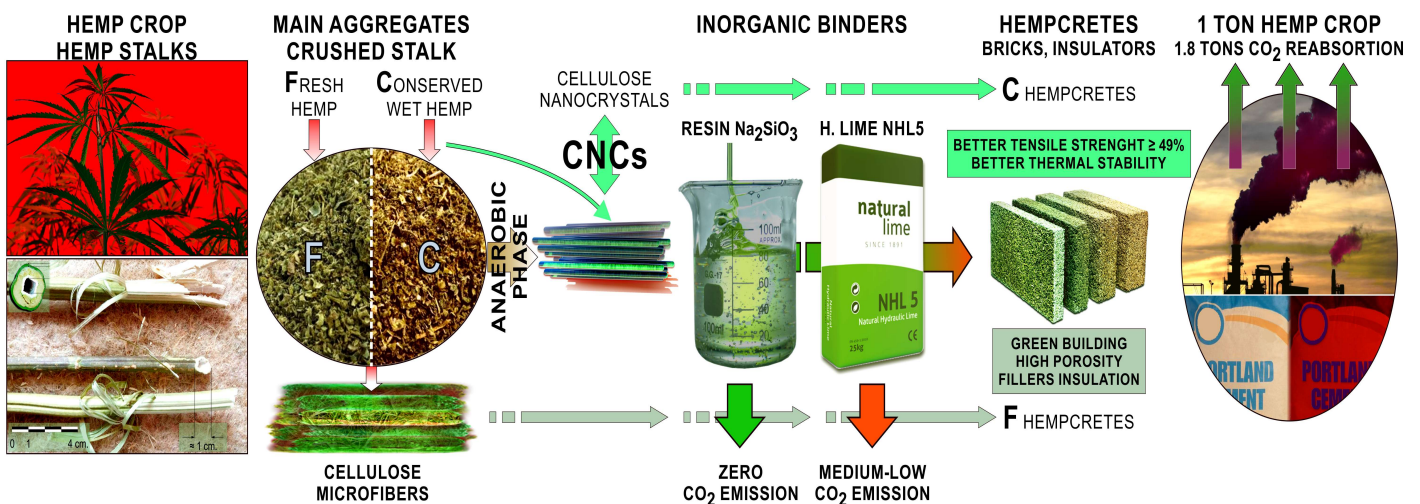




# UNIVERSIDAD DE GRANADA



## TESIS DOCTORAL RESTAURACIÓN Y REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS Y BIOCONSTRUCCIÓN CON MORTEROS LIGEROS ADITIVADOS CON FIBRAS VEGETALES.

Por Monika Brümmer  
2021



# UNIVERSIDAD DE GRANADA

Facultad de Bellas Artes

Programa de Doctorado en Historia y Artes

TESIS DOCTORAL

RESTAURACIÓN Y REHABILITACIÓN DE  
EDIFICIOS Y BIOCONSTRUCCIÓN CON  
MORTEROS LIGEROS ADITIVADOS CON  
FIBRAS VEGETALES.

Monika Brümmer

Graduada en Arquitectura por la Escuela Superior de Bellas Artes de Berlín (HdK). Máster en Ciencias y Tecnologías del Patrimonio Arquitectónico por la Universidad de Granada.

Dra. María Paz Sáez-Pérez

Dr. Jorge Alberto Durán Suárez

Directores de la Tesis Doctoral

Granada, Mayo 2021

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales  
Autor: Monika Brümmer  
ISBN: 978-84-1117-036-9  
URI: <http://hdl.handle.net/10481/70693>

## **Agradecimientos**

Deseo expresar mi gratificación a todas las personas que han apoyado la elaboración de esta tesis doctoral.

En primer lugar, me dirijo a los Profesores de la Universidad de Granada, Doctora M<sup>a</sup>Paz Sáez-Pérez y Doctor Jorge Durán Suárez, directores de la presente tesis, expresando mi más amplio agradecimiento por su interés para guiar el desarrollo de esta investigación. Sus orientaciones y conocimientos tal como su sugerencia de participar en la 3. Edición de la Conferencia ICNF (International Conference on Natural Fibers) han sido fundamentales para su avance y finalización. Al programa de Doctorado en Historia y Artes de la Universidad de Granada, a los Grupos de Investigación HUM629. Materiales avanzados para aplicaciones técnicas y artísticas y su conservación-restauración (MAKRAC) y RNM179 Mineralogía y Geoquímica de los Ambientes Sedimentario y Metamórfico, ambos de la Junta de Andalucía. A los proyectos de Investigación: REMINE Reuse of Mining Waste into Innovative Geopolymeric-based Structural Panels, Precast, Ready Mixes and Insitu Applications, y a MAT2016-75889-R.

En especial quiero dar mi gratitud al Doctor Hans-Jörg Gusovius. Nuestra conversación en el 14. Congreso Internacional de la EIHA (European Industrial Hemp Association), ha sido incentiva para el programa experimental llevado a cabo en esta investigación. Con él he aprendido cuestiones técnicas muy importantes sobre el procesado de la materia prima vegetal, utilizada en los estudios, que se reflejan en esta Tesis. Estoy sumamente agradecida al instituto Alemán Leibnitz, de Tecnología Agraria y Bioeconomía ATB y en particular a miembros del Departamento de “Tecnología de Procesamiento, Almacenamiento y Preservación”, de preparar los materiales vegetales utilizados en la parte experimental de esta tesis y de facilitar datos relevantes sobre ellos.

Hace casi una década me contactaron los Doctores Anna Arizzi y Guiseppe Cultrone (investigadores de UGr) y crearon este importante nexo entre ciencia e industria y práctica que despertó mi interés en profundizar en el estudio de hormigones vegetales. Las investigaciones que hemos desarrollado juntos han surgido de necesidades reales a través de observaciones en obra y han consolidado mi intención de apuntarme a un Máster, seguido

por un Doctorado en la Universidad de Granada. Es por ello significativo para mí que parte de nuestro trabajo completa el presente compendio.

Por último, expreso una enorme gratitud a mis colegas, clientes, colaboradores y seres queridos por su apoyo incondicional y espera paciente durante el desarrollo de este trabajo.

## **Resumen**

La incorporación de agregados vegetales en los hormigones es un desafío porque el fraguado de aglutinantes no parece ser óptimo. Al tratarse de materiales orgánicos también es frecuente encontrar patologías morfológicas, cromáticas o microbiológicas si no se adapta el ritmo de construcción al comportamiento de secado del material. De hecho, hemos encontrado que es aconsejable esperar como mínimo diez semanas antes de aplicar un revoco sobre un material tipo muro, para no dificultar el fraguado de los hormigones en masa y evitar el deterioro del hormigón o del revoco o un excesivo cambio cromático. Además, el deterioro del revoco es condicionado por la cal utilizada en su amasado y el tipo de aglutinante utilizado en la formulación del hormigón vegetal y su densidad del material.

Por otro lado, la presente Tesis evoluciona experiencias favorables, realizadas con pretratamientos químicos y no químicos de agregados de cáñamo que han conducido a mayores rendimientos mecánicos de los hormigones de cáñamo. Nuestra investigación identifica si la preservación anaeróbica húmeda del tallo de cáñamo picado y embalado directamente en el campo constituye un método factible y sostenible de mejorar el rendimiento de diferentes hormigones de cáñamo contra el mismo material picado y conservado en estado fresco, recién cosechado, ya que la preservación induce cambios en los polímeros estructurales del vegetal. El método se aplica a diferentes formulaciones, aglutinados con tierra estabilizada con cal o bien geopolímeros de arcilla. La mayoría de los resultados nos muestran algunas estrategias nuevas para aprovechar al máximo el potencial de características térmicas y mecánicas del hormigón de cáñamo, ahorrar agua en la mezcla y emplear mayores proporciones de agregados vegetales de los alcanzados habitualmente con cañamiza-cal. La investigación también destaca el hecho de que la permeabilidad al vapor de agua disminuye en las formulaciones mezcladas con cáñamo preservado en húmedo y que la porosidad de probetas, elaboradas con cáñamo fresco tiende ligeramente hacia

radios de mayor tamaño. La porosidad accesible de las formulaciones aglutinadas con geopolímeros de arcilla, que contienen agregados del tallo íntegro y se sitúan en un rango hormigones de cáñamo con mayor utilidad para funciones estructurales, se encontró análoga con diferentes hormigones de cáñamo-cal en la literatura, aunque no alcanza la gama de resultados máximos en este campo.

## **Abstract**

Incorporating plant-based aggregates into concretes is a challenge because the setting of binders does not appear to be optimal. As they are organic materials, it is also common to find morphological, chromatic- or microbiological pathologies if the construction rhythm is not adapted to the drying behavior of the material. In fact, we have found that it is advisable to wait at least 10 weeks before applying a render on a wall-type material, so as not to hinder the setting of the mass concrete and avoid deterioration of the hemp concrete or the render or an excessive color change. Furthermore, the deterioration of the plaster is conditioned by the lime used in its mixing and the type of binder used in the formulation of vegetable concrete as well as the density of the material.

On the other hand, this Thesis evolves favorable experiences, carried out with chemical and non-chemical pretreatments of hemp aggregates that have led to higher mechanical performances of hemp concretes. Our research identifies whether the wet anaerobic preservation of chopped and packed hemp stalk directly in the field constitutes a feasible and sustainable method of improving the performance of different hemp concretes against the same freshly harvested chopped and preserved material, since this preservation induces changes in the structural polymers of the plant. The method is applied to different formulations, bonded with earth stabilized with lime or clay geopolymers. Most of the results show us some new strategies to take full advantage of the potential of thermal and mechanical characteristics of hemp concretes, save water in the mix and use higher proportions of vegetable aggregates than those usually achieved with hemp-lime. The research also highlights the fact that water vapor permeability decreases in formulations mixed with wet preserved hemp and that the porosity of test specimens made with fresh hemp tend slightly towards larger pore radiuses. The accessible porosity of the formulations agglutinated with clay geopolymers, which contain aggregates of the entire stem and are in

a range of hemp concretes with greater utility for structural functions, was found to be analogous with different hemp-lime concretes in the literature, although it does not reach the maximum range of results in this field.

## Índice

<b>1. Introducción .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1. Definición de hormigón de cáñamo .....</b>	<b>12</b>
1.1.1. Origen de la tecnología y propagación en Europa.....	13
1.1.2. Composición y formato comercial del hormigón de cáñamo .....	14
1.1.3. Composición.....	15
<b>1.2. Ámbito de usos y aplicaciones .....</b>	<b>17</b>
<b>1.3. Cultivo de cáñamo, morfología del tallo, variedades y calidad industrial.....</b>	<b>18</b>
1.3.1. Morfología del tallo de cáñamo .....	18
1.3.2. Variedades de cáñamo .....	21
1.3.3. Calidad de cáñamo industrial.....	21
<b>1.4. Propiedades de agro-agregados de cáñamo.....</b>	<b>22</b>
<b>1.5. Estado del Arte de hormigones de cáñamo .....</b>	<b>24</b>
1.5.1. Propiedades físicas y de confort .....	25
1.5.2. Características medioambientales .....	27
1.5.3. Contraindicaciones .....	29
<b>1.6. Barreras en la difusión de la tecnología de hormigón de cáñamo .....</b>	<b>30</b>
1.6.1. Barreras regulatorias.....	31
1.6.2. Barreras comerciales y estrategias de mayor alcance .....	33
1.6.3. Barreras técnicas, formativas y reguladoras.....	35
<b>1.7. Tendencias y carencias actuales de investigación .....</b>	<b>36</b>

<b>2. Objetivos.....</b>	<b>39</b>
<b>2.1. Objetivo general .....</b>	<b>39</b>
2.1.1. Problemas pendientes por resolver.....	39
<b>2.2. Objetivos específicos .....</b>	<b>40</b>
2.2.1. Intenciones de optimizar las propiedades físicas.....	40
2.1.2. Limitación de patologías.....	41
<b>3. Materiales .....</b>	<b>42</b>
<b>3.1. Agregados vegetales procedentes de tallo de cáñamo completo.....</b>	<b>42</b>
3.1.1. Origen del material y procesado.....	42
3.1.2. Conservación y preservación .....	42
3.1.3. Características del cáñamo preservado.....	44
<b>3.2. Agregados minerales, aglutinantes y activador .....</b>	<b>46</b>
3.2.1. Polvo de vidrio .....	46
3.2.2. Tierra arcillosa .....	47
3.2.3. Silicato de sodio .....	47
3.2.4. Hidróxido de sodio.....	47
3.2.5. Cal hidráulica natural.....	47
<b>3.3. Agregados comerciales de cáñamo .....</b>	<b>48</b>
3.3.1. Origen de la cañamiza .....	48
<b>3.4. Aglutinantes y agregados minerales .....</b>	<b>49</b>
3.4.1. Cal hidráulica natural.....	49
3.4.2. Cal aérea en pasta.....	49
3.4.5. Composición química y mineralógica de los materiales minerales.....	50
<b>4. Metodología utilizada en los estudios experimentales.....</b>	<b>50</b>
<b>4.1. Preparación de probetas y secado .....</b>	<b>50</b>



4.1.1. Mezclado .....	50
4.1.2. Moldeo y desmoldeo.....	52
4.1.3. Secado .....	52
4.3.4. Densidades secas.....	54
4.1.5 Absorción por capilaridad .....	54
<b>4.2. Relación de estudios experimentales.....</b>	<b>54</b>
4.2.1. Conductividad térmica .....	54
4.2.2. Calor específico.....	55
4.2.3. Permeabilidad al vapor de agua.....	55
4.2.4. Porosimetría de mercurio (MIP).....	56
4.2.5. Resistencia mecánica .....	57
4.2.6. Ultrasonidos.....	57
4.2.7. Determinación de color de los agregados vegetales .....	58
4.2.8. Determinación del ancho de las fibras .....	58
<b>4.3. Preparación de probetas y secado .....</b>	<b>58</b>
4.3.1. Probetas .....	58
4.3.2. Curado de probetas.....	59
4.3.3. Revestimientos.....	59
4.3.4. Probetas de control.....	59
<b>4.4. Programa experimental .....</b>	<b>60</b>
4.4.1. Porosimetría de intrusión de mercurio .....	60
4.4.2. Microscopía electrónica de barrido ambiental.....	60
4.4.3. Determinación de color de los revestimientos .....	60
4.4.4. Estudio microbiológico .....	61
<b>5. Resultados .....</b>	<b>61</b>
<b>5.1. Resultados experimentales con hormigones, elaborados con materiales del tallo de cáñamo íntegro.....</b>	<b>61</b>
5.1.1. Secado y densidades secas de las probetas.....	61

5.1.2. Resultados de Conductividad térmica de hormigones de cáñamo aglutinados con geo-polímeros de arcilla.....	62
5.1.2. Resultados de calor específico .....	63
5.1.4. Permeabilidad al vapor de agua.....	64
5.1.5. Absorción por capilaridad .....	69
5.1.6. Porosimetría de intrusión de mercurio (MIP) .....	70
5.1.7. Resistencia mecánica .....	74
5.1.8. Ultrasonidos.....	76
5.1.10. Grosor de las fibras vegetales.....	77
5.1.11. Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX).....	77
<b>5.2. Resultados experimentales con hormigones, elaborados con cañamiza .....</b>	<b>78</b>
5.2.1. Secado de las probetas de hormigón de cáñamo .....	78
5.2.2. Porosimetría de intrusión de mercurio (MIP) .....	79
5.2.3. Endurecimiento y fases minerales de los hormigones de cáñamo (XRD, ESEM) .....	79
5.2.4. Endurecimiento y fases minerales de los revestimientos (XRD, ESEM).....	80
5.2.5. Determinación de color de los revestimientos .....	80
5.2.6. Estudio microbiológico .....	81
<b>6. Conclusiones.....</b>	<b>81</b>
6.1. Conclusiones de resultados experimentales con hormigones vegetales, elaborados con materiales del tallo de cáñamo íntegro .....	82
6.2. Conclusiones de resultados experimentales obtenidos con hormigones, elaborados con cañamiza.....	85
<b>9. Bibliografía.....</b>	<b>86</b>

## **ANEXO**

### **Tesis como compendio de artículos previamente publicados**

## 1. Introducción

A diferencia de los hormigones agregados con fibras sintéticas o minerales, aquellos elaborados con fibras vegetales ofrecen un enfoque alternativo, que se está investigando en paralelo a tendencias de reducción del impacto medioambiental de procesos de construcción, de eficiencia energética y de retención de CO<sub>2</sub> en las envolventes de edificios.

En este contexto se están explorando dos líneas de investigación:

La primera línea incluye el material vegetal como refuerzo de hormigones tradicionales en forma de fibras a fin de evitar retracciones, ganar resistencia mecánica a la flexo-tracción y compresión o para resolver problemas de micro fisuras que pudieran repercutir en su durabilidad.

La segunda línea está asociada a la composición intrínseca de los hormigones vegetales, que es sumamente compleja puesto que el añadido de material orgánico afecta a algunas de sus propiedades físicas a la vez. Entre otras la viscosidad, la densidad, la conductividad térmica, la permeabilidad al vapor, la porosidad y la absorción de agua.

Estos hormigones destacan por sus cualidades como aislante térmico a lo que se suma el ser un material con capacidad estructural, y un material de cerramiento o de construcción con moderadas propiedades aislantes y estructurales.

Mientras en la primera línea las fibras poliméricas se añaden en proporciones pequeñas, que pueden encontrarse por debajo del 5% en volumen, la segunda línea parte de añadidos mucho mayores que pueden llegar a superar el 60% y contener en proporciones variables fibras poliméricas y fracciones vegetales leñosas. Las últimas sustituyen parcial o completamente los áridos minerales naturales, utilizados en hormigones tradicionales.

La incorporación de una proporción importante de materiales vegetales en hormigones hidráulicos o de tierra, entre otros, ofrece un potencial significativo para el desarrollo de materiales ecológicos para la construcción. Los beneficios de estos materiales van más allá de la protección del medio ambiente, dado que tienen en cuenta el usuario, es decir destacan por un comportamiento higrotérmico que puede crear niveles de confort superiores a los que se consigue con materiales aislantes sintéticos.

Sin embargo, hay desafíos importantes que deben superarse antes de que las fibras naturales puedan incorporarse de forma satisfactoria en los compuestos.

Aunque las fibras poliméricas naturales han mostrado propiedades mecánicas y térmicas muy competitivas con las fibras sintéticas, además de disponibles a nivel global y económico en el procesado que las fibras sintéticas, metálicas, de carbono e inorgánicas, su uso en hormigones es más delicado en términos de durabilidad, trabajabilidad, propiedades inestables del material y difícil adhesión a la matriz.

Tanto la morfología como las propiedades físicas de los materiales vegetales que se pretenden incorporar en un hormigón aislante pueden presentar características muy variables. A estas variables se juntan las de tratamiento, procesado y conservación.

Asimismo, es conocido que las fibras vegetales consisten en celulosa, lignina y hemicelulosa, que reaccionan con matrices cementosas. Las reacciones interfaciales entre la matriz de conglomerante son atribuidas sobre todo a la hemicelulosa y la lignina por medio de lixiviación de polisacáridos. Estas reacciones pueden interferir en el fraguado y secado del hormigón elaborado con agregados vegetales, con una moderada o significativa pérdida de características mecánicas. Por lo tanto, es necesario desarrollar estrategias de pretratamiento que pudieran limitar o neutralizar estas reacciones indeseadas.

En conclusión, debido a la presencia de componentes vegetales pueden ocurrir tanto fenómenos negativos como positivos que influirán en las características finales de los hormigones vegetales para la construcción, y que se pretenden estudiar con la realización de esta tesis de doctorado.

La falta de conciencia por limitado acceso a la información sobre las características y la aplicación de los materiales naturales promueven el uso de materiales de construcción convencionales. Estos además están más normalizados por ser inorgánicos o sintéticos y en la mayoría más estables químicamente que los vegetales. Sin embargo, causan elevadas emisiones de CO<sub>2</sub> y pueden presentar riesgos para la salud, identificados en paralelo con las discusiones sobre el cambio climático, la degradación del medioambiente y la contaminación. De esto se están creando condiciones para contemplar materiales naturales, derivados de fuentes renovables.

Uno de los vegetales que está ganando alta popularidad en el ámbito de la construcción ecológica es el cáñamo. Esta planta tiene un potencial muy significativo debido a su adaptación a diversas regiones climáticas, su alta producción de biomasa, su beneficio para la estructura del suelo, su resistencia a las plagas y su inalcanzable versatilidad, altamente indicada en la creación de nuevas bioeconomías sostenibles para una gran variedad de propósitos industriales.

### ***1.1. Definición de hormigón de cáñamo***

Un hormigón convencional consiste en una mezcla heterogénea entre un aglutinante mineral y granulados rocosos de dimensiones graduadas. Del mismo modo, lo que definimos como hormigón de cáñamo, consistirá en una mezcla entre agregados obtenidos de un material lignocelulósico, procedente de un cultivo agrícola, que forma la mayor parte del volumen, y un aglutinante. De hecho, muchos proyectos del pasado y presente integraron fibras vegetales en la construcción utilizando estos materiales como refuerzo estructural en lugar de un agregado ligero con un propósito aislante. Sin embargo, recientemente, los proyectos también comenzaron a utilizar diversas fuentes de bio-agregados leñosos. En el proceso de decorticación del tallo de cáñamo industrial europeo se obtiene como subproducto 1,7 kg cañamiza por cada kilo de fibras (*Carus y Sarmento, 2013*). La cañamiza consiste en fragmentos leñosos, formados por fibras lignocelulósicas, que recientemente se están valorizando para aligerar el hormigón. El resultado es un bio compuesto multi poroso que se considera como una posible solución para resolver, en paredes de una hoja, eficiencia energética y condiciones de confort en los edificios, sin sacrificar características mecánicas de autoaporte. Para cumplir con el conjunto de estos objetivos se necesitan cantidades importantes de bio agregados vegetales, que rondan un metro cúbico de fracciones vegetales de cáñamo por cada metro cúbico de hormigón, aglutinados en cantidades variables con un material que tiene la función de adherir las partículas mediante el amasado con agua. Tras el compactado del hormigón fresco, endurecimiento y secado, los componentes completan un compuesto aislante, sólido y duradero al que se añaden atributos de impacto ecológico y socioeconómico, como son baja energía incorporada, elevada regulación higrótérmica, reducido impacto ambiental, alta retención de gas de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>) y buena relación coste-rendimiento.

Variables se obtienen principalmente a través de la relación entre el cáñamo y los materiales cementosos así como la naturaleza de estos últimos. Las características físicas resultantes están condicionadas por la triple porosidad del hormigón de cáñamo (*Arnaud y Goulay, 2012*), asociada con la estructura propia de los agregados de cáñamo (mesoporos de 0,1-1 mm), los microporos entre los hidratos del conglomerante endurecido y los macroporos, resultantes de la disposición de las partículas vegetales tras el compactado del hormigón de cáñamo.

### ***1.1.1. Origen de la tecnología y propagación en Europa***

El potencial de la cañamiza para una aplicación en materiales de construcción compuestos fue por primera vez contemplado a finales de los años 80 en Nogent sur Seine (Francia), mientras se realizaba la rehabilitación de un edificio histórico de entramado de madera. En este proyecto se sustituyeron materiales de tierra y paja de cereal por un hormigón más ligero, formulado por cañamiza y cal. A continuación de esta experiencia emprendedora, llevada a cabo por un constructor llamado Carles Rasetti, el material fue descubierto y desarrollado comercialmente por la empresa francesa Isochanvre y difundido técnicamente por la asociación Adam (*Allin, 2012*). A finales de los años 90 también entró en funcionamiento la asociación Construire en Chanvre (*CenC, 2020*). El liderazgo que tenía Francia en esta época como país productor principal de cáñamo y de semillas certificadas en Europa, sobre gran cantidad de países de Europa del Norte, del Este y del Sur, que no cultivaron cáñamo en este momento, explica su papel de país movilizador en el ámbito tecnológico de la construcción con hormigón de cáñamo, de los años 90 en adelante. En la primera década la técnica se ha podido propagar favorablemente en el mercado de la construcción gracias a un ambiente financiero favorable para el desarrollo científico e industrial de aplicaciones para fibras naturales por parte de la comisión europea (*Carus y Sarmiento, 2013*).

Con una cosecha media anual de 30.000 toneladas métricas de cañamiza en Europa, la contribución de la construcción al mercado de cáñamo entre 2001-2003 alcanzó el 5% (1.750 toneladas métricas) (*Carus, 2005*). Con una creciente extensión de la técnica a otras partes de Europa la cuota de mercado de construcción para 43.000 toneladas métricas de cañamiza, obtenidas de la cosecha en 2013, ya alcanzó el 16% (6.880 toneladas métricas). En adición, un 26% de 25.000 toneladas métricas totales de fibras de cáñamo, se destinaron

a la producción de otros materiales aislantes para la construcción (*Carus y Sarmiento, 2013*). Dado que el cultivo de cáñamo industrial en Europa se ha multiplicado casi por tres, es decir desde menos de 16.000 hectáreas en 2013 hasta más de 45.000 hectáreas en 2017 (*Nova-Institut, 2020*), representando en la actualidad alrededor de una cuarta parte del cultivo de cáñamo industrial a nivel mundial, la producción de agro-agregados destinados a biohormigones seguirá aumentando con esta tendencia.

### ***1.1.2. Composición y formato comercial del hormigón de cáñamo***

El hormigón de cáñamo es un compuesto, amasado con agua, puesto en obra por compactado in situ o proyectado y basado en un agregado vegetal de cáñamo y un conglomerante o aglomerante.

En el formato comercial, el agregado consiste en cañamiza, partículas leñosas procedentes del tallo de la planta, que contienen un 5% de fibras residuales, no eliminadas en el decorticado. Entre los conglomerantes comerciales más comunes, utilizados en hormigones de cáñamo, se encuentra la cal aérea y la cal hidráulica natural, aunque también se emplean mezclas de estos dos últimos, mezclas de cal y cemento (cemento natural prompt o cemento portland) y formulaciones preparadas que contienen diferentes aglutinantes, desarrolladas específicamente para el hormigón de cáñamo (*Tradical, 2020*).

En cuando este biomaterial es utilizado para la construcción de muros proporciona el relleno y el aislamiento de una estructura de madera. Debido a un mayor poder aislante del material, comparado con muros tradicionales, los muros de hormigón de cáñamo no requieren aislamiento acústico-térmico adicional. La técnica renuncia por ello a la necesidad de construir una pared multicapa lo que favorece la velocidad y la simplicidad de la construcción. El entramado de madera puede estar completamente envuelto o bien hacerse visible en una o ambas caras, dependiendo de las dimensiones de las paredes y los pilares.

Además de ser utilizado en construcciones nuevas, el material resulta idóneo para la renovación y reparación de edificios antiguos con entramado de madera como un reemplazo del relleno de pared original. Gracias a sus características reguladores de humedad, el material contribuye a la longevidad de la estructura de madera. Otra opción, en rehabilitación es el añadido del material como revoco aislante de importante espesor, aplicado mediante proyectado o compactado en paredes existentes en una o ambas caras. En nueva construcción

su baja densidad y utilidad en toda la envolvente permite dimensionar cimentaciones y estructuras de madera más livianas de lo habitual, lo que reduce costes y plazos de ejecución. Los agregados vegetales y conglomerantes son generalmente suministrados por separado. Una vez mezclados en proporciones variables, adaptados a los trabajos a realizar, son aplicados mediante técnicas de compactado mecánico o proyectados.

Como alternativa adicional se comercializan aditivos naturales que pretenden reducir el consumo de cal (*Wolf Jordan, 2020*). En casos singulares los materiales se encuentran en un formato premezclado, (*Schönthaler, 2020*), aunque se trata únicamente de formulaciones para revocos, no para hormigones en masa.

### **1.1.3. Composición**

En cuanto a su composición, el hormigón de cáñamo pertenece a una categoría de materiales de construcción que incorporan partículas o agregados de origen vegetal y un aglutinante mineral u orgánico. Los materiales vegetales, cultivados para tal fin, o bien sus residuos industriales (*Savastano Jr. et al., 2001; Coatanlem et al., 2006*) y agrícolas (*Chabannes et al., 2014; Hung Mo et al., 2016*) se han investigado ampliamente como refuerzo de fibra cruda o de celulosa (*Jarabo et al., 2012, Kidalova et al., 2012*). En este caso el integro de fibras en los hormigones tiene la única finalidad de mejorar la resistencia a las fracturas (*Nozahic et al., 2012*) y evitar la aparición de grietas superficiales. Mientras han sido añadidos solo en pequeñas proporciones (*Jarabo et al., 2012*), alteraron muy poco las propiedades físicas de los materiales. Por otro lado, se ha comprobado que más allá de añadidos de tan solo 1,5% de agregados o fibras vegetales, los hormigones pierden progresivamente su resistencia mecánica (*Ramakrishna y Sundarajan. 2005*).

Las fibras orgánicas se agregaron a los aglomerantes desde la antigüedad (*Nozahic et al., 2012*), por ejemplo, con el objetivo de evitar retracciones en hormigones de arcilla (*Bachar et al., 2015; De Andrade Salgado, 2010*). Con un creciente uso de los hormigones de cemento portland, las fibras orgánicas han sido sustituidas progresivamente por fibras más inertes, de acero, poliéster, nylon y carbono. Sin embargo, recientemente se vuelve a investigar su uso en los hormigones debido a su resistencia mecánica, que puede superar aquella de los polímeros sintéticos (Tabla 1), así como su menor coste y mayor disponibilidad en países poco industrializados.



**Tabla 1.** Propiedades de fibras poliméricas naturales y sintéticas.

<i>Propiedades</i>	<i>Densidad específica (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Absorción de agua (%)</i>	<i>Resistencia a la tracción (MPa)</i>	<i>Módulo de elasticidad (GPa)</i>	<i>Referencia</i>
<i>Sisal</i>	1370	110	347-378	15,2	<i>Pachego-Torgal y Jalali, 2011</i>
<i>Coco</i>	1177	93,8	59-118	2,8	<i>Pachego-Torgal y Jalali, 2011</i>
<i>Bambú</i>	1158	145	73-505	10-40	<i>Pachego-Torgal y Jalali, 2011</i>
<i>Cáñamo</i>	1500	85-105	900	34	<i>Pachego-Torgal y Jalali, 2011</i>
<i>Aramina</i>	1409	182	300-500	10-40	<i>Pachego-Torgal y Jalali, 2011</i>
<i>Banana</i>	1031	407	384	20-51	<i>Pachego-Torgal y Jalali, 2011</i>
<i>Palmera de piasaba</i>	1054	34-108	143	5,6	<i>Pachego-Torgal y Jalali, 2011</i>
<i>Palmera de dátiles</i>	1300-1450	60-84	70-170	2,5-4	<i>Kriker et al., 2005</i>
<i>Polipropileno</i>	913	-	250	2,0	<i>Pachego-Torgal y Jalali, 2011</i>
<i>Fibra de alcohol polivinílico (PVA) F45</i>	1300	-	900	23	<i>Passuello et al., 2009</i>

Por otro lado, los investigadores obtenían resultados interesantes utilizando los materiales vegetales y sus residuos en hormigones “verdes”, reemplazando parcial- (*Bachar et al., 2015*) o totalmente (*Sáez-Pérez et al., 2020*) los áridos minerales.

El Hormigón con añadido de agregados vegetales leñosas de cáñamo ha mostrado una fuerte coherencia intergranular en estado seco (*Kinnane et al., 2016*). Por lo tanto, las partículas heterogéneas de cañamiza permiten proporciones en una matriz de hormigón equivalentes a su densidad aparente, reemplazando enteramente los áridos rocosos naturales.

Decorticados o troceados (*Kidalova et al., 2012; Nozahic et al., 2012; Magniont et al., 2016*), los agregados vegetales de cáñamo cumplen con criterios medioambientales en su procesado y un rendimiento térmico superior, comparado con agregados minerales naturales. Sin embargo, responden con rendimiento mecánico menor si se comparan con hormigones convencionales, debido fundamentalmente a su porosidad (*Nozahic et al., 2012*). Aunque la mayoría de los estudios examinan el empleo de la cañamiza comercial, la investigación de materiales del tallo completo troceado (*De Bruijn et al., 2009; Brümmer et al., 2018*), es una variable interesante, que se contempla para contrastar las propiedades

físicas de los hormigones elaborados con cañamiza y analizar alternativas de cosechado y de preservación que evitan el desfibrado (*Gusovius et al., 2019*).

A las variables del material orgánico se añaden aquellos de los aglutinantes. Aparte de los conglomerantes comerciales como la cal existen, sin embargo, muchos aglutinantes alternativos, tanto orgánicos (*Le et al., 2015; Balčiūnas et al., 2016*) como inorgánicos (*Kidalova, 2011; Mazhoud et al., 2017; Hussain et al., 2019*). Aunque estos se han explorados científicamente, la mayoría todavía no se contempla a nivel comercial o bien únicamente en la manufactura de materiales prefabricados (*Cannabric, 2020*). Estas variables se han considerado por ejemplo para adaptarse a los materiales disponibles localmente (*Brümmer et al., 2018*), como la tierra arcillosa, que indudablemente es atractiva desde el punto de vista ecológico, debido a que incorpora poca energía gris. No obstante, la tierra arcillosa es exigente en cuanto a formulaciones y manejo porque varía en mineralogía y granulometría, dando lugar a resultados más imprevisibles comparado con los conglomerantes comerciales. Los aglutinantes alternativos que se están estudiando, exploran varios nuevos potenciales en agro-hormigones con materiales vegetales de cañamo: por un lado, la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> es decir la eficacia en su producción y su ciclo de vida, por otro lado, sus características físicas, explorando los límites térmicos y de resistencia mecánica del compuesto. A esto se suma la observación de su compatibilidad con el agregado vegetal con la intención de limitar la reactividad entre el aglutinante y los polímeros estructurales que componen las partículas vegetales (*Umurigirwa Benitha et al., 2015; Balčiūnas et al., 2015*).

## ***1.2. Ámbito de usos y aplicaciones***

El hormigón de cañamo es un material polivalente que en los últimos 30 años ha mostrado una aplicabilidad en toda la envolvente de edificios de nueva construcción e incluso en sus divisiones interiores, como paredes y forjados entreplanta. Aunque existen otros materiales aplicables a toda la envolvente (tierra, hormigón armado), lo especial de este compuesto es que posee a la vez propiedades aislantes y moderadamente estructurales. Esto se debe a que el uso de agregados vegetales de cañamo conduce a una disminución leve o considerable de la densidad del hormigón resultante, ya que el material vegetal de origen biológico posee una menor densidad comparado con los áridos minerales obtenidos de rocas a los cuales sustituye. El hormigón ligero de cañamo es por ello un material de construcción

cuya densidad no siempre es constante, contrario al hormigón de cemento Portland ordinario donde, independientemente de la relación árido natural y aglomerante, la densidad permanece poco variable. La formulación del material compuesto, que consiste en un material vegetal de cáñamo y un aglomerante o conglomerante en cantidades variables, es por ello ajustable a las características físicas que pretenden cumplir con una función concreta en obra.

### ***1.3. Cultivo de cáñamo, morfología del tallo, variedades y calidad industrial***

El cáñamo es una planta dioica (tiene flores unisexuales en tallos y troncos separados) que se considera un cultivo respetuoso con el medio ambiente. Aunque el cultivo de cáñamo es exigente de agua, suelo y nutrientes es un cultivo termofílico que se puede habituar a una amplia gama de entornos y climas a nivel mundial, utilizando técnicas agrícolas sostenibles (*Jankauskienė et al., 2015*), sin necesidad de pesticidas ni herbicidas. Se le atribuyen además capacidades de regeneración de suelos, efectos anti erosivos, de drenaje y de neutralización de contaminantes. El cultivo destinado a la obtención de fibras se siembra además en hileras estrechas que favorecen la resistencia del cáñamo sobre las malas hierbas.

Estos calificativos, junto con la ausencia de nutrientes, por lo tanto, una resistencia natural ante las plagas, son muy valorados en bioconstrucción ya que superan los de muchos otros vegetales.

En cuanto a sus usos, el cáñamo es un cultivo que puede destinarse para producir una gran cantidad de productos primarios, intermedios y finales a partir de todas las fracciones de su biomasa (*Shahzad, 2012*). Aunque este trabajo se limita al uso de materiales obtenidos de su tallo, en particular agregados en hormigones para la construcción, los productos de cáñamo ya existentes en el mercado mundial alcanzan unos 25.000 (*Crini et al., 2020*). Los campos agroindustriales más explorados son los de textil, papel, bio-compuestos, automotriz, construcción, biocombustibles, ganadería, cultivo, alimentos, cosméticos, higiene y farmacéutica, con un creciente número de novedades (*Salentijn et al., 2015*).

#### ***1.3.1. Morfología del tallo de cáñamo***

Morfológicamente hablando, un tallo de cáñamo maduro se puede considerar como un cuerpo hueco con un perfil ligeramente ahusado desde la base hasta el ápice del tallo

(Bouloc, 2006), con una longitud y un diámetro variables según la variedad y las condiciones de cultivo (Bourmaud et al., 2016).

Los tallos de cáñamo industrial pueden alcanzar alturas de aproximadamente 1 a 5 metros (Small, 2015) y diámetros comprendidos entre 10 y 30 milímetros. La sección transversal del tallo consiste, de su centro a su periferia, de médula, xilema, cambium vascular, floema, fibras, intersticio cortical y epidermis (Figura 1). Desde el punto de vista mecánico, las partes más importantes son las zonas de fibras (epidermis) y el núcleo leñoso (xilema) (Figuras 1 y 2).

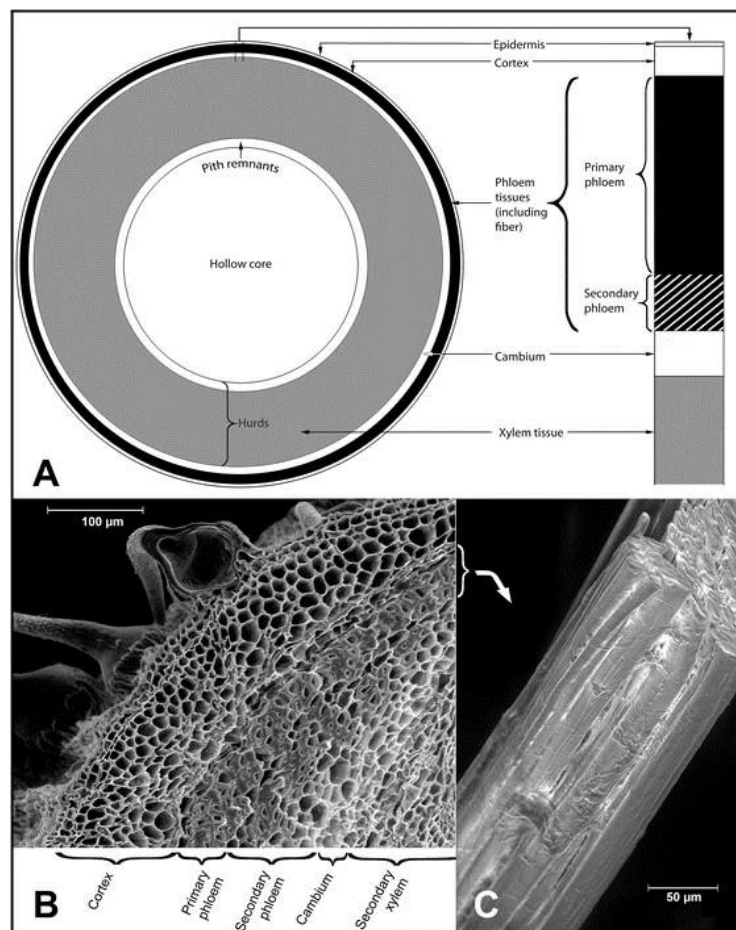


Figura 1. (A) Sección transversal esquemática de un tallo de cáñamo maduro. (B) Micrografía electrónica de barrido de una parte de la sección transversal de un tallo de cáñamo. (C) Micrografía electrónica de barrido de un haz de fibras primarias. Extraído de (Small, 2015).



Figura 2. Tallos de cáñamo maduros.

Aunque las fibras primarias perimetrales a lo largo del vástago (de 20-30 mm de largos en promedio) desempeñan un papel muy importante en la rigidez a la flexión de la planta, también se ha demostrado que el núcleo leñoso del tallo realiza una contribución mecánica significativa (Deger *et al.*, 2010). Este último está constituido por tejidos conductores, formados por paredes rígidas que constituyen una multitud de celdas (Day *et al.*, 2005). El hueco central del tallo completa una estructura rígida tubular, ligera y esbelta.

Las fibras primarias del líber (fibra de tejido vegetal que se encuentra en la corteza del tallo de cáñamo) son el producto más valioso de los tallos. Aparecen en haces de fibras

que pueden medir entre 1 y 5 metros de largos, que se unen mediante una mezcla de pectina, hemicelulosa y lignina. A medida que el tallo madura, el cambium produce fibras de líber secundarias, que son cortas (de unos 2 mm) y más lignificadas. Las fibras del núcleo leñoso (cañamiza) son aún más cortas (de unos 0,5 a 0,6 mm) y aglutinadas con una cantidad considerable de lignina (*Van der Werf, 1994*).

### **1.3.2. Variedades de cáñamo**

El nombre botánico del cáñamo, *Cannabis sativa L.*, comprende tres subespecies. *Cannabis sativa L.*-Sativa se cultiva actualmente como cáñamo industrial y es fuente de miles de productos (*Crini et al., 2020*) derivados de sus raíces, tallos, hojas, semillas e inflorescencias. A diferencia de *Cannabis sativa L.* -Sativa, *Cannabis sativa L.* -Índica incluye variedades con tasas mayores de tetrahidrocannabinol (THC) en el tercio superior de las plantas femeninas, el cannabinoide principal que induce efectos psicotrópicos (*Clarke y Merlin, 2013*). En la segunda mitad del siglo XX, la selección del cáñamo industrial permitió desarrollar variedades no psicotrópicas de *Cannabis sativa L.* -Sativa, con un nivel de THC muy bajo, para cumplir con nuevas normativas y regulaciones. La normativa actual limita el cultivo en Europa a variedades con niveles de THC inferiores al 0,3% en el tercio superior de la planta (en países singulares se permiten tasas de hasta 1%). Sin embargo, los tallos son generalmente libres de THC y la morfología de ambos genotipos es similar (*Amaducci et al., 2015*). En la tercera subespecie, llamada *Cannabis sativa L.* -Ruderalis, se trata de un cáñamo silvestre de baja estatura, no explorado industrialmente (*Sáez-Pérez et al., 2020*).

