," 2001.

[46] UNE-67019, "Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. definiciones, clasificaciones y especificaciones," Aenor, p. 9, 1996.

[47] J. E. Aubert and M. Gasc-Barbier, "Hardening of clayey soil blocks during freezing and thawing cycles," *Appl. Clay Sci.*, vol. 65–66, pp. 1–5, 2012.

[48] J. E. Oti, J. M. Kinuthia, and J. Bai, "Engineering properties of unfired clay masonry bricks," *Eng. Geol.*, vol. 107, no. 3–4, pp. 130–139, 2009.

[49] M. Fernandes and A. Tavares, O adobe. .

[50] "369 RICOLA KRÄUTERZENTRUM - HERZOG & DE MEURON." [Online]. Available: <https://www.herzogdemeuron.com/index/projects/complete-works/351-375/369-ricola-kraeuterzentrum/image.html>.

[51] "Nk'Mip Desert Cultural Centre - HBBH Architects / HBBH Architects | ArchDaily." [Online]. Available: <http://www.archdaily.com/10629/nkmip-desert-cultural-centre-hbbh-architects>.