Los esfuerzos de selección del cáñamo industrial, que actualmente se practican, se centran en el desarrollo de formas monoicas (*Amaducci et al., 2015*), presentes naturalmente en poblaciones dioicas, con alta expresión vegetal femenina y menor presencia de plantas masculinas, que tienen una vida útil más corta debido a su mayor sensibilidad a los parásitos. Esto permite obtener mejores rendimientos de biomasa y también reduce la heterogeneidad de los productos recolectados.

### **1.3.3. Calidad de cáñamo industrial**

Indudablemente, el cáñamo es un cultivo con salidas industriales polivalentes, también explorado por sus semillas de alto valor nutritivo y sus inflorescencias, ricos en

cannabinoides medicinales. La posibilidad de cultivar cáñamo como plantación multipropósito es actualmente muy relevante desde una perspectiva económica, dado que los ingresos derivados de las semillas y las inflorescencias son fundamentales para su rendimiento. Combinar la producción de fibras con la de la inflorescencia aparenta una solución óptima, sabiendo que el tiempo de recolección de la fibra y de la inflorescencia son sincrónicas. Por otro lado, retrasar la recolección hasta la madurez de la semilla reduce la calidad de la fibra debido a un aumento de lignificación y acumulación de fibra secundaria. La elección de la variedad adecuada es de suma importancia para asegurar una cosecha con un alto rendimiento de fibra de calidad para bio composites (*Tang et al., 2016*). Se obtiene una mayor producción de fibra y una menor finura eligiendo una variedad tardía, que maximiza el desarrollo de los tallos (*Amaducci et al., 2015*) aunque cabe señalar que la cosecha de estas variedades puede caer en condiciones climáticas desfavorables para el secado posterior a la cosecha que a su vez influye en la calidad de ambos, fibras de líber y fragmentos leñosos (cañamiza).

En el pasado, la fibra de alta calidad se obtenía principalmente mediante enjuague de los tallos de cáñamo, aunque hoy en día esta práctica es limitada debido a problemas ambientales y a los altos costos laborales. La producción de fibra de alta calidad depende, por lo tanto, de las condiciones climáticas adecuadas durante la fase de secado en el campo, salvo si se exploran métodos alternativos de retiro (*Gusovius et al., 2019*). Mientras la separación de fibras de líber y la cañamiza en estado verde ha mostrado un efecto muy dañino a las fibras, se están explorando técnicas novedosas de separación de las fibras “fuera del campo” mediante biotecnologías apropiadas.

#### ***1.4. Propiedades de agro-agregados de cáñamo***

Debido a la estructura propia del tallo de la planta, los agregados de cáñamo son generalmente alargados, muy porosos y con ello deformables. Al tener una porosidad entorno al 60%, formada por tubos paralelos de más o menos 0,08 mm de diámetro (*Arnaud y Boyeux, 2011*), el peso específico de las partículas leñosas de cáñamo es de tan sólo 320 kg/m<sup>3</sup> (*Cerezo, 2005*), es decir inferior a especies ligeras de maderas blandas. A diferencia de agregados minerales, que se utilizan habitualmente en los hormigones, no existen técnicas estandarizadas para su caracterización. Entre otros agregados comparables, procedentes por ejemplo del kenaf, lino o girasol, la cañamiza (el núcleo leñoso del tallo de la planta de

cañamo) es probablemente el material más utilizado en hormigones alternativos o ecológicos de bioconstrucción contemporánea en Europa. La cañamiza también es representativa de la mayor parte del material lignocelulósico (*Carus y Sarmiento, 2013*) que proviene de la biomasa de la planta anual de cañamo. Este tipo de agregado es en realidad un coproducto residual de la industria del desfibrado de cañamo cuyo uso no se ha contemplado históricamente (*Hung Mo et al. 2016*). Notablemente, se demostró que las fibras de la parte inferior de un tallo exhiben propiedades mecánicas más bajas en comparación con las fibras de su parte media superior, un hecho que se atribuye a un menor relleno de celulosa debido a la síntesis más temprana de las paredes celulares secundarias en la base del tallo (*Bourmaud et al., 2017*).

La baja densidad aparente de la cañamiza es relacionada con la porosidad propia de las partículas y aquella entre las mismas, en su orientación espacial a granel. En función del tamaño de las partículas, la cañamiza suelta, una vez en equilibrio con las condiciones atmosféricas, tiene una densidad aparente de 110 kg-130 kg/m<sup>3</sup> (*Cerezo, 2005; Arnaud y Boyeux, 2011*). Su comportamiento higroscópico se debe en gran parte a su hidrofobicidad. La compleja arquitectura de las partículas (Figura 3) está marcada por una porosidad para conducir los fluidos necesarios para su ciclo vegetativo. Incluso después del corte, secado y procesamiento, esta porosidad continúa desempeñando un papel importante, de manera que es la principal vía de absorción de agua. Esta absorción se produce principalmente por vasos conductores, antes de que el agua se extienda al resto de las células por difusión a través de las paredes celulares. El potencial de absorción de las partículas de cañamiza es de aproximadamente 350% (*Picandet, 2013*). La capacidad de absorción es generalmente más importante en materiales del núcleo que de la corteza del tallo (*Anderson, 1974*). Los primeros se identifican por células hidrófobas en el xilema y células hidrófilas en su médula. Estas últimas son responsables de una rápida ingesta inicial de agua, que ocurre en los primeros 2 minutos de inmersión; a consecuencia, durante el amasado del hormigón, las partículas pueden absorber 3 veces su propio peso en agua. Las células de la parte de xilema prolongan la ingesta de agua por días o semanas (*Fourmentin et al., 2016; Brümmer et al., 2018*). Este comportamiento facilita la liberación de componentes solubles en agua, que son más abundantes conforme avance la maduración de la planta (*Crônier et al., 2005*). Los componentes más importantes de las paredes lingocelulares de los agregados vegetales utilizados en un hormigón de cañamo son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina (Tabla 2),



cuyas proporciones dependen de cada especie, así como de la posición de las células. El empleo de agregados del tallo completo, que contienen materiales de epidermis y de xilema en su proporción natural, tiene por ello condiciones de partida que varían de la cañamiza.

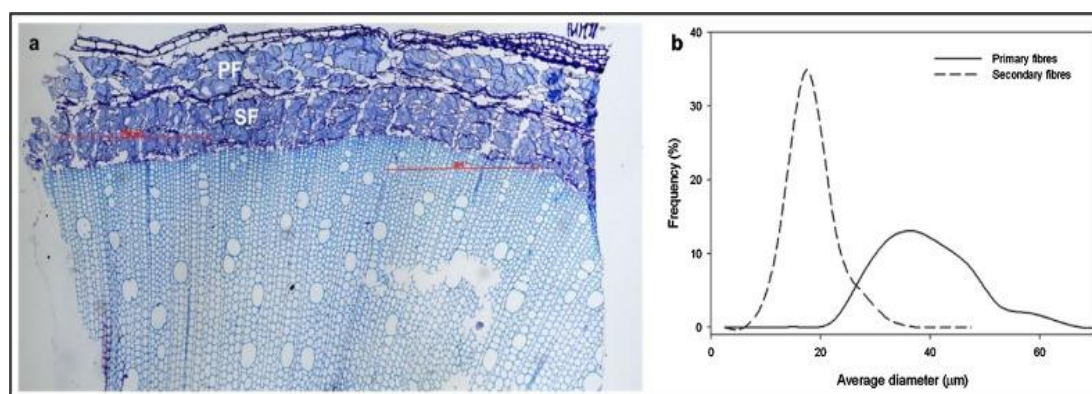


Figura 3. Arquitectura del vástago de cañamo (a) y distribución de los diámetros de las fibras primarias y secundarias respectivamente (b). Extraído de (Bourmand et al. 2017).

**Tabla 2.** Composición de fibras naturales.

componentes	lignina (%)	celulosa (%)	hemicelulosa (%)	cenizas (%)	referencia
fibra de líber de sisal	11,00	73,11	13,33	0,33	Pachego-Torgal y Jalali, 2011
fibra de líber de coco	46,48	21,46	12,36	1,05	Pachego-Torgal y Jalali, 2011
cañamo (cañamiza)	21-24	40-48	18-24	2*	Stevulova et al., 2014; *García-Jaldón et al., 1998
cañamo (fibra de líber)	5-9	57-77	9-14	4*	Stevulova et al., 2014; *García-Jaldón et al., 1998
banana (hoja)	24,84	25,65	17,04	7,02	Pachego-Torgal y Jalali, 2011
banana (tronco)	15,07	31,48	14,98	20-51	Pachego-Torgal y Jalali, 2011
eucalipto	25,4	41,57	32,56	0,22	Pachego-Torgal y Jalali, 2011
bagaso	21,8	41,7	28	3,5	Pachego-Torgal y Jalali, 2011

### 1.5. Estado del Arte de hormigones de cañamo

Los recursos renovables de fibra se están explorando y utilizando cada vez más en polímeros y compuestos de ingeniería debido a su combinación de desempeño ambiental y técnico. El desarrollo de publicaciones y el aumento de conferencias internacionales sobre el tema de los composites reforzados con fibras naturales muestra la actualidad del tema

(ICNF, 2021). El especial interés científico que han ganado hormigones con agregados derivados del tallo de cáñamo, comparado con otros vegetales, se entiende por varias razones. Por un lado, la planta posee ambos componentes, tal fibra como abundante núcleo leñoso. Por otro lado, es cultivable en un alta extensión geográfica y muy resistente a plagas agrícolas, parásitos y degradación biológica. Además, ha mostrado buenas propiedades de aislamiento térmico combinada con una cierta inercia térmica, una gran permeabilidad al vapor y una buena estanqueidad al aire. Siendo un material de baja o moderada densidad puede reducir las cargas sobre los cimientos y simplificar los procesos de construcción. Es un material de fuentes renovables con capacidad de retener CO<sub>2</sub> absorbido en su crecimiento durante la vida útil del edificio. Por último, la investigación de materiales y productos compuestos, hechos de fibras naturales también es compatible con la creciente preocupación por del desarrollo sostenible en el ámbito social, ecológico y económico.

#### ***1.5.1. Propiedades físicas y de confort***

Al ser un material compuesto, el hormigón de cáñamo se define por características físicas múltiples que son bastante inusuales de encontrar en el mercado de materiales de construcción, donde se suele trabajar con envolventes multicapa que cumplen con diferentes objetivos en el proyecto. De hecho, las partículas leñosas de cáñamo se caracterizan por un alto grado de porosidad que resulta en una alta capacidad para deformarse, absorber sonidos y tener capacidades higrotérmicas. En este ámbito el nuevo material se distingue de los hormigones tradicionales en base de áridos de machaqueo, cuyos granulados son indeformables. Estas diferencias tienen efectos sobre el comportamiento de del hormigón ligero en las áreas térmicas y acústicas y particularmente sobre sus propiedades mecánicas. La capacidad de deformación permite en gran medida una compresión diferencial, contracción o dilatación sin fisuras aparentes (*De Bruijn et al, 2009*). En realidad, el material tiene un comportamiento elastoplástico (*Cerezo, 2005*) condicionado por la flexibilidad de los agregados porosos mientras la rigidez es condicionada por las características y la dosis del aglutinante. La variabilidad del comportamiento en función de la formulación permite ajustar el rendimiento a aplicaciones portantes, autoportantes o de relleno. Estas variables alcanzan resistencias mecánicas a la compresión que oscilan entre 0,18 MPa, trabajando con cal (*Elfordy et al., 2008*) y 5,20 MPa, trabajando con cemento de óxido de magnesio (*Stevulova et al., 2012*). Para pequeñas dosis de aglutinante las partículas de cáñamo están solo unidas con puentes que las conectan, mientras se obtiene un material con niveles

importantes de deformación. Esta variante es predestinada para aplicaciones en las cuales el rendimiento térmico-acústico es más importante que el mecánico. Para dosis intermedias, el nivel de rendimiento mecánico aumenta con la cantidad de aglutinante. Para dosis altas, el material es conectado por el aglutinante que rellena por completo los espacios entre partículas o bien las envuelve. La porosidad, que condiciona la resistencia mecánica, puede alcanzar niveles superiores al 70% y comprende mesoporos (0,1-1 mm) comprendidos dentro de las partículas y en su área de contacto con el ligante, microporos entre los hidratos de la matriz del ligante y poros de tamaño macro (alrededor de 1 cm) en la disposición de las partículas (Arnaud y Gourlay, 2012). A estas variables hay que añadir una gran variedad de aglutinantes de origen mineral u orgánico que a su vez tienen propiedades distintas que se pueden elegir en función de la finalidad del hormigón ligero. Otros métodos para optimizar la resistencia a la compresión son un mayor compactado mecánico (Nozahic et al., 2012; Stevulova et al., 2012) o una reducción del tamaño de partículas (Le et al., 2015), ambos con el objetivo de reducir el volumen de vacíos o una controlada orientación de partículas (Williams et al., 2016) para sacar partido de las propiedades anisotrópicas de las partículas vegetales. En este contexto se han detectado mejores resultados aplicando tensión en la dirección perpendicular a la compactación, la dirección en la que la rigidez de partículas es mayor. Sin embargo, esto implica aumentar el cortante de tensión en la interfaz de partículas y matriz del aglutinante, que es el punto débil en formulaciones de baja o moderada densidad. Enfoques adicionales se centran en solucionar eventuales retrasos en el fraguado o la carbonatación de conglomerantes, para optimizar su rendimiento. La primera vía examina la limitación de lixiviación de polisacáridos mediante lavado o pretratamiento químico de los agregados vegetales. Los polisacáridos constituyen la hemicelulosa, que es más abundante en el núcleo de leñoso de cáñamo (31%) que en la corteza (13%) (Van der Werf, 1994). La segunda vía pretende reducir el agua mediante la aplicación por proyectado, evitando un mezclado prolongado que facilita el transporte de compuestos orgánicos. La tercera vía explora una mejora de las condiciones de curado (Benfratello et al., 2013) para optimizar la hidratación del conglomerante. Por último, se han obtenido resultados prometedores con la adición de fibras, es decir con formulaciones que contienen materiales del tallo completo (Brümmer et al., 2018). Otra investigación ha señalado que el añadido de fibras también mejora los resultados térmico-acústicos (Fernea et al., 2019). Sin embargo, tanto los resultados mecánicos como los térmico-higrotérmicos están condicionados por la

porosidad de los agregados orgánicos. La porosidad favorece sobre todo los últimos. Tal y como se ha discutido entorno de las características mecánicas en el hormigón de cáñamo, a medida que cambia la composición del material y el proceso de fabricación, también cambia su densidad. Las variaciones en la densidad pueden afectar en gran medida al rendimiento térmico y, por lo tanto, constituyen una variable importante. Esta postulación puede ser confirmada por un estudio que encontró que la conductividad térmica aumenta en 0.005 W/mK por cada 50 kg/m<sup>3</sup> ganados (*Sinka et al., 2015*). Aunque las conductividades térmicas de los hormigones de cáñamo no alcanzan las de los materiales aislantes tradicionales (algunos poliestirenos expandidos y lanas minerales alcanzan conductividades térmicas de 0,031-0,032 W/mK) (*CTE Web, 2021*), su comportamiento higroscópico y su inercia térmica contribuyen a un rendimiento térmico superior de tal forma que no comprometen las tendencias contemporáneas de comodidad (*Senga Kiessé et al., 2016*). Actualmente, espumas poliméricas alcanzan difusividades térmicas y una permeabilidad al aire tan bajas, que son difíciles de mejorar. Sin embargo, carecen de algunas cualidades que poseen los aislantes naturales, relacionadas con la capacidad de absorción, transferencia y cambio de fase del agua en forma de vapor y líquido, propiedades asociadas a las características del espacio poroso del material vegetal y el acoplamiento hídrico que ocurre en este mismo. Estas cualidades se aprecian a la hora de aislar paredes existentes desde el interior, incluso si la conductividad térmica del hormigón de cáñamo no es tan baja. Esta se mueve entre 0,052 W/mK para hormigones de relleno muy ligeros (*Hussain et al., 2019*) y 0,185 W/mK para materiales con moderadas funciones estructurales (*Cannabric, 2020*). El material tiene una alta permeabilidad al vapor, un alto coeficiente de transferencia de agua líquida y una alta capacidad de almacenamiento de humedad. De esta manera, los hormigones ligeros se pueden utilizar como un medio pasivo para establecer condiciones climáticas interiores (*Rode, 2005*), que sean cómodas para la ocupación humana y seguras para el almacenamiento de objetos, sensibles a las variaciones de humedad. En paralelo se consigue disminuir la demanda de energía del edificio (*Gourlay, 2014*).

### **1.5.2. Características medioambientales**

El secuestro de CO<sub>2</sub> es uno de los temas de investigación de tendencia, conmovido por serias preocupaciones sobre las crecientes emisiones globales, que se relacionan en gran medida con procesos de fabricación y reciclaje de materiales de construcción. Una de las formas innovadoras de capturar CO<sub>2</sub> en un volumen importante es la de incorporar agregados

vegetales en los materiales que constituyen la envolvente de los edificios, reemplazando los áridos rocosos naturales que normalmente contribuyen con un 13-20% en las emisiones totales de un hormigón de cemento Portland (*Flower y Sanjayan, 2007*). Otro motivo para la sustitución de recursos minerales rocosos en algunos materiales es que su extracción es una de las actividades más desastrosas de ríos y entornos naturales (*Padmalal y Maya, 2014*) y contaminantes del aire (*Blankendaal et al., 2014*). En el reemplazo de estos recursos no renovables por materiales de cáñamo, se pueden emplear aproximadamente 100 kg de cañamiza en un metro cúbico de hormigón de cáñamo que equivale a un secuestro de 180 kg de CO<sub>2</sub> (*Pervaiiz, 2003*). Aunque este dato es interesante, el resultado final está condicionado por el grado de la recuperación del CO<sub>2</sub> en el proceso de endurecimiento por carbonatación, que previamente ha sido descarbonatado en la calcinación de la cal (conglomerante industrial principal, utilizado en hormigones de cáñamo). En resumen, se secuestran entre 18 y 117 kg de CO<sub>2</sub> en un metro cúbico de hormigón de cáñamo (*Rhydwen, 2006*). La pared de hormigón de cáñamo clásica (hormigón compactado de cáñamo-cal con estructura portante de madera), constituye por un lado un interesante absorbente de carbono con un impacto favorable sobre el efecto invernadero, con un saldo neto de 35 kg CO<sub>2</sub> equivalente, por una duración de ciclo de vida de mínimo de 100 años. El gas invernadero así retenido se devolverá a la atmósfera con un retraso de tiempo (*Boutin et al., 2006*). Por otro lado, tanto este escenario como aquellos de otros estudios, indican que los impactos medioambientales de hormigones de cáñamo dependen en gran medida del aglutinante (*Ingrao et al., 2015*). Como consecuencia de esto hay motivo para explotar el potencial de formulaciones, elaboradas con materiales locales como la arcilla cruda, que ofrece una mayor reducción del impacto ambiental y facilita el paso hacia viviendas neutras en su huella de carbono (*Busbridge, 2009*).

Una ventaja de los procesos del cultivo, del procesado y del transporte de materiales vegetales es, que comparado con aquellos de áridos rocosos, son económicos en energía (*Biagotti et al., 2004*) y resultan en gran medida sin emisiones de CO<sub>2</sub> porque la retención en el propio material vegetal es mucho mayor. Asimismo, el cultivo de cáñamo implica solo 11.400 MJ de energía por hectárea, dos veces menos que la necesaria en otros cultivos con rendimientos similares (*Kenneth y Miller, 2012*).

Por último, la alta porosidad del hormigón vegetal de cáñamo contribuye a la reducción de emisiones, relacionadas con el consumo eléctrico en la climatización de los edificios, lo que presta atención a la eficiencia energética (*Maalouf et al., 2018*).

### **1.5.3. Contraindicaciones**

Indudablemente, hay desafíos significativos que deben de estudiarse o superarse antes de que las fibras naturales puedan incorporarse a los hormigones, sean aglutinados con materiales industriales, locales u orgánicos. Una de las desventajas del uso de agregados vegetales es su alteración natural en propiedades físicas, la que podría llevar a propiedades impredecibles. En adición, los materiales orgánicos son absorbentes y no son inertes lo que puede conllevar retrasos en la hidratación de los conglomerantes por causa de lixiviación de polisacáridos (*Li et al., 2006*). Independiente de los aglutinantes utilizados, varios investigadores observaron retrasos en el secado y fraguado de los hormigones o una inhibición del proceso de endurecimiento en el área de transición interfacial entre las partículas vegetales y el aglutinante, sea con aglutinantes orgánicos (*Umurigirwa Benitha et al., 2015*) o inorgánicos como la cal (*Arizzi et al., 2014*), el cemento Portland (*Balčiūnas et al., 2015*), el yeso (*De Bruijn, 2009*) y la arcilla (*Brümmer et al., 2018*). Se ha observado además que el ambiente alcalino de algunos conglomerantes puede conducir a modificaciones fisicoquímicas y microestructurales de las partículas vegetales y, por lo tanto, afectar el rendimiento de los hormigones (*Diquélou et al., 2015*). Esta degradación se relaciona con la cristalización de la cal en la estructura porosa superficial del agregado o bien una disolución parcial o total de la celulosa, hemicelulosa o lignina, que conduce a la fragilización de los hormigones (*Toledo Filho et al., 2009*).

La zona de transición puede verse afectada además por cambios dimensionales del material vegetal en función de su contenido de humedad, que pueden ser irreversibles (*Arizzi et al., 2015*). Los ciclos que simulaban variaciones naturales de absorción y secado influyeron tanto en las propiedades mecánicas como en las características térmicas de los materiales estudiados (*Castel et al., 2016*).

Finalmente, algunos estudios detectaron la aparición de hongos y microorganismos en la superficie de los materiales. Este desarrollo es posible en condiciones húmedas, por ejemplo, durante la absorción por capilaridad o el secado de los hormigones en condiciones

ambientales desfavorables. Los grados de colonización y alteración dependen de varios factores relacionados con la naturaleza el soporte, sus propiedades fisicoquímicas, el contenido de agua, la temperatura del ambiente, el tipo y el pH del aglutinante (*Viitanen et al., 2010*). El añadido de un material alcalino como la cal, el conglomerante más utilizado en hormigones de cáñamo, impide el crecimiento de algunos microorganismos, presentes naturalmente en el agregado vegetal, pero no garantiza una protección suficiente contra la biodegradación por parte de bacilos grampositivos, que han sido identificados como alcalófilos, y el crecimiento de hongos presentes en el aire (*Arizzi et al., 2015*). Se ha demostrado además que el tipo conglomerante controla la tasa de absorción y desorción de agua lo que indica que la colonización no depende tan solo de la gran capacidad de absorción y retención de agua en las partículas vegetales de cáñamo. La correcta elección del conglomerante, en función de las condiciones ambientales o climáticas reduce por ello la probabilidad de colonización. Aunque los microorganismos encontrados sobre la cañamiza no han sido identificados peligrosos para la salud, pueden deteriorar la calidad de aire y desarrollar un ambiente menos saludable en el interior del edificio, contrario a lo que se espera de un material con buenas prestaciones higiénicas a través de su comportamiento hidro-regulador.

### ***1.6. Barreras en la difusión de la tecnología de hormigón de cáñamo***

El mercado de la bioconstrucción todavía está poco desarrollado, con una cantidad mucho menor de actores profesionales (arquitectos, constructores) y clientes, comparado con la construcción actual, que emplea materiales industriales contemporáneos. La sociedad necesita comprender los escenarios de conflicto (límites ecológicos, cambio climático, contaminación, generación de desechos, pérdida de biodiversidad, etc.) así como los problemas normativos para estimular un cambio de comportamiento. A esto se añade que en el mercado moderno de la construcción todavía es inusual vincular la agricultura y la industria para la producción de materiales de construcción. El hormigón de cáñamo es por lo tanto una excepción, un material que consiste en una mezcla entre un producto agrícola (cañamiza) y un material industrial normalizado (en la mayoría cal). A consecuencia, hay una necesidad de investigación científica, de integración de nuevos sistemas en los estándares oficiales y de formación de aprendices, estudiantes y profesionales del sector de la construcción. En lo que son materiales basados en la planta de cáñamo, se añaden infamias, causadas por incidentes históricos que produjeron contratiempos legales.

### ***1.6.1. Barreras regulatorias***

El uso de la planta de cáñamo como recurso natural multicomponente, originaria de Asia Central, ha cubierto durante milenios necesidades esenciales como ropa, alforjas, redes, velas, textiles pesados y pulpa de papel, así como medicamentos y remedios moderadamente psicotrópicos en una amplia área geográfica (*Small, 2015*). Hoy en día, las tradiciones artesanales y de culto solo existen en un contexto cultural limitado (*Clarke y Merlin, 2013*), mientras que el cáñamo se cultiva de forma limitada para mercados específicos. En algunas explotaciones, la planta se utiliza para un solo propósito ya sea para la extracción de cannabinoides psicotrópicos o terapéuticos o la extracción de fibras. En otras, se utiliza con un motivo polivalente, como recurso industrial y nutracéutico completo.

Los productos elaborados a partir del cáñamo tuvieron consecuencias históricas impactantes a nivel cultural. Un ejemplo interesante es la introducción de la fabricación de papel en Europa, una tecnología instalada por los almorávides en Xátiva, España, en 1059 (*Clarke y Merlin, 2013*). Durante este período, los ingenieros del mundo islámico contribuyeron a la integración y difusión de la ciencia y la tecnología, en particular la navegación y la agricultura. En aquel entonces el papel de cáñamo contribuyó a la difusión de importantes conocimientos. La tecnología de su fabricación entró en Europa a través de la Ruta de la Seda desde Asia Central, donde el desarrollo tecnológico del cáñamo (textil, de papel y medicinal) estaba muy avanzado en ese momento (*Clarke y Merlin, 2013*).

Otro momento culminante fue la época de colonización. A finales de la Edad Media, los europeos cruzaron los océanos en busca de riqueza y nuevos conocimientos. Siglos antes de que fuera inventado la navegación de vapor, las fuertes velas, que impulsaron esta economía de exploración, tomaron su nombre de la planta de la que fueron hechas: *Canvas*. Con cáñamo, se podrían construir velas suficientemente resistentes para los viajes más largos del siglo XVI al siglo XIX, y manufacturar otros accesorios tales como cabos de anclaje, redes de carga, redes de pesca, banderas, material de sellado, ropa náutica e incluso cartas y cuadernos de navegación (*Herer y Bröckers, 1993*).

Sin embargo, no fue hasta los años 20 del siglo pasado que la producción de cáñamo, que había sido importante hasta entonces, declinó considerablemente. Por un lado, el cáñamo se había ido abandonando gradualmente en favor de otras prioridades agrícolas, por otro



lado, ha sido reemplazado en el curso de una creciente industria de fibras petroquímicas. Aunque todavía se estaban logrando importantes avances industriales de cáñamo en Estados Unidos en la década de 1930 (*Sáez-Pérez et al., 2020*), por primera vez en la historia el Cannabis se asoció con una droga, con su consecuente prohibición en 1937, comenzando por Estados Unidos, seguido de Canadá, Inglaterra y Alemania. Esta barrera se ha reforzado y extendido desde 1961 con la inclusión del Cannabis en la lista de estupefacientes de la ONU. Como resultado, el cultivo de cáñamo solo se reanimó para satisfacer las necesidades textiles de la Segunda Guerra Mundial. En el período de 1950 a 1980, la extensión de cultivo se redujo prácticamente a Rusia, Asia, Chile y Europa del Este. En aquel momento Francia y España concentraron su cultivo en la producción de celulosa para la fabricación de papel de moneda.

El auge más reciente del cáñamo industrial se remonta a finales de la década de 1980 cuando Europa comenzó a redescubrir la versatilidad y utilidad de la planta de cáñamo, respaldada por publicaciones deslumbrantes (*Herer y Bröcker, 1993*) que abrieron discusiones sobre la creación de bioeconomías en Alemania, donde las primeras medidas de despenalización se iniciaron a mediados de la década de 1990, lo que nuevamente hizo posible la explotación agroindustrial de variedades seleccionadas. La Asociación Europea de Cáñamo Industrial (*EIHA, 2020*), con sede en Alemania, alberga desde entonces las conferencias internacionales más concurridas de la industria de Cannabis y ha establecido recientemente una segunda sede en Bruselas, la capital de la toma de decisiones en Europa. Dado que el cáñamo es una de las plantas más versátiles y tiene una de las fibras poliméricas más resistentes y duraderas para una amplia variedad de aplicaciones industriales, se ha desarrollado un entorno normativo avanzado a nivel europeo e internacional durante las últimas décadas que ha eliminado progresivamente los obstáculos históricos que frenaron su desarrollo agroindustrial durante las épocas post industriales. Con la reciente retirada del Cannabis del Apéndice IV de la Convención Única sobre Estupefacientes de 1961 por parte de la Comisión de Estupefacientes de la ONU a principios de diciembre de 2020 (*Noticias ONU, 2020*), se inició un hito histórico menos restrictivo que ya tiene un impacto en el desarrollo de nuevas leyes a nivel internacional, lo que puede marcar el comienzo de una era muy favorable para inversores e investigadores en la creación de aplicaciones innovadoras de la planta, entorno a tendencias de desarrollo sostenible. Durante los últimos 30 años, el cáñamo ha sido probablemente la planta más investigada científicamente en la industria, la

alimentación y la medicina, incluyendo una amplia variedad de materiales y aplicaciones de construcción (Sáez-Pérez *et al.*, 2020) que en otras épocas no se consideraron. En efecto, muchas investigaciones se retrasaron hasta una fecha tan tardía debido a barreras regulatorias.

### ***1.6.2. Barreras comerciales y estrategias de mayor alcance***

Con la excepción de un nicho pequeño de bio-construcción, la actividad actual general de la construcción todavía no practica importantes principios de sostenibilidad. El modelo de bio-construcción complementa diseños inteligentes, que tienen en cuenta condiciones topográficas y climáticas de un lugar. Asimismo, trabaja fundamentalmente con materiales y métodos de construcción alternativos que minimizan el agotamiento de recursos fósiles y minerales y evitan la implicación de materiales dañinos para la salud y los ecosistemas.

En este contexto, cabe destacar que el enfoque de hormigón de cáñamo tiene como objetivo desarrollar métodos de construcción que representen un avance en comparación con las técnicas convencionales. Es verdad, que se recuperan conocimientos ancestros, pero se completan con nuevas formulaciones, habilidades, y tecnologías, que pretenden alcanzar las exigencias de estándares actuales. No obstante, muchos posibles consumidores todavía no ven una mejora en la implicación de materiales naturales, si no un retroceso, inspirado en la arquitectura vernácula, siendo esto otra barrera importante en la introducción de materiales naturales de nueva creación. A esto hay que añadir que la construcción natural todavía está en una etapa pionera y que la menor visibilidad de los materiales y sistemas asociados, retrasan el mecanismo didáctico que pudiera impulsar el contacto con los mismos.

Un aspecto preocupante del enfoque comercial de la industria relativos a tendencias de construcción sostenible, que surgían entorno a los debates de las últimas décadas sobre el cambio climático, la eficiencia energética y las emisiones tóxicas de algunos materiales, radicaba en su actitud de eco-blanqueamiento que trataba de justificar la continuación de los métodos de construcción convencionales (Woolley, 2004). Este enfoque sugiere tan solo cambios superficiales a través de una mejor eficiencia energética de la envolvente, la gestión de residuos o la inclusión de nuevas tecnologías, respaldados por una serie de herramientas

de evaluación ambiental y estándares que están diseñados para mejorar la imagen de la industria de construcción.

De hecho, la industria solo está dispuesta a hacer lentas adaptaciones ya que una renovación completa conlleva un esfuerzo grande y costoso. Por lo tanto, el debate en los países norte europeos, con mayores exigencias de eficiencia energética respecto a otras regiones, a menudo no tiene en cuenta el agotamiento de recursos no renovables. Las subvenciones que sostienen reformas, relacionadas con mejoras de eficacia energética como el programa KfW en Alemania (*KfW, 2020*), se limitan básicamente a exigencias de transmitancia térmica sin promover el uso de materiales aislantes naturales de fuentes renovables. Sería el papel de los gobiernos agilizar una mayor implicación de aislantes naturales y fomentar el incremento de creación de bio-economías con bajas emisiones de carbono.

Si se apoyará con criterio, por ejemplo, a través de políticas más estrictas de contratación pública (*European Green Deal 2019-2024, 2020*) se podrá conseguir ampliar el alcance de diseño ecológico. Para impulsar un cambio positivo, la UE podrá ayudar a orientar a los consumidores hacia productos más sostenibles, aunque es necesario un enfoque normativo para impulsar el cambio entre los operadores empresariales.

Algunos materiales de cáñamo ya se distinguen con eco-sellos como IBR, Nature Plus, Etiqueta Ecológica Europea o de construcción como Breeam, Minergy Eco, DGNB o Cradle to Cradle (*Ecohabitar, 2020*). Estas herramientas estructuran el mercado con una marca de calidad además de dar visibilidad y transparencia para garantizar una sostenibilidad más real al consumidor, que aparte del ahorro energético, impulsado por Passivhaus o Leed, contempla ganancias en la fabricación de los materiales o del ciclo de vida completo del edificio.

Los materiales de construcción de cáñamo tienen el potencial de contribuir significativamente al logro de los objetivos establecidos en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC 2021-2030, 2021), de apoyar objetivos ambiciosos en términos de eficiencia energética y sostenibilidad. Son compatibles con iniciativas de la Comisión Europea como Renovation Wave (*Renovation Wave, 2020*), donde el material de base biológica recibirá una consideración especial, no solo por su impacto positivo en la

reducción de carbono, la salud y el bienestar, sino también por los beneficios sociales, ambientales y económicos que puede aportar a las zonas rurales. Compaginan además en las estrategias visionarios para 2030-2050 (*Thelen et al., 2019*) donde la circularidad es integrada en los edificios, desde el diseño hasta la fase de deconstrucción.

### ***1.6.3. Barreras técnicas, formativas y reguladoras***

Después de 3 décadas de construcción con hormigón de cáñamo en Europa, que lidera el resto del mundo en este método de construcción innovador, existen miles de casas de nueva construcción y cientos de edificios comerciales realizados con este material. Sin embargo, todavía hay mucha labor por hacer para optimizar las tecnologías relacionadas e incorporar este material de construcción novedoso que aún no es usual para gran parte de la industria de la construcción. Como en toda innovación, existe un conjunto de barreras de conocimiento y formación técnica para asumir lo nuevo. A los arquitectos les requiere mucho más esfuerzo demostrar a un cliente que los nuevos materiales y métodos son libres de riesgos de fracaso, duraderos y viables. Si la iniciativa viene del cliente puede sufrir rechazos, relacionados con barreras reguladoras o de conocimiento, tanto por arquitectos como constructores. Por lo tanto, es esencial brindar apoyo personalizado a los actores, para que puedan realizarse proyectos de cáñamo exitosos. Este apoyo puede funcionar a través de un acceso a herramientas desarrolladas, capacitaciones y conocimientos, así como una plataforma de mercado para los seguidores y clústers territoriales. Los actores locales y regionales involucrados conocerán así el papel del cáñamo para lograr los objetivos de sostenibilidad y la importancia de su propia participación en la transición.

Hasta la fecha solo existen sugerencias profesionales asociadas a la construcción con hormigón de cáñamo en Francia, país que dio origen al hormigón de cáñamo-cal y donde recientemente se completó el primer edificio de hormigón de cáñamo de 8 plantas. Impulsados por la asociación francesa de construcción con cáñamo (*CenC, 2020*), las primeras reglas profesionales para la ejecución de obras con hormigón de cáñamo fueron publicados por CenC en 2007 y reconocidas en 2012 por la comisión francesa de prevención de productos (*C2P, 2020*) de la agencia francesa de calidad de construcción (*AQC, 2020*). Estas reglas se apoyan tal en la calidad de los materiales empleados como en el seguimiento de una formación reglada para los profesionales por formadores certificados en la construcción con cáñamo-cal. La validación de estas normas profesionales ha constituido un

momento clave en la divulgación de la construcción con cáñamo en Francia, incluso en Europa. Comprenden detalles constructivos y sugerencias precisas para la aplicación del hormigón de cáñamo en la realización de muros, soleras, recubrimientos de forjados, cubiertas y revestimientos. Sin embargo, únicamente contemplan mezclas de cáñamo con cal.

En los países que recientemente regularizaron el cultivo de cáñamo con fines industriales el retraso técnico se está resolviendo poco a poco a través de actividades formativas empresariales e iniciativas como los Simposios Internacionales, organizados desde 2009 por la Asociación Internacional de Construcción con Cáñamo (*IHBA, 2020*). Mientras esta divulgación científica y práctica llega directamente a profesionales del sector de la construcción con cáñamo o interesados en la misma, en otros congresos internacionales la construcción juega todavía un papel minoritario al lado de muchos otros enfoques agroindustriales de cáñamo. Dada la versatilidad de la planta, y la prioridad que se da muchas veces a productos obtenidos de sus flores, la construcción con cáñamo participa muchas veces en congresos, dirigidos a un público menos selectivo, como aquel celebrado anualmente por la Asociación Europea de Cáñamo Industrial (*EIHA, 2020*), el más importante a nivel mundial.

### ***1.7. Tendencias y carencias actuales de investigación***

La reincorporación de agregados vegetales en los materiales de construcción ha sido investigada ampliamente en curso del desarrollo de soluciones constructivas con propiedades complementarios o de mejora de soluciones existentes, no ecológicas. En este contexto se ha investigado la integración de materiales de construcción de base biológica tanto como refuerzo de los hormigones como para limitar los impactos negativos del sector de la construcción, que tiene un papel clave en las emisiones de gases de efecto invernadero, además por el calentamiento global y por el agotamiento progresivo de los recursos. La literatura ha mostrado que el hormigón de cáñamo tiene el potencial de afectar positivamente en las tendencias actuales y futuras, discutidas en los capítulos anteriores. En la práctica, sin duda, es un material con importante añadido de componentes vegetales. Sin embargo, los añadidos de agregados vegetales varían mucho en la literatura estudiada. No está aun claramente definido a partir de qué relación agregado - aglutinante las diferentes formulaciones resultan en un material con huella de carbono neutra o negativa y

asombrosamente se proclaman contribuciones aislantes también en cuanto se integran tan solo porcentajes de 1% a 6% de cáñamo en las formulaciones (*Charai et al., 2021*). Falta investigar y definir a partir de qué límites se puede hablar de una ganancia medioambiental a través de la eficiencia energética o el secuestro de carbono y a partir de qué límite conviene sustituir la terminología “hormigón de cáñamo” por “hormigón con añadido de fibras vegetales”, por tratarse de un método para conseguir cualidades bastante alejadas de un material aislante orgánico con alta captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

Los estudios han mostrado además que las materias primas, las formulaciones y los procesos provocan muchas variaciones en el producto final. En cualquier caso, la búsqueda aparente es un producto que tenga una resistencia mecánica adecuada a la aplicación y una conductividad térmica baja o moderada, suficiente para funcionar como un material para un muro monocapa.

No obstante, la mayoría de los estudios se realizaron en países industrializados, prestando menos atención a aglutinantes locales, no normalizados, y condiciones climáticas semiáridas, mediterráneas y tropicales, fuera del contexto de Europa del Oeste y Norte. Esto también se manifiesta en el hecho de que la caracterización térmica llevada a cabo hasta ahora no contempla la investigación de materiales que pudieran responder de una forma óptima a climas cálidos o no han sido validados en el creciente número de regiones geográficas, en las cuales que se aplican actualmente. Por lo tanto, el hormigón de cáñamo pudiera estudiarse también en otras condiciones climáticas, incorporando no solo conglomerantes industriales, sino también aglomerantes de origen local.

De acuerdo con (*Sáez-Pérez et al, 2020*) se estudia la caracterización mecánica del hormigón de cáñamo más que la optimización de su rendimiento. En la gran mayoría de los estudios se descarta todavía una función portante del material, porque los climas fríos y húmedos requieren materiales más porosos con prestaciones mecánicas muy limitadas. Por lo tanto, el hormigón de cáñamo es asociado muchas veces con una estructura de madera, aun cuando se ha mostrado que las resistencias mecánicas pueden alcanzar el rango de bloques de tierra comprimidos, incluso si poseen una menor densidad. En algunos países que prestan más atención a este material, los BTC's están regulados por normativas que los contemplan como bloque para muros estructurales.

El formato prefabricado, es decir bloques o piezas estructurales, pudiera ser la clave de éxito comercial del hormigón de cáñamo portante, ya que, contrario a aquel hormigón compactado en obra, es un material con propiedades declaradas por un fabricante. La escala de fabricación, sin embargo, requiere una atención científica mayor porque el tamaño, el proceso de compactación y las condiciones de secado de materiales prefabricados pudieran tener consecuencias sobre los resultados mecánicos y de durabilidad del material.

Dado que el material se comporta de manera dúctil y sufre cantidades mayores de tensión antes de fallar, es necesario estudiar también su comportamiento de absorción de energía para su posible uso en el diseño estructural de edificios sismo resistentes.

En la optimización de las características mecánicas raramente se incorporan materiales no comerciales, es decir agregados obtenidos del tallo íntegro, aunque se ha mostrado en estudios singulares que la integración de fibras conduce a mejoras (*Brümmer et al, 2018; Fernea et al. 2019*), interesantes de contrastar con materiales elaborados con cañamiza, especialmente en el ámbito mecánico, pero también en el ámbito térmico-acústico.

Debido al desarrollo relativamente reciente del hormigón de cáñamo, pocos estudios se han centrado en su durabilidad. Los métodos de envejecimiento aplicados en laboratorio y las propiedades analizadas hacen además compleja la comparación de los resultados obtenidos. Los tiempos de envejecimiento utilizados hasta la fecha dan previsiones que no alcanzan o superan la edad de estructuras ya existentes, y probablemente no sean identificables variaciones significativas para estos plazos. Los protocolos implementados hasta ahora están enfocados a factores similares que podrían influir en las propiedades del material: temperatura, humedad relativa, salinidad y agua con un potencial de crecimiento microbiológico (*Arizzi et al. 2016; Arizzi et al. 2015*) y modificación fisicoquímica y microestructural de los materiales. En mucho menor grado aún se ha investigado el comportamiento al fuego y a la respuesta ante termitas y otras plagas en ambientes tropicales.

Por último, se ha identificado en muchos estudios un área interfacial entre las partículas y el aglutinante en donde se limita o retrasa el fraguado, endurecimiento o secado del material por causa de disolución de sustancias inhibitoras, contenidas en la hemicelulosa (*Arizzi et al. 2014; Diquélou et al., 2015*). Del mismo modo pudieran ocurrir degradaciones

de las fibras en contacto con el aglutinante si este es altamente alcalino. Aunque estos fenómenos se pueden limitar con pretratamientos químicos y no químicos queda pendiente encontrar técnicas factibles en la práctica, viables, no tóxicas y respetuosas con el medioambiente, que al mismo tiempo optimizan el rendimiento de los aglutinantes y amplían la escala de su aplicación.

## **2. Objetivos**

### ***2.1. Objetivo general***

Debido a la presencia de agregados vegetales pueden ocurrir tanto fenómenos positivos como negativos que influyen en las características finales de los hormigones ligeros, producidos con los mismos, que se pretenden revisar, estudiar y afrontar gracias a esta Tesis. Los estudios que forman parte de este compendio pretenden investigar las consecuencias de las sinergias entre los materiales vegetales y los aglutinantes, que pueden causar alteraciones macroscópicas y microscópicas que influyen en las propiedades físicas del compuesto vegetal.

#### ***2.1.1. Problemas pendientes por resolver***

Parte de la investigación tratada en esta Tesis identifica la ocurrencia de patologías y anomalías durante o después de la realización de una obra, que pudieran limitar el aprovechamiento de materiales vegetales en la construcción. En este contexto se procuran de detectar condiciones bajo las cuales hormigones vegetales ligeros de cáñamo y sus recubrimientos con morteros minerales pueden llegar a desarrollar patologías, por ejemplo, la colonización de microorganismos, cambios cromáticas y anomalías en el proceso de endurecimiento, que se relacionan con interacciones químicas de los agregados vegetales y los aglutinantes.

Tras revisar y analizar estudios, llevados a cabo en los últimos años, también se han identificado algunos retos de investigación que tienen el propósito de desarrollar hormigones de cáñamo con prestaciones mecánicas afinadas, para atender una mayor gama de aplicaciones que amplía su utilidad y hace más atractiva su utilización. Por lo tanto, otro objetivo de esta tesis es la de explorar el potencial de materiales de cáñamo para compuestos con prestaciones mecánicas mejoradas, sin extraviarse gravemente de las cualidades térmicas, de porosidad abierta y de permeabilidad al vapor, que se valoran en compuestos,



principalmente orgánicos. En este contexto la presente investigación pretende identificar nuevas estrategias de procesado post agrícola y pretratamiento del material vegetal y contrastar su rendimiento en compuestos formulados con diferentes aglutinantes.

La investigación pretende también secundar el desarrollo de materiales que responden a condiciones climáticas y contextuales adicionales a los que dieron origen a la tecnología, siendo los desafíos más importantes los de economizar la estructura auxiliar, de reducir el uso de aglutinantes industriales, de ahorrar agua en el amasado y de potenciar el aprovechamiento de materias orgánicas en los compuestos.

## ***2.2. Objetivos específicos***

### ***2.2.1. Intenciones de optimizar las propiedades físicas***

Esta investigación sigue el enfoque de desarrollar un marco alternativo para el diseño de hormigones de cáñamo que contrasta con la elección de materiales de cañamiza seca y formulaciones aglutinados con cal, que se toman comúnmente en consideración. Es decir, en la formulación de los hormigones de cáñamo de esta Tesis se contemplan por primera vez materiales vegetales picadas y embaladas directamente en el campo, conservadas o preservadas con su contenido natural de humedad, un proceso que no precisa de una óptima climatología post cosecha para el secado de tallos y posterior desfibrado.

La investigación pretende revelar si los compuestos desarrollados con estos materiales aspiran a beneficiarse del hecho de que los agregados conservan su humedad natural y experimentan cambios porcentuales de sus polímeros estructurales durante la preservación anaeróbica en húmedo, sin que la actividad microbiana durante este proceso de fermentación afecte a sus propiedades esenciales. El método de picado del tallo integro procura además destacar el potencial mecánico de los hormigones de cáñamo elaborados con agregados que contienen la relación natural de cañamiza y fibras y contrastarlo con otras características físicas como son densidad, conductividad térmica, calor específico, permeabilidad al vapor y porosidad, además de secado y absorción por capilaridad.

Los parámetros contabilizados postulan, en primer lugar, hacer frente a la problemática de endurecimiento incompleto de hormigones vegetales, dado su importante contenido en materia orgánica, que a su vez es rica en componentes inhibidores del fraguado

y normalmente muy absorbente de agua. Por lo tanto, el objetivo de la investigación es aquel de determinar en un análisis comparativo el impacto de los agregados de cáñamo fresco y preservado en húmedo en las propiedades físicas de tres formulaciones. Una argamasa, formulado con cáñamo, tierra arcillosa y cal y dos argamasas formuladas con cáñamo y geo-polímeros de arcilla.

Para afrontar los inconvenientes, la presente Tesis examina el impacto de los polisacáridos contenidos en materiales de agregados de cáñamo frescos y preservados en húmedo, sobre los procesos de secado de los hormigones ligeros y una selección de sus características físicas una vez endurecidos. El estudio postula además detectar el contenido proporcional de material vegetal empleable, y el agua necesaria, comparado con otras referencias de hormigón de cáñamo en la literatura en donde se emplea cañamiza seca.

Otro propósito de esta investigación es una selección determinada de un aglutinante que trata de mejorar las resistencias mecánicas, comparado con otros aglutinantes como la cal, ampliamente investigada en hormigones de cáñamo. Una de las soluciones alternativas más prometedoras que se ha tenido en cuenta en el presente trabajo, es la tecnología basada en compuestos geo-poliméricos que se contrasta con otra propuesta de tierra-cal.

### ***2.1.2. Limitación de patologías***

Esta investigación tiene el objetivo de estimar un tiempo adecuado para el recubrimiento de muros compactados de diferentes hormigones de cáñamo con mortero de cal aérea o cal hidráulica natural. Las formulaciones tipo “muro compactado” se componen o bien de cañamiza y tierra estabilizada con cal o bien de cañamiza y cal hidráulica natural. Ambos hormigones se elaboran tal sin como con añadido de arena, para poder obtener resultados sobre dos diferentes densidades finales, tipo “autoportante” o bien “estructural”, de cada grupo.

Además, el estudio procura contrastar la influencia de la adición de tanto aglutinantes comerciales como la cal como de aglutinantes crudos y no industriales al hormigón de cáñamo, como la tierra arcillosa. No obstante, la tierra tiene un PH muy inferior a la cal y la cinética de secado de paredes de cáñamo y tierra, aunque estabilizada con una pequeña proporción de cal, puede ser más prolongada. Esta circunstancia puede favorecer la colonización de microorganismos, lo que esta tesis pretende revelar.

Simular un secado incompleto de los muros compactados a la hora de revocar (dos semanas) se planteaba para investigar posibles patologías surgidas con ambos aglutinantes, mediante investigaciones cromáticas, microbiológicas y morfológicas, contrastándolo con un tiempo de secado de diez semanas. El presente estudio pretende por lo tanto comparar la respuesta hormigones de cáñamo tipo “muros”, formulados con ambos aglutinantes, revocados en estado semihúmedo y seco.

### **3. Materiales**

Los agregados que se exponen a continuación fueron empleados en las probetas experimentales de la publicación titulada: “EFFECT OF THE STATE OF CONSERVATION OF THE HEMP USED IN GEOPOLYMER AND HYDRAULIC LIME CONCRETES” (Sáez-Pérez et al., 2021) y otros ensayos adicionales.

#### ***3.1. Agregados vegetales procedentes de tallo de cáñamo completo***

##### ***3.1.1. Origen del material y procesado***

Plantas de cáñamo de la variedad “Fedora 17”, cultivadas en 2017 en Potsdam (Alemania) por el Instituto Leibniz de Ingeniería Agrícola y Bioeconomía (ATB) (ATB, 2020), se recolectaron con una picadora de recolección, que cortó los tallos en trozos de hasta 50 mm. De la picadora el material paso a la unidad de prensado de una empacadora (Figura 4). Unas balas cilíndricas y compactas, obtenidas en este proceso se envolvieron con películas de ensilaje para evitar la presencia de oxígeno y la degradación de la celulosa durante el estado de conservación con la humedad natural del material recién cosechado (Lühr et al., 2018).

##### ***3.1.2. Conservación y preservación***



*Figura 4: Imágenes de una picadora de recolección con empacadora (arriba izq.) y balas cilíndricas con películas de ensilaje (arriba der.), tomadas durante una visita en (ATB, 2020), Potsdam (Alemania). Detalle de agregados de cáñamo de tallo íntegro, picados, de cáñamo fresco recién cosechado (F-) (abajo izq.) y cáñamo obtenido de la preservación anaeróbica húmeda de 6 meses (C-) (abajo der.).*

Posteriormente a la cosecha (septiembre de 2017) se obtuvieron dos materiales troceados, procedentes del tallo completo. Por un lado, una muestra del cáñamo recién cosechado y procesado por la picadora (Figura 4), conservado en estado congelado en recipientes herméticamente cerrados hasta su empleo en los hormigones elaborados para los experimentos. Por otro lado, se conservó una muestra del cáñamo, procesado por la picadora, preservado en húmedo durante 6 meses en una bala de ensilaje (Figura 4) al ambiente exterior en Potsdam Alemania. Ambos materiales se mantuvieron congelados en recipientes herméticamente cerrados hasta su empleo en los hormigones, elaborados para los experimentos de la investigación que se realizaron en verano de 2018.

### 3.1.3. Características del cáñamo preservado

Las características, como el olor típico del ensilado (Lühr et al., 2018) y un oscurecimiento (Sáez-Pérez et al., 2021), se notaron al retirar el material preservado durante 6 meses de las balas de embalaje. Tal como se muestra en las Figuras 5 y 6, durante la conservación anaeróbica en húmedo, la proporción de polímeros estructurales y el contenido de productos metabólicos y el valor del pH cambiaron debido al metabolismo de las bacterias anaeróbicas. Como ha sido observado por (Gusovius et al., 2016), el resultado de la preservación húmeda implica una reducción porcentual de lignina y hemicelulosa y un ligero aumento de celulosa (Figura 5). Además, durante una preservación húmeda del cáñamo “Fedora 17” durante 6 meses, el valor de pH disminuyó de 7.56 a 5.64 mientras que el contenido de ácido total se cuadruplicó (Figura 6).

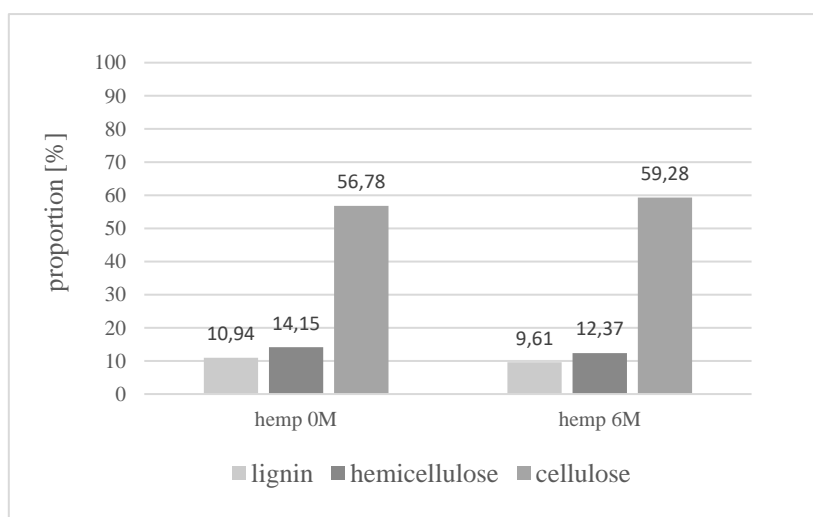


Figura 5: Proporción porcentual de polímeros estructurales antes y después de la preservación anaeróbica en húmedo del cáñamo “Fedora 17”, cosechado en 2017 (cáñamo 0M = cáñamo fresco recién cosechado; cáñamo 6M = cáñamo obtenido de la preservación anaeróbica húmeda de 6 meses). Extraído de (Sáez-Pérez et al., 2021).

## Restauración y rehabilitación de edificios y bioconstrucción con morteros ligeros aditivados con fibras vegetales

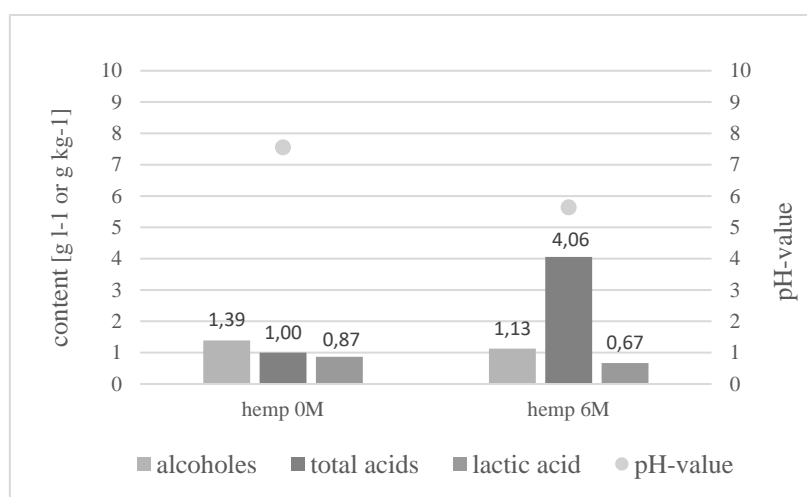


Figura 6: Contenido de productos metabólicos y el valor de pH en el curso de la preservación anaeróbica en húmedo de cáñamo Fedora 17, cosechado en 2017 (cáñamo 0M = cáñamo fresco recién cosechado; cáñamo 6M = cáñamo obtenido de la preservación anaeróbica húmeda de 6 meses). Extraído de (Sáez-Pérez et al., 2021).



Figura 7: Agregados de cáñamo picado fresco, recién cosechado (imagen izquierda), cáñamo picado obtenido de la preservación anaeróbica húmeda de 6 meses (imagen central) y cañamiza comercial seca (imagen derecha).

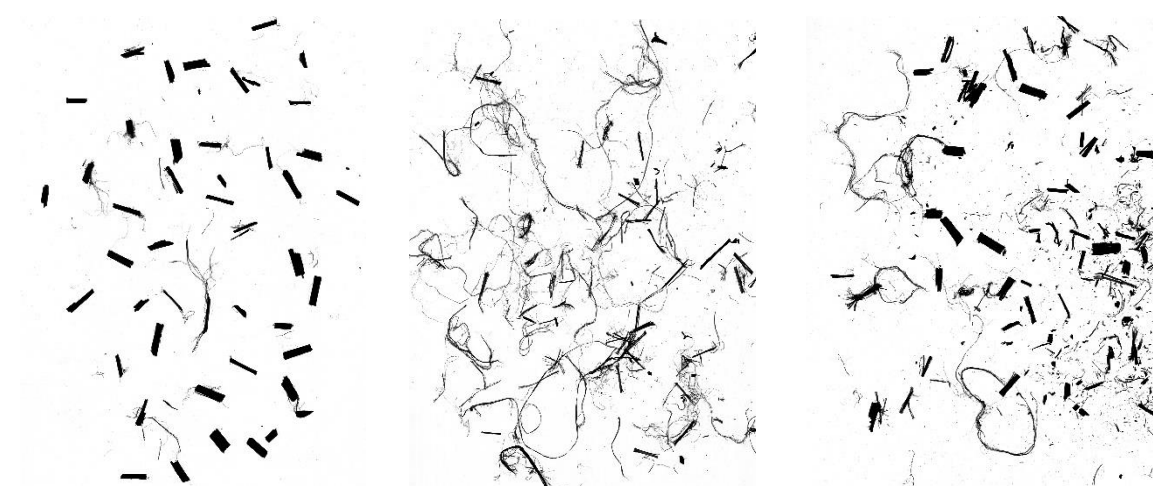


Figura 8: Imágenes escaneadas (1200 ppp) de partículas vegetales, usando el aparato FiberShape (IST AG Switzerland, 2021), facilitadas por Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy (ATB, 2020) en Potsdam (Alemania). De izquierda a la derecha: partículas de cañamiza extraídas del agregado fresco; partículas de fibra de cáñamo extraídas del agregado fresco; agregado con relación natural de cañamiza y fibra de cáñamo, preservado 6 meses en húmedo.

En cuanto a su apariencia visual (Figura 7), el cáñamo se había oscurecido después de una preservación en húmedo durante seis meses (Sáez-Pérez et al., 2021). La preservación también afectó a la distribución de los espesores de las fibras, determinadas mediante escaneado (Figura 8). Mientras en el cáñamo fresco (F-) las fibras más delgadas fueron dominantes en términos porcentuales en el cáñamo preservado en húmedo (C-) la distribución porcentual de los tamaños de las fibras indicó un engrosamiento (Sáez-Pérez et al., 2021). Los gráficos del estado conservado en fresco y preservado 6 meses en húmedo (Figura 9) mostraron que durante la preservación en húmedo el ancho de las fibras de tamaño desde  $>0,040$  mm hasta poco por encima de  $0,074$  mm disminuyeron hasta un 50% mientras aquellas fibras más gruesas, comprendidas entre  $>0,074$  mm y poco por encima de  $1,570$  mm, hasta duplicaron su anchura. Los rangos de desviación más evidentes se encuentran poco por debajo de  $0,074$  mm y poco por encima de  $0,251$  mm.

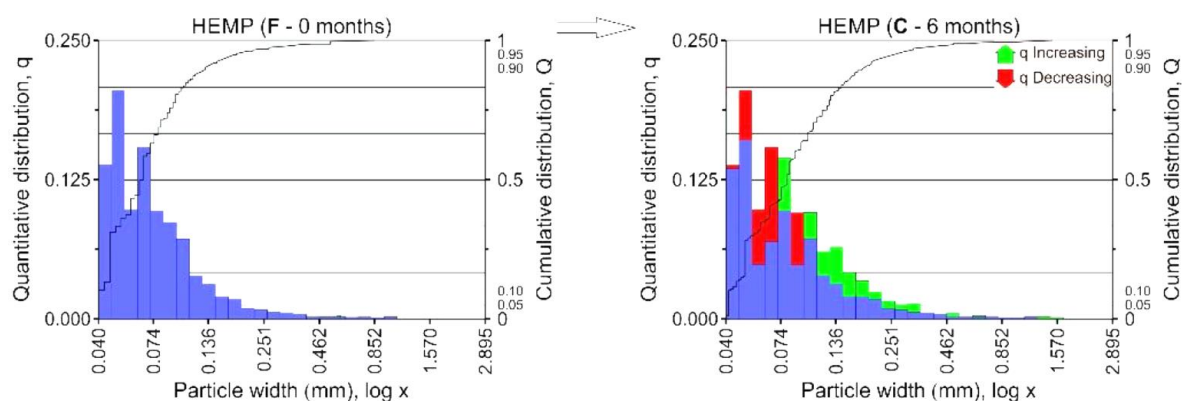


Figura 9: Evaluación del ancho de las fibras de cáñamo en estado fresco (F-) y después de la preservación en húmedo (C-), a través del análisis acumulativo de imágenes escaneadas (1200 ppp) con partículas, medidas individualmente usando el aparato FiberShape (IST AG Switzerland, 2021). Extraído de (Sáez Pérez et al., 2021).

## 3.2. Agregados minerales, aglutinantes y activador

### 3.2.1. Polvo de vidrio

El polvo de vidrio reciclado (utilizado en las formulaciones de especímenes de hormigón de cáñamo FSL, CSL, FSH y CSH), conocido comercialmente como FARMAC

TR, fue proporcionado por Silmin Ibérica (Rubí, España) (*Silmin Iberica, 2020*). Su composición química se muestra en la Tabla 3.

### **3.2.2. Tierra arcillosa**

La tierra se recogió en terrones vírgenes de las capas de arcilla limosa de los cerros en la zona de la cueva de Guadix (provincia de Granada, España). Su composición química y mineralógica se muestra en Tabla 3. De acuerdo con (*Sáez Pérez et al., 2021*), la composición mineralógica del suelo obtenido por difracción de rayos X (XRD) consiste en cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), moscovita ( $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ), paragonita ( $\text{NaAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) y serpentina ( $(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Ni}, \text{Zn})_{2-3}(\text{Si}, \text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ). Para la elaboración de los diferentes hormigones de cáñamo, las muestras de suelo, recogidas en terrones, fueron trituradas y tamizadas para obtener una granulometría de  $\leq 1$  mm. El suelo funciona como agregado y aglutinante en las formulaciones. Además, su composición mineralógica, con alto contenido de sílice y aluminio, también puede inducir reacciones hidráulicas (*Sáez Pérez et al., 2021*).

### **3.2.3. Silicato de sodio**

El silicato de sodio líquido, con la fórmula molecular  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  fue utilizado para las muestras de hormigón de cáñamo FSL, CSL, FSH y CSH. El material, cuyo análisis se muestra en Tabla 3, fue proporcionado por Quimipur S.L.U. (Quimipur, 2020), España.

### **3.2.4. Hidróxido de sodio**

La empresa alemana Kremer Pigmente GmbH & Co KG (Kremer Pigmente, 2020) proporcionó el hidróxido de sodio en forma sólida, con la fórmula molecular  $\text{NaOH}$ , utilizado en muestras de hormigón de cáñamo FSL, CSL, FSH y CSH.

### **3.2.5. Cal hidráulica natural**

La cal hidráulica natural NHL5, producida con acuerdo a la norma UNE-EN 459-1:2016 (*AENOR, 2016*), utilizada para los especímenes FL y CL, fue fabricada por Secil Martingança S.A. (Portugal) y obtenida de Seciltek (*Seciltek, 2020*). Su composición química, mediante fluorescencia de rayos X (XRF), se expone en Tabla 3. En lo que se refiere a la composición mineralógica mediante difracción de rayos X (XRD), resultó que la cal hidráulica natural NHL5 contiene al menos 50% de Portlandita y  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ , a la cual se



contribuyen altas capacidades de unión y 33% de Cal en forma de  $\text{CaCO}_3\text{-CaO}$  (Sáez-Pérez et al., 2021). Se supone que el 17% de mineralizaciones restantes, como An y  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ , son responsables para la reacción hidráulica de la cal NHL5, lo que (Sáez-Pérez et al., 2021) relaciona a su contenido en silicato de calcio de aluminio.

**Tabla 3:** Composición química por análisis XRF (% en peso) de materias primas minerales, utilizadas en las formulaciones. Datos normalizados al 100% (sin LOI). Extraído de (Sáez-Pérez et al., 2021).

composición química % en peso	tierra tamizada	cal NHL5	polvo de vidrio reciclado	silicato de sodio	silicato de sodio y polvo de vidrio
$\text{SiO}_2$	53,78	10,83	68,42	48,09	50,43
$\text{Al}_2\text{O}_3$	24,54	3,74	1,18	0,18	0,31
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	7,88	1,88	0,2	0,03	0,05
$\text{MnO}$	0,07	0,02	0,01	-	-
$\text{MgO}$	0,95	2,5	3,09	-	0,5
$\text{CaO}$	1,17	55,29	10,27	0,03	1,32
$\text{Na}_2\text{O}$	1,35	0,18	14,86	19,57	18,29
$\text{K}_2\text{O}$	3,4	0,92	0,46	0,08	0,12
$\text{TiO}_2$	0,83	0,24	0,08	0,01	0,02
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,24	0,05	0,02	0,01	0,01
$\text{SO}_3$	0,09	1,82	0,3	0,05	31,78
LOI	5,48	19,91	0,98	0,08	28,73

### 3.3. Agregados comerciales de cáñamo

Los agregados que se exponen a continuación fueron empleados en las probetas experimentales de la publicación titulada: “OPTIMIZATION OF LIME AND CLAY-BASED HEMP-CONCRETE WALL FORMULATIONS FOR A SUCCESSFUL LIME RENDERING” (Arizzi et al., 2018).

#### 3.3.1. Origen de la cañamiza

La cañamiza, utilizada en las probetas experimentales, ha sido producida por AgroFibre, Euralis (Francia) y suministrada por Cannabric (España) (Cannabric, 2020) bajo el nombre comercial Cannahabitat.

#### 3.3.2. Características de la cañamiza

Las características de la cañamiza de la marca Cannahabitat, ilustrada en la imagen derecha de Figura 7, se detallan en Tabla 4. Cannahabitat es un agregado seco, compuesto de cañamiza calibrada y desempolvada, resultante del desfibrado de paja de cáñamo (tallo de cáñamo) por un proceso mecánico, realizado con el material previamente secado en el

campo de cultivo. El material cuenta con el sello CenC (CenC, 2020), otorgado en Francia a cañamizas destinadas a aplicaciones de construcción, tales como hormigones y revocos aislantes de cáñamo y cal.

**Tabla 4:** Características de la cañamiza comercial Cannahabitat. Extraído de (Cannabric, 2021).

	<i>Entidad</i>	<i>Resultado</i>	<i>Norma</i>
Masa volumétrica	kg/m <sup>3</sup>	110	no declarada
Conductividad térmica	λ	0,048	UNE-EN 12667:2002 (AENOR, 2002)
Granulometría representativa (grosor de partículas)	%	6,30 mm: 2,5 3,15 mm: 32 2 mm: 39 1 mm: 24 0,50 mm: 2	no declarada
Longitud de partículas	mm	2-25	no declarada
Contenido en fibra y polvo	%	<2	no declarada
Índice de humedad	%	<15	no declarada
PH en suspensión al 10%	-	7,2	no declarada
Calor específico	J/g·K	2.109	no declarada
Poder absorbente de agua	%	210-250	NF V19-002:1993 (AFNOR, 1993)

### **3.4. Aglutinantes y agregados minerales**

#### **3.4.1. Cal hidráulica natural**

La cal hidráulica natural NHL3,5, producida de acuerdo con la norma UNE-EN 459-1:2016 (AENOR, 2016), utilizada en algunas probetas y revestimientos, ha sido fabricada por Socli (Izaourt, Francia) (Socli, 2021) y suministrada por Cannabric (Cannabric, 2021).

#### **3.4.2. Cal aérea en pasta**

La cal aérea en pasta CL90S-PL, producida con acuerdo a la norma UNE-EN 459-1:2016 (AENOR, 2016), utilizada en algunas probetas y revestimientos, ha sido producida por Gordillos Cal de Morón (Sevilla, España) (Gordillos Cal de Morón, 2021) y suministrada por Cannabric (Cannabric, 2021). Se trata de una cal hidratada en pasta, preservada un mínimo de 4 años. Esta cal se obtiene mediante fabricación tradicional en horno de leña y posterior apagado con un exceso de agua.

#### **3.4.3. Tierra arcillosa**

La tierra arcillosa utilizada en algunas de las probetas de hormigón de cáñamo procedía de Guadix (Granada, España) y ha sido suministrada por Cannabric (Cannabric 2020). Para la elaboración de los diferentes hormigones de cáñamo, las muestras de tierra,

recogidas en terrones, fueron trituradas con una maquina pulverizadora de la marca Oskam V/F (Oskam, 2021). El material funciona como agregado y aglutinante en las formulaciones.

#### **3.4.4. Arena**

De acuerdo con (Arizzi et al., 2018), la arena calcítica de machaqueo, utilizada en las probetas de mayor densidad y la totalidad de revestimientos, posee una granulometría comprendida entre 0,063 y 3 mm.

#### **3.4.5. Composición química y mineralógica de los materiales minerales**

Los elementos principales y trazas de cales, arcilla y arena se analizaron mediante un espectrómetro de fluorescencia de rayos X (XRF) S4 PIONEER-BRUKER. Las muestras se trituraron y el polvo se dispersó en gránulos de KBr antes del análisis. La identificación y semi-cuantificación de fases minerales de cales, tierras arcillosas y arena se realizó mediante difracción de rayos X (XRD) y un procedimiento detallado en (Arizzi et al., 2018). La mineralogía de la tierra arcillosa se ha determinada con fracciones inferiores a 2  $\mu\text{m}$ , obtenida con una centrífuga Kubota Ks-8000 y un procedimiento descrito en (Arizzi et al., 2018). Posteriormente los patrones de los diferentes materiales han sido analizados con un difractor Panalytical X'Pert PRO MPD con las características indicadas en (Arizzi et al., 2018).

## **4. Metodología utilizada en los estudios experimentales**

### **4.1. Preparación de probetas y secado (hormigones elaborados con agregados de cáñamo del tallo íntegro)**

La metodología que se expone a continuación es relacionada con las probetas experimentales tratadas en la publicación titulada: “EFFECT OF THE STATE OF CONSERVATION OF THE HEMP USED IN GEOPOLYMER AND HYDRAULIC LIME CONCRETES” (Sáez-Pérez et al., 2021) y otros ensayos complementarios.

#### **4.1.1. Mezclado**

Doce horas antes de mezclar los materiales de cáñamo, conservados congelados hasta la elaboración de hormigones vegetales, los agregados se descongelaron a  $T=22^{\circ}\text{C}$  en envases de plástico herméticamente cerrados. Para las formulaciones FSL y FSH (preparadas con cáñamo fresco) tal como CSL y CSH (preparadas con cáñamo preservado en húmedo),

todos aglutinados con geo-polímeros de arcilla, los materiales de cáñamo se mezclaron con una lechada de aglutinantes (Figura 10), preparada de la siguiente manera: primero, se mezcló el silicato de sodio con el hidróxido de sodio (solución al 5% en agua), después se añadió el polvo de vidrio reciclado y se mezcló de nuevo manualmente. A esta solución, una vez mezclada, se añadió la tierra arcillosa tamizada ( $\leq 1$  mm) y se volvió a mezclar manualmente. A la lechada homogénea obtenida se añadió el agregado de cáñamo y se mezcló manualmente hasta las partículas picadas estaban envueltos completamente de la lechada.



Figura 10: (de izq. a der.) agregado de cáñamo (no preservado), lechada de aglutinantes (geopolímero de arcilla) y hormigón FSH tras el mezclado.

Para la formulación de hormigón de cáñamo, aglutinado con tierra estabilizada, los agregados descongelados se agregaron a la tierra tamizada ( $\leq 1$  mm) y a la cal hidráulica natural NHL5 (previamente mezcladas en seco). Una vez que se obtuvo una mezcla uniforme, se añadió el agua. Cada una de las tres diferentes formulaciones (Tabla 5) se elaboró tanto con cáñamo fresco (F-) como con cáñamo preservado (C-). Las dos series de hormigón, aglutinados con geo-polímeros de arcilla (FSL/CSL y FSH/CSH), se distinguen menos en su contenido de cáñamo que en su contenido de suelo y silicato de sodio. La relación de silicato de sodio y polvo de vidrio reciclado y la solución de hidróxido de sodio se mantuvo sin cambios en todos los compuestos correspondientes. La tercera serie de hormigón de cáñamo (FL/CL) contiene cáñamo, tierra tamizada y cal hidráulica natural NHL5. Esta formulación se mezcló con agua, mientras que los geopolímeros no necesitaban agua para la mezcla (excepto el agua contenida en la solución de hidróxido de sodio).

**Tabla 5:** Nombres de los tipos de hormigón de cáñamo, componentes y formulaciones por peso y volumen %.

nombre	cáñamo fresco	cáñamo pre-servado	sieved earth (<1 mm)	recycled glass powder	sodium silicate	hidróxido de sodio diluido al 5%	cal NHL5	agua
FSL	20 64,45		22,5 13,35	6 4,45	30 15,55	3 2,20		
CSL		20 64,45	22,5 13,35	6 4,45	30 15,55	3 2,20		
FSH	20 60,60		37,5 21,60	5 3,50	25 12,55	2,5 1,75		
CSH		20 60,60	37,5 21,60	5 3,50	25 12,55	2,5 1,75		
FL	20 51,45		50 24,85				10 8,90	25 14,80
CL		20 51,45	50 24,8				10 8,90	25 14,80

#### 4.1.2. Moldeo y desmoldeo

Inmediatamente después de mezclar, los hormigones frescos se vertieron en moldes prismáticos de madera de 160 x 40 x 40 mm y 50 x 200 x 200 mm. El compactado de las masas se realizó en tongadas paralelas con una pequeña espátula para eliminar el aire atrapado. Durante las siguientes 12 horas, las muestras se curaron en condiciones de T = 22°C y HR = 70%, antes de retirarlos de los moldes (Figura 11).



Figura 11: Probetas FSH durante el curado en el molde (imagen izq.) y recién desencofradas (imagen der.).

#### 4.1.3. Secado

Después del desmoldeo, las probetas aglutinadas con geo-polímeros de arcilla se dejaron secar durante 12 horas en una rejilla a T = 22°C y HR = 70%. Posteriormente, se secaron en un horno durante 24 horas a T = 80 ° C (Figuras 12, 13 y 14). A partir de entonces, el secado continuó nuevamente sobre una rejilla en condiciones de T = 22°C y HR = 70%.

A diferencia de las probetas anteriores, las probetas elaboradas con tierra y cal NHL5 se secaron exclusivamente sobre una rejilla en condiciones de  $T = 22^{\circ}\text{C}$  y  $\text{HR} = 70\%$ .



Figura 12: Probetas FSL recién desencofrados durante el secado en una rejilla y tras el secado en el horno.

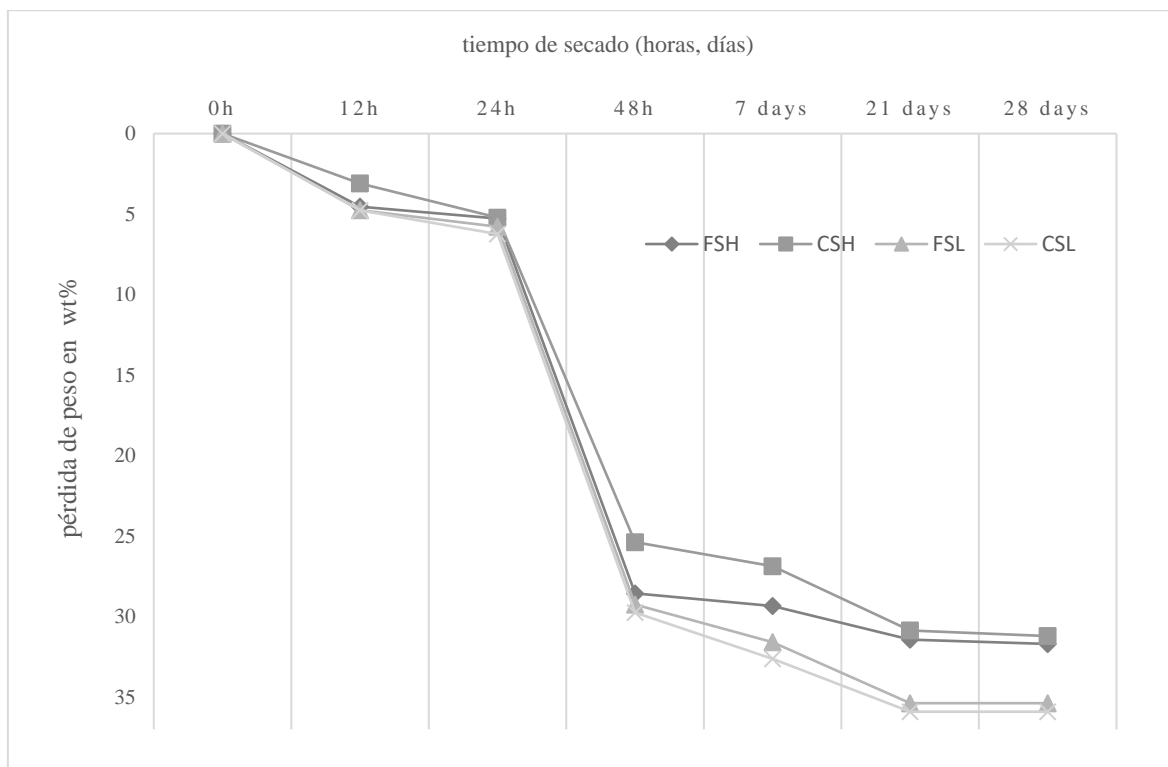


Figura 13: Curvas de secado de hormigones de cáñamo aglutinados con geopolímeros de arcilla. Pérdida porcentual media en peso (% en peso) de 12 muestras ( $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ ) de cada tipo durante el secado a condiciones de  $T22RH70$  ( $<24 \text{ h}$  y  $48 \text{ h}$ ) y  $T80$  ( $24 \text{ h} - 48 \text{ h}$ ).



Figura 14: Probetas CSH tras el secado en el horno.

#### **4.3.4. Densidades secas**

Las densidades secas de las probetas se determinaron según la norma UNE-EN 12390-7:2020 (AENOR, 2020). Antes de realizar mediciones y cálculos, las muestras se expusieron a condiciones ambientales de temperatura a  $T = 20^{\circ}\text{C}$  y  $\text{HR} = 60\%$ .

#### **4.1.5 Absorción por capilaridad**

La absorción capilar se realizó en tres muestras de  $4 \times 4 \times 16$  cm de cada tipo de probeta, según la norma italiana UNI EN 1925:2000 (normeUNI, 2000). Se determinaron las ganancias porcentuales en peso durante la absorción, en relación con la masa inicial de cada probeta en equilibrio con el ambiente.

### **4.2. Relación de estudios experimentales**

#### **4.2.1. Conductividad térmica**

Las probetas aglutinadas con geo-polímeros de arcilla FSL, CSL, FSH y CSH utilizados en el ensayo de medición de conductividad térmica corresponden a moldes prismáticas de hormigón de cáñamo endurecido y seco, de  $50 \times 200 \times 200$  mm.

La conductividad térmica se determinó con un equipo de la marca EDIBON-TCMC, con capacidad para medir muestras desde  $100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  hasta  $305 \text{ mm} \times 305 \text{ mm}$  y espesores variables en un rango de unos pocos milímetros hasta  $100 \text{ mm}$ . Las muestras se analizaron entre dos sensores de flujo de calor en gradientes de temperatura fijos o variables. Un ensayo de medidor de flujo de calor (HFM) es un proceso de medición en condiciones de equilibrio en el que una muestra se sitúa en contacto con una placa superior y una placa

inferior, que son estabilizadas a dos temperaturas diferentes. Debido al gradiente de temperaturas impuesto, los flujos calientes atraviesan verticalmente la muestra del lado caliente al lado frío. Pasados unos minutos, cuando el sistema alcanza un equilibrio, el equipo determina tanto la conductividad térmica como la resistencia térmica de la muestra. La Unidad de Conductividad Térmica de Materiales Aislantes y de Construcción, controlada por ordenador, "TCMC", es un equipo que se utiliza para medir la conductividad térmica de materiales de baja conductividad, como los materiales aislantes. Este equipo es un instrumento calibrado que cumple con las normas ISO 8301, ASTM C518, DIN EN 12667 y JIS A1412, donde ASTM C518 (ASTM, 2017) es a la norma que se contempla.

#### ***4.2.2. Calor específico***

Las muestras originales de los hormigones de cáñamo con los geopolímeros de arcilla FSL, CSL, FSH y CSH corresponden a probetas prismáticas de mortero endurecido y seco, de 40 x 40 x 160 mm de tamaño. A partir de estos especímenes, se cortaron 3 cortes de 40 x 40 x 10-20 mm de cada serie de apertura de la parte central de los especímenes después de retirar 10 mm de cada borde de los especímenes. La norma seguida ha sido ASTM E1269-11 (ASTM, 2018). En el procedimiento, se midió la masa de agua vertida en el calorímetro con una báscula COBOS modelo XB-620M, y su temperatura se midió con un termopar del tipo PCE-T390, mientras estaba en funcionamiento el agitador del calorímetro. Las muestras de prueba se introdujeron en las muestras de prueba del calorímetro que previamente se mantuvieron en un horno de aire forzado a 100°C durante 24 h, mientras se midió su temperatura con el mismo termopar y su masa con la escala. La muestra sumergida en el agua alcanzó su equilibrio térmico en aproximadamente una hora, período durante el cual el agitador continuó funcionando. De los resultados individuales de 3 ejemplares de cada tipo se utilizó una cifra significativa para la expresión de los mismos, y se obtuvo el valor promedio para cada caso. Además, se anotó el coeficiente de variación para cada serie de muestras analizadas.

#### ***4.2.3. Permeabilidad al vapor de agua***

La permeabilidad al vapor de agua se define como la cantidad de agua (en forma de vapor) que atraviesa un espesor de hormigón sobre superficies paralelas bajo el efecto de una diferencia de presión parcial de vapor de agua entre estas dos. De acuerdo con el tipo de muestras se ha decidido aplicar la norma italiana NORMAL 21/85:1985 de Permeabilidad



al vapor de agua (CNR-ICR, 1985). Se utilizaron 3 piezas para cada ensayo, recortadas del centro de los prismas originales de cada grupo, con dimensiones de 10x40x40 mm. Previamente, las muestras se secaron durante 8 horas a 70° C en una estufa. Para realizar esta prueba se utilizaron permeámetros, discos de sellado de silicona, algodón, agua y las propias probetas (Figura 15). Primero, se colocó un hisopo de algodón humedecido en agua en la parte inferior del permeámetro, luego se colocaron los discos de silicona con el fin de asegurar que las muestras permanecieran inmobilizadas y que el movimiento del vapor de agua a la superficie ocurriera solo a través de las probetas. Los pesos (del permeámetro con la muestra) se determinaron a intervalos regulares (cada 24 horas) hasta que se alcanzó un peso constante. La prueba se realizó en condiciones estables de temperatura y humedad relativa (T = 20 ° C y HR = 60%). Para calcular el aumento de masa por unidad de área en función del tiempo ( $\Delta M / S$ , en g / cm<sup>2</sup>), se utilizó la siguiente fórmula empírica  $\Delta M / S = \frac{M_t - M_0}{S}$  g/m<sup>2</sup> donde "S" representa la superficie del parámetro constante, con un valor de 0,0000707 m<sup>2</sup> (para un diámetro del área de muestra expuesta al aire de 3 cm), "Mt" es la masa total y "M0" la masa inicial. Para calcular el coeficiente de permeabilidad al vapor de agua (Kv) se utilizó la fórmula empírica  $K_v = \frac{\Delta M / S}{t}$  g/m<sup>2</sup> x 24h, mientras para calcular el coeficiente completo según la "Ley de Darcy" se utilizó la formula  $K_v = \frac{(\Delta M - S) \times e}{t \times \Delta P}$  g/m x h x mm hg (donde "ΔP" representa el diferencial de presión y "hg" la unidad de masa).

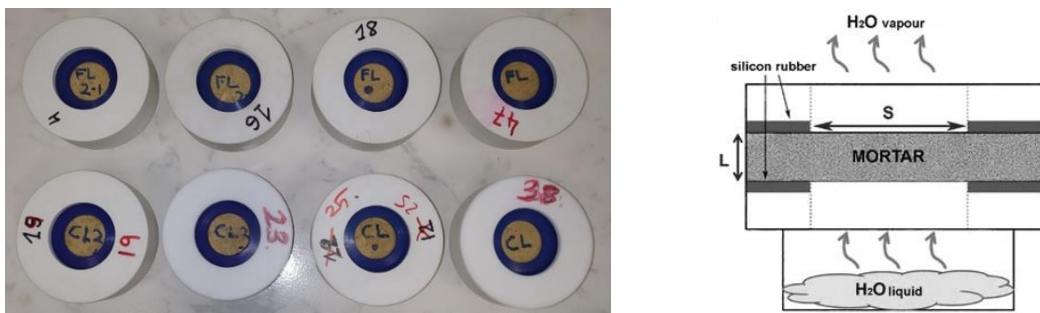


Figura 15: Permeámetros (imagen izq.), utilizados para determinar la permeabilidad a vapor de agua de las probetas (contienen hormigones FL y CL). Representación esquemática del ensayo (imagen der.) (Arizzi y Cultrone, 2014), siendo "L" el espesor de la muestra sellada con silicona, "S" la superficie de la muestra expuesta al aire, "H2O liquid" el agua líquido y "H2O vapour" el vapor de agua.

#### 4.2.4. Porosimetría de mercurio (MIP)

La evaluación de la distribución del tamaño de los poros y la porosidad de los materiales sólidos se llevó a cabo mediante porosimetría de intrusión de mercurio (MIP) y

adsorción de gas, de acuerdo con ISO 15901-1:2016 (ISO, 2016). Las muestras se prepararon utilizando 2 fragmentos seleccionados de cada grupo de especímenes, con un volumen de aproximadamente 1 cm<sup>3</sup>. La distribución del tamaño de los poros y el volumen total de los poros se midieron con un MIP (Autopore IV 9510, Micromeritics) que opera a presiones de 0,01 a 414 MPa. Estas condiciones operativas nos permitieron medir poros en una amplia gama de tamaños (<0,01-1 000 μm) y obtener información sobre el volumen total de poros interconectados (expresados como porosidad accesible, Pa) y la distribución del tamaño. Un líquido como el mercurio, que no penetra espontáneamente en los poros de un material, requiere una presión "p" para su introducción que es inversamente proporcional al radio "r" de los poros:  $r = 2 \sigma \cos \alpha / p$  donde "σ" es la tensión superficial del mercurio y "α" el ángulo de contacto sólido-líquido. Para realizar esta prueba, se permitió que entrara mercurio en la muestra a una presión que aumentaba gradualmente. Por cada grado de aumento en la presión aplicada, se registró el volumen de mercurio que ingresaba en la muestra. El volumen total de mercurio inyectado da información sobre el índice total de vacíos en la muestra (Pa) y la presión de mercurio aplicada en cada incremento se correlaciona con el tamaño de los poros.

#### **4.2.5. Resistencia mecánica**

Para la medición de la resistencia mecánica que completó este estudio, a efectos de comparación con las propiedades térmicas, se utilizaron los valores medios obtenidos de 3 probetas de cada formulación según la norma UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007 (AENOR, 2007). La resistencia a la flexión se midió en prismas de 40 x 40 x 160 mm después de 28 días de secado. Se obtuvieron dos cubos de cada prisma que fueron utilizados en las pruebas de resistencia a la flexión. La resistencia a la compresión se determinó con 6 cubos de 40 x 40 x 40 mm. Los ensayos se llevaron a cabo con un equipo universal de INSTRON Modelo 3365 (INSTRON, 2021). En el ensayo de resistencia a flexión se aplicó una velocidad de 1 mm/min y un intervalo de muestra de 64 mm. Esto provocó que la muestra se rompiera al aplicar una carga concentrada en el centro, estableciendo la celda de carga en 5 kN. Para la prueba de compresión se utilizó una velocidad aplicada de 5 mm/min (Sáez Pérez et al., 2021).

#### **4.2.6. Ultrasonidos**

La compacidad y resistencia media a la transmisión directa de pulsos ultrasónicos de cada grupo de probetas se midieron mediante un aparato ultrasónico Steinkamp BP5, un

generador de impulsos con transductores de 100 kHz de acuerdo con el estándar internacional ASTM D2845-08 (ASTM, 2017).

#### ***4.2.7. Determinación de color de los agregados vegetales***

La determinación de color se realizó con los agregados de cáñamo fresco (F-) con su contenido natural de humedad y el cáñamo procedente de 6 meses de preservación en húmedo (C-). La representación gráfica de los valores (Sáez-Pérez et al., 2021) se ha realizado con en equipo CIE-Lab1976 con Iluminante D65 de acuerdo con el estándar ISO 11664-2:2007 (ISO. 2007). El término "iluminante" se refiere a una distribución de potencia espectral definida, no necesariamente realizable o proporcionada por una fuente artificial. El iluminante estándar D65 debe usarse en todos los cálculos colorimétricos que requieran representar luz diurna, que tiene una temperatura de color correlacionada de aproximadamente 6500K.

#### ***4.2.8. Determinación del ancho de las fibras***

Se decidió realizar un estudio del ancho de las fibras contenidas en los agregados del tallo íntegro, tanto materiales picados frescos como materiales picados preservados 6 meses en húmedo. El sistema de análisis de imágenes FiberShape (IST AG Switzerland, 2020) permite capturar el ancho de una gran cantidad de fibras en cuestión de minutos.

### ***4.3. Preparación de probetas y secado***

La metodología que se expone a continuación está relacionada con las probetas experimentales tratadas en la publicación titulada: "Optimization of lime and clay-based hemp-concrete wall formulations for a successful lime rendering" (Arizzi et al., 2018).

#### ***4.3.1. Probetas***

Se prepararon cuatro tipos de hormigón de cáñamo. Por un lado, formulaciones para aplicaciones no portantes (nlb-L) y portantes (lb-L), aglutinados con cal hidráulica natural NHL3,5, por otro lado, formulaciones de tierra arcillosa y cal hidráulica natural para aplicaciones no portantes (nlb-LC) o portantes (lb-LC). A los bloques denominados "portantes" se agregó arena, con el consiguiente aumento de densidad. Se realizó la mezcla de las materias primas en una mezcladora 500LB con eje vertical de la marca OSKAM V/F (OSKAM V/F, 2021). El hormigón, que se se vertió en moldes de 30x30x30 cm, realizados con cuatro paneles de madera no absorbentes, fue compactado en tongadas de 10 cm con

una herramienta de hierro. Los bloques (4 de cada tipo) quedaron con una sola cara expuestas a las condiciones ambientales, mientras que la cara opuesta se cubrió con una lámina de plástico para evitar que se secase. Las imágenes del proceso de fabricación tal como componentes y formulaciones se detallan en (Arizzi et al., 2018).

#### ***4.3.2. Curado de probetas***

El comportamiento hidrófilo de cañamiza dificulta la gestión del agua durante el tiempo de fraguado (Colinart et al., 2012). Para favorecer la hidratación de los silicatos de calcio en la cal hidráulica durante el período de edad temprana de los hormigones de cáñamo los bloques se dejaron secar durante la primera semana a  $T = 18^{\circ} \text{C}$  y  $\text{HR} = 95\%$ . De la segunda semana en adelante las muestras continuaron secándose a condiciones de humedad relativa más baja (60%) para favorecer la carbonatación del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  contenido en la cal hidráulica natural. Sin embargo, estas condiciones superan todavía con un 10-15% la humedad relativa recomendada por (Arnaud y Gourlay, 2011) para un secado ideal de bloques de hormigón de cáñamo.

#### ***4.3.3. Revestimientos***

Para cada tipo de bloque se aplicaron dos revocos diferentes de 1,2 cm de espesor, ambos realizados con arena triturada natural, variando únicamente el tipo de cal. Los revestimientos tanto de cal hidráulica natural NHL3,5 como de cal en pasta CL90S-PL se realizaron 2 y 10 semanas después de la fabricación de los bloques, en aquella cara que durante el secado fue expuesta a condiciones ambientales. Un humedecimiento previo con 100 ml de agua por cara a revocar se realizó únicamente en los bloques con 10 semanas de secado previo, ya que las otras probetas, especialmente aquellas elaboradas con tierra, no llegaron a secarse en dos semanas.

#### ***4.3.4. Probetas de control***

De cada tipo de hormigón de cáñamo y de revoco se tomaron muestras de control, vertiéndolos en moldes de 4x4x16 cm y 10x10x1,5 cm, respectivamente. Con la intención de promover un secado lento debido a su menor tamaño comparado con los bloques, los materiales se retiraron de los moldes una semana después de su colado y se curaron durante 6 meses en las mismas condiciones que los bloques durante la primera semana ( $T = 18^{\circ} \text{C}$  y

HR = 95%). La confección de muestras de control permitió determinar su comportamiento de secado durante 3 semanas.

#### ***4.4. Programa experimental***

Seis meses después de la fabricación de los bloques, se tomaron muestras superficiales de los bloques y de los revocos de cal para el siguiente programa experimental:

##### ***4.4.1. Porosimetría de intrusión de mercurio***

Para el ensayo de porosimetría de intrusión de mercurio, fragmentos de muestra de 1 cm<sup>3</sup> se secaron en un horno durante 24 h a 60°C, antes del análisis con un porosímetro Quantachrome Poremaster 60 y un porosímetro Micrometics Autopore III 9410. Primero sirvió para determinar la porosidad interparticular (PIP, en %) de las muestras de control de bloques mientras segundo para determinar la porosidad abierta (Po, en %) y la distribución del tamaño de poro (PSD) de las muestras de control de revocos.

##### ***4.4.2. Microscopía electrónica de barrido ambiental***

Para observar la microestructura y morfología tanto de los hormigones de cáñamo como de los revocos se tomaron pequeñas muestras (5 mm) que se secaron previamente. Al tratarse entre otros de muestras biológicas, poco conductoras, se utilizó un microscopio electrónico de barrido ambiental (ESEM), que puede controlar tanto la humedad relativa de la cámara como la temperatura de la muestra para evitar daños durante el tiempo de observación. El aparato utilizado fue un Philips Quanta 400 con detector de estado sólido (SSD) que trabaja con electrones retro dispersados a una temperatura fija de 2 ° C y 3,5 torr (HR 70%) cuya cámara microscópica se purgó a una presión óptima para imágenes de electrones retro dispersados que se fijó en 0,5 torr, a través de un procedimiento descrito en (Arizzi et al 2018).

##### ***4.4.3. Determinación de color de los revestimientos***

Tal como descrito en (Arizzi et al., 2018) las mediciones de color de los revestimientos se realizaron sobre 5 muestras de cada tipo en un área de medición de 8 mm, una iluminación estándar D65 y un observador 10° con modos SCI/SCE y un rango de longitudes de onda de 400 nm a 700 nm con un intervalo de longitud de onda de 10nm. Las diferencias cromáticas de color general ( $\Delta E$ ) entre los dos tipos de revocos, aplicados en diferentes estados de secado de los bloques y las muestras de control, se detectaron mediante

un espectrofotómetro portátil Konica-Minolta CM700d, que mide, de acuerdo con la norma UNE-EN 15886, 2011 (AENOR, 2011), tanto la ligereza “L” como los parámetros de cromatismo “a” y “b”. L\*1, a\*1 y b\*1 corresponden a las muestras de control mientras L\*2, a\*2 y b\*2 a las muestras los revoco, retiradas de los bloques.

#### ***4.4.4. Estudio microbiológico***

Se realizó un estudio microbiológico de los revocos aplicados sobre los bloques tras un curado de 2 y 10 semanas y de las muestras de control de los revocos, aislando las bacterias y hongos.

## **5. Resultados**

### ***5.1. Resultados experimentales con hormigones, elaborados con materiales del tallo de cáñamo íntegro***

Los resultados experimentales que se exponen a continuación están relacionados con los ensayos tratados de la publicación titulada: “EFFECT OF THE STATE OF CONSERVATION OF THE HEMP USED IN GEOPOLYMER AND HYDRAULIC LIME CONCRETES” (Sáez-Pérez et al., 2021) y ensayos complementarios con los mismos materiales.

#### ***5.1.1. Secado y densidades secas de las probetas***

Las probetas de los geo-polímeros de arcilla FSL y CSL alcanzaron las mismas densidades medias secas, de 910 kg/m<sup>3</sup>, con ambos vegetales (fresco y preservado en húmedo), y las formulaciones FSH y CSH alcanzaron densidades medias superiores, de 1060 kg/m<sup>3</sup> y 1110 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. La menor viscosidad de las formulaciones FSL y CSL, con proporciones porcentuales más altas de silicato de sodio comparado con FSH y CSH, sugieren por qué esta formulación alcanzó las mismas densidades secas con ambos materiales de cáñamo. Los hormigones de cáñamo-arcilla-cal alcanzaron densidades medias secas de 990 kg/m<sup>3</sup> para las probetas FL y 1010 kg/m<sup>3</sup> para las probetas CL. Con las últimas formulaciones, que exhibieron viscosidades más altas durante la preparación, en comparación con los geo-polímeros de arcilla, las muestras con cáñamo preservado alcanzaron densidades ligeramente más altas que aquellas con cáñamo fresco. Lo mismo pasó con CSH, que con la misma formulación alcanzó una mayor densidad que FSH. Las probetas FL y CL alcanzaron un equilibrio en condiciones ambientales en aproximadamente

4 semanas, aunque los resultados no son comparables con los otros grupos de probetas porque no se le ha añadido una fase de secado en un horno. Las curvas de secado de las probetas aglutinadas con geo-polímeros de arcilla, evidencian que todas las muestras alcanzan un equilibrio en condiciones ambientales en aproximadamente 3-4 semanas, independientemente de los materiales y formulaciones. Las muestras de FSL y CSL alcanzan una pérdida de peso porcentual ligeramente mayor que las muestras de FSH y CSH. Este resultado es proporcional a las diferentes densidades de ambas formulaciones y al mayor contenido de cáñamo y silicato de sodio del primer grupo. Las curvas de secado de las series FSL y CSL son muy cercas, independientemente del material de cáñamo utilizado. Con las probetas FSH y CSH, la pérdida de peso de los hormigones con cáñamo fresco fue levemente mayor durante el secado al horno. Sin embargo, ambos hormigones lograron niveles muy similares de evaporación de agua en 3 semanas. Aunque los geo-polímeros del tipo -H llegaron a diferentes densidades finales, su pérdida de peso porcentual total fue  $> 35\%$ . Por el contrario, los hormigones de cáñamo FSL y CSL, con mayor contenido de silicato de sodio y menor contenido de tierra, alcanzaron  $> 31\%$ . Estos resultados sugieren que las diferencias son más específicas del aglutinante o la densidad que del material de cáñamo fresco o preservado en húmedo. Las pérdidas por evaporación de agua encontradas con los materiales presentes son mayores que aquellas encontradas en otros trabajos. Con hormigones de cáñamo de un rango de densidad del tipo estructural, elaborados con aglomerantes de tierra-cal y cal, se observó una pérdida de peso de 16-22% durante el mismo período de secado (Arizzi et al., 2018). Un rango de densidad más bajo de estas formulaciones alcanzó el 26-31%.

### ***5.1.2. Resultados de Conductividad térmica de hormigones de cáñamo aglutinados con geo-polímeros de arcilla***

En el grupo de probetas FSH y CSH, con mayor proporción de tierra y menor contenido de silicato de sodio, la conductividad térmica resultó más favorable en la muestra preparada con cáñamo fresco que también alcanzó una menor densidad. En las formulaciones FSL y CSL, que poseen las mismas densidades secas, la muestra con cáñamo preservado logró una conductividad térmica ligeramente menor (Tabla 1). Los datos obtenidos sugieren que tanto la densidad seca como los procesos microbiológicos durante la preservación anaeróbica del material vegetal influyen en la conductividad térmica. Otros autores también afirman que los procesos de pretratamiento que eliminan parcialmente la

hemicelulosa de los materiales vegetales tienden a generar mejores propiedades térmicas (George et al., 2016). Los resultados, expuestos en Tabla 6, corresponden en parte a una tendencia ya discutida en otros estudios. Los autores observaron un aumento de la conductividad térmica en paralelo con la densidad (Collet y Pretot, 2014; Nguyen et al., 2016), que suele ocurrir también en paralelo con un aumento de la resistencia mecánica (Elfordy et al., 2008; Nguyen et al., 2010). En las series FSL y CSL que poseen densidades iguales, la resistencia a la compresión aumenta en paralelo con la conductividad térmica, mientras que en las series FSH y CSH, estas tendencias se confirman con la conductividad térmica y la resistencia a la flexión, pero no con la resistencia a la compresión. Las medidas que se muestran en la Tabla 7 confirman la correlación de densidad y conductividad térmica con la mayoría de los aglutinantes utilizados en los hormigones de cáñamo referidos.

**Tabla 6:** Densidades, conductividades térmicas y calor específico de hormigones de cáñamo aglutinados con geopolímeros de arcilla frente a sus resistencias mecánicas medias.

<i>serie</i>	<i>densidad seca (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>conductividad térmica <math>\lambda</math> (W/m K)</i>	<i>calor específico C (J/Kg K)</i>	<i>C.V. (%) de calor específico</i>	<i>resistencia a la compresión (MPa)</i>	<i>resistencia a la flexión (MPa)</i>
<b>FSL</b>	910	0.1504	1490 ± 80	4.69	2.68	2.18
<b>CSL</b>	910	0.1450	1660 ± 80	5.25	2.58	2.41
<b>FSH</b>	1060	0.1780	1470 ± 60	1.42	2.13	3.52
<b>CSH</b>	1110	0.1832	1520 ± 60	1.0	1.92	3.75

### 5.1.2. Resultados de calor específico

En ambos grupos de hormigones de cáñamo aglutinados con geo-polímeros de arcilla, los valores de calor específico (Tabla 6) manifiestan mejoras en las probetas con cáñamo preservado, especialmente en las series -L. Se observa un intervalo mayor entre los valores de FSL y CSL que en aquellos de FSH y CSH. Los resultados sugieren que la densidad tiene menos influencia sobre el calor específico que el proceso microbiológico durante la preservación en húmedo y que esta última es beneficiosa en este campo. Entre los compuestos ligeros que se muestran en Tabla 7, los hormigones de cáñamo aglutinados con geo-polímeros de arcilla muestran resultados superiores en su calor específico que, junto con sus conductividades térmicas moderadas, afectan muy positivamente a sus difusividades y efusividades térmicas. Una baja difusividad térmica y una alta efusividad térmica son la clave para abordar condiciones climáticas semiáridas severas y diversos microclimas mediterráneos entre otros, en donde se reivindican materiales de cambio de fase



almacenamiento de energía (Maalouf et al., 2014). Mientras que la efusividad térmica determina la capacidad de un material para intercambiar energía térmica con su entorno, la difusividad térmica es una medida para determinar con que rapidez se adapta la temperatura de un material a la temperatura del entorno. En ambos casos, los composites hechos con cáñamo preservado en húmedo dan mejor resultado que aquellos elaborados con cáñamo fresco, aunque todos los materiales estudiados en la presente investigación obtenían resultados significativamente mejores en este contexto que la mayor parte de hormigones de cáñamo referidos en Tabla 7.

#### ***5.1.4. Permeabilidad al vapor de agua***

Tabla 8, muestra la incidencia de ganancia de peso en  $\text{g/m}^2 \times 24$  horas de las probetas, que se someten al ensayo de permeabilidad al vapor de agua. Los hormigones aglutinados con geo-polímeros de arcilla exhiben instancias muy similares de ganancia de peso media entre 7,04 y 7,57  $\text{g/m}^2 \times 24$  horas para tres de las series de probetas, con la excepción de la serie CSL, con cáñamo preservado, que alcanzó un valor más elevado de 8,36  $\text{g/m}^2 \times 24$  horas. Las mediciones de la permeabilidad al vapor de agua indicaron una ganancia de peso aparentemente mayor en las muestras de hormigón de cáñamo-tierra-cal que en los hormigones aglutinados con geo-polímeros de arcilla y la diferencia entre los dos materiales de cáñamo es muy evidente.

Restauración y rehabilitación de edificios y bioconstrucción con morteros ligeros aditivados con fibras vegetales

**Tabla 7:** Densidades y propiedades térmicas de hormigones de cáñamo con diferentes aglutinantes, que contienen cañamiza o materiales del tallo íntegro (~), encontrados en la literatura (CL = cal hidratada; NHL = cal hidráulica natural; f. = cáñamo fresco; c. = cáñamo preservado en húmedo), comparado con los resultados del presente estudio (p.e.).

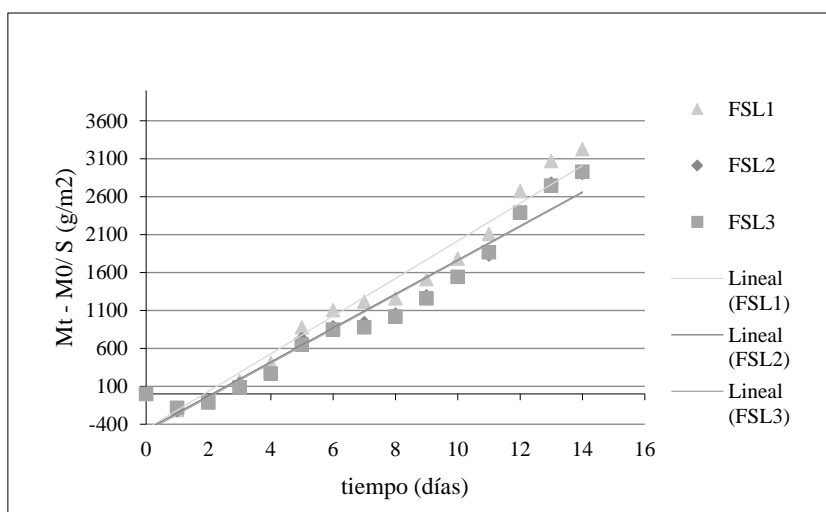
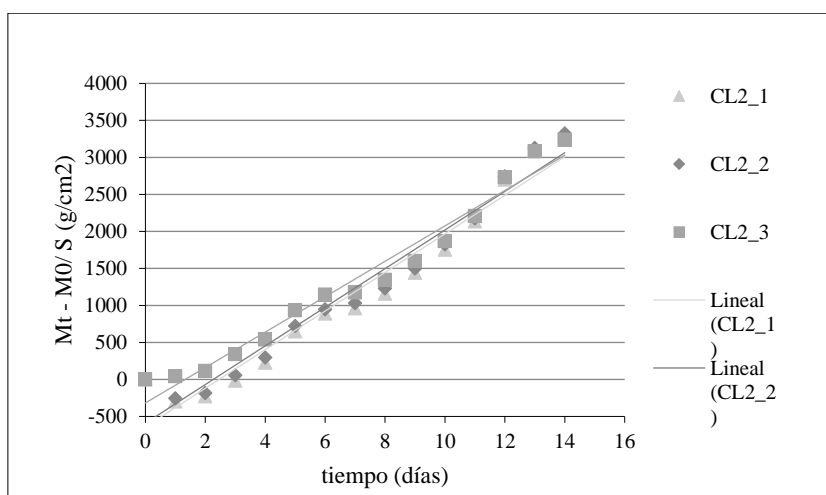
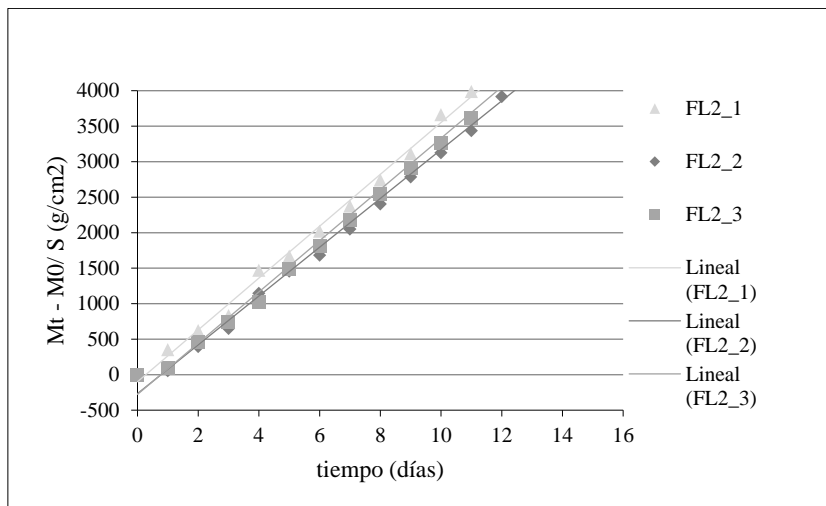
aglutinante	densidad (kg/m <sup>3</sup> ) hormigones obtenidos por compactado o prensado (=) con cañamiza o materiales del tallo íntegro (~)	conduc- tividad térmica (W/mK)	calor específico (J/kgK)	referencia	difusi- vidad térmica (m <sup>2</sup> /s) (ensayada por el autor ( <sup>a</sup> ) o calculada)	efusividad térmica (J/m <sup>2</sup> Ks <sup>1/2</sup> ) (calculada)
CL	413	0,1	1000	(Biagotti et al., 2004)	2,50 x 10 <sup>-7</sup>	200
	298.1	0,094	333	(De Bruijn y Johansson, 2013)	2,82 x 10 <sup>-7</sup> ( <sup>a</sup> )	96,59
	394.8	0,105	385	(De Bruijn y Johansson, 2013)	2,74 x 10 <sup>-7</sup> ( <sup>a</sup> )	126,33
	300 (=)	0,07	1700	(Technichanvre, 2020)	1,37 x 10 <sup>-7</sup>	188,94
CL + aditivo puzolánico	508	0,13	1627	(Reilly et al., 2019)	1,57 x 10 <sup>-7</sup>	327,79
NHL	450	0,11	470	(Florentin et al., 2017)	5,20 x 10 <sup>-7</sup>	152,52
tierra estabilizada	410.28-577.41			(Mazhoud et al., 2017)		
	1078.5(~)-1187.81(~)			(Brümmer et al., 2018)		
	1054.34-1124.14			(Brümmer et al., 2018)		
	1100 (=)	0,185	1113	(Cannabric, 2020)	1,54 x 10 <sup>-7</sup>	475,92
geo-polímero de arcilla	1060 (~) f.	0,178	1470	(p.e.)	1,14 x 10 <sup>-7</sup>	526,65
	1110 (~) c.	0,183	1520	(p.e.)	1,08 x 10 <sup>-7</sup>	555,66
	910 (~) f.	0,150	1490	(p.e.)	1,11 x 10 <sup>-7</sup>	450,98
	910 (~) c.	0,145	1660	(p.e.)	0,96 x 10 <sup>-7</sup>	468,01
cemento de MgO	1040-1110	0,07-0,08		(Kidalova et al., 2011)		
	1040-1150	0,11-0,12		(Številova et al., 2012)		
sol silicato	175	0,052	1050.28	(Hussain et al., 2019)	2,83 x 10 <sup>-7</sup>	97,76
	200	0,053	763	(Hussain et al., 2019)	3,47 x 10 <sup>-7</sup>	89,93
	240	0,057	782,71	(Hussain et al., 2019)	3,03 x 10 <sup>-7</sup>	103,48
almidón	134	0,074	1281	(Bourdot et al., 2017)	4,30 x 10 <sup>-7</sup>	112,6
	141	0,065	1288	(Bourdot et al., 2017)	3,60 x 10 <sup>-7</sup>	108,9
	126	0,067	1279	(Bourdot et al., 2017)	4,14 x 10 <sup>-7</sup>	103,7
	142	0,063	1264	(Bourdot et al., 2017)	3,51 x 10 <sup>-7</sup>	107

**Tabla 8:** Tasas de transmisión de vapor de agua de las series de hormigón de cáñamo aglutinadas con geopolímeros de arcilla (FSL, CSL, FSH, CSH) y tierra-cal (FL y CL).

<b>Tipo de hormigón</b>	<b>Tasa de transmisión de vapor de agua</b> (g/m <sup>2</sup> x 24 horas) coeficiente de permeabilidad simplificado a 20°		
	<i>medidas individuales</i>	<i>valores medios</i>	<i>desviación típica</i>
<b>FL</b>	16,84	16,09	1,13
	14,79		
	16,64		
<b>CL</b>	12,03	11,07	1,33
	11,64		
	9,56		
<b>FSL</b>	8,38	7,24	0,09
	8,26		
	6,22		
<b>CSL</b>	9,63	8,36	1,56
	8,83		
	6,62		
<b>FSH</b>	6,2	7,57	1,62
	9,36		
	7,15		
<b>CSH</b>	4,65	7,04	2,07
	8,44		
	8,02		

La figura 16 muestra el aumento de masa por unidad de área ( $\Delta M/S$ ) en función del tiempo (t) de 3 probetas de cada tipo de hormigón durante la prueba de permeabilidad al vapor de agua. La curva de FL muestra un declive más pronunciado que CL y los materiales aglutinados con geopolímeros de arcilla. De hecho, se observa un comportamiento de aumento de masa muy similar en las curvas de todos los hormigones aglutinados con geopolímeros de arcilla. Ambas series con importante contenido de tierra, de 20% o más en volumen (FSH y CSH; FL y CL), mostraron una mayor tasa de transmisión de vapor de agua cuando se elaboraron con cáñamo fresco. Aquellas, elaboradas con cáñamo fresco, también lograron densidades más bajas que las elaboradas con cáñamo preservado en húmedo. Al igual que lo exponen otros autores, la difusión del vapor a través de un hormigón depende por un lado de las características microestructurales, especialmente el tamaño y la forma de poros (Quenard y Sallee, 1992), y de otro lado de los macro poros del hormigón de cáñamo, que se reducen como resultado de una mejor compactación (Nguyen et al., 2010). Este hallazgo sugiere que las mezclas de mayor contenido de tierra y viscosidad alcanzan una mejor compactación con cáñamo preservado, lo que conduce a una matriz más densa, que a su vez favorece la disposición de las partículas y reduce la permeabilidad al vapor de agua. Por otra parte, en la serie FSL y CSL, de menor viscosidad, que logró las mismas densidades

secas con ambos materiales de cañamo, se pudo observar una mayor tasa de transmisión de vapor de agua con el cañamo preservado en húmedo (Tabla 8).



Restauración y rehabilitación de edificios y bioconstrucción con morteros ligeros aditivados con fibras vegetales

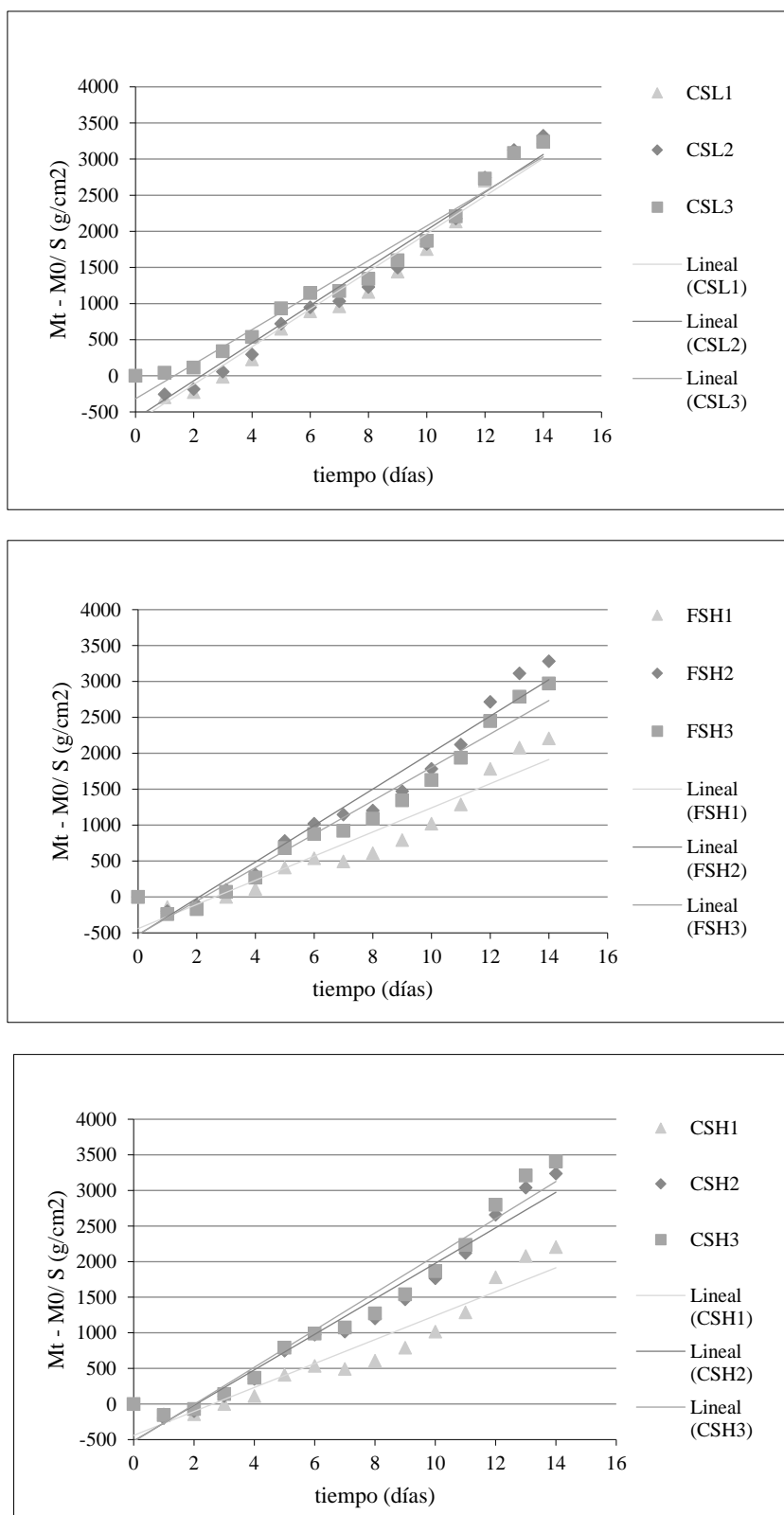


Figura 16: Aumento medio de masa por unidad de área ( $\Delta M/S$ ) en función del tiempo ( $t$ ) durante el ensayo de permeabilidad al vapor de agua en los hormigones de cáñamo FL y CL (elaboradas con tierra y cal) y FSL, CSL, FSH, CSH (aglutinadas con geopolímeros de arcilla).

### 5.1.5. Absorción por capilaridad

La Figura 17 muestra las ganancias porcentuales en peso durante la absorción de agua por capilaridad, respecto al peso inicial de cada grupo de probetas. El gráfico indica que las probetas de cáñamo-tierra-cal tienen una curva de absorción porcentual que aumenta mucho más rápidamente que la de las probetas aglutinadas con geo-polímeros de arcilla. Las probetas FL y CL llegan a un aumento porcentual de peso de > 44 % en 72h, con curvas prácticamente paralelas, independiente del material vegetales utilizado (cáñamo fresco y preservado en húmedo). El siguiente grupo más absorbente (FSL y CSL) llega a > 34% y > 33% de ganancias porcentuales en peso respectivamente mientras FSH y CSH a > 32% y > 29%. En todos los grupos de probetas los materiales elaborados con cáñamo fresco llegan a absorber más agua en el mismo periodo de tiempo, aunque las diferencias finales son mínimas y las curvas ascienden prácticamente paralelas con una más contundente diferencia entre las series -F y -C de los geo-poliméricas con más contenido de tierra y menor contenido de silicato de sodio (FSH y CSH).

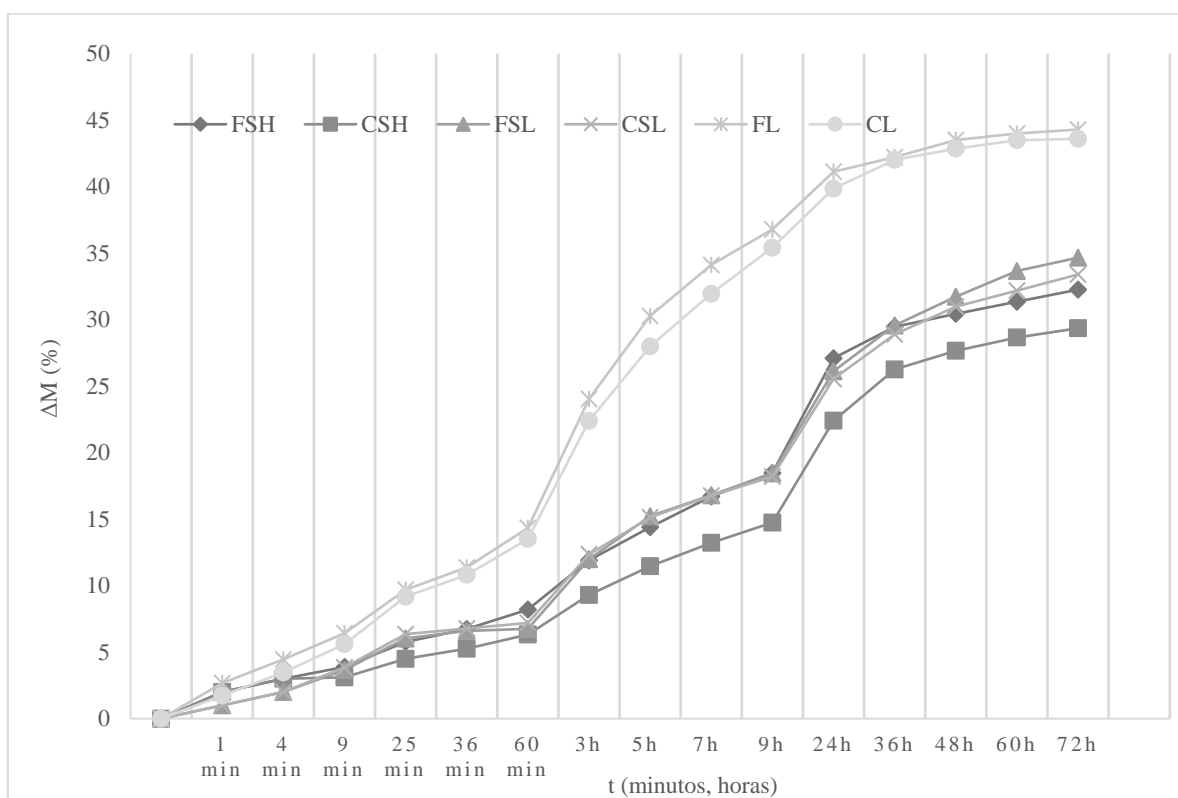


Figura 17: Curvas de absorción de agua por capilaridad. Ganancia porcentual media en peso ( $\Delta M$ ) en % de 3 muestras (40 x 40 x 160 mm) de cada tipo (FSH y CSH; FSL y CSL; FL y CL) durante la absorción en condiciones de 20° C de temperatura y 60% de humedad relativa.

### 5.1.6. Porosimetría de intrusión de mercurio (MIP)

Los datos de porosidad total accesible ( $P_a$ , en %) exponen los valores obtenidos en dos muestras de cada tipo de probeta, incluyendo los valores medios (Tabla 9). En este ensayo, la mayor densidad de los especímenes CSH, elaborados con cáñamo preservado en húmedo da como resultado una porosidad accesible media más baja, de 45,73%, comparado con la serie FSH con cáñamo fresco que alcanzan un valor de 50,08%. En la serie con mayor contenido de silicato y menor contenido de tierra (FSL y CSL), la porosidad abierta es claramente superior con los especímenes CSL (cáñamo preservado en húmedo) que alcanzan el 57.77%, comparado con el 48.73% que alcanzan las probetas FSL con cáñamo fresco.

Los resultados confirman que las muestras siguen la misma tendencia, observada con las correspondientes probetas del ensayo de permeabilidad al vapor de agua: las mezclas de mayor contenido de tierra y viscosidad alcanzan una mejor compactación con cáñamo preservado, lo que conduce a una matriz más densa, que a su vez favorece la disposición de las partículas y reduce la porosidad accesible. En la serie FSL y CSL, elaborada con otra relación de tierra-silicato de sodio, que logró las mismas densidades secas con ambos materiales de cáñamo, los resultados sugieren que el uso de material preservado en húmedo aumenta la porosidad accesible (Tabla 4). A diferencia, una mayor densidad lograda en las probetas CSH (con cáñamo preservado en húmedo) comparado con FSH (con cáñamo fresco) anuló la ganancia de porosidad accesible sugerida como resultado del proceso microbiológico durante la conservación en húmedo. También se puede confirmar que las distintas proporciones cáñamo-aglutinante produjeron menos diferencias en las probetas elaborados con cáñamo fresco que en aquellas, elaboradas con cáñamo preservado en húmedo.

Tabla 9: Porosidad accesible ( $P_a$ ) de las probetas aglutinadas con geo-polímero de arcilla (FSL, CSL, FSH, CSH) en %. Resultados individuales y medios, obtenidos con dos muestras por tipo de hormigón.

	<i>Pa 1 (%)</i>	<i>Pa 2 (%)</i>	<i>Pa (%) media</i>
<i>FSH</i>	52,47	47,69	50,08
<i>CSH</i>	42,47	48,38	45,43
<i>FSL</i>	41,86	55,60	48,73
<i>CSL</i>	51,40	64,33	57,77

Cuando se comparan los resultados de hormigones aglutinados con geo-polímeros de arcilla, con aquellos de hormigones de cáñamo-cal (Tabla 5), obtenidos por otros autores, se evidencia que los de cáñamo-cal alcanzan una porosidad accesible de más del 70%. Sin embargo, solo se dispone de datos para una pequeña cantidad de productos que poseen densidades más bajas que las probetas del presente estudio y que se elaboraron con cañamiza. La cañamiza tiene una estructura de poros de mayor tamaño que las fibras de cáñamo (Kymäläinen et al., 2001) lo que podría explicar los valores más bajos de porosidad accesible, obtenidos con materiales que emplean el agregado del tallo íntegro, comparado con los materiales formulados con cañamiza.

No obstante, se confirma que también en las muestras de cañamiza-cal, la densidad no es el único parámetro que influye en la porosidad accesible y, que dos de las formulaciones, que se exponen en la Tabla 10, se encuentran en el rango de porosidad accesible del presente estudio, aunque poseen densidades mucho menores. La formulación CSL de 910 kg/m<sup>3</sup> alcanzó con 57,77% la mayor porosidad accesible entre los hormigones de cáñamo aglutinados con geo-polímero de arcilla.

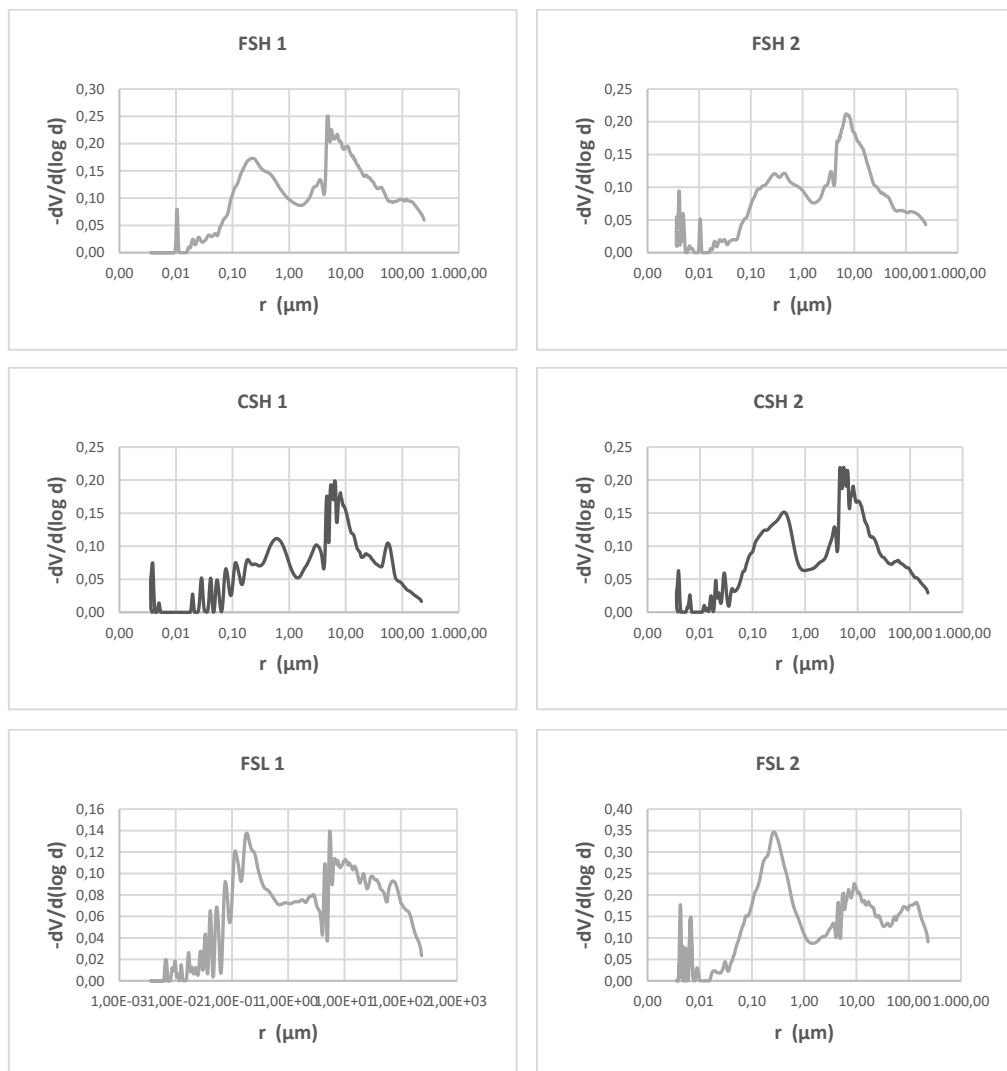
Tabla 10: Porosidades accesibles medias (Pa) de los hormigones de cáñamo aglutinados con geopolímeros de arcilla del presente estudio (p.e.) en comparación referencias de otros hormigones de cáñamo, elaboradas con cales.

<i>agregado de cáñamo</i>	<i>aglutinante</i>	<i>densidad media (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>porosidad accesible media Pa (%)</i>	<i>referencia</i>
<i>cañamiza (seca)</i>	<i>cales CL + NHL</i>	<i>440</i>	<i>70,6</i>	<i>(Collet, 2004)</i>
<i>cañamiza (seca)</i>	<i>cales CL + NHL</i>	<i>717</i>	<i>65,6</i>	<i>(Lühr et al., 2018)</i>
<i>cañamiza (seca)</i>	<i>cales CL + NHL</i>	<i>805</i>	<i>64,9</i>	<i>(Collet, 2004)</i>
<i>cañamiza (seca)</i>	<i>cales CL + NHL</i>	<i>664</i>	<i>64,4</i>	<i>(Collet et al., 2008)</i>
<i>cañamiza (seca)</i>	<i>cales CL + NHL</i>	<i>405</i>	<i>64,1</i>	<i>(Tran Le et al., 2010)</i>
<i>cañamiza y fibra (preservada en húmedo)</i>	<i>geopolímero de arcilla</i>	<i>910</i>	<i>57,77</i>	<i>(p.e.)</i>
<i>cañamiza (seca)</i>	<i>cales CL + NHL</i>	<i>487</i>	<i>54,9</i>	<i>(Rahim et al., 2016)</i>
<i>cañamiza y fibra (fresca)</i>	<i>geopolímero de arcilla</i>	<i>1060</i>	<i>50,08</i>	<i>(p.e.)</i>
<i>cañamiza (seca)</i>	<i>cales CL + NHL</i>	<i>478</i>	<i>49,9</i>	<i>(Rahim et al., 2016)</i>
<i>cañamiza y fibra (fresca)</i>	<i>geopolímero de arcilla</i>	<i>910</i>	<i>48,73</i>	<i>(p.e.)</i>
<i>cañamiza y fibra (preservada en húmedo)</i>	<i>geopolímero de arcilla</i>	<i>1110</i>	<i>45,43</i>	<i>(p.e.)</i>

Los tres picos principales de las curvas de distribución del tamaño de poro (PSD) (Figura 18) de los materiales aglutinados con geo-polímeros de arcilla (FSL y CSL; FSH y



CSH) oscilan entre 0,1 y 100  $\mu\text{m}$  y representan principalmente radios de poro de 0,1-1,0  $\mu\text{m}$ , 5-10  $\mu\text{m}$  y 50-100  $\mu\text{m}$ , cuyos volúmenes tienen la influencia más decisiva en la porosidad accesible, y que representan en cada serie más o menos un 30 % (Figura 19). Al comparar estos picos con los resultados obtenidos por (Collet, 2004) en hormigones de cáñamo-cal, con densidades comprendidas entre 405-805  $\text{kg}/\text{m}^3$ , el pico principal de estas formulaciones se encuentra entre 0,45 y 0,72  $\mu\text{m}$  y en un 70% los radios de poro están en la región de tamaño inferior, de 0,18-4,53  $\mu\text{m}$ . Esta es una tendencia que no se encuentra con los hormigones arcillosos, que también comprenden un número importante de poros de 10-100  $\mu\text{m}$  (Figura 18, Figura 19).



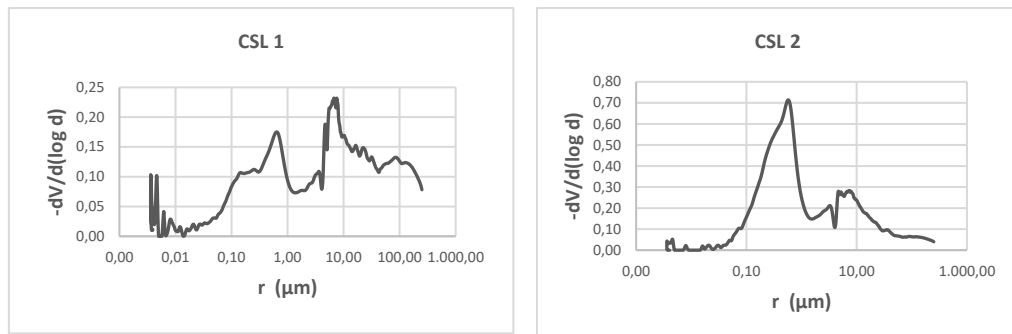


Figura 18: Curvas de distribución del tamaño de los poros (PSD) de las probetas de hormigón de cáñamo aglutinados con geo-polímeros arcilla (FSL, CSL, FSH, CSH) resultantes de dos muestras por hormigón. El radio ( $r$ ) de los poros se representa en función del volumen incremental de mercurio introducido.

Cuando las curvas de PSD de los hormigones FSH y CSH se comparan simultáneamente, se notan varios picos secundarios, que van desde menos de  $0,01 \mu\text{m}$  a  $0,1 \mu\text{m}$ , con un número ligeramente mayor de picos en las muestras con cáñamo conservado húmedo. Otro pico secundario en la región de macro poros es más evidente en las probetas elaboradas con cáñamo fresco (FSH) que en aquellas con cáñamo preservado en húmedo (CSH). Esta tendencia es aún más evidente en las curvas PSD de la serie FSL y CSL. Se puede concluir que los tamaños de poros de todos los hormigones, elaborados con cáñamo fresco, se desplazan ligeramente a la región de microporos de  $<0,01 \mu\text{m}$ , mientras que aquellos radios de las probetas, elaboradas con cáñamo preservado en húmedo se desplazan ligeramente a la región de macro poros de  $>100 \mu\text{m}$ . Aunque el análisis MIP no toma en cuenta la morfología de los poros (Collet, 2004), los hallazgos explican por qué los materiales con cáñamo, preservado en húmedo, muestran tasas de porosidad accesible más altas en los hormigones FSL y CSL (Tabla 10, Figura 19), que alcanzaron las mismas densidades con ambos tipos de cáñamo.

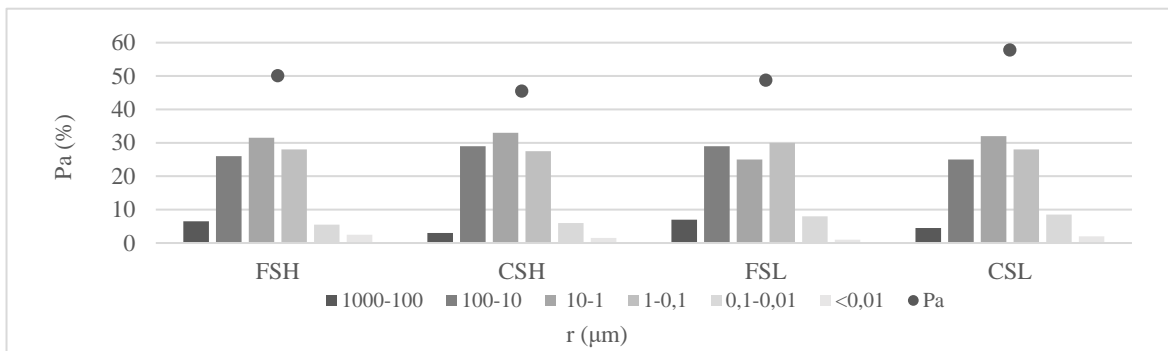


Figura 19: Distribución porcentual de radios de poro ( $r$ ) de hormigones de cáñamo aglutinados con geo-polímeros de arcilla (FSL y CSL; FSH y CSH) y porosidad accesible ( $Pa$ ) de estas series.

### **5.1.7. Resistencia mecánica**

La lixiviación de algunos componentes durante el estado húmedo de los hormigones vegetales, que pudieran afectar a su rendimiento mecánico se intentó afrontar por otros autores mediante enriamiento previo al agua del material vegetal utilizado (Di Candilo et al., 2000), lavado (Diquélou et al., 2015), pretratamiento químico (Sedan et al., 2007; Terpácová et al., 2012; Umurigirwa Benitha et al., 2015) o mineralización de los agregados (Balčiūnas et al., 2015). Por otra parte, el presente estudio añade resultados sobre materiales, elaborados con agregados, sometidos a la fermentación anaeróbica en húmedo, contrastándolos con materiales elaborados con cáñamo fresco.

Con resultados de 2,13 MPa y 1,92 MPa (Tabla 6) las resistencias a la compresión de las series FSL y CSL son más frágiles que aquellas que corresponden a las series FSH y CSH, pero no significativamente diferentes, alcanzando los últimos 2,68 MPa y 2,58 MPa. Los resultados, que son claramente diferentes, son aquellos de resistencia a la flexión, dado que con 3,52 MPa y 3,75 MPa la resistencia a la flexión es mayor que la compresión en las series FSL y CSL. Este dato es excepcional, comparando con los resultados expuestas en Tabla 7, obtenidos por otros investigadores, incluyendo aquellos estudios que investigaron agregados secos, del tallo completo (Brümmer et al., 2018). Con una resistencia a la flexión de 2,18 MPa y 2,41 MPa esto no se aplica a las series FSH y CSH (mayor contenido de arcilla y menor contenido de silicato de sodio).

Los resultados demuestran que la resistencia a la flexión en ambas series aglutinados con geo-polímeros de arcilla es mayor si las probetas se han elaborado con cáñamo preservado en húmedo, además la resistencia a la flexión es superior si las probetas son elaboradas con mayores tasas de silicato de sodio (-L). No obstante, la resistencia a la compresión es mayor en la serie (-H) que lleva una tasa más baja en silicato de sodio que la serie (-L). Las probetas elaboradas con cáñamo fresco dan mejores valores a compresión en ambas series por el contrario dan peores valores a la flexión (Tabla 6).

Las resistencias mecánicas a la compresión de las probetas FL y CL (elaborados con tierra estabilizada con cal) han sido indetectables con los canales de trabajo habituales, mientras que su resistencia a la flexión resultó extremadamente frágil (Tabla 6) comparada con todas las probetas aglutinadas con geo-polímeros de arcilla. Los aglutinantes de tierra-

cal no han mostrado una cohesión satisfactoria de los agregados frescos y preservados en húmedo. Sin embargo, otros estudios alcanzaron resultados satisfactorios con hormigones elaborados con cáñamo, seco, aglutinados con tierra y cal (Kidalova et al 2011; Brümmer et al., 2018), tanto con cómo sin el añadido de fibras.

**Tabla 11:** Densidades secas y resultados mecánicos, obtenidos con 3 probetas (40x40x160 mm) de cada hormigón, aglutinado con geo-polímeros de arcilla (FSL y CSL; FSH y CSH) o tierra-cal (FL y CL).

tipos de hormigón	densidades secas (kg/m <sup>3</sup> )	valores medios (kg/m <sup>3</sup> )	resistencia a la flexión (MPa)	valores medios (MPa)	resistencia a la compresión (MPa)	valores medios (MPa)
FSH	1060		1,86		2,97	
	1070	1060	2,03	2,18	2,58	2,68
	1060		2,64		2,50	
	1100		2,13		2,34	
CSH	1120	1110	2,62	2,41	2,81	2,58
	1110		2,47		2,59	
	900		3,33		2,19	
FSL	890	910	3,51	3,52	2,19	2,13
	930		3,72		2,00	
	890		3,11		1,88	
CSL	950	910	4,28	3,75	1,94	1,92
	900		3,87		1,94	
	980					
FL	990	990		< 0,02		no detectada
	1000					
	1010					
CL	990	1010		< 0,02		no detectada
	1030					

Tal y como expone la Tabla 12, los valores de resistencia a la compresión de los hormigones, aglutinados con geo-polímeros de arcilla, solo son superados por aquellos de cemento MgO o bien cemento Portland y pretratamiento químico de la cañamiza, mientras que todas las resistencias a la flexión de los hormigones del presente trabajo, aglutinados con geo-polímeros de arcilla, mejoran significadamente los resultados encontrados en la literatura.

Los resultados confirman el rendimiento prometedor de la tecnología basada en compuestos geo-poliméricos (Huiskes et al., 2016), como alternativa factible al cemento portland (Duxson et al., 2007). Adicionalmente, el potencial mecánico de las formulaciones con fibras apunta a beneficiarse del hecho de que las fibras de cáñamo contienen un porcentaje menor en hemicelulosa que la cañamiza (Stevulova et al., 2014). Esto puede

favorecer las condiciones de fraguado, comparado con hormigones de cáñamo corrientes contrastados en Tabla 12.

**Tabla 12:** Densidades y propiedades mecánicas de hormigones de cáñamo con diferentes aglutinantes, que contienen cáñamo o cáñamo y fibras (~), encontrados en la literatura (CL = cal hidratada, NHL = cal hidráulica natural; PC = cemento Portland; NC = cemento natural), en comparación con los resultados del presente estudio (p.e.).

<i>aglutinantes</i>	<i>densidades</i> (kg/m <sup>3</sup> ) <i>hormigones de cáñamo compactados o proyectados (*) con cañamiza o cañamiza y fibras (~)</i>	<i>resistencia a la compresión</i> (MPa)	<i>resistencia a la flexión</i> (MPa)	<i>referencia</i>
<i>CL + aditivo pozoalánico</i>	549,7-604,5	0,29-0,39 0,77-1,14	0,06-0,09	(Walker et al., 2014) (Dinh et al., 2015)
<i>aglutinante formulado (CL + NHL o PC y aditivo pozoalánico)</i>	790-1100 587-733 (~) 391-485 (*) 430-607 (*)	0,30-0,73 0,15-0,83 0,18-0,80	0,83-1,21	(Kidalova et al 2011) (De Bruijn et al., 2009) (Elfordy et al, 2008) (Elfordy et al, 2008)
<i>NHL</i>	450	1,97		(Florentin et al., 2017)
<i>NC</i>	422,1-488,88	0,32-0,46		(Niyigena et al., 2016)
<i>CL + NHL</i>		0,53		(De Bruijn, 2008)
<i>PC</i>		0,55-2,14		(De Bruijn, 2008)
<i>PC + pretratamiento químico del material orgánico</i>	819-1055	1,79-8,03		(Balčiūnas et al., 2015)
<i>yeso</i>		0,71		(De Bruijn, 2008)
<i>tierra</i>	373,71-509,48	0,39-0,48		(Kidalova et al 2011)
<i>tierra estabilizada</i>	410,28-577,41 1078,5-1187,81 (~) 1054,34-1124.14 990-1010 (~)	0,47-0,68 1,26-1,33 1,18-1,20 no detectada	0,55-0,58 0,43-0,45 < 0,02	(Kidalova et al 2011) (Brümmer et al., 2018) (Brümmer et al., 2018) (p.e.)
<i>geo-polímero de arcilla</i>	1060-1110 (~) 910 (~)	2,58-2,68 1,92-2,13	2,18-2,41 3,52-3,75	(p.e.) (p.e.)
<i>cemento MgO</i>	1040-1110 1040-1150	1,86-2,73 2,73-5,20		(Kidalova et al 2011) (Stevulova et al., 2012)
<i>sol silicato</i>	175-240	0,49-1,05		(Hussain et al., 2019)
<i>almidón</i>	182-188,30 163,60-174,30	0,57-0,63	0,03-0,13	(Bourdot et al., 2017) (Le et al., 2015)

### 5.1.8. Ultrasonidos

En cuanto a los diferentes grupos de muestras aglutinados con geo-polímeros de arcilla y tierra-cal, todas las muestras indicaron valores de transmisión de pulsos ultrasónicos comprendidos entre 750 m/s y 1700 m/s (Sáez-Pérez et al., 2021). Aunque las velocidades eran más altas en todas las muestras (-C), elaborados con cáñamo preservado en húmedo, la desviación estándar con cáñamo fresco (-F) resultó bastante insignificante. Los bajos valores

de velocidad de transmisión de pulsos ultrasónicos detectados se relacionan con un alto nivel de porosidad, propia en primer lugar de los agregados vegetales, pero también de los aglutinantes. En cuanto a la repercusión de los últimos, los valores de transmisión de pulsos ultrasónicos de los hormigones elaborados con tierra-cal mostraron valores más bajos que aquellos, elaborados con geo-polímeros de arcilla.

#### **5.1.9. Color de los agregados vegetales**

El estudio de determinación de color que forma parte de (Sáez-Pérez et al., 2021) confirma un oscurecimiento de los agregados de cáñamo (-C) durante la preservación de 6 meses en húmedo, también detectado visualmente por otros autores (Lühr et al., 2018). Los resultados ilustrados en (Sáez-Pérez et al., 2021) indican los parámetros cromáticos que se refieren al espacio de color tridimensional, en donde la luminosidad  $L^*$  va de negro a blanco,  $a^*$  de rojo a verde y  $b^*$  de azul a amarillo. El gráfico indica que el color de cáñamo preservado se aleja de la zona amarilla-verdosa, en donde se sitúa el cáñamo fresco, hacia la zona azulada y su luminosidad baja de la zona media o semioscura en la cual se sitúa el cáñamo fresco (alrededor de 45%) a la zona negruzca (alrededor de 10%).

#### **5.1.10. Grosor de las fibras vegetales**

La ilustración gráfica que representa el ancho de fibras (Sáez-Pérez et al., 2021), como resultado del análisis acumulativo de imágenes escaneadas con FiberShape, indica que los agregados vegetales preservados (-C) engrosaron durante el proceso de fermentación anaeróbica, mientras experimentaron una modificación proporcional de los polímeros estructurales que componen las partículas (Lühr et al., 2018; Kastiukas et al., 2015), es decir un ligero aumento de celulosa y una reducción de hemicelulosa y lignina. Al mismo tiempo, se observó que las partículas más pequeñas disminuyeron comparado con cáñamo fresco (-F). Ambos fenómenos pueden repercutir en varias propiedades físicas de los hormigones dado que la distribución del tamaño de partículas es decisiva (Bourdot et al., 2017; Stevulova et al., 2012) para su disposición tras el compactado del hormigón fresco y el área interfacial de contacto entre el agregado y el aglutinante.

#### **5.1.11. Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX)**

Las imágenes, detectadas mediante el rastreo con microscopía electrónica de barrido SEM-EDX, confirman (igual que las imágenes escaneadas con FiberShape) un aumento de grosor de las fibras del tipo de cáñamo preservado (-C) en todas las formulaciones, independiente del aglutinante utilizado, estas trazas de fibra pueden medir hasta más de 100  $\mu\text{m}$  de espesor.

En cuanto a la morfología de las tres diferentes formulaciones de hormigón de cáñamo, tratadas en (Sáez-Pérez et al., 2021), se localizaron una gran cantidad de mesoporos bien interconectados en la mayoría, incluso algunos macro poros, resultantes de la disposición de las partículas vegetales, especialmente en la serie de geopolímeros de arcilla, elaborada con un mayor porcentaje de silicato de sodio. De acuerdo con (Sáez-Pérez et al., 2021) los poros de los hormigones evidencian una gran variedad de tamaños y formas, como cilíndricas, de caverna y de cuello de botella. La apariencia de texturas agrietadas es típica de oligómeros inorgánicos en cuanto se someten a un periodo de secado en un horno. El análisis de las dos series de hormigones aglutinados con geo-poliméricos muestra un favorable desarrollo con los agregados utilizados que se manifiesta en una composición apropiada de silicato de sodio y tierra con filosilicatos tal como elementos característicos del aglutinante que contiene importantes cantidades de minerales de silicato y sodio.

Por otra parte, la serie de hormigón aglutinada con tierra-cal es rica en elementos que se encuentran típicamente en los minerales de filosilicato, junto con trazas del aglutinante de cal hidráulica natural como calcio, sin embargo, evidencia fisuras y fibras hinchadas.

## ***5.2. Resultados experimentales con hormigones, elaborados con cañamiza***

Los resultados que se exponen a continuación están relacionados con las probetas experimentales tratadas en la publicación titulada: “Optimization of lime and clay-based hemp-concrete wall formulations for a successful lime rendering” (Arizzi et al., 2018).

### ***5.2.1. Secado de las probetas de hormigón de cáñamo***

Las curvas de secado exponen una contundente diferencia entre bloques de hormigón de cáñamo del tipo autoportante y portante siendo la pérdida de peso durante el secado proporcional a la densidad final de los hormigones (Arizzi et al., 2018). Mientras los hormigones menos densos perdieron entre el 26 y el 31% de agua en las primeras dos

semanas, los hormigones del tipo más denso de cada serie solo perdieron el 16-22%. El hecho de que los dos hormigones aglutinados con cal resultaran con mayores variaciones de densidad que aquellos elaborados con tierra estabilizada se refleja proporcionalmente en sus curvas de secado y su pérdida de peso porcentual. Esta pérdida alcanza 16 y 31% para las muestras aglutinadas con cal y 22 y 26% para aquellas elaboradas con tierra estabilizada.

### ***5.2.2. Porosimetría de intrusión de mercurio (MIP)***

Las investigaciones de la porosimetría de intrusión de mercurio de las muestras de control de los hormigones de cáñamo, conducidas por (Arizzi et al., 2018), mostraron que las formulaciones del tipo portante, elaboradas con arena, tienen una macro porosidad de tan solo 10-12% mientras que las muestras hechas sin arena alcanzaron 17-18%.

### ***5.2.3. Endurecimiento y fases minerales de los hormigones de cáñamo (XRD, ESEM)***

Los resultados por XRD indican los grados de carbonatación e hidratación de las muestras de hormigón a través de las fases minerales encontradas en las muestras. Por su parte, la microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) identifica las fases minerales a través de la morfología de los cristales de carbonato cálcico, con tamaños de hasta 100  $\mu\text{m}$ . Mediante estas tecnologías se ha podido observar que la aplicación de revestimientos después de tan solo dos semanas limita o ralentiza y el proceso de carbonatación de los bloques de cáñamo elaborados con cal NHL mientras que en los bloques hechos con tierra estabilizada con cal NHL, la carbonatación no parece verse afectada tanto como el proceso de hidratación, independiente del tipo de cal utilizado en los revestimientos (Arizzi et al., 2018). En los bloques de cáñamo elaborados con cal NHL esto se manifiesta a través de la comparación del contenido porcentual de los tres polimorfos de carbonato de calcio en los límites de los bloques con los revestimientos y las muestras de control, no revestidas. En las muestras de control la calcita es predominante (80%) seguida por la vaterita (20%). Sin embargo, no se ha detectado aragonita. Por otra parte, la investigación revela que en los bloques revestidos pasadas 2 y 10 semanas la calcita sigue predominando, pero la vaterita disminuye a 9% y 15% respectivamente y además aparece un pequeño porcentaje de aragonita, de 9% y 5% respectivamente.



#### **5.2.4. Endurecimiento y fases minerales de los revestimientos (XRD, ESEM)**

La identificación de las fases minerales y la comparación de la altura de los picos en los patrones XRD de los revestimientos de control y de las muestras recolectadas de los bloques indica posibles desviaciones de la tendencia esperada, como son la carbonatación de la cal aérea (transformación de portlandita en calcita) y la hidratación de la cal hidráulica natural (reacción de los silicatos de calcio con agua para obtener hidratos de silicato de calcio) junto con una carbonatación de la misma (Arizzi et al., 2018). Mientras que los patrones XRD evidenciaron que las muestras de control estuvieron casi totalmente endurecidas, las muestras de revoco recolectadas de los bloques todavía presentaron cantidades bajas de portlandita y de silicato de calcio. El endurecimiento menos avanzado se manifestó en los revocos de dos semanas de cal CL, aplicada sobre los bloques de cáñamo autoportantes, amasados con tierra y cal. Dado la limitada resolución de XRD el estudio examinó algunas áreas de manchas oscuras en estas muestras con ESEM, detectando la presencia de cristales de aragonita, cuya formación es contribuida por algunos autores (Kawaguchi y Decho, 2002) a la acción de microorganismos.

#### **5.2.5. Determinación de color de los revestimientos**

De acuerdo con (Arizzi et al., 2018), los revocos cal aérea (CL) comenzaron a tomar un color amarillento a una temprana edad de secado mientras después de dos semanas de aplicación los revocos de cal hidráulica natural (NHL) aún mantenían su color natural. A excepción de aquellos revocos de cal CL, aplicados sobre los bloques autoportantes de cáñamo-cal tras 10 semanas de secado, todos los revocos de cal aérea adquirieron cambios cromáticos. Aunque ninguno de los revocos de cal NHL mostró diferencias visibles de color, independiente del tipo de bloque y tiempo de aplicación, el valor de luminosidad ( $L^*$ ) medido, disminuyó entre un 4% y un 12% en los revocos de cal aérea y entre un 2% y un 7% en los revocos de cal hidráulica natural, comparado con las muestras de control que se refleja en los valores de la tabla y los gráficos en (Arizzi et al., 2018). La mayor diferencia de color comparado con la muestra de control se encontró en todos los revocos de cal CL, aplicados después de 2 semanas. Por otro lado, en los revocos de cal NHL la variable era despreciable, excepto en los bloques de cáñamo con tierra y cal. El estudio reveló que el parámetro cromático  $a^*$  (de rojo a verde) aumenta entre un 3% y un 15% en los revocos de cal CL mientras tan solo entre un 2% y un 5% en los revocos de cal NHL y que el parámetro

cromático b\* (de azul a amarillo) incrementa entre un 0% y un 2% en los revocos de cal CL y entre un 0,2 y un 0,7% en los revocos de cal NHL.

### **5.2.6. Estudio microbiológico**

La mayoría de los microorganismos aislados en (Arizzi et al., 2018), coinciden con los hongos y bacterias álcali resistentes, identificados en un otro estudio sobre la durabilidad de hormigones de cáñamo (Arizzi et al., 2016), sometidos a diferentes contextos climáticos.

Además, el tipo de hongos y bacterias encontrados en los revocos de cal CL y cal NHL, aplicados sobre diferentes bloques de hormigón de cáñamo-cal o cáñamo-tierra-cal, coincide básicamente con las muestras de control, a excepción de *Aspergillus versicolor* que solo se localizó en la muestra de control de revoco de cal aérea y levadura que apareció en la muestra tomada pasado 10 semanas de del bloque autoportante de cáñamo-tierra-cal, revocado con mortero de cal aérea.

Mientras que en la muestra de control de cal aérea se aislaron no solo hongos, pero también dos tipos de bacterias (*Staphylococcus* y *Diplococci capsulado*), en la de revoco de cal hidráulica natural se aislaron solo hongos (dos especies diferentes de *Penicillium* y una de *Cladosporium*). Los mismos hongos, excepto una de las variedades de *Penicillium*, se reencontraron en los revocos retirados, aunque una nueva especie, no identificada, apareció sobre los revocos recolectados tras cualquiera de los tiempos de curado de ambos tipos de bloques elaborados con cal hidráulica natural.

## **6. Conclusiones**

Analizando investigaciones previas, el hormigón de cáñamo pretende reemplazar envolventes multicapa (térmico-estructurales) con un solo material autoportante y en casos singulares moderadamente portante. Responde además con gran adaptabilidad a una amplia gama de nuevas funcionalidades para la construcción ecológica y rehabilitación, sin comprometer la durabilidad de materiales que constituyen viviendas vernáculas. El estudio de las propiedades funcionales y medioambientales de los hormigones de cáñamo justificaba por ello importantes avances científicos y tecnológicos (Sáez-Pérez et al., 2020) a lo largo de las últimas tres décadas, comparado con otros vegetales de menor rendimiento. No obstante, la investigación dedicaba un mayor enfoque en la eficiencia energética del material

en un limitado contexto climático, mientras un menor enfoque en su posible independencia de una estructura de soporte. La optimización de sus características como material portante se vio en primer lugar limitado debido a los inconvenientes causados por la lixiviación de compuestos orgánicos (Sáez-Pérez et al., 2020). A la vez precisa precauciones para evitar contratiempos estético-funcionales (Arizzi et al., 2018) que limitan su rendimiento por daños morfológicas, microbiológicas o cromáticos. Entre las posibles soluciones investigados, pocos estudios llegaron a soluciones factibles y sostenibles en práctica para resolver estas limitaciones. Por otro lado, las investigaciones se limitaron básicamente a la cañamiza comercial, estudiando en menor grado agregados del tallo completo con un mayor contenido de fibras (Sáez-Pérez et al., 2021) que pudieran ser la clave para desarrollar compuestos con prestaciones físicas complementarias o más ventajosos que aquellas encontradas en soluciones anteriores.

### ***6.1. Conclusiones de resultados experimentales con hormigones vegetales, elaborados con materiales del tallo de cáñamo íntegro***

Las conclusiones que se exponen a continuación están relacionadas con los ensayos experimentales tratados de la publicación titulada: “EFFECT OF THE STATE OF CONSERVATION OF THE HEMP USED IN GEOPOLYMER AND HYDRAULIC LIME CONCRETES” (Sáez-Pérez et al., 2021) y ensayos complementarios con los mismos materiales.

Este trabajo permitió obtener resultados en hormigones de cáñamo a través de métodos de picado del tallo completo y preservación anaeróbica del material, comparado con cáñamo fresco preparado con el mismo método de recolección y picado. Ambos agregados se investigaron con aglutinantes geo-poliméricas de arcilla y tierra-cal.

Los resultados muestran que los hormigones geo-poliméricos alcanzan una capacidad portante moderada, ampliando así la gama de aplicaciones comparado con los hormigones con tierra-cal del presente estudio y hormigones de cáñamo-cal tradicionales, considerados autoportantes y dependientes de una estructura portante de madera que aumenta los costes y limita su aplicación en regiones con escasos recursos forestales.

A través del contenido natural de humedad de los agregados de cáñamo empleados, el uso de materiales del tallo completo y la elección de aglutinantes alternativos a la cal, los

geo-polímeros de arcilla permitieron la incorporación de importantes proporciones de material vegetal de entre 60,60 y 64,45%, que superan las proporciones de cáñamo, que se lograron emplear en los hormigones con tierra-cal elaborados con los mismos agregados (51,45%) y hormigones tradicionales elaborados con cañamiza. Con las formulaciones elaboradas con geo-polímeros de arcilla se ha conseguido por lo tanto disminuir la conductividad térmica y aumentar la tasa de efusividad térmica, en comparación con otros hormigones de cáñamo de un rango de densidad similar.

Al considerar el uso de materiales de cáñamo que contengan la humedad natural de la planta en el momento de cosecha, no fue necesario agregar agua a la mezcla de materiales aglutinadas con geo-polímeros de arcilla, favoreciendo la eficiencia hídrica en climas secos o contextos climáticos adicionales a aquellos de las regiones que dieron origen a la tecnología. Incluso los hormigones, aglutinados con tierra-cal, precisaron menos agua que otros hormigones de cáñamo encontrados en la literatura. No obstante, la pérdida porcentual de peso durante el secado de los hormigones, elaborados con agregados húmedos del tallo íntegro, fue aproximadamente 1,5 veces mayor que aquella encontrada en hormigones tradicionales con cañamiza seca.

Se pudo observar que el uso de cáñamo preservado durante 6 meses en húmedo influye positivamente tanto en el calor específico como en la efusividad térmica. Además, con el hormigón geo-polimérico de una viscosidad más baja y un mayor contenido de silicato de sodio (FSL/CSL), cuyas probetas alcanzaron la misma densidad seca, independiente del agregado, se pudo lograr una conductividad térmica más favorable trabajando con cáñamo preservado.

Mientras que la formulación antes mencionada alcanzó una mayor permeabilidad al vapor de agua y una mayor porosidad accesible cuando se elaboraba con cáñamo preservado en húmedo, la formulación geo-polimérica, más rica en tierra, alcanzó una densidad más alta cuando se elaboraba con cáñamo preservado en húmedo, y este aumento invalidaba el resultado logrado.

En las dos series, formuladas con una mayor tasa porcentual de tierra (FSH/CSH y FL/CL), se ha logrado una mayor densidad con cáñamo preservado a través de cambios de reología de las mezclas, independiente del aglutinante utilizado. Estos cambios pueden ser

fruto de uno o más fenómenos que experimentaron los agregados durante el proceso de preservación, como son:

- cambios porcentuales de los polímeros estructurales del material vegetal (ligero aumento de celulosa, ligera bajada de hemicelulosa y lignina)
- alteraciones morfológicas detectadas mediante SEM (hinchado de las fibras)
- reacciones orgánico-químicos resultantes de la fermentación (subida de acidez total y bajada del PH).

Cabe señalar que más o menos el 90% de los tamaños de poro de las formulaciones, aglutinadas con geo-polímeros de arcilla, se encontraron en el rango de porosidad media y macro porosidad, pero tendían a una mayor representación de los poros más grandes dentro de este rango, en contrasta con hormigones de cáñamo-cal, objeto de otros estudios. Además, los materiales con cáñamo preservado en húmedo tienden a tener poros de mayor tamaño en comparación con aquellos, elaborados con cáñamo fresco. El rango de porosidad accesible de los hormigones de cáñamo, aglutinadas con geo-polímeros de arcilla, es alto en comparación con otros materiales para cerramientos de construcción, pero se encuentra tan solo en el rango medio-bajo de hormigones de cáñamo, elaborados con cañamiza y cal.

El procesado con maquinaria agrícola reduce costes de producción de los agregados e independiza la cosecha de condiciones óptimas de meteorología que hacen posible un secado en el campo. El proceso de fermentación natural significa además un avance más factible y sostenible sobre otros pretratamientos del material vegetal, que pretenden lograr resultados equivalentes, ya que no precisa un lavado con agua ni químicos en el proceso. El método también evita que condiciones meteorológicas post cosecha desfavorables pudieran perjudicar en la calidad estructural de los tallos, durante el secado al aire libre.

Se ha desarrollado un material de un avanzado rendimiento físico que prevé aplicaciones moderadamente portantes en regiones del clima mediterráneo y semiárido, destacando potenciales destacados en compuestos de construcción a base de agregados vegetales de cáñamo que precisan menores cantidades de aglutinantes industriales. Los experimentos complementarios deberían profundizar en la comprensión de los resultados obtenidos con el fin de refinar aún más las formulaciones de los materiales de aislamiento

de base biológica que contienen agregados de cáñamo del tallo completo, preservados en húmedo, así como el periodo mínimo de preservación.

Los agregados fermentados mostraron un avance considerable sobre los agregados frescos de cáñamo en la mayoría de los resultados, obtenidos de este trabajo.

## ***6.2. Conclusiones de resultados experimentales obtenidos con hormigones, elaborados con cañamiza***

Las conclusiones que se exponen a continuación están relacionadas con los ensayos experimentales tratados de la publicación titulada: “Optimization of lime and clay-based hemp-concrete wall formulations for a successful lime rendering” (Arizzi et al., 2018).

Se han investigado los rendimientos de hormigones de cáñamo, tal autoportantes como portantes. De ambos tipos se han obtenido conclusiones sobre hormigones de cáñamo elaborados con cal o bien con arcilla y cal, sin y con añadido de arena. En este contexto se han observado las patologías surgidas sobre el soporte y los revocos hechos con mortero de cal aérea en pasta o con cal hidráulica natural cuando se aplican sobre los diferentes hormigones compactados tras dos diferentes estados del secado. En el secado de las probetas de hormigón de cáñamo, la mayor densidad de las probetas portantes ralentizaba el secado, debido a que alcanzaron una menor macro porosidad que los hormigones autoportantes, independiente del aglutinante utilizado. Además, el añadido de arcilla retrasaba el proceso de secado comparado con hormigones elaborados con cal.

Debido al contenido de hierro, la arcilla causaba también una pigmentación más intensa en los revocos, aplicados sobre bloques de hormigón de cáñamo aglutinados con la misma. Para evitar contratiempos, causados por el revestimiento, se necesita respetar la correcta evolución de su proceso de endurecimiento previo a la aplicación de un recubrimiento, que no se da antes de 10 semanas. Las precauciones se deben incrementar en superficies internas del edificios o caras sombreadas, es decir superficies menos expuestas a la acción del viento y el calentamiento solar. Cabe destacar que las conclusiones antes mencionadas no solo son predilectas para la carbonatación de la cal contenida en las formulaciones sin tierra y la hidratación de la cal contenida en los hormigones con tierra, pero también para la hidratación y carbonatación de los revestimientos de cal. Respeto a la

elección del tipo de aglutinante se debe preferir la cal hidráulica natural a la cal hidratada para revocar paredes de hormigones apisonadas de cáñamo-tierra. De hecho, se logra un endurecimiento más rápido, una menor pigmentación, y una menor colonización microbiana con un revoco de cal hidráulica natural.

## 9. Bibliografía

- Ali, M. (2016). Use of coconut fibre reinforced concrete and coconut-fibre ropes for seismic-resistant construction. *Materiales de Construcción*, 66 (321). <https://doi.org/10.3989/mc.2016.01015>.
- Allin S. (2012). *Building with hemp* (2<sup>nd</sup> Edition). Seed Press, Rushins, Kenmare, Co. Kerry, Ireland.
- Anderson L.C. (1974). A Study of Systematic Wood Anatomy in Cannabis. Published in *Botanical Museum Leaflets*, 24, 29-36. Harvard University, Cambridge, MA, USA.
- Amaducci S., Scordia D., Liu F.H., Zhang Q., Guo H., Testa G., Cosentino S.L. (2015). Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. *Industrial Crops and Products*, 68, 2-16. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.041>
- Arizzi A., Brümmer M., Martín Sanchez I., Cultrone G., Viles H. (2015). The influence of the type of lime on the hygric behaviour and bio-receptivity of hemp lime composites used for rendering applications in sustainable new construction and repair works. *Plos One*, 10 (5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125520>
- Arizzi A., Cultrone G., Brümmer M., Viles H. (2014). A chemical, morphological and mineralogical study on the interaction between hemp hurds and aerial and natural hydraulic lime particles: Implications for mortar manufacturing. *Construction and building materials*, 12, 375-384. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.026>
- Arizzi A. y Cultrone G. (2014). The water transfer properties and drying shrinkage of aerial lime-based mortars: an assessment of their quality as repair rendering materials. *Environmental Earth Sciences*, 71, 1699-1710. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2574-x>
- Arizzi A., Viles H., Martín-Sánchez I., Cultrone G. (2016). Predicting the long-term durability of hemp-lime renders in inland and coastal areas using Mediterranean, Tropical and Semi-arid climatic simulations. *Science of the Total Environment*, 542, 575-770. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.141>
- Arizzi A., Brümmer M., Martín- Sanchez I., Molina E., Cultrone G. (2018). Optimization of lime and clay-based hemp-concrete wall formulations for a successful lime
- Monika Brümmer. Programa de Doctorado en Historia y Artes. Universidad de Granada.

rendering. *Construction and Building Materials*, 184, 76-86.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.225>

Arnaud L. y Boyeux B. (2011). *La chènevotte comme nouveau granulat écologique et performant pour une utilisation dans le bâtiment*. Recuperado de <https://www.academie-agriculture.fr/actualites/academie/seance/academie/nouvelles-utilisations-des-plantes-fibres>

Arnaud L. y Gourlay E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of Hemp Concretes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 50-56.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>

Association Française de Normalisation (1993). *NF V19-002:1993, Litières pour animaux familiers - Détermination du pouvoir absorbant - Capacité de rétention d'eau*. La Plaine Saint-Denis: AFNOR.

ASTM International (2017). ASTM C518 - Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. West Conshohocken, PA, USA: ASTM

ASTM International (2017) ASTM D2845-08 Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. West Conshohocken, PA, USA: ASTM

ASTM International (2018). ASTM E1269-11 - Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry. West Conshohocken, PA, USA: ASTM

ATB, Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy (2020). Recuperado 2.11.2020 de <https://www.leibniz-gemeinschaft.de>

AQC, Agence Qualité Construction (2020). Recuperado 5.12.2020 de <https://qualiteconstruction.com>

Bachar M., Azzouz L., Rabehi M., Mezghiche B. (2015). Characterization of a stabilized earth concrete and the effect of incorporation of aggregates of cork on its thermo-mechanical properties: Experimental study and modeling. *Construction and Building Materials*, 74, 259-267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.106>

Balčiūnas G., Pundienė I., Lekūnaitė-Lukošiūnė L., Vėjelis S., Korjakins A. (2015). Impact of hemp shives aggregate mineralization on physical–mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material. *Industrial Crops and Products*, 77, 724-734. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.011>



- Balčiūnas G., Žvironaitė J., Vėjelis S., Jagniatinskis A., Gaidučis S. (2016). Ecological, thermal and acoustical insulating composite from hemp shives and spropel binder. *Industrial Crops and Products*, 91, 286-294. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.034>
- Benfratello S., Capitano C., Peri G., Rizzo G., Scaccianoce G., Sorrentino G. (2013). Thermal and structural properties of a hemp-lime biocomposite. *Construction and Building Materials*, 48, 745-754. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096>
- Bevan R. y Woolley T. (2008). Hemp lime construction. Published in: *A Guide to Building with Hemp Lime Composites*, 41-42. HIS BRE Press, Bracknell, UK.
- Biagotti J., Puglia D., Kenny J.M. (2004). A review on natural fiber based composites Part I: Structure, Processing and properties of natural fibers. *Journal of Natural Fibers*, 1(2), 37-68. [https://doi.org/10.1300/J395v01n02\\_04](https://doi.org/10.1300/J395v01n02_04)
- Blankendaal T., Schuur P., Voordijk H. (2014). Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach. *Journal of Cleaner Production*, 66, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.012>
- Bouloc P. (2006). *Le Chanvre Industriel: Production et Utilisations*. Editions La France Agricole, Paris, France.
- Bourdot A., Moussa T., Gacoin A., Maalouf C., Vazquez P., Thomachot-Schneider C., Bliard C., Merabtine A., Lachi M., Douzane O., Karaky H., Polidori G. (2017). Characterization of a hemp-based agro-material: influence of starch ratio and hemp shive size on physical, mechanical, and hygrothermal properties. *Energy and Buildings*, 153, 501-512. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.022>
- Bourmaud A., Gibaud M., Baley C. (2016). Impact of the seeding rate on flax stem stability and the mechanical properties of elementary fibres. *Industrial Crops & Products*, 80, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.053>
- Bourmaud A., Malvestio J., Lenoir N., Siniscalco D., Habrant A., Andrew King A., Legland D., Baley C., Beaugrand J. (2017). Exploring the mechanical performance and in-plant architecture of secondary Hemp fibres. *Industrial Crops & Products*, 108, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.010>
- Boutin M.P., Flamin C., Quinton S., Gosse G. (2006). Étude des caractéristiques environnementales du chanvre par l'analyse de son cycle de vie. Ministère de l'Agriculture, France.
- Brümmer M., Sáez-Pérez M.P., Durán Suárez J.A. (2018) Hemp-Clay Concretes for Environmental Building-Features that Attribute to Drying, Stabilization with Lime, Water Uptake and Mechanical Strength. In: Fangueiro R., Rana S. (eds) *Advances* Monika Brümmer. Programa de Doctorado en Historia y Artes. Universidad de Granada.

*in Natural Fibre Composites*, 249-265. Springer, Cham.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-64641-1\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-64641-1_21)

Busbridge R. (2009). *Hemp-Clay: towards zero-carbon housing* (Thesis MSc architecture). Advanced Environment & Energy Studies, Graduate School for the Environment, Centre for Alternative Technology & School of Computing and Technology. University of East London, UK.

Cannabric (2020). Recuperado 1.10.2020 de <https://www.cannabric.com/catalogo> y de [http://www.cannabric.com/catalogo/cannabric\\_bloque\\_aislante\\_de\\_canamo\\_estructural/](http://www.cannabric.com/catalogo/cannabric_bloque_aislante_de_canamo_estructural/)

Cannabric (2021). Recuperado 5.1.2021 de [http://www.cannabric.com/media/documentos/269a1\\_CAL\\_HIDRAULICA\\_NAT\\_URAL\\_ficha\\_tecnica.pdf](http://www.cannabric.com/media/documentos/269a1_CAL_HIDRAULICA_NAT_URAL_ficha_tecnica.pdf) y de [http://www.cannabric.com/media/documentos/46120\\_CAL\\_AEREA\\_EN\\_PASTA\\_ficha\\_tecnica.pdf](http://www.cannabric.com/media/documentos/46120_CAL_AEREA_EN_PASTA_ficha_tecnica.pdf)

Cannabric (2021). Recuperado 3.3.2021 de [www.cannabric.com/media/documentos/03a6b\\_Cannahabitat\\_ES.pdf](http://www.cannabric.com/media/documentos/03a6b_Cannahabitat_ES.pdf)

Carus M. (2005). European hemp industry 2001 till 2004: Cultivation, raw materials, products and trends. EIHA & Nova-Institut, Germany.

Carus M., Sarmiento L. (2016). The European Hemp Industry: Cultivation, processing and applications for fibres, shivs, seeds and flowers. EIHA, Germany.

C2P, Commission Prévention Produits (2020). Recuperado 5.12.2020 de <https://www.auxiliaire.fr/lexique/c2p-commission-prevention-produits>

Castel Y., Amziane S., Sonebi M. (2016). Durabilité du béton de chanvre: résistance aux cycles d'immersion hydrique et séchage. Paper presented at *1ère Conférence Euro Maghrébine des Bio Composites*, Marrakech, Morocco.

CenC, Construire en Chanvre (2020). Recuperado 5.12.2020 de <https://www.construire-en-chanvre.fr/missions>

Cérézo V. (2005). Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique (Thèse de doctorat). L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, France.

Chabannes M., Bénézet J.-C., Clerc L., Garcia-Diaz E. (2014). Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: An innovative application.

*Construction and Building Materials*, 70, 428-438.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.025>

Charai M., Sghiouri H., Mezhhab A., Kakri M. (2021). Thermal insulation potential of non-industrial hemp (*Moroccan cannabis sativa L.*) fibers for green plaster-based building materials. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126064,  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126064>

Clarke R.C. y Merlin M.D. (2013). *Cannabis: Evolution and ethnobotany*. University of California Press, Los Angeles, USA.

Coatanlem P., Jauberthie R., Rendell F. (2006). Lightweight wood chipping concrete durability. *Construction and Building Materials*, 20(9), 776-781.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.057>

Colinart T., Glouannec P., Chauvelon P. (2012). Influence of the setting process and the formulation on the drying of hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 372-380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.030>

Collet F. (2004). Caractérisation hydrique et thermique de matériaux du génie civil à faibles impacts environnementaux (Thèse de doctorat). INSA, Rennes, France.

Collet F., Bart M., Serres L., Miriel J. (2008). Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials. *Construction and Building Materials*, 22, 1271-1280.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.018>

Collet F. y Pretot S. (2014). Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Construction and Building Materials*, 65, 612-619. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.039>

Crini G., Lichtfouse E., Chanut G., Morin-Crini N. (2020). Applications of hemp in textiles, paper industry, insulation and building materials, horticulture, animal nutrition, food and beverages, nutraceuticals, cosmetics and hygiene, medicine, agrochemistry, energy production and environment: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 1451-1476. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01029-2>

Crônier D., Monties B., Chabbert B. (2005). Structure and chemical composition of bast fibers isolated from developing hemp stem. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53 (21), 8279-8289. <https://doi.org/10.1021/jf051253k>

CTE. Código técnico de la edificación. Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. CTE Web (2021). Recuperado 5.1.2021 de <http://cte-web.iccl.es/materiales.php>

- Dalmay P., Smith A., Chotard T., Sahay-Turner P., Gloaguen V., Krausz P. (2010). Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibers on the properties of set gypsum. *Journal of Materials Science*, 45(3), 793-803. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-4002-x>
- De Andrade Salgado F. (2010). *Análise Macro-Mecânica do Comportamento da Terra como Revestimento Externo com ou sem Reforço de fibras Vegetais* (Dissertação de Mestrado). Pontificia Universidade Católica Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Brasil.
- De Bruijn P.B. (2008). *Hemp Concretes: Mechanical Properties using both Shives and Fibres* (Licenciante tesis). Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Sciences, Alnarp, Sweden.
- De Bruijn P.B., Jeppsson K.-H., Sandin K., Nilsson C. (2009). Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres. *Biosystems Engineering*, 103(4), 474-479. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005>
- De Bruijn P.B., Johansson P. (2013). Moisture fixation and thermal properties of lime-hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 1235-42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.006>
- Di Candilo M., Ranalli P., Bozzi C., Focher B., Mastromei G. (2000). Preliminary results of tests facing with the controlled retting of hemp. *Industrial Crops and Products*, 11(2-3), 197-203. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(99\)00047-3](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(99)00047-3)
- Dinh T.M., Magniont C., Coutand M., Escadeillas G. (2015). Hemp concrete using innovative pozzolanic binder. Paper presented at *First International Conference on Bio-based Building Materials*, Clermont-Ferrand, France.
- Diquélou Y., Gourlay E., Arnaud L., Kurek B. (2015). Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix. *Cement and Concrete Composites*, 55, 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.004>
- Diquélou Y., Gourlay E., Arnaud L., Kurek B. (2016). Influence of binder characteristics on the setting and hardening of hemp lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 506-517. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.138>
- Duxson P., Fernandez-Jimenez A., Provis J.L., Lukey G.C., Palomo A., Van Deventer J.S.J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917-2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>

- Ecohabitar (2020). Recuperado 5.12.2020 de <https://ecohabitar.org/etiquetas-ecologicas-o-ecocertificados/>
- Elfordy S., Lucas F., Tancret F., Scudeller Y., Goudet L. (2008). Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hempcrete”) manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials*, 22(10), 2117-2123. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.023>
- Ente Nazionale Italiano di Unificazione (2000). UNI EN 1925:2000 Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità. Milano: normeUNI
- European Green Deal 2019-2024 (2020). Recuperado 6.12.2020 de [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)
- Ferneá R., Manea D.L., Plesa L., Iernuțan R., Dumitran M. (2019). Acoustic and thermal properties of hemp-cement building materials. *Procedia Manufacturing*, 32, 208-215. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.204>
- Florentin Y., Pearlmutter D., Givoni E. (2017). A life-cycle energy and carbon analysis of hemp-lime bio-composite building materials. *Energy and Building*, 156, 293-305. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.097>
- Fourmentin M., Faure P., Pelupessy P., Sarou-Kanian V., Peter U., Lesueur D., Rodts S., Daviller D., Coussot P. (2016). NMR and MRI observation of water absorption/uptake in hemp shives used for hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 405-413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.100>
- García-Jaldón C., Dupeyre D., Troede M.R. (1998). Fibers from semi-retted hemp bundles by steam explosion treatment. *Biomass and Bioenergy*, 14, 251-260. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)10039-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)10039-3)
- George M., Mussone P.G., Alemaskin K., Chae M., Wolodko J., Bressler D.C. (2016). Enzymatically treated natural fibers as reinforcing agents for biocomposite material: Mechanical, thermal, and moisture absorption characterization. *Journal of Materials Science*, 51, 2677-2686. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9582-z>
- Gourlay E. (2014). *Caractérisation expérimentale des propriétés mécaniques et hygrothermiques du béton de chanvre* (Thèse de doctorat). École Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Université de Lyon, France.
- Gordillos Cal de Morón (2021). Recuperado 28.2.2021 de <http://www.gordilloscaldemoron.com/>

- Gusovius H.-J., Hoffmann T., Budde J., Lühr C. (2016). Immer noch speziell? Verfahren zur Ernte von Faserhanf. *Landtechnik*, 71(1), 14-24. <https://doi.org/10.1515/lt.2016.3118>
- Gusovius H.-J., Lühr C., Homann T., Pecenka R., Idler C. (2019). An Alternative to Field Retting: Fibrous Materials Based on Wet Preserved Hemp for the Manufacture of Composites. *Agriculture*, 9(7), 140. <https://doi.org/10.3390/agriculture9070140>
- Grubeša I.N., Marković B., Gojević A., Brdarić J. (2018). Effect of hemp fibers on fire resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 184, 473-484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.014>
- Herer J. y Bröckers M. (1993). Die Wiederentdeckung der Nutzpflanze HANF Cannabis Marihuana. Zweitausendeins, Frankfurt.
- Huiskes D.M.A., Keulen A., Yu Q.L., Brouwers H.J.H. (2016). Design and performance evaluation of ultra-lightweight geopolymer concrete. *Materials and Design*, 89, 516-526. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.167>
- Hung Mo K., Johnson Alengaram U., Zamin Jumaat M., Poh Yap S., Cheng Lee S. (2016). Green concrete partially comprised of farming waste residues: a review. *Journal of Cleaner Production*, 117, 122-138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.022>
- Hussain A., Calabria-Holley J., Lawrence M., Jiang Y. (2019). Hygrothermal and mechanical characterisation of novel hemp shiv based thermal insulation composites. *Construction and Building Materials*, 212, 561-568. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.029>
- ICNF (2021). Recuperado 6.1.2021 de <https://www.icnf2021.fibrenamics.com/>
- Ingrao C., Giudice A.L., Bacenetti J., Tricase C., Dotelli G., Fiala M., Siracusa V., Mbohwa C. (2015). Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 51, 29-42. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.002>
- International Organization for Standardization (2007). *ISO 11664-2:2007 Colorimetry - Part 2: CIE standard illuminants*. Ginebra: ISO
- International Organization for Standardization (2014). *ISO 13322-1:2014 Particle Size analysis. Image analysis methods - Part 1: Static image analysis methods*. Ginebra: ISO
- International Organization for Standardization (2016). *ISO 15901-1:2016 Evaluation of pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption - Part 1: Mercury porosimetry*. Ginebra: ISO
- Monika Brümmer. Programa de Doctorado en Historia y Artes. Universidad de Granada.

INSTRON (2021). Recuperado 28.2.2021 de <https://www.instron.us/en-us/products/testing-systems/universal-testing-systems/electromechanical/3300/3360-dual-column>

IST AG Switzerland (2021). Recuperado 30.1.2021 de <https://fibershape.com/contact>

Istituto Centrale per il Restauro (1985). *NORMAL 21/85:1985 - Permeability to water vapour*. Rome: CNR-ICR

Jankauskienė Z., Butkutė B., Gruzdevienė E., Cesevičienė J., Fernandoc A.L. (2015). Chemical composition and physical properties of dew- and water-retted hemp fibers. *Industrial Crops and Products*, 75(B), 206-211. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.06.044>

Jarabo R., Fuente E., Monte M.C., Savastano H., Mutjé P., Negro C. (2012). Use of cellulose fibers from hemp core in fiber-cement production. Effect on flocculation, retention, drainage and product properties. *Industrial Crops and Products*, 39, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.017>

Kastiukas G., Zhou X., Castro-Gomes J., Huang S., Saafi M. (2015). Effects of lactic and citric acid on early-age engineering properties of Portland/calcium aluminate blended cements. *Construction and Building Materials*, 101(1), 389-395. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.054>

Kawaguchi T. y Decho A.W. (2002). A laboratory investigation of cyanobacterial extracellular polymeric secretions (EPS) in influencing CaCO<sub>3</sub> polymorphism. *Journal of Crystal Growth*, 240(1-2), 230-235. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(02\)00918-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(02)00918-1)

Kenneth I.P. y Miller A. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime wall constructions in the UK. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 1- <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.001>

Kidalova L., Številova N., Terpakova E., Sicakova A. (2011). Use of magnesium oxide-cement binder in composites based on hemp shives. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 5(6), 736-741.

Kidalova L., Stevilova N., Terpakova E., Sicakova A. (2012). Utilization of alternative materials in lightweight composites. *Journal of Cleaner Production*, 34, 116-119. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.031>

Kinnane O., Reilly A., Grimes J., Pavia S., Walker R. (2016). Acoustic absorption of hemp-lime construction. *Construction and Building Materials*, 122, 674-682. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.106>

- KfW, Förderung (2020). Recuperado 3.12.2020 de <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilien/Energetische-Sanierung/>
- Kremer Pigmente GmbH & Co. KG (2020). Recuperado 5.10.2020 de <https://www.kremer-pigmente.com/>
- Kriker A., Debicki G., Bali A., Khenfer M., Chabannet M. (2005). Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot dry climates. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 554-648.
- Kymäläinen H.-R., Hautala M., Kuisma R., Pasila A. (2001). Capillarity of flax/linseed (*Linum usitatissimum L.*) and fibre hemp (*Cannabis sativa L.*) straw fractions, *Industrial Crops and Products*, 14 (1), 41-50. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(00\)00087-X](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(00)00087-X)
- Le A.T., Gacoin A., Li A., Mai T.H., El Wakil N. (2015). Influence of various starch/hemp mixtures on mechanical and acoustical behavior of starch-hemp composite materials. *Composites part B: Engineering*, 75, 201-211 <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.01.038>
- Li Z., Wang X., Wang L. (2006). Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(3), 497-505. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.01.032>
- Liu, M., Fernando D., Daniel G., Madsen B., Meyer A.S., Ale M.T., Thygesen A. (2015). Effect of harvest time and field retting duration on the chemical composition, morphology and mechanical properties of hemp fibres. *Industrial Crops and Products*, 69, 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.02.010>
- Lühr C., Pecenka R., Budde J., Hoffmann T., Gusovius H.-J. (2018). Comparative investigations of fibreboards resulting from selected hemp varieties. *Industrial Crops and Products*, 118, 81-94. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.031>
- Maalouf C., Ingrao C., Scrucca F., Moussa T., Bourdot A., Tricase C., Presciutti A., Asdrubali F. (2018). An energy and carbon footprint assessment upon the usage of hemp-lime concrete and recycled-PET façades for office facilities in France and Italy. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1640-1653. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.111>
- Maalouf C., Tran Le A.D., Umurigirwa S.B., Lachi M., Douzane O. (2014). Study of hygrothermal behaviour of hemp concrete building envelope under summer conditions in France. *Energy and Building*, 77, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.040>



- Magniont C., Escadeillas G., Coutand M., Oms-Multon C. (2016). Use of plant aggregates in building ecomaterials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(1), 17-33. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.682452>
- Mazhoud B., Collet F., Pretot S., Lanos C. (2017). Mechanical properties of hemp-clay and hemp stabilized clay composites. *Construction and Building Materials*, 155, 1126-1137. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.121>
- Munawar S.S., Umemura K., Kawai S. (2007). Characterization of the morphological, physical, and mechanical properties of seven non wood plant fiber bundles. *Journal of Wood Science*, 53, 108-113. <https://doi.org/10.1007/s10086-006-0836-x>
- Nguyen S.T., Tran Le A.D., Vu M.N., To Q.D., Douzane O., Langlet T. (2016). Modeling thermal conductivity of hemp insulation material: A multi-scale homogenization approach. *Building and Environment*, 107, 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.026>
- Nguyen T.-T., Picandet V., Carre P., Lecompte T., Amziane S., Baley C. (2010). Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete. *European Journal of Environment and Civil Engineering*, 14(5), 545-560. <https://doi.org/10.1080/19648189.2010.9693246>
- Niyigena C., Amziane S., Chateauneuf A., Arnaud L., Bessette L., Collet F., Lanos C., Escadeillas G., Lawrence M., Magniont C., Marceau S., Pavia S., Peter U., Picandet V., Sonebi M., Walker P. (2016). Variability of the mechanical properties of hemp concrete. *Materials Today Communications*, 7, 122-133. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.03.003>
- Noticias ONU (2020). Recuperado 3.11.2020 de <https://news.un.org/es/story/2020/12/1485022>
- Nova-Institut (2020). Hemp becomes the world's billion-dollar business - worldwide largest conference on industrial hemp in June 2019 in Cologne (Germany). Recuperado 8.11.2020 de <https://news.bio-based.eu/hemp-becomes-the-worlds-billion-dollar-business-worldwide-largest-conference-on-industrial-hemp-in-june-2019-in-cologne-germany/>
- Nozahic V., Amziane S., Torrent G., Saïdi K., De Baynast H. (2012). Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice-lime binder. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 231-241. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.002>
- Oskam V/F (2020). Recuperado 10.10.2020 de <https://oskam-vf.com/es/maquinas-de-bloques-de-tierra-comprimida/pulverizadores>

- Oskam V/F (2021). Recuperado 1.3.2021 de <https://oskam-vf.com/earth-block-machines/mengers>
- Pacheco-Torgal F. y Jalali S. (2011). Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: a review. *Construction and Building Materials*, 25 (2), 575-581. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>
- Padmalal D., Maya K. (2014). River Sand Mining and Mining Methods. In: *Sand Mining*, 23-30. Environmental Science and Engineering, Springer, Dordrecht, NL. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-9144-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9144-1_3)
- Passuello A., Moriconi G., Shah S. (2009). Cracking behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures and PVA fibers. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 699-704. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.08.004>
- Pervaiz M. (2003). Carbon storage potential in natural fiber composites. *Resources, Conservation and Recycling*, 39(4), 325-340. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00173-8](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00173-8)
- Picandet V. (2013). Characterization of Plant-Based Aggregates (Chapter 2). In: *Bio-Aggregate-Based Building Materials: Applications to Hemp Concretes*, 27-74. Amziane S., Arnaud L., Challamel, N. (eds), John Wiley & Sons Ltd., Hoboken, NJ, USA. <https://doi.org/10.1002/9781118576809.ch2>
- PNIEC 2021-2030 (2021). Recuperado 4.1.2021 de <https://www.idae.es/informacion-y-publicaciones/plan-nacional-integrado-de-energia-y-clima-pniec-2021-2030>
- Pretot S., Collet F., Garnier C. (2014). Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating. *Building and Environment*, 72, 223-231. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.010>
- Quenard D. y Sallee H. (1992). Water vapour adsorption and transfer in cement-based materials: a network simulation. *Materials and Structures*, 25, 515-522. <https://doi.org/10.1007/BF02472447>
- Quimipur S.L.U. (2020). Recuperado 5.10.2020 de <http://quimipur.com/>
- Rahim M., Douzane O., Tran Le A.D., Promis G., Langlet T. (2016). Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 102(1), 679-687. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.021>
- Ramakrishna G. y Sundarajan T. (2005). Mechanical characterization and impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: a comparative study. *Cement*

*and Concrete Composites*, 27(5), 547-553.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.006>

Reilly A., Kinnane O., Lesage F.J., McGranaghan G., Pavía S., Walker R., O'Hegarty R., Robinson A.J. (2019). The thermal diffusivity of hemplime, and a method of direct measurement. *Construction and Building Materials*, 212, 707-715.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.264>

Renovation Wave (2020). Recuperado 3.12.2020 de

[https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en)

Rhydwen R. (2006). A model for UK hemp cultivation and processing to supply the building industry with hurds for hemp and lime concrete and fibres for insulation bats, with the ethos of environmental protection as a priority (MSc. Thesis). University of East London, UK.

Rode, C. (Ed.), Peuhkuri, R. H., Mortensen, L. H., Hansen, K. K., Time, B., Gustavsen, A., Ojanen, T., Ahonen, J., Svennberg, K., Arfvidsson, J., & Harderup, L-E. (2005). *Moisture Buffering of Building Materials*, BYG Report No. R-127. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, Denmark.

Sáez-Pérez M.P., Brümmer M., Durán Suárez J.A. (2020). A review of the factors affecting the properties and performance of hemp aggregate concretes. *Journal of Building Engineering*, 31, 101323. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101323>

Sáez-Pérez M.P., Brümmer M., Durán Suárez J.A. (2021). Effect of the state of conservation of the hemp used in geopolymer and hydraulic lime concretes. *Construction and Building materials*, 285, 122853.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122853>

Salentijn E.M.J., Zang Q., Amaducci S., Trindade L.M. (2015). New developments in fiber hemp (*Cannabis sativa L.*) breeding. *Industrial Crops and Products*, 68, 32-41.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.08.011>

Savastano Jr. H., Warden P.G., Coutts R.S.P. (2001). Ground iron blast furnace slag as a matrix for cellulose-cement materials. *Cement and Concrete Composites*, 23(4-5), 389-397. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00083-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00083-4)

Schönthaler (2020). Recuperado 4.12.2020 de <https://www.hanfstein.eu/home-deutsch/hanfputze/>

Seciltek (2020). Recuperado 2.11.2020 de <https://www.seciltek.com/>

- Sedan D., Pagnoux C., Chotard T., Smith A., Lejolly D., Gloaguen V., Krausz P. (2007). Effect of calcium rich and alkaline solutions on the chemical behavior of hemp fibres. *Journal of Materials Science*, 42, 9336-9342. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1903-4>
- Shazad A. (2012). Hemp fiber and its composites - A review. *Journal of Composite Materials*, 46 (8), 973-986. <https://doi.org/10.1177/0021998311413623>
- Silmín Ibérica (2020). Recuperado 2.1.2020 de <http://www.silminiberica.com/vidrio-granular-y-polvo-de-vidrio.html>
- Sinka M., Radina L., Šahmenko G., Korjakins A., Bajare D. (2015). Enhancement of lime-hemp concrete properties using different manufacturing technologies. *Academic Journal of Civil Engineering*, 33 (2). <https://doi.org/10.26168/icbbm2015.46>
- Small, E. (2015). Evolution and Classification of Cannabis sativa (Marijuana, Hemp) in Relation to Human Utilization. *The Botanical Review*, 81, 189-294. <https://doi.org/10.1007/s12229-015-9157-3>
- Socli (2021). Recuperado 2.1.2021 de <https://www.socli.fr/fr>
- Stevulova N., Cigasova J., Estokova A., Terpakova E., Geffert A., Kacik F., Singovszka E., Holub M. (2014). Properties Characterization of Chemically Modified Hemp Hurds. *Materials*, 7, 8131-8150. <https://doi.org/10.3390/ma7128131>
- Stevulova N., Kidalova L., Cigasova J., Junak J., Sicakova A., Terpakova E. (2013). Lightweight Composites Containing Hemp Hurds. *Procedia Engineering*, 65, 69-74. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.013>
- Stevulova N., Kidalova L., Junak J., Cigasova J., Terpakova E. (2012). Effect of hemp shive sizes on mechanical properties of lightweight fibrous composites. *Procedia Engineering*, 42, 496-500. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.441>
- Tang K., Struik P.C., Yin X., Thouminot C., Bjelkova M., Stramkale V., Amaducci S. (2016). Comparing hemp (*Cannabis sativa L.*) cultivars for dual-purpose production under contrasting environments. *Industrial Crops and Products*, 87, 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.026>
- Technichanvre, France (2020). Recuperado 1.11.2020 de <http://www.technichanvre.com/wp-content/uploads/2013/09/Chanvribloc-Notice-technique-2016.pdf>
- Terpáková E., Kidalová L., Eštoková A., Čigášová J., Številová N. (2012). Chemical Modification of Hemp Shives and their Characterization. *Procedia Engineering*, 42, 931-941. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.486>
- Monika Brümmer. Programa de Doctorado en Historia y Artes. Universidad de Granada.

- Thelen D., Wullink F., Van Acoleyen M., Pastoor V., Maarten T. (2019). *The Future of The European Built Environment. A Forward-Looking description of Europe in 2030 and 2050*. Arcadis Nederland B.V., Arnhem, NL.
- Toledo Filho R.D., De Andrade Silva F., Fairbairn E.M.R., De Almeida Melo Filho J. (2009). Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. *Construction and Building Materials*, 23, 2409-2420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.10.012>
- Tradical (2020). Recuperado 4.12.2020 de <http://www.tradical.com/>
- Tran Le A.D., Maalouf C., Mai T.H., Wurtz E., Collet F. (2010). Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope. *Energy and Building*, 42(10), 1797-1806. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.016>
- Umurigirwa B.-S., Vroman I., Mai T.H., Chadi M. (2015). Influence of chemical modification on hemp-starch concrete. *Construction and Building Materials*, 81, 208-215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.045>
- UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007, Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Madrid: AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 12390-7:2020, Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened Concrete. Madrid: AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 12667:2002, Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método medidor del flujo de calor. Madrid: AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 15886:2011, Conservación del patrimonio Cultural – Medición del color de superficies. Madrid: AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 459-1:2016, Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. Madrid: AENOR. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- Van der Werf, H.M.G. (1994). *Crop physiology of fibre hemp (Cannabis sativa L.)* (Dissertation in Agronomy PE&RC). Agricultural University, Wageningen, NL.
- Viitanen H., Vinha J., Salminen K., Ojanen T., Peuhkuri R., Paaanen L., Lähdesmäki K. (2010). Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures. *Journal of Building Physics*, 33, 201-224. <https://doi.org/10.1177/1744259109343511>
- Monika Brümmer. Programa de Doctorado en Historia y Artes. Universidad de Granada.

Walker R., Pavia S., Mitchell R. (2014). Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes. *Construction and Building Materials*, 61, 340-348.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065>

Williams J., Lawrence M., Walker P. (2016). A method for the assessment of the internal structure of bio-aggregate Concretes. *Construction and Building Materials*, 116, 45-51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.088>

Wolf Jordan (2020). Recuperado 4.12.2020 de <https://wolfjordan.be/en/product/lime>

Woolley, T. (2004). The role of low impact building materials in sustainable construction: The potential for hemp. Paper presented at *Sustainable Building 2004 Africa Conference*, Western Cape, South Africa.

## **Anexo**

### ***Tesis por compendio de artículos previamente publicados***

La presente tesis doctoral, de acuerdo con el informe correspondiente, se presenta como un compendio de tres trabajos previamente publicados con un índice de calidad acreditado. Las referencias completas de los artículos que constituyen el cuerpo de la tesis son las siguientes:

ARTÍCULO 1. Brümmer M., Sáez-Pérez M.P., Suárez J.D. (2018). **Hemp-Clay Concretes for Environmental Building. Features that Attribute to Drying, Stabilization with Lime, Water Uptake and Mechanical Strength.** In: Figueiro R., Rana S. (eds) *Advances in Natural Fibre Composites*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-64641-1\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-64641-1_21)

ARTÍCULO 2. Sáez-Pérez M.P., Brümmer M., Durán Suárez J.A. (2020). **A review of the factors affecting the properties and performance of hemp aggregate concretes.** *Journal of Building Engineering*, 31, 101323. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101323>

ARTÍCULO 3. Sáez-Pérez M.P., Brümmer M., Durán Suárez J.A. (2021). **Effect of the state of conservation of the hemp used in geopolymer and hydraulic lime concretes.** *Construction and Building materials*, 285, 122853. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122853>

# PAPER 1




[Advances in Natural Fibre Composites](#) pp 249-265 | [Cite as](#)

## Hemp-Clay Concretes for Environmental Building —Features that Attribute to Drying, Stabilization with Lime, Water Uptake and Mechanical Strength

Authors

[Authors and affiliations](#)

Monika Brümmer, M<sup>a</sup> Paz Sáez-Pérez , Jorge Durán Suárez

Indicios de calidad.

1. Capítulo de libro incluido en la Monografía ADVANCES IN NATURAL FIBRE COMPOSITES. EDITORIAL SPRINGER.

2. Según SPI. Editoriales mejor valoradas (2018). Scholarly Publishers Indicators se encuentra en la cuarta posición (4<sup>a</sup>) respecto a un total de 96 editoriales extranjeras de prestigio. Por delante de Ed. Brill, Harvard University press, Thomson Reuters o Wiley & Sons. En términos de cuartiles, la editorial, la monografía y el capítulo de libro corresponden con Q1. El índice de citas determinado en 2018 es de 670.000 ICEE en un ranking desde el nº 1 (1705.000, Oxford University Press) al nº 96 (1.000, Teneo Press).

3. Igualmente la publicación está incluida en diferentes bases de datos tales como:

-Conference Proceedings Citation Index (CPCI), part of Clarivate Analytics' Web of Science

-El Engineering Index (Compendex and Inspec databases)

-ACM Digital Library

-DBLP

-Google Scholar

-IO-Port

-MathSciNet

-Scopus

-Zentralblatt MATH



# **HEMP-CLAY CONCRETES FOR ENVIRONMENTAL BUILDING—FEATURES THAT ATTRIBUTE TO DRYING, STABILIZATION WITH LIME, WATER UPTAKE AND MECHANICAL STRENGTH**

## **ABSTRACT**

There are numerous parameters which define the mechanical properties of hemp concretes. Several authors identified significant differences in mechanical properties due to the quality, particle size, form and distribution of the hemp aggregates, and also due to the energy of compaction, binder dosage, density, drying conditions and drying time. The other factors which influence the mechanical properties of hemp concretes are the type of binders and their influence on the setting process of mortars containing plant aggregates. This research work has been done to encourage the use of hemp in construction industries that can reduce the usage of industrial binders and shift the focus on natural binders. The experiments were carried out to observe the drying kinetics, capillary water uptake and mechanical strength of hemp-clay concretes made with de-fibered or non-de-fibered hemp materials of industrial and domestic origin. The influence of addition of the lime on the mechanical performance of hemp-clay composites was also studied.

**KEYWORDS:** Hemp concrete, hurds, fiber, waste, lime.

## **INTRODUCTION**

Bio-based materials from rapidly renewable resources provide the opportunity to create a new generation of low energy and carbon storing building products [6] with improved insulating properties. In this manner they are reducing greenhouse gas emissions caused by human activities [20] and replacing natural resources made from mineral aggregates [27]. It is widely assumed that renewable materials are environmentally beneficial and should be preferentially used in building envelopes to reduce the energy needed for manufacturing processes and air conditioning in the building sector, which is responsible for about 50% of the energy consumption worldwide [7]. The economic production and processing of natural fibers [9] is an added motive for the increasing research in this field in the last decade [27]. Hemp (*Cannabis sativa* L.) stands for a fast growing [17, 24] and multi-beneficial [2, 11, 29, 33] fiber plant. Its world-wide spread as one of the earliest culture plants [2, 29] is also explained by its easy acclimation to different climates, altitudes and soil types and its important role in crop rotations [2, 33, 34]. The use of plant aggregates in concretes and mortars is a method that allows versatile applications in construction, and practiced since antiquity to improve or modify their qualities [4, 5]. To ensure their major appraisal and use, building-product and green building designers must understand hemp based building materials in terms of their thermal, acoustic, hygrothermal and mechanical performances, in particular the links between these features. Hemp concretes, based on hemp hurds and lime binders, are proving since the early years 90s to be a user friendly, high performance and fire-resistant construction material for light weight applications in new building and renovation works [8]. However, hemp concretes have an elastic-plastic behavior and are therefore, reported to function with a support structure [10]. A lower mechanical strength of plant based concretes as compared to the mineral ones is considered as the major drawback for their use in construction [27]. An interesting challenge is, therefore, the refinement of the mechanical performance of plant based concretes for structural purposes. By now, it is demonstrated that the compressive strength of hemp concretes, with unchanged hemp content, can be increased by compaction [28], through further reduction of void volume by adding small sized aggregate or by shortening the mean particle length [1, 32]. As reported by several authors, adding fibers could not improve significantly the mechanical strength of hemp concrete formulations with lime, cement or gypsum

[15, 26] but could be an interesting option for regions without facilities to separate stem materials [14]. However, very few studies are carried out on this matter, and therefore, the present research investigates the mechanical properties of hemp concrete, comparing the performance of de-fibered and non de-fibered stem material in a lime stabilized hemp-clay concrete matrix. Improving mechanical strength of hemp concretes by augmenting the dosage of lime or other calcined binders is possible [26] but it is not favorable, as the highest negative contribution to their climate change indicator is caused by commercial binders [28]. These materials consume 49% primary energy and 68% water of the total consumption of a hemp concrete and cause 47% of corresponding air pollution, followed by the wooden structure, plasters and hemp hurds [20]. Furthermore, in plant based concretes, setting problems occur [16] through the release of polysaccharides [18, 28], that hinder the carbonation of aerial lime; while in mortars with mineral aggregates, up to 90% of the CO<sub>2</sub> emitted during its calcination is re-absorbed [21]. A design that takes into account the local raw clay binders with the lowest possible environmental impact [30] and involving minimum transport is decisive for the final carbon footprint of a hemp concrete. It also takes into account the dosage, constructive systems (e.g. in harmony with traditional and climate adapted building) and application technology [19]. The motive of this research work is the development of hemp concretes for alternative economic development, based on the local hemp waste material of an ancestral hemp variety found in the Moroccan Central Rif, and historically harvested for industrial as well as recreational purposes. The use of both *C. sativa* L. and *C. sativa* L. - *indica* species as fiber hemp is undertaken by numerous archeological [11, 22] and written [2] affirmations. Due to technological obstacles, plant's specific morphological reasons and chemical differences between hemp hurds and fibers [25], whole stem utilization has been taken into account and compared with de-fibered stem material. The present study also aims to reveal if the plant infusions of both species have influence on the drying process of clay based mortars and on the interactions between clay and lime.

## **MATERIALS AND METHODS**

### **Hemp Materials**

There exist significant variations in wood anatomy, wood cell distribution, cell wall thickness and cell dimension between *Cannabis sativa* L. and *Cannabis sativa* L. - *indica* species [2, 3]. Also, the chemical composition of bark differs from the woody stem material and hemi-cellulose is more abundant in the hemp core (31%) than in the bark (13%) [34]. In addition, the absorption capacity is more in the core than in the bark [23] and water and alkali soluble components increase with the maturity of the plant [13]. The present research focuses on both, industrial *Cannabis sativa* L. hemp, collected in Cervera del Rio Alhama (Spain) and ancestral *Cannabis sativa* L. - *indica* hemp (Fig. 1), collected in Morocco's "historic hemp farming region" [12].



Fig. 1 Moroccan hemp stalks of “beldiya”

Absorption of 5 g sample from each species of hemp core and hemp fiber was observed in the intervals of 72 h, 7 days and 14 days, and for studying the drying kinetics, the total water loss after drying in T20 and HR80 conditions was recorded. The plant materials were prepared by manual chopping. In addition, plant infusions were produced by submersion for 14 days, for the elaboration of lime stabilized earth mortars. Furthermore, hemp-clay concretes were produced to understand the differences in the use of industrial hemp hurds from Cavac (France), with a mean particle length of 2–25 mm (Fig. 2) and whole stem material from Cervera del Rio Alhama (Spain), cut parallel to the stem section in pieces of similar length (Fig. 3), with a chopping machine used for agricultural waste.



Fig. 2 Industrial hemp hurds (France)



Fig. 3 Chopped hemp stem (Spain)

### **Binder and Stabilizer**

For the preparation of mortar samples, earth was collected from the same region where the ancestral *C. sativa* L. - indica hemp materials were collected. For the analysis of its clay minerals, the fractions smaller than 2  $\mu\text{m}$  have been separated after decanting the suspension of 200 g earth in 500 ml of water for 8 h. Liquids, obtained from the upper 10 cm of the column of liquid with particles, were collected and centrifuged for 4 min at 6000 revolutions. Mineralogical X-ray diffraction (XRD) analysis was done with a PANalytical X'Pert Pro diffractometer, equipped with a X'Celerator solid state detector, and using Cu-K $\alpha$  radiation at 45 kV and 40 mA. The diffraction patterns were obtained by continuous sweeping between 3 and 50° of 2 $\theta$ , with a space of 0.01° of 2 $\theta$  and 20 s of time in each step. Its clay minerals (fractions of 2  $\mu\text{m}$ ) contain 18.1% quartz, 44.1% illite, 22% chlorite and 15.8% amorphous particles. Illite is a clay mineral formed by alteration of feldspars. It is expensive and of medium plasticity and have unctuous touch and low permeability. Illite from Issaguen is sodic and it dissolves rapidly in water. Its red color is associated with iron oxides. Its structure is mica type, but it has less potassium than muscovite, more inter-laminar water, and less substitution of aluminum for silica in the tetrahedral layer. Chlorite is found in nature combined with illites. It is not very expensive, has less cut resistance, and is difficult to disperse in water. This clay has tetrahedral-octahedral-tetrahedral (TOT) packages. For the stabilization of the clay as reinforcement of the inter-laminar matrix to resist the weathering conditions, white natural hydraulic lime NHL3.5 "Calcia" from Socli (France) was used and showed superior results in a previous research with different hemp-lime mortars [4].

### **Experimental Program with Clay Mortars and Plant Infusions**

Infusions from the 14-day submersion of two hemp varieties (Figs. 4 and 5) have been used to prepare earth mortars with the addition of NHL3.5 lime. In addition, a control mold was also made, and kneaded with water. The hemp infusions were obtained from a quantity of plant material corresponding to this mold size, employing 1 m<sup>3</sup> of plant material per m<sup>3</sup>. The infusions have been prepared using a water-plant material ratio in such a way that the suitable amount is obtained to knead the mortars, taking into account that part of the water is absorbed by hemp.



Fig. 4 Moroccan hemp core and fiber after 14 days of submersion in water and drying



Fig. 5 Spanish hemp core and fiber after 14 days of submersion in water and drying

Plant materials were previously cut into pieces to obtain a similar length that is found in commercial hemp hurds (maximum 25 mm) after separating fibers and hurds. After immersion in closed containers, hemp infusions got darkened and gave off a smell in hemp hurds distinct from the whole stem material. Before mixing, the red earth of Issaguen has been sieved at 3 mm maximum grain size. Four different specimens have been made, one of each class, in standardized molds of 4 \_ 4 \_ 16 (cm). The first specimen (“A”) contained sieved earth, NHL3.5 lime and potable water. The second one (“FPK”) was prepared with sieved earth, NHL3.5 lime and hemp infusion of the full stem section of the ancestral Moroccan hemp variety, called locally “beldiya” [12]. The third specimen (“PK”) was made with sieved earth, NHL3.5 lime and hemp infusion from the de-fibered stem material of Issaguen. The fourth specimen (“FPE”) was prepared like

the second one but with the infusions obtained from industrial hemp of Cervera del Rio Alhama (Spain) (Fig. 6).



Fig. 6 Earth mortar specimens kneaded with water or plant infusions

The kneading was performed with equal proportions of water or hemp infusion by weight. The percentage of NHL3.5 lime was high, 25% by volume in relation to the earth in order to improve the results and to study if the substances released by the plant material also affect the drying kinetics, and to compare the results with the specimen mixed with water. After 28 days of curing at temperature of 20 °C and RH of 80%, the mortar samples were analyzed using mineralogical X-ray diffraction (XRD) in order to verify if the minerals of clay and lime were associated.

#### **Experimental Program with Lime Stabilized Hemp-Clay Concretes**

For both hemp-clay concrete (Fig. 7) formulations, with either hemp hurds or chopped hemp stem (including the fibers) plus sieved earth and water, two different percentages of NHL3.5 lime (8 and 16% in volume) were added. This stabilization aimed to reinforce the inter-laminar matrix of the clay through cationic exchange and transformation of peripheral links to provide good resistance to local weather conditions (Central Rif has the highest precipitation rate in Morocco). The use of lime is encouraged due to the fact that it was found in the formulation of all traditional earth concretes and mortars used in the region, although it is not produced locally. During a curing and drying period of 5 weeks at T20 and RH80 conditions, drying kinetics was studied. After 5 weeks, when all concrete samples were in equilibrium with the relative humidity of the ambient, capillary water uptake was measured, according to the Spanish norm UNE-EN1015-18:2003. Mechanical results were obtained at an age of 37 days instead of 28 days because drying progressed slower than in mineral concretes. Compressive and flexural strength of the concretes were tested at Applus laboratory (Barcelona), according to the Spanish norm UNE-EN1025-11:2000/A1:2007, with four standardized rectangular concrete samples (4 \_ 4 \_ 16 cm) of each type, obtaining four specimens for the test of the flexural strength and eight specimens for the test of the compressive strength.



Fig. 7 Lime stabilized hemp-clay concrete test specimens

## RESULTS AND DISCUSSION

### **Influence of Plant Infusions on Drying of Lime Stabilized Earth Mortars and the Interaction Clay-Lime**

Among the four different lime stabilized earth-mortars, a higher viscosity has been observed in the ones prepared with infusions that contain whole stem material. Under conditions of T20 and RH80, the specimen mixed with water advanced faster during the drying process of the first week, but the total water loss after 4 weeks was lower than in the specimens with hemp infusions. In the specimen made with infusion of whole stem material, deviations from the mortar sample “A” were higher than in the specimen with infusion of hemp core material. Even so, the final water loss % (by weight), as compared to the initial weight of the fresh mortars, varied a little in the different specimens, being 23.74% in the mortar mixed with water, 24.06% in the mortar mixed with infusion of core of the ancestral hemp variety, 25.89% in the mortar with infusion of whole stem material of the same and 26.63% in the specimen made with whole stem material of industrial hemp. According to these numbers the mortars with higher initial viscosity showed higher final water loss. The XRD tests that were performed with 28 days cured specimens and with fractions of less than 200  $\mu\text{m}$  (Fig. 8) showed that in mortars kneaded with hemp infusions, a delay occurred in the carbonation of the lime that is not combined with the clay minerals, as well as in the combination of the rest of the lime with the clay as compared to the mortar sample mixed with water. In the mortar sample “A”, which has been kneaded with water, all clay minerals have reacted with NHL3.5 lime (they no longer appeared as such). The lowest percentage of carbonated lime was observed in the sample “PK”, made with hemp core infusion, i.e. 1.5 against 7.1% of calcite in the mortar mixed with water; while the samples with whole stem material showed 2 and 2.2% (Table 1). This can be explained by the higher percentage of hemi-cellulose present in hemp core compared to the bark fraction [34] and the higher water absorption by the hemp stem material, compared to the bark [23], resulting in higher release of substances that hinder the hardening processes. The calcite content was slightly higher in “FPE” than in “FPK” specimen. This can be explained by variations in the wood anatomy, wood cell distribution, cell wall thickness and cell dimension between *C. sativa* L. - indica and *C. sativa* L. species [2, 3].

The submersion and drying tests of the plant materials confirmed a higher porosity of the ancestral *C. sativa* L. - indica hemp. A clearly higher and quicker water absorption has been observed in the ancestral hemp core, compared to *C. sativa* L. hemp core during the period of submersion, whereas no differences were observed in the fibers of both raw materials (Fig. 9). In all specimens the total water loss after drying was higher than the amount of water absorbed by submersion. While 5 g of *C. sativa* L. - indica hemp core absorbed 16.63 g of water in 14 days and lost 17.13 g in 6 days, *C. sativa* L. hemp core only absorbed 13.75 g and lost 14.25 g. These facts were probably attributed to the bigger pore size of the earlier matured *C. sativa* L. - indica hemp and an irreversible swelling of hemp core material during water absorption, as observed at micro-scale [5]. The quantitative analysis of lime-stabilized clay mortars (Table 1) verifies that specimens with infusions of Issaguen's hemp stem show the highest percentage of uncombined clay among all samples. In "FPE" specimen with industrial hemp stem it is mainly illite that got associated with lime, whereas in the specimen "FPK", with infusions of Issaguen's hemp stem, it is rather the chlorite. "FPE" specimen showed 27.7% free illite and 15.2% free chlorite and "FPK" specimen showed 42.2% free illite and 11.5% free chlorite, whereas in the sample mixed with water all the clay mineral matrixes got combined with lime.

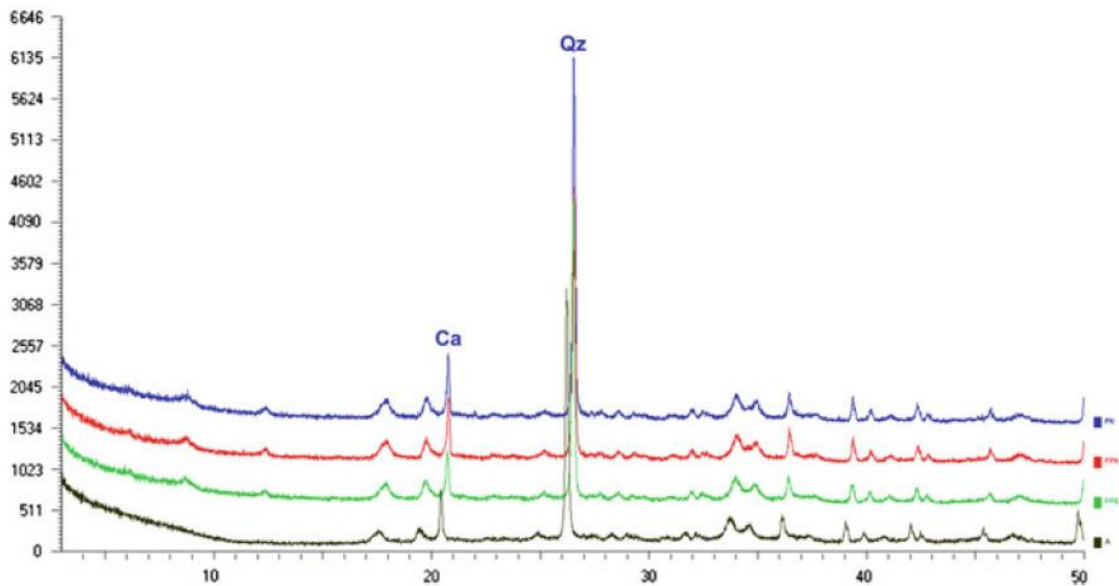


Fig. 8 Mineralogical X-ray diffraction of earth mortar specimens mixed with water (black) or infusions of plant materials (green, red and blue lines)

Table 1 Quantitative analysis by mineralogical X-ray diffraction of earth mortar specimens

Quantitative analysis (%)	A	PK	FPK	FPE
	With water	With infusion of hemp core (Issaguen)	With infusion of whole stem material (Morocco)	With infusion of whole stem material (Spain)
quartz and silicates	73.2	36.3	30.1	42.2
illite	–	42.2	42.2	27.7
chlorite	–	10.4	11.5	15.2
calcite	7.1	1.5	2	2.2
amorphous	19.7	10.7	14.2	12.7



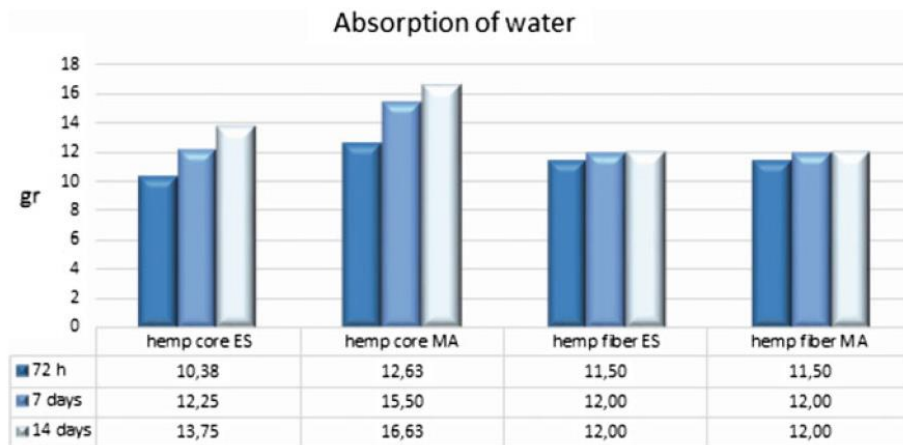


Fig. 9 Absorption of water in grams by submersion in water of 5 g hemp material (origin: Spain and Morocco)

### Drying kinetics of the different hemp concretes

In the first 72 h, the drying progressed faster in the molds of series 2, stabilized with 16% lime. Then the series 1, stabilized with 8% lime, advanced, until a slightly higher water loss was noticed in the series 2 after 5 weeks of drying. In the molds of series 1, those made with hemp hurds, dried faster in the beginning, while after 24 h the drying of specimens with chopped stem material was advanced. The total water loss of the last one was greater after 5 weeks. In the molds of series 2, those made with hemp hurds dried faster at first, while after 24 h the drying of specimens with chopped stem material was advanced. After the 3 weeks until 4 weeks of age, the specimens made with hemp hurds showed faster drying once more. Nevertheless, total water loss after 5 weeks was greater in the molds with chopped stem material of both series than in those with hemp hurds (in specimens with chopped stem material 347 g and 355.5 g in series 1 and 341.5 g or 334.5 g in series 2, in those with hemp hurds 317 g and 327 g in series 1 and 319 g and 305.5 g in series 2). Therefore, the final water loss was slightly higher in molds, stabilized with a lower amount of lime. According to these results it can be understood that in lime stabilized hemp clay concretes the hemp stem material releases more inner pore water through swelling than the hemp hurds material, possibly due to the higher contact area of the fibers.

### Capillarity water uptake of lime stabilized hemp-clay

#### Concretes with de-Fibered and Whole Stem Material

In the short-term absorption of concretes of series 1, stabilized with 8% lime, molds made with whole stem material absorbed water quicker, whereas after 3 h molds made with hemp hurds became more absorbent. It is expected that the absorption does not end until the full saturation of the hemp hurds is achieved, a process that, as observed in the submersion test, takes more than 14 days in the hemp hurds, whereas 7 days in fiber material (Fig. 10). The molds subjected to capillary absorption of 72 h (Figs. 10 and 11), take more than 3 weeks to dry under T20 RH80 conditions. The whole stem species dried earlier, as did the hemp fibers with respect to the hemp hurds. Comparing series 1 and 2, it can be observed that higher stabilization has a more favorable effect on the specimens with hemp hurds, because the absorption progresses slower from the beginning. However, a higher lime addition benefits practically nothing to the specimens with chopped stem. Till 24 h the absorption of series 2 progressed practically in the same rate as in the samples stabilized with half amount of lime, although after 24 h the absorption advanced somewhat slower than in the series 1. In series 2 the molds with hemp hurds showed more absorption than the molds with whole stem from 36 h and not after 3 h as in the series 1. Finally,

the drying of the molds stabilized with twice the lime was slower than in series 1, although previously absorbed water was lower.

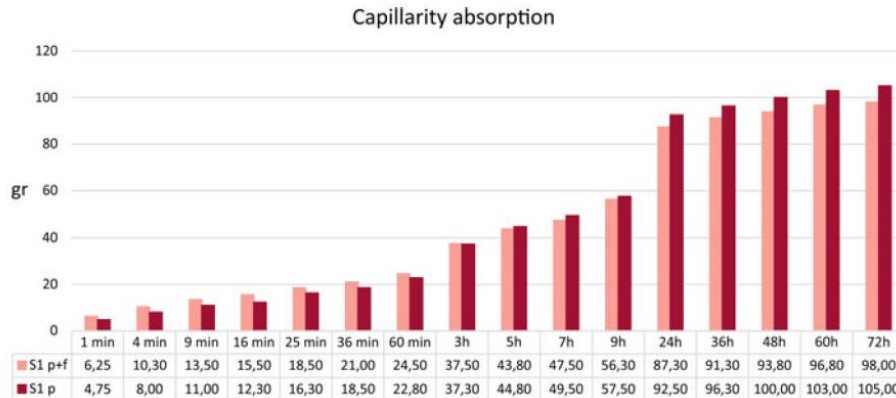


Fig. 10 Capillarity absorption in grams, in specimens of SERIES 1, stabilized with 8% lime, with hemp hurds (S1 p) or chopped stem (S1 p + f)

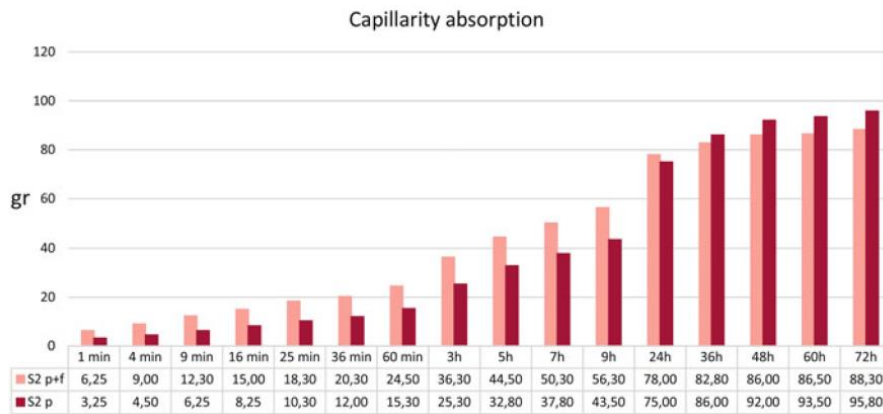


Fig. 11 Capillarity absorption in grams, in specimens of SERIES 2 stabilized with 16% lime, with hemp hurds (S2 p) or chopped stem (S2 p + f)

### Mechanical results of lime stabilized hemp-clay concretes with de-fibered and whole stem material

Contrary to the results of another research carried out with lime, cement and gypsum concretes containing hemp hurds and fibers [14, 15], in the present work adding fibers successfully increased the compressive strength as well as the flexural strength of all tested lime stabilized hemp-clay concretes (Table 2 and 3). Nevertheless, the samples of series 2, stabilized with 16% lime showed worse results in their compressive strength than samples of series 1 stabilized with 8% lime, which showed 1.3 MPa for the specimens with whole stem and 1.2 MPa for the specimens with hemp hurds. The specimens of series 2, stabilized with 16% lime showed 1.26 and 1.18 MPa, respectively. On the contrary, flexural strength was higher in series 2 stabilized with 16% lime than specimens of series 1, which exhibited 0.55 MPa for the specimens with whole stem and 0.43 MPa for the specimens with hemp hurds. The specimens of series 2 showed 0.58 and 0.45 MPa respectively. Although large amounts of plant material, equivalent to one m<sup>3</sup> perm<sup>3</sup> of concrete were used for the specimens of this research, their compressive strengths were within the upper range of adobe bricks that usually range from 0.32 to 2.46 MPa [31] and are frequently found in load-bearing applications. The mechanical performance of hemp concretes is limited due to meso-pores (from 0.1 to 1 mm) formed by trapped air within the hemp

aggregates and the binder itself and micro-pores (lower than 0.01  $\mu\text{m}$ ) in the binder matrix. 40% in volume of lime binder would be needed to reach a compressive strength of 1.15 MPa by reduction of the macro-pores, that occupy spaces of up to 1 cm between particles of a hemp light concrete [10]. Earth is a cheaper and environmental friendly material to fill those macro-pores. Clay particles from 0.08 up to 2.5  $\mu\text{m}$ , contrary to air and hydraulic lime binders [4], cover all the pores of the wall of hemp hurds but form a heterogeneous structure after drying and thus reduce the contact area with the same [7].

Table 2 Mechanical results series 1 (P + F = whole stem, P = hemp hurds)

Reference	Mass (g) specimens 4 × 4 × 16 (cm)	Flexural strength (37 days)		Compressive strength (37 days)	
		Load (N)	Tensile (MPa)	Load (N)	Tensile (MPa)
S1 P + F (a)	275.28	234	0.5	2.037	1.3
				2.026	1.3
S1 P + F (b)	274.59	230	0.5	2.163	1.4
				2.261	1.4
S1 P + F (c)	270.81	238	0.6	2.062	1.3
				2.137	1.3
S1 P + F (d)	280.02	253	0.6	2.192	1.4
				2.097	1.3
S1 P (a)	271.18	173	0.4	1.887	1.2
				2.070	1.3
S1 P (b)	269.91	176	0.4	1.846	1.2
				1.758	1.1
S1 P (c)	271.20	206	0.5	1.948	1.2
				2.103	1.3
S1 P (d)	270.75	175	0.4	1.880	1.2
				1.978	1.2

Table 3 Mechanical results series 2 (P + F = whole stem, P = hemp hurds)

Reference	Mass (g) specimens 4 × 4 × 16 (cm)	Flexural strength (37 days)		Compressive strength (37 days)	
		Load (N)	Tensile (MPa)	Load (N)	Tensile (MPa)
S2 P + F (a)	298.4	202	0.5	1.890	1.2
				1.923	1.2
S2 P + F (b)	288.14	206	0.5	1.991	1.2
				2.015	1.3
S2 P + F (c)	293.61	260	0.6	1.984	1.2
				2.132	1.3
S2 P + F (d)	304.08	278	0.7	2.064	1.3
				2.257	1.4
S2 P (a)	272.00	181	0.4	1.957	1.2
				1.746	1.1
S2 P (b)	287.13	209	0.5	1.841	1.2
				1.987	1.2
S2 P (c)	281.24	196	0.5	1.896	1.2
				1.973	1.2
S2 P (d)	287.78	186	0.4	1.822	1.1
				1.859	1.2

## CONCLUSIONS

This paper addresses the feasibility of the implementation of an ancestral hemp variety against industrial hemp in concrete. In this context, the drying kinetics and stabilization with lime of earth mortars, mixed with water or plant infusions were studied for both hemp hurds and whole stem material. The results confirmed different findings with de-fibered and non-de-fibered stem material and also with different hemp varieties. Those differences could be due to anatomic and chemical deviations. However, the differences between both species are not important enough to disregard the use of Moroccan ancestral *C. sativa* L. - indica hemp for construction purposes. The research rather demonstrates that in hemp-clay concretes, stabilized with lime, different varieties of hemp may need different formulations containing appropriate clays, in order to obtain maximum performance. Adapted formulations and treatments seem to be necessary to optimize results in all hemp varieties and those are more important in de-fibered than in whole stem material. Furthermore, clay based concretes made with de-fibered and non-de-fibered hemp stem, stabilized with two different percentages of lime were compared. Concerning the mechanical properties, the lower results of compressive strength with higher amount of lime addition could be explained by the alkaline medium created by higher lime content which is probably the reason for higher hemi-cellulose release, causing hardening problems and hindering the interaction between clay and lime. This resulted in weakening of clay-lime matrix. Why a higher amount of lime addition benefitted the flexural strength of both concretes can only be explained through additional macroscopic studies, or preparing control specimens without addition of lime. Higher additions of lime didn't reduce significantly the capillarity absorption and delayed the subsequent drying process of the specimens.

## Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the funding by REMINE Project, H2020-MSCA-RISE-2014 and Research groups HUM-629 and RNM 0179 (Regional Government of Andalusia). The authors thank to Antonio Sanchez Navas of University of Granada for technical assistance in analysis and the mineralogical X-ray diffraction of samples and also to Abdellatif Adebibe, whose request of collaboration in the alternative socioeconomic development of the Moroccan Central Rif region was an incentive for this research. Lime, hemp and clay materials were sponsored by members and collaborators of Cannabric (Spain) and Adrar Nouh (Morocco).

## REFERENCES

1. Ali, M., Liu, A., Sou, H., & Chouw, N. (2012). Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 814–825.
2. Amaducci, S., Scordia, D., Liu, F. H., Zhang, Q., Guo, H., Testa, G., et al. (2014). Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. *Industrial Crops and Products*.
3. Anderson, L. C. (1974). A study of systematic wood anatomy in *Cannabis*. In *Botanical Museum Leaflets* (Vol. 24. pp. 29–36). Harvard University.
4. Arizzi, A., Cultrone, G., Brümmer, M., & Viles, H. (2015). A chemical, morphological and mineralogical study on the interaction between hemp hurds and aerial and natural hydraulic lime particles: Implications for mortar manufacturing. *Construction and Building Materials*, 75, 375–384.

5. Arizzi, A., Brümmer, M., Martín-Sanchez, I., Cultrone, G., & Viles, H. (2015b). The Influence of the type of lime on the hygric behaviour and bio-receptivity of hemp lime composites used for rendering applications in sustainable new construction and repair works. *PIOS ONE*.
6. Arnaud, L., & Boyeux, B. (2011). La chènevotte comme nouveau Granulat écologique et performant pour une utilisation dans le bâtiment. Académie d'Agriculture de France – Séance du 12 Janvier.
7. Balčiūnasa, G., Vėjelis, S., Vaitkus, S., & Kairyte, A. (2013). Physical properties and structure of composite made by using hemp hurds and different binding materials. *Procedia Engineering*, 57, 159–166.
8. Bevan, R., & Wooley, T. (2008). *Hemp lime construction: A guide to building with hemp-lime*. Bre-Press.
9. Biagiotti, J., Puglia, D., & Kenny, J. M. (2004). A review on natural fiber-based composites-part I: Structure, processing and properties of vegetable fibers. *Journal of Natural Fibers*.
10. Cérézo, V. (2005). Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. L'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Thèse doctorale: Génie Civil.
11. Chen, T., Yao, S., Merlin, M., Mai, H., Qiu, Z., Hu, Y., et al. (2014). Identification of Cannabis fiber from the Astana Cemeteries, Xinjiang, China. *Economic Botany*, 68(1), 59–66.
12. Chouvy, P.-A., & Afsahi, K. (2014). Hashish revival in Morocco. *International Journal of Drug Policy*, 25, 416–423.
13. Crônier, D., Monties, B., & Chabbert, B. (2005). Structure and chemical composition of bast fibers isolated from developing hemp stem. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 53 (21), 89–8279.
14. De Bruijn, P. B. (2008). *Hemp concretes: Mechanical properties using both shives and fibres*. Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Sciences Alnarp.
15. De Bruijn, P. B., Jeppsson, K.-H., Sandin, K., & Nilsson, C. (2009). Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres. *Biosystems Engineering*, 103(4), 474–479.
16. Diquélou, Y., Gourlay, E., Arnaud, L., & Kurek, B. (2015). Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix. *Cement & Concrete Composites*, 55, 112–121.
17. Elfordy, S., Lucas, F., Tancret, F., Scudeller, Y., & Goudet, L. (2008). Synthèse des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre. *Construire en Chanvre*.

18. Gourlay, E., & Arnaud, L. (2011). Des matières premières au béton de chanvre: optimization des propriétés thermiques et mécaniques. 20ième Congrès Français de Mécanique Besançon.
19. Hustache Y., & Arnaud L. (2008). Synthèse des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre.
20. Ingraio, C., Lo Giudice, A., Bacenetti, J., Tricase, C., Dotelli, G., Fiala, M., et al. (2015). Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 29–42.
21. Ip, K., & Miller A. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions of hemp–lime wall constructions in the UK University of Brighton, School of Environment and Technology, Cockcroft Building, Lewes Road, Brighton BN2 4GJ, United Kingdom.
22. Jiang, H., Wang, L., Merlin, M. D., Clarke, R. C., Pan, Y., Zhang, Y., et al. (2016). Ancient Cannabis Burial Shroud in a Central Eurasian Cemetery. *Economic Botany*, 70(3), 213–221.
23. Kymäläinen, H.-R., Hautala, M., Kuisma, R., & Pasila, A. (2001). Capillarity of flax/linseed (*Linum usitatissimum* L.) and fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) straw fractions. *Industrial Crops and Products*, 14(1), 41–50.
24. Kymäläinen, H.-R., Koivula, M., Kuisma, R., Sjöberg, A.-M., & Pehkonen, A. (2004). Technologically indicative properties of straw fractions of flax, linseed (*Linum usitatissimum* L.) and fiber hemp (*Cannabis sativa* L.). *Bioresource Technology*, 94(1), 57–63.
25. Kymäläinen, H.-R., & Sjöberg, A. (2007). M. Flax and hemp fibers as raw materials for thermal insulations. *Building and Environment*, 43(2008), 1261–1269.
26. Nguyen, T., Picandet, V., Sofiane, A., & Baley, C. (2011). Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1039–1050.
27. Niyigena, C., Amziane, S., Chateauneuf, A., Arnaud, L., Bessette, L., & Collet, F. (2016). Variability of the mechanical properties of hemp concrete. *Materials Today Communications*, 7, 122–133.
28. Nozahic, V., Amziane, S., Torrent, G., Saïdi, K., & De Baynast, H. (2012). Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice–lime binder. *Cement & Concrete Composites*, 34, 231–241.
29. Sawler, J., Stout, J. M., Gardner, K. M., Hudson, D., Vidmar, J., & Butler L. (2015). The genetic structure of marijuana and hemp. *PLoS ONE*, 10.
30. Senga Kiessé, T., Ventura A., Van der Werf H. M. G., Cazacliu B., Idir R., & Andraina, A. (2016). Introducing economic actors and their possibilities for action in LCA using sensitivity analysis: Application to hemp-based insulation products for building applications. *Journal of Cleaner Production*, 1–12.

31. Silveira, D., Varum, H., & Costa, A. (2007). Análise do comportamentos sísmico de construções existentes em adobe. -7 Congresso de sismologia e engenharia sísmica. SÍSMICA.
32. Stevulova, N., Kidalova, L., Cigasova, J., Junak, J., Sicakova, A., & Terpakova, E. (2013). Lightweight composites containing hemp hurds. *Procedia Engineering*, 65, 69–74.
33. Struik, P. C., Amaducci, S., Bullard, M. J., Stutterheim, N. C., Venturi, G., & Cromack, H. T. H. (2000). Agronomy of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) in Europe. *Industrial Crops and Products*, 11(2–3), 107–118.
34. Van der Werf, H. G. M. (1994). Crop physiology of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) (Ph.D. thesis). Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, p. 153.

## PAPER 2





Journal of Building Engineering

Volume 31, September 2020, 101323



# A review of the factors affecting the properties and performance of hemp aggregate concretes

M.P. Sáez-Pérez (Professor)<sup>a</sup>  , M. Brümmer<sup>b,1</sup>  , J.A. Durán-Suárez<sup>c,2</sup>  

Indicios de calidad.

1. Artículo científico publicado en Journal of Building Engineering, en 2020. Con un Factor de Impacto de 3.379 (2020) según WOS, Web of science, Clarivate Analytics. Su CiteScore es de 4.9.

2. Para las categorías JCR de CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY, tiene una clasificación de 15 respecto a 63 con cuartil Q1, al igual que en ENGINEERING, CIVIL el ranking es 22 respecto a 134 y cuartil Q1.

3. Ha sido citado desde finales de 2020 a mayo de 2021 siete veces sin auto citas en las siguientes categorías de web of science:

- CONSTRUCTION BUILDING TECHNOLOGY (57.143%).
- ENGINEERING CIVIL (42.857%).
- ENERGY FUELS (28.571%).
- MATERIALS SCIENCE MULTIDISCIPLINARY (28.571%).
- CHEMISTRY MULTIDISCIPLINARY (14.286%).
- GREEN SUSTAINABLE SCIENCE TECHNOLOGY (14.286%).

4. Según SJR, la revista tiene H-Index de 26 y en las diferentes áreas (Architecture, Building and Construction, Civil and Structural Engineering, Mechanics of Materials, Safety, Risk, Reliability and Quality se encuentra indizada en Q1.

5. La revista está incluida en las siguientes bases de datos:

- Ei Compendex
- Scopus
- Science Citation Index Expanded
- INSPEC



# A REVIEW OF THE FACTORS AFFECTING THE PROPERTIES AND PERFORMANCE OF HEMP AGGREGATE CONCRETES.

## ABSTRACT

New energy-efficient materials are increasingly used in architecture and civil engineering today. Many of these are based on the reuse of plants and plant residues from industry and agriculture for the production of bio-sustainable insulation materials, and as aggregates in concretes. This paper presents the results of our study of research into hemp concrete, an emerging material in the green building sector, since it first appeared about twenty-five years ago to the present day. The study centres on a growing bibliography over this period, emphasizing some fundamental parameters of hemp raw materials and related building materials, the binders used in the production of hemp aggregate concretes and assessments of different aspects of their performance. The most important properties of hemp concrete vary according to the quality of the plant aggregates, the choice of binders (typically aerial or hydraulic lime), the proportions of the raw materials and the application techniques. Organic aggregates are less stable than inorganic aggregates and are therefore more difficult to use in a concrete mix with both inorganic and organic binders. Among other reasons, this is due to the disproportionate amount of water required in the mixing of plant-based concretes and to the release of organic compounds, which can have serious effects on the hardening process. This problem was identified in scientific studies on the use of hemp concrete in sustainable, bioclimatic construction, whether applied as a semi-liquid mass or as a precast element. This new biomaterial offers excellent results in terms of its application on site and has important physical properties, such as high durability and easy conservation. This study seeks to provide a useful tool for future research into sustainable building materials, better use of available energy and plant-based resources and more efficient recycling of the waste produced by human activities.

**KEYWORDS:** Hemp concrete; Hemp shives; Hemp fibre; Green building; Agricultural waste; Hemp aggregates

## 1. BACKGROUND AND INTRODUCTION

Global carbon dioxide levels have risen by over 39% over the past century [1] causing visible changes in the earth's climate. Climate change is caused by human activity, within which building is frequently reported as one of the highest energy consuming sectors [2, 3]. This has coincided with large-scale extraction of virgin natural resources since the beginning of the industrial revolution almost to the point of exhaustion [4]. The voracious appetite of the building sector in its broadest sense (40% of the world's energy, 25% of global water and 40% of global resources – according to the UN Environment Program, 2016) is not only related to the production of building materials and technical installations, construction, operation, renovation and demolition, as the energy used to power and heat buildings during their life-cycle must also be taken into account [5, 3]. The building sector must therefore urgently address the issue of greenhouse gas reduction and encourage the use of energy-efficient building materials that can be manufactured in an environmentally-friendly manner [2, 5, 6] with the additional objective of reducing dependence on fossil fuels. Moreover, significant correlations have been found between energy consumption and the symptoms produced by “unhealthy building syndrome”, including various allergies [7], so highlighting the need to take a more user-friendly approach [8]. This has led, especially over the last decade, to increasing research aimed at developing bio-based, affordable construction technologies [9, 10, 11]. One example is the wide range of innovative applications of natural fibres [12, 13] that have been created for the green building sector [14, 15] amongst others, without compromising on contemporary comfort standards and performance specifications [5]. This review focuses on a fibre crop with multiple advantages, which therefore has great economic potential [16, 12, 17, 13]: Hemp (*Cannabis Sativa L.*). Although its most plausible origin and centre of diversity was in Central Asia [18, 17], different authors have concluded that the *Cannabis* species has been grown on the Eurasian continent for at least 6,000 years, as confirmed by archaeological findings [17, 16]. Cultivation may even have begun 10,000 years ago [17, 18, 15] in parallel with the climatic and behavioural changes that took place at the beginning of the Neolithic period. This crop was farmed for three main purposes: the strong and durable fibre of its stalks; its nutritious, oil-rich seeds; and the psychoactive and medicinal compounds produced by the glandular hair on the flowers of the female plants [18, 19]. It is known that [18] “Early humans used both, *C. sativa* and *C. indica* for fibre and seed but only *C. indica* has a history of drug use”. The versatility of the annual, fast growing [20, 21] *Cannabis* plant and its ability to adapt to different climates and soil types coupled with its limited need for fertilizers [13], its biocide-free growth and its important

role in crop rotations [17, 13, 22] are all important factors in its worldwide spread and cultural impact of this plant, as confirmed by abundant archaeological evidence [23, 12] and written historical testimonies [17]. It was not until the beginning of the last century that, in a process led by the United States, laws started to limit and obstruct the farming [24], selection and crossing of *Cannabis*. This not only led to the emergence of a black market in several countries but also delayed the development of green technologies that were already being tested at that time. In 1941, for example, the New York Times reported that Henry Ford had developed a bio-plastic for car bodies [25] containing 30% soy flour and a liquid bio-resin and 70% cellulose from slash pine, straw, hemp and ramie fibre, which was lighter and had better mechanical performance than steel. Studies confirmed [26] that the mechanical properties of hemp fibre polymer composites were superior to those made with other natural fibres such as kenaf, coir, sisal and jute. Hemp fibre composites showed the highest tensile (52 MPa) and flexural strength (54 MPa), comparable with glass fibre composites (60 MPa), while requiring significantly lower power consumption and greenhouse gas emission in their manufacture [25]. As hemp fibre composites can withstand high levels of mechanical and thermal stress, they have been used in many recently developed products in sectors such as aeronautics and space travel [27].

The long-standing divide between agriculture and the building industry during the past century spurred the development of non-renewable resources and energy-consuming insulation materials such as glass and rock wool [28]. The result is that today natural fibres have only a very small share of the insulation market in Europe (e.g. 0.5% in Germany) because they cost roughly twice as much as petroleum or mineral based products [29, 28] with comparable thermal conductivities [28]. Numerous studies have revealed the insulation capacities of concretes containing plant fibre and the energy savings they could bring [30, 31, 32], compared to concretes composed of synthetic fibres or minerals. Hemp fibre has the potential for various new technical applications (e.g. the automotive and building industries, industrial design) but represents an average of only 20-35% of the stem mass [20], while raw materials based on the woody core of the stem section (hemp shives, also called hurds) are about twice as abundant and cost about half as much as raw bast fibres [29].

To this end research focuses on hemp concrete as part of an innovative bio-based economy [2] for building applications, in which, above all, hemp shives are used as a substitute for the usual mineral aggregates, along with a binder (mainly lime) and in rare cases additional compounds and additives [33, 34]. Hemp concrete began to be used in walls, slabs and plasters (historic timber buildings, new construction and repair works) in the early 1990's in France [34], which then emerged as the main producer and transformer of hemp in the European Union [17]. As a supplementary example of what was previously reported in timber frame constructions with tamped hemp concrete infill [33, 35, 36], Figure 1 shows two buildings with load-bearing hemp walls, constructed with prefabricated blocks of hemp concrete (A) and cast, compacted hemp concrete (B) as well as building blocks made with hemp concretes mixed with either a clay binder (C) or with NHL3.5 lime (D). (E) and (F) show a non-loadbearing building with an internal timber structure with cast, non-rendered hemp-lime concrete.



Fig. 1. Hemp concrete constructions built with premade building blocks (A) and cast, compacted loadbearing, hemp-clay concrete walls (B). Building blocks made from hemp shives (2-25 mm) and a clay binder (C) or hemp shives (2-25 mm) and a lime binder, with or without addition of mineral pigments (D). (E) and (F) show different views of a building made with non-loadbearing, casted hemp-lime concrete walls after 20 years exposure to weathering conditions in Switzerland. (G) Sprayed application of hemp concrete as an outer coating.

It is estimated that about 5000 tons of hemp are used each year in the construction sector in France today. In 2006 it was reported that over 4000 tons were consumed in the same sector with an overall value of 35 million Euros [35]. However, only 15% of the 2010 harvest of hemp shives in Europe was used in construction [29]. Hemp building materials have so far been used in just a few large commercial projects [36]. In order to ensure they move into mainstream production and use, it is important for building-product and green building designers to understand these innovative materials in order to be able to optimize their thermal, acoustic, hygrothermal and mechanical performance in each context.

While *Cannabis* is grown in 86 countries worldwide [37, 38], about 30 countries have licensed cultivation of fibre-type hemp varieties [39] with maximum Delta 9-THC levels of 0.2% or 0.3%, almost half of which have signed up to this movement in the last 25 years. Given the fact that very few genotypes have such a low percentage, the possibility of extending this limit to 0.6%-0.8% is currently being studied in several countries, although Switzerland has gone a stage further allowing THC levels of up to 1%. Recent laws that regulate the cultivation of *Cannabis* exclusively for the production of cannabinoids or seeds are unsustainable in that a lot of

agricultural waste is produced. The best application involves the utilization of all the plant's resources [17, 4], so reducing the impact on the environment [17]. Several authors link the presence of psychoactive components in the plant [40] with a specific deviation of agricultural and innovative technical development with hemp towards this goal [38, 19, 13]. Certainly, there is a need for updated legal regulation in many countries to explore alternative, adaptive models that take into account the historical, ecological and cultural role played by *Cannabis* in each region.

## 2. CLASSIFICATION AND DEFINITION OF HEMP AGGREGATE CONCRETE

### 2.1 Conceptual context

Fibre crops, and the industrial [41] and agricultural waste they produce [42], can be used as a substitute for mineral aggregate in concretes, as raw fibre reinforcement, cellulose fibre reinforcement [43, 44, 45] or in the form of ash, acting as an additive with pozzolanic reactivity [6]. Prior to the recent development of applications in green concrete, animal bedding and biomass [29, 46], hemp shives (the chopped woody core of hemp stalk or by-product of hemp fibre decortication) were either burnt or land-filled, as happens all over the world with numerous other agricultural waste products [6]. An emerging solution to postpone the reintroduction into the atmosphere of the CO<sub>2</sub> sequestered by these plants [6, 42, 4] are building envelopes that store carbon dioxide [47, 15] and are made with bio-aggregate concretes, e.g. concretes that combine hemp shives with a mineral binder and water [48, 49]. The result, after hardening and drying, is a multi-porous [49] insulating material with dry densities of at least 175 kg/m<sup>3</sup> with a silica sol treatment [50] and 163.60 kg/m<sup>3</sup> [51] or 182 kg/m<sup>3</sup> [52] with a starch binder. When common lime binders were used, dry density values ranged from 250 kg/m<sup>3</sup> to 660 kg/m<sup>3</sup> [20]. Dry densities of over 410.28 kg/m<sup>3</sup> were achieved with stabilized clay [53] and of over 1040 kg/m<sup>3</sup> with MgO-cement. The densest hemp shive concretes made with these last two binders reached 1124.14 kg/m<sup>3</sup> and 1150 kg/m<sup>3</sup> [54, 55]. Different formulations with varying final densities have been used in a range of applications, e.g. concretes and mortars for walls, plasters, floor-slabs, slabs and roof insulation [49]. While metallic, mineral and polymeric fibres have been added to concretes since the 1920's for mechanical reasons [56], e.g. to avoid multiple cracking [57], research on hemp concrete has sought to create a multi-performance material that improves the thermal, hygrothermal and acoustic comfort of the building envelope. The plant aggregate itself has a lesser role as reinforcement due to its porosity [56]. Natural fibres and aggregates of plant or animal origin have been added to natural binders since ancient times [56] in order, for example, to prevent retractions in clay-based mortars and concretes [58, 59, 60], although they were often only added in small proportions [43, 61, 62, 63, 64]. While numerous plant species have been recently rediscovered as additives in green concretes [44, 65, 15], among which "shives" from sunflower stems and flax stems [8, 49] are the most similar to hemp shives, hemp is particularly attractive from a business point of view because it has both fibres and abundant woody core. Moreover, the fact that hemp shives show strong inter-granular coherence in a dry state [66] and that they vary considerably in size allows them to be added to the concrete matrix in proportions equivalent to their bulk density, so replacing all of the mineral aggregate.

### 2.2. Cannabis stem and its key components

The stem of the hemp plant is divided into separate parts with different chemical compositions. As seen in Table 2, the outer section contains long liberian fibres with a low lignin content compared to that of the woody core. The liberian fibres vary in length between 5 and 50 mm and they are around 40 µm wide, while the cellulose fibres from the woody core are around 0.55 mm long and about 22 µm wide [67] (Figure 2). For important fibre applications, varieties with tall stems, few inter-nodal spaces, small numbers of branches and a small woody core are used.

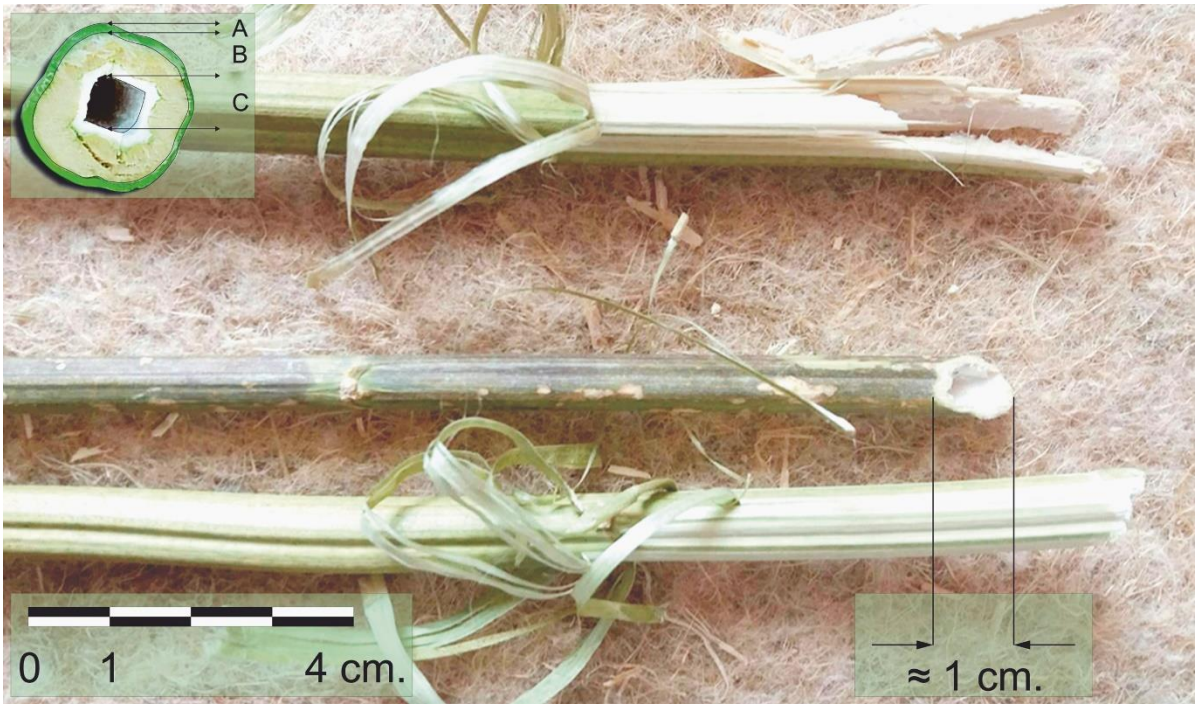


Fig. 2. Section of the stem of the hemp plant and its anatomical parts. A. Bark (composed of epidermis, bast fibre and cambium) B. Woody core (composed of xylem and pith). C. Hollow space.

According to [68], some of the best known varieties are *Cannabis sativa* (developed into industrial hemp with a wide range of applications other than drug use), *Cannabis indica* (used in drug, medical and fibre applications) and *Cannabis ruderalis* (regarded as a wild strain and therefore not normally considered for industrial applications but valued as an aromatic plant).

Fibre Hemp varieties are often not morphologically distinguishable from varieties grown for drug consumption [4], in that both genotypes are very similar [17]. The best ways to distinguish them are by seed size, terpenophenolic compounds [38] and plant height [39]. The most important components of the lignocellular walls of the plant aggregates used in hemp concrete are cellulose, hemicelluloses and lignin [69], the proportions of which vary from one species to the next, as do the position and function of the cells. The cells also have aromatic compounds associated with lignins, pectins, waxes, fats and lipids. Ash or mineral compounds can be extracted by calcination [70]. Natural polymers are made of cellulose, hemicellulose and lignin [71]. These facts also explain the specific bearing strengths and characteristics of hemp concretes. The most common properties of the raw material are directly related to the morphological structure and chemical composition of the plant fraction. However, as shown in the following tables, there are a wide range of existing references. Typical composition data has been obtained from various sources. But in addition, and as indicated by [28], theoretically, the plants produced by each grower may vary due to fermentation, fractionation or alteration of atmospheric conditions. These changes in the plant can affect its performance as an insulation material. Table 1 shows the different components of hemp stem and their respective percentages.

Table 1. The main components of fibre hemp in percentage terms.

Component	%	References
Holocellulose	90.3	[72]
Water soluble constituents	1.2	[72]
Klason lignin	4.6	[72]
Acid-soluble lignin	1.5	[72]
Removable lipophilic constituents	0.5	[72]
Ashes	2.0 /// 2-5	[72] /// [73]



Al	240.5	-	K	2103.3	0.2-0.5	S	371.7	-
B	6.5	-	Mg	480.0	0.006-0.02	Sr	17.0	-
Ba	6.6	-	Mn	47.1	-	Si	19.5	-
Ca	5330.0	1.5-3	Na	26.7	-	Ti	3.7	-
Cr	2.9	-	Ni	1.2	0.4-1	Zn	4.5	-
Cu	2.0	-	P	666.7	-	F	-	-
Fe	207.8	-	Pb	<1.0	-	C	-	-

For construction purposes, the hollow hemp stem of 1 to 5 metres in length consists of two main components: the bark on the outside of the vascular cambium of its grooved cross section and the woody core on the inside. These two raw materials vary not only in terms of quantity (there is roughly twice as much core as bark) [84] but also show significant morphological and chemical differences that also depend on the harvest time [22, 85]. Lower bark fractions (minimum 10-15%) were found in drug strains [86], while hemp fibre usually has bark fractions of at least 20% [20]. The thickness of the fibre normally decreases towards the top part of the stem [87] and genotypes with longer vegetative cycles produce more bark [17]. Fibre content [38] and tensile strength [88] are both increased by higher plant density. The hemp fibres with the best mechanical properties are reported to be in the middle part of the stem [89] with a tensile strength ranging from 300 to 800 MPa [90]. The physical and mechanical properties of the stem material depend on the variety, section height and diameter, but generally increase towards the bottom of the stems [91]. The mechanical properties of the porous woody core, with a density of 320 kg/m<sup>3</sup> [92], are quite different from those of both hard and soft woods [89]. Several differences have been found between *C. indica* and *C. sativa* species in terms of wood anatomy, wood cell distribution, cell wall thickness and cell size [17, 93]. The absorption capacity is generally greater in the core than in the bark [93]; a further study revealed that hemp core porosity is in the region of 60%, formed by parallel tubes of more or less 0.08 mm in diameter [47, 96]. Hemp core particles can be identified by more hydrophobic cells in the xylem and hydrophilic cells in the pith. The latter are responsible for a quick initial water intake in the first 2 minutes of submersion (during kneading of the concrete hemp shives can absorb 3 times their own weight in water), while xylem cells encourage water intake over a long period [96] that can last for days or weeks [55] in one single hemp shive and therefore has consequences for the hydration of the binders. Other researchers [88] found that water and alkali-soluble components increase with the maturity of the plant. In fact, the release of the polysaccharides present in the hemicellulose, which is more abundant in the hemp core (31%) than in the bark (13%) [22], is associated with a delay or hindering of the setting process with numerous binders in hemp concrete formulations [56]. Macroscopic and microscopic alterations in the plant may be produced by any of the aforementioned parameters (density, porosity, mechanical properties etc.), together with natural variations within each plant [97] regardless of the growing techniques [17], the geographical and growing conditions [90], and the retting and decortication methods [25]. These alterations may affect the physical and mechanical properties of the plant material [98, 99] when used in hemp concrete. The result is that the relative impact of all these different parameters makes formulations with plant-based aggregates more difficult to control than those involving mineral or synthetic aggregates.

### 2.3. Binders

The choice of binder is one of the biggest challenges in the design of a hemp concrete, in that it has an important role in the formulation. Either fluid or mixed with water its function is to envelop and bind the coarse and fine particles of the aggregate together. The type of binder and the dosage used can affect the mechanical [49], thermal [100], hygrothermal [101] and acoustic [66, 102] performances of the bio-aggregated concrete, some of which are correlated with its durability. The binders discussed in this article are those referred to in the available publications about hemp concretes. The goal of any researcher is to use the precise quantity of binder needed to obtain optimum results in one or more of the aforementioned aspects. Other aspects investigated include durability when exposed to fire [103], climate conditions [104], mechanical stress [105] and microorganisms [106]. The binder and its formulation also have an important influence on the final cost and the life-cycle impact [107] of a hemp concrete (e.g. embodied energy and CO<sub>2</sub> emissions in its manufacture, the possibility of reabsorption of part of the carbon dioxide during the hardening process, transport, recycling, etc.). Hemp concrete is frequently reported as a hemp-lime material [33, 35, 36, 108] and the binder most commonly used in

combination with hemp shives is (powdered) aerial lime, also known as hydrated lime, undoubtedly an interesting option given that its porosity does not detract from the capacity of hemp to absorb, transfer and change the phase of water in vapour and liquid forms. When used in thick walls (e.g. external walls), aerial lime formulations certainly harden better in combination with pozzolanic aggregates [56, 109], as the carbonation process is usually very slow [42]. This means that CO<sub>2</sub> cannot progress to the centre of the wall due to the fact that vapour penetration only happens within the superficial 3.67 cm of a non-plastered hemp concrete wall formulation of 413 kg/m<sup>3</sup> [110]. In such cases, walls may harden superficially and become powdery inside [105]. Research also suggests that materials like the quite acidic pozzolanic aggregates are thought to have a favourable influence on the interface between the binder and the natural fibres [56]. The binders set due to hydraulic activity (Portland cements, natural cement and hydraulic limes), carbonation (aerial limes CL-S or CL-S PL, dolomite limes DL and partially natural hydraulic limes NHL, hydraulic limes HL and formulated hydraulic limes FL), crystallization (gypsum) or water loss (clay and some organic binders). Mineral binders, used in hemp concrete or hemp mortars, are frequently aerial limes [100] and formulated binders with added natural hydraulic limes or Portland cement [108]. Natural hydraulic lime [111] natural cement [102], gypsum [45, 112], MgO cement [113] and silica sol binders [50] are also mentioned. According to Table 4, MgO cement achieved the highest compressive strength value of up to 5.20 MPa in comparative research with several other binders [44], which in other research was only surpassed by a concrete with chemically pretreated hemp shives and Portland cement that reached 8.03 MPa. Due to the fact that there are no data for the flexural strength of this material, it cannot be compared with all the material specifications shown in Table 4. The highest flexural strengths reported in the literature consulted on hemp concretes were achieved by formulated binders (1.21 MPa) composed of aerial lime, a hydraulic binder and pozzolanic additives [114] followed by stabilized clay. However, few studies have been carried out on MgO cement, natural cement (prompt), gypsum and clay binders [115, 116]. This might be explained by the fact that these binders are less common (MgO cement and natural cement), water soluble (gypsum and clay) or impure and non-standardized (local earth containing clay as the binder). As shown in Table 4, organic binders, such as corn starch [51] and sapropel [117], did not reach the maximum compressive strengths of formulations with comparable densities containing inorganic sol silica binders [50].

Although the hemicellulose content of hemp fibre (as happens with cotton, bamboo, coconut and flax) is significantly lower than that of other natural fibres such as wheat straw or wood [118], the delay or hindering of the setting of the binders in a hemp concrete matrix, caused by polysaccharide leaching from the hemicellulose material was observed by several researchers in both organic binders like starch [119] and inorganic binders such as lime [120], cement [121, 122] and gypsum [45, 112]. Apart from diverse chemical pretreatments and retting methods [123], in order to avoid the consequences of the interactions observed between hemp shives and organic or mineral binders [119, 122] due to the partial removal of hemicellulose and lignin, which also reduces the absorption behaviour of hemp shives [124], lime water pretreatment and moist curing proved unsuccessful at reducing the delay in the hardening of a hemp-lime concrete [42]. However, calcium ions in the Ca(OH)<sub>2</sub> solution react with the pectin contained in the fibres, forming stable surface structures, a promising method for improving the mechanical results of hemp concrete [125]. Moreover, non-chemical treatment, involving the previous washing of the hemp material with water, significantly improved the hydraulic activity of a cement-based hemp concrete [121], although complete hydration was not achieved. Hydration of the cement could be further improved by additional NaOH solution washing [126]. The hindering of the hydration of the different cement or cement-lime binders is reported to be more evident when the water obtained by submersion of the shives is used rather than when the shives are used directly. Plant materials rich in silicon, such as hemp stem and rice straw, have recently been proposed for possible use with geopolymer binders to form light concretes by formulating aluminosilicate materials (e.g. fly ash or furnace slag) and alkalescent solutions. The advantages of polymeric Si-O-Al-O bonds over Portland cement-based concretes are their high compressive strength and low levels of shrinkage as well as their environmental characteristics [127, 128]. They have also shown good bonding with cellulose materials and good mechanical strength with limited hemicellulose and lignin addition [54].

#### **2.4. Environmental and economic aspects**

Due to the low cost of processing [129, 42], plant fibres are cheaper than synthetic fibres [44] and they are often locally available [64]. Hemp farming involves only 11,400 MJ/ha, about half the energy required for other similar yields [107]. Negative aspects of hemp farming e.g. land and fertilizer use, could be overcome by crop rotation and organic farming [32]. Carbon emission per kg of hemp shive production ranges from 0.085-0.19 kg of CO<sub>2</sub>



[107, 130] although this is more than countered by the sequestration during growth of 1.5-2.1 kg of CO<sub>2</sub> [36, 107, 131]. The result is that hemp concrete generally has a positive balance in its climate change indicator [132, 133] due to the fact that carbon dioxide is stored in the plant-based aggregate [32]. The highest negative contribution is caused by the commercial binders [56, 32, 134], in particular Portland cement and to a lesser extent natural cement and natural hydraulic lime, followed by aerial lime and gypsum. As a general guideline, several studies agree on values of -0.3 to -1.0 kg CO<sub>2</sub> per kg hemp concrete [133]. An unrendered 30 cm thick hemp-lime formulation of 1 m<sup>2</sup>, with a density of 275 kg/m<sup>3</sup>, sequesters 82.71 kg of CO<sub>2</sub>, which compensates for the 46.43 kg of CO<sub>2</sub> emitted by the materials and during their processing, thus enabling the storage of 36.08 kg of CO<sub>2</sub> [107]. In a non-load-bearing hemp concrete with a wooden support structure, the lime binder consumes 49% of the primary energy and 68% of the water and causes 47% of the air pollution, followed by the wooden structure, the plasters and the hemp shives [32]. Lime burning and calcination (quicklime production) emit 0.42-0.8 kg CO<sub>2</sub> and 0.7 kg CO<sub>2</sub> per kg lime [133]. Calcic lime (CL) usually reaches up to 90% reabsorption [107] of the aforementioned 0.7 kg of CO<sub>2</sub> per kg of lime, although due to the setting problems that often occur in plant-based concretes [121], the CO<sub>2</sub> might not be reabsorbed by carbonation in the same quantity as in mortars made with mineral aggregates. This issue is not considered in the life-cycle assessments of the hemp-lime concretes we studied. A design that takes into account binder types with the lowest possible environmental impact [5], the transport of the materials, the dosage, the construction system and the application technology [135] is of vital importance in the final carbon footprint of a hemp concrete: e.g. a hemp-lime plaster formulation can have more impact than a sand-lime coating because more binder is needed [5].

In spite of an overall positive balance in all the phases of the life cycle of plant-based building materials [32] and their positive health impact [65], one clear drawback is their higher price compared with the conventional materials that dominate the market today [32]. This is why at present plant-based materials are preferred by just a small minority of customers who value their ecological and environmental qualities and their energy-saving benefits. The building industry represents 10% of the PIB and 28% of employment worldwide (OECD) and has a vast environmental impact [47]. Changes can only be achieved by the introduction of appropriate policies, to encourage the development and promotion of new, plant-orientated economies in the construction sector [32].

### **3. COMMON HEMP-BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS ON THE MARKET. METHODS AND SOLUTIONS.**

Hemp fibres are mostly commercialized for dry application. They are seldom seen as loose wools for manual [136] or sprayed application [137], used for example in roof insulation (installed density is 40-50 kg/m<sup>3</sup>) or as void filler. Normally, the bark fibres are processed into rectangular, thermo-welded insulating panels for roofs, attics, walls and suspended ceilings, containing 85%-90% hemp fibre, 8-10% polymeric PET-based fibres and 2-5% soda as a fire protector [138]. Occasionally, these insulating panels are manufactured with plant-based binders such as corn starch [139]. The panels (or rolls) are available in densities ranging from 25 to 45 kg/m<sup>3</sup> [140] for different thermal performances. Semi-rigid, thermo-welded insulating panels with densities of 90-100 kg/m<sup>3</sup> [141] contain 40% hemp fibres, 40% hemp shives and 20% PES-binder. After being adhered to façades, they are rendered with formulated mortars. Non-woven felts made with 75% hemp fibre and 25% recycled jute fibre [140] are used as levelling and acoustic underlay for floors, or for impact-reduction purposes between hard materials. Hemp-fibre reinforced composites are blends of materials ranging from thermoplastics such as polypropylene and polyethylene to thermoset fibres such as polyester. 100% bio-composite materials are now feasible when working with plant-based resins from soy, canola or corn. Typical applications include automobile interior substrates, furniture and other consumer products [17]. Hemp fibre reinforced composites have recently been developed into sandwich panels for façades, building skins and curtain walls [142]. Dust-free hemp shives offer a practical, loose filling material, while larger shives, mixed with dry earth and slightly compacted, are used in slabs [136]. Despite this, the main construction application of hemp shives is in concretes and mortars. Over the past 25 years, lightweight hemp concretes in the medium density range of 200-840 kg/m<sup>3</sup> [92], and also in lower [50, 51] or higher [55, 54] density formulations, have been used in manually cast or sprayed (figure 1) in-situ applications in walls (via filling and tamping of shuttering), slabs and plasters, as well as in pre-fabricated pieces [35, 143] (e.g. blocks and bricks) (Figure 1). These have proven to be high-performance, fire-retardant materials, generally reaching Fire Class B standard [20], although higher density materials (>360 kg/m<sup>3</sup>) can achieve Fire Class A2. In a 30-cm-thick hemp brick wall under a load of 3 kg/cm<sup>2</sup>, a fire resistance of >120 minutes [73] can be achieved with a denser, clay binder-based matrix. Hemp concretes are known for their

elastic-plastic behaviour and there are frequent reports of their dependence on a wooden support structure [7, 56, 14, 51, 144]. Most common binders are lime or formulated products [47], although sand and pozzolanic aggregates may be added to improve mechanical performance. Additives may be used for a range of purposes, e.g. to reduce the need for binder [145]. When bound together with pMDI, natural resins or by geopolymerisation, hemp shives are pressed into lightweight particle boards with a density range of 350 kg/m<sup>3</sup> to 1000 kg/m<sup>3</sup> [146]. The possibility of creating binder-less particle boards was also studied [147]. Hemp shives are generally processed into dust-free 2-25 mm long particles. Shorter and thinner particle sizes of 2-15 mm or 2-5 mm [140] allow hemp shives to be used in mortars and fine plasters. According to studies by various different authors, the bulk density of hemp shives ranges from 110 kg/m<sup>3</sup> [47] to 130 kg/m<sup>3</sup> [92] depending on particle size. The common fibre content of commercial hemp shives is around 5% (residual fibres of the epidermis). These fibres are usually not as long as the hemp shives themselves and can influence the mechanical performance of the hemp concretes. When chopped and pressed into small granulated pellets (< 3 mm), this hemp shive product is used as an aggregate in mortars and plasters [136], and can be applied with normal plaster-spraying machines. Hemp powder (a by-product of industrial decortication, generally about 15%) is occasionally used as an aggregate in stuccos or pressed into solid pellets with an average installed density of 700 kg/m<sup>3</sup> [148]. These pellets can be used in dry floor slabs, slabs and as roof insulation. Lightweight hemp-lime bricks for cladding, internal walls and slabs (the most common density is 300-360 kg/m<sup>3</sup>) are manufactured to order by several producers [140], mainly in France. Load-bearing hemp-clay bricks, using the same quantity of plant material as lightweight bricks, [34] have been manufactured and used since 1999 for solid walls and interior partitions of 1-3 floor buildings in Southern Europe [73]. This system can be adapted to diverse climates and can be used as a substitute for wood in regions in which it is in short supply [149]. It enables hemp-building in unfavourable drying conditions and locally sourced binders are normally used. Premade panels with a wooden framework measuring 3.6 m by 2.4 m and 400 mm thick sprayed hemp concrete were produced for a large-scale wine warehouse in the UK [34, 35], while research into precast elements [34, 150] aims to produce mainstream applications for hemp concrete. Hempseed oil is occasionally sold for the embellishment of interior wood [140] and is also found in formulations of oil-based, ecological varnishes [151].

#### **4. PARAMETERS THAT CAN INFLUENCE THE PROPERTIES OF HEMP AGGREGATE CONCRETES**

##### **4.1. Mechanical properties**

The inferior mechanical performance of hemp concretes when compared with concretes based on mineral aggregates is due above all to their porosity, which makes them deformable [92]. A wall mixture made with hemp and aerial lime (about 400 kg/m<sup>3</sup>) can have a porosity of over 70%. Apart from the mesopores (0.1-1 mm) within the shives and in their contact area with the binder, the mortar also has micropores between the hydrates of the binder matrix and macropores (of around 1 cm) in the arrangement of the particles of the plant aggregate [49]. There are however various methods for increasing the mechanical strength of hemp concretes without changing the aggregate content (more or less equivalent to the bulk density of the hemp shives). The most sustainable method involves denser compaction of the concrete so as to reduce the void volume [56, 130]. Void volume can also be reduced by adding small-sized aggregates or by reducing the mean particle length. This increases the compressive strength [152, 64, 51] although a larger amount of binder is needed to hold the smaller-sized materials together. Due to their greater surface area, smaller sized aggregates can also increase the risk of binder setting and hardening problems through the release of polysaccharides [56, 153]. Particle size change augmented the compressive strength in both organic binders [51] and mineral binders [54]. Plant adapted formulations and pretreatments can also increase the mechanical performance of hemp concrete [56, 122] by preventing setting problems. One of the most successful chemical treatments involves the addition of cellulose ether, which increases the viscosity of the water, so reducing absorption by the hemp shives and improving the mechanical properties by up to 3 times [154]. The sprayed application also has benefits. Less water (responsible for the transport of organic compounds) is needed because no previous absorption (e.g. during mixing) takes place and improved compactness or particle arrangement can be obtained [7, 114]. The mechanical strength can also be improved by increasing the dosage of the binder [143]. The choice of lime is also important, given that the limes with higher quantities of pozzolanic compounds achieve better results [152]. With a typical density range of 250-660 kg/m<sup>3</sup>, hemp concretes with different lime-based formulations showed compressive strengths of between 0.25 and 1.15 MPa with a corresponding elastic modulus of between 4 and 160 MPa [92]. Calculating the optimum binder content is a key factor for obtaining solid hemp concrete [143]. In practice the use of large

amounts of hydraulic binders, with high embodied energy, is an unsustainable solution when it comes to increasing compressive strength. Less energy is embodied in gypsum or clay. Bricks made with clay binder have been used in hemp buildings with loadbearing walls in Spain for the last two decades [73]. Within the same density range their compressive strength is only surpassed by MgO-cement and Portland cement with pretreated shives (Table 4). Furthermore, variations in the mechanical results also depend on the curing conditions during the drying process, which can affect the hydration of the binders [155]. While compaction was found to be very effective for improving mechanical performance, several authors raised doubts about the benefits of the addition of fibres [143, 144, 112]. Others observed a more positive result with the use of chopped, whole stem material [55] although the last reference, shown in Table 4, refers to lime-stabilized hemp-clay concretes with a higher density range. Proper compaction, combined with the high deformability of hemp shives, makes hemp building an interesting option in seismic regions [143]. As an elastic support for timber walls, hemp concretes can increase their strength by up to 4 times by preventing weak axis buckling [105]. Hemp shive particles are an anisotropic material [156] and their particular orientation depends on the construction method. In fact, compressive strength is higher and stiffness is lower when the particles are orientated parallel to the compacting force (Figure 1 D), and the concrete is more fragile when loaded perpendicular to the orientation of the particles [48].

#### 4.2. Thermal performance

The optimisation of the mechanical properties of hemp concretes via the orientation, compaction and application method can also affect their thermal conductivity [157, 7]. When comparing hemp concretes prepared with different formulations, the choice of binder has little influence on the thermal properties although it can have significant effects on the mechanical results [130]. Due to the anisotropic pore structure of hemp shives [156], hemp concretes can have up to 30% greater thermal conductivity in the perpendicular direction of compaction [48, 109, 130] (Figure 3 A). Thermal conductivity also increases in line with the degree of moisture and the temperature, while the mechanical properties improve with increased density [48, 7, 99, 109, 114], such that “for a hemp percentage in weight between 20% and 40%, the concrete density decreases from 611 to 369 kg/m<sup>3</sup> and the thermal conductivity decreases from 0.14 to 0.094 W/(m·K)” [100]. Whereas hemp-lime formulations generally show moderate levels of dry thermal conductivity from 0.06 to 0.12 W/mK [158], lower values can be achieved with sprayed applications with a dosage of 1:1 in weight (hemp shives and aerial lime binder). The lower thermal conductivities can also be obtained by using organic binders like sapropel [117]. As shown in Table 4, a recent study of a hemp concrete with a silica sol binder [50] achieved a thermal conductivity of 0.05 W/mK, a value close to that for the hemp shives themselves, without compromising on its mechanical strength compared to low and medium density hemp concretes. While a smaller particle size of hemp shives has a positive impact on the mechanical strength of hemp concretes, its influence on the thermal conductivity is reported to be minimal [54]. The reason why lower thermal conductivities were obtained with smaller sized aggregates in a study with hemp plasters [159] must therefore be investigated in complementary research. The orientation of the anisotropic aggregates might have a greater impact on a hemp-plaster coating application than the use of smaller-sized aggregate. Tests carried out on walls exposed to real weather conditions, proved that U-values alone are not a suitable parameter for evaluating the thermal performance of hemp-lime concretes. Dynamic factors, e.g. Q24h, should also be taken into account [131]. Hemp concrete is an insulation material with semi-structural properties and therefore performs well between conventional insulation panels and structural walls [160], also regulating thermal comfort by passive solar energy gain [103]. The disproportionately broad range in the specific heat values of hemp concretes with similar densities reported in the existing body of literature (Table 4) might be due to irregularities in the plant materials themselves. Such great differences with the same type of binder and commercial hemp shives could also have occurred due to the use of different measurement methods or to difficulties with the measurement techniques, some of which function with small samples of this heterogeneous, anisotropic material [160]: with densities of around 300 kg/m<sup>3</sup> the specific heat values observed in different publications varied hugely between 300 and 1700 J/kgK, while there was much less variation in thermal conductivity (0.07 to 0.09 W/mK). Efforts over the past decade have tended to focus on thermal insulation and the achievement of thermal conductivity values that were as close as possible to those of the shive material itself and comparable with traditional insulation materials, according to the climatic requirements of the countries in which hemp building appeared, with the added benefits of hygrothermal performance and water vapour permeability. Unfortunately, the few available data on specific heat vary too much to enable us to reach conclusions on thermal diffusivity and effusivity according to the density range, although depending on the kind of binder and its dosage, the specific heat should be adaptable. In fact, both thermal conductivity and specific

heat capacity were found to increase with higher amounts of lime binder. By contrast differences in RH had no significant influence on the thermal diffusivity and specific heat capacity of the same formulations, although they did have considerable impact on their thermal conductivity [161]. A study of a hemp concrete wall under summer conditions in different regions in France suggested that adding a higher thermal inertia component could avoid overheating in Southern France due to the low thermal effusivity (231 J/mKs) of the hemp concrete wall formulation of 440 kg/m<sup>3</sup> [162]. This example shows that formulations must be adapted to the particular climate in which the concrete is being used. In order to dampen the diffusion of external heat, low thermal diffusivity is required, while high thermal effusivity values can increase the quantity of stored energy. Since it is difficult to design a hemp concrete material that meets both criteria, the use of multilayer hemp concrete walls could be a solution to adapt this material to different climate conditions.

### 4.3. Hygrothermal behaviour

Although the thermal conductivity values of hemp concretes (best results shown in Table 4 are between 0.05–0.09 W/mK) are not as good as those of traditional insulating materials (expanded polystyrene and glass wool have values of 0.04 W/mK), their hygroscopic behaviour contributes to the improved thermal performance associated with the latent heat produced by the process of liquid to vapour phase change [131] of the water contained in its porous structure in solid, liquid and gaseous phases [110]. The absorption capacities of hemp shives and fibres vary significantly because of their different physical structure and chemical composition. The dynamic hydric behaviour of hemp concretes contributes to a significant level of moisture buffering that avoids excessive energy loss due to ventilation. Daily cycles of RH between 33% and 80%, with densities ranging from 405 to 510 kg/m<sup>3</sup>, showed a remarkable mass uptake during the cycle of more than 110 g/m<sup>2</sup> and a vapour penetration depth of more than 4 cm [163]. The pores in the hemp shives are tubular and larger than hemp fibres, and over-retted hemp has a higher absorption capability than dried material [94]. As hemp concrete is normally made with commercial hemp shives, the available studies on hemp concretes have tended to focus on formulations with an insignificant fibre content, usually containing lime binder. Hemp concrete has high open porosity which contributes to heat transfer by conduction (in the solid, liquid and gaseous phases), convection (in the pores), radiation (between the pore walls), phase change (vapour evaporation or condensation in the pores) and water vapour diffusion [110]. The solid and liquid phases are responsible for the heat transfer and the thermal conductivity increases with rising humidity [92]. This is confirmed by the following results: with a low-density hemp concrete of around 200 kg/m<sup>3</sup> (roof formulation), the thermal conductivity changes from 0.06 to 0.085 W/(m·K) between relative humidity (RH) = 0% and RH = 50%, reaching 0.10 W/(m·K) with RH = 75%. With medium densities of around 450 kg/m<sup>3</sup> (non-loadbearing wall formulation), thermal conductivity increases by 10% between RH = 0% and RH = 50%, from 0.10 to 0.11 W/(m·K), reaching 0.13 W/(m·K) with RH = 75%. The same study discovered that increasing the density of the hemp concrete up to 700 kg/m<sup>3</sup> only increased its thermal conductivity by 15%, while low density hemp concretes increased their thermal conductivity by 40% between 0 and 50% RH. The specific heat also increases in proportion to the absorbed humidity [110]. The open porosity of hemp concrete enables it to regulate internal air humidity. In this context its macropores make a greater contribution to permeability than the micropores of the different binder types, when hemp concretes were compared with aerial lime, hydraulic lime and Portland cement [164]. Heat is transported from the higher temperature areas to the lower temperature areas and water vapour is transported from the areas with higher concentration to those with lower concentration. Resistance to water vapour diffusion varies depending on the formulation and binder type. For example, a wall formulation with natural hydraulic lime NHL2 and a density of 476 kg/m<sup>3</sup> has a vapour diffusion resistance factor of 2.6  $\mu$  while the same dosage made with a natural hydraulic lime NHL3.5 and a density of 563 kg/m<sup>3</sup> is more resistant at 3.6  $\mu$  [110].

### 4.4. Acoustic properties

The acoustic qualities of hemp concretes depend on their porous structure [165]. When hemp concretes are rendered the sound absorption coefficient falls significantly. Unrendered hemp concretes, with an average sound absorption of 40–50% [66] across a certain range of frequencies, have specific absorption and reflection qualities depending on the binder, formulation and fabrication [102]. Surface permeability varies according to its texture (Figure 1 C and D, Figure 3 A and B), and this alters the absorption coefficient ( $\alpha$ ). This varies between 0.3 and 0.9 depending on the binder dosage and the frequency [92]. In addition, absorption peaks at low ( $f \approx 400$  Hz) and medium frequency ( $f \approx 1200$  Hz) are observable as long as the material is less than 20 cm thick. The values observed by this author [92] were high, compared to other building materials tested under equivalent conditions.

Moreover, the amplitude of the peaks and their band width decrease with increasing amounts of binder, because the pore size decreases. Greater sound absorption was observed in concretes made with smaller-sized hemp shives [102] and also in concretes made with lime-pozzolanic binders compared to hydraulic binders [66]. Increasing the thickness of the wall resulted in a concentration of absorption peaks for the frequencies above 500 Hz and a shift in the frequency position of the peaks towards low frequencies. While low density formulations show a net shift in the absorption peaks towards low frequencies and a stabilization in the level of  $\alpha$  when the thickness increases, a frequency shift of the first absorption peak and a stabilization of the second peak can be observed in medium density formulations, until a constant absorption level of between 500 and 2000 Hz is reached. In high density formulations there is a steady decrease in absorption as the frequency increases [92]. Recent studies highlight that the acoustic performance depends above all on the concentration of hemp aggregate in the concrete and is unaffected by binder types (comparing clay and lime) [166]. Below 375 kg/m<sup>3</sup> the acoustic behaviour of hemp concretes containing either of these binders is strongly marked by a highly absorbent first peak that appears between 500 and 1200 Hz due to inter-particle pores, while only small differences were observed in the corresponding widths of the absorption peak indicating greater roughness of the hemp-lime. Up to a density of 500 kg/m<sup>3</sup> the manufacturing process appears to be the most important factor in acoustic behaviour, while above 500kg/m<sup>3</sup>, transmission loss increases with density. Air resistance is higher for hemp-clay than for hemp-lime due to its higher binder-density. Further retting and aging can affect the acoustic absorption capacity of the hemp aggregate by changing the pore size distribution [99]. When the hemp shives are aged via exposure to real weather conditions they tend to swell up. Greater open porosity was found to have an important influence on acoustic absorption [99].

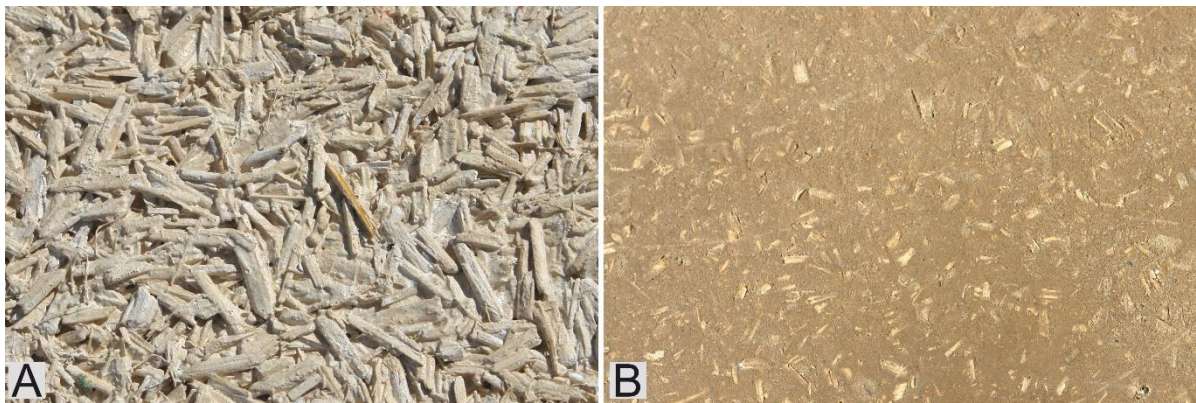


Fig. 3. Wall Finishes showing different textures made from hemp shives (2-25 mm) and NHL3.5 lime (left) or hemp shives (2-5 mm) and clay binder (right).

#### 4.5. Durability

Hemp can be farmed without fungicides or pesticides [14]. It has a high silica content (table 3), which makes it more resistant to biological decay than other plant products such as cereal straw [51]. In addition, there are no reports of attacks by wood parasites, due to the fact that hemp straw does not contain albumin. A study with hemp shives, treated with mineral oxides, revealed that termites were capable of traversing this material but did not survive for long [20], although no other research on the effects of termites on hemp or hemp concretes could be found. One of the few examples of research on exposure to the weather in buildings made with unrendered hemp concretes is a tower constructed with this material in Switzerland (Figure 1) in 1999 [111]. This tower has resisted exposure to the environment for 20 years without suffering serious decay. It was built with a non-loadbearing hemp-lime concrete wall formulation with 12.5 kg CL-lime, 25 kg NHL-lime and 10 kg brick dust on 200 litres of hemp shive aggregate, and has a potassium water glass coating with a mineral pigment, which was renewed for the first time in 2019. In fact, a study with comparable hemp concretes of 325-327 kg/m<sup>3</sup> made with “prompt” natural cement and exposed to accelerated aging through 8 wetting/drying cycles at 30°C over a period of 75 days, found no differences in their thermal conductivity and hardly any in their acoustic properties [167]. With the same concrete samples mould growth was only noticed under conditions of 98% relative humidity (RH), once the pH of the samples had fallen below 10. By contrast to these observations on hemp concretes, loose hemp shives underwent serious deterioration over 2 years exposure to wetting/drying cycles under laboratory conditions at 30°C (every 5 days under RH 95% were followed by 2 days under RH 40%) and

real weather conditions [99]. The shives subject to laboratory conditions suffered decay to the cellulose and lignin while the hemicellulose content remained unchanged. The shives exposed to real weather conditions suffered more serious decay, including to the hemicellulose, and a significantly higher mass loss of 35.9% compared to 24.2% under laboratory conditions. Mass loss, volume variations and greater open porosity were found to have an important influence on water vapour sorption. These phenomena had a more significant impact on the shives exposed to real weather conditions, which suffered greater pore size alterations. Although the binder provides significant protection, especially against microorganisms that can alter the microstructure of the hemp shives [99], it is important to protect the material against capillarity uptake and excessive contact with rain. Capillarity uptake can be reduced by increasing the hydraulicity of the binder and by adding a water retainer, although in all specimens prepared with aerial lime, hydraulic lime and Portland cement, the speed of capillarity uptake fell as time went by [164]. In Sweden a 25 freeze-thaw cycle test was carried out on hemp concrete samples, which were exposed to 12 hours of +20 °C followed by 12 hours of -20 °C [112]: while before the freeze-thaw cycles the best mechanical results were obtained by a cement-lime formulation, the best values after the test were obtained by a pure cement binder formulation whose mechanical performance was improved rather than hampered by the test. Furthermore, gypsum as a binder showed higher compressive strength in comparison to lime but was expected to have low durability in humid atmospheres [112]. Opting for more vapour-permeable binders avoids water vapour retention in the material, which could damage the wooden support structure [144]. Unfavourable weather conditions during the hemp harvest can have negative effects in that storing hemp shives with a moisture content of over 15% can result in poorer quality [168, 99] or the growth of microorganisms. Microorganisms may also appear in hemp concretes due to unfavourable drying conditions. Recent research [104] reported the growth of alkali-tolerant fungi and bacteria on different hemp-lime plaster samples over the course of a long-term durability study (simulating Mediterranean, tropical and semiarid climatic conditions). In addition, the volume of the material and its appearance remained unchanged in most samples, except for the yellowing of the exposed surfaces and a slight mass uptake after heavy rainfall. This and other [169] research have also shown that salt weathering did not cause long-term damage to any of the samples and that [104] “none of the isolated microorganisms caused either aesthetic changes or physical breakdown during or after the test and this encourages the use of hemp-lime renders under Mediterranean, semiarid and tropical climates”. Insufficient drying of hemp concrete walls before rendering with lime mortars can lead to chromatic changes and microbiological, textural or morphological pathologies, which are more intense with clay than with lime-bounded hemp concrete supports, while renders made with natural hydraulic lime show less deterioration than those made with aerial lime [116]. The smaller pored hydraulic binders resisted the freeze thaw cycles better, while the porous aerial limes prevent salt crystallization [169].

Table 4. Densities and/or mechanical and thermal properties of hemp concretes with different binders (CL = hydrated lime, NHL = natural hydraulic lime; PC = Portland cement; NC = natural cement), containing either hemp shives or hemp shives and fibres.

binders of hemp concretes	densities (kg/m <sup>3</sup> ) of tamped, sprayed (*) or compressed (=) hemp concretes with shives or shives and fibres (~)	compressive strength (MPa)	flexural strength (MPa)	thermal conductivity (W/mK)	specific heat capacity (J/kgK)	ref.
CL	374-416 (*) 450 (*) 377 400 298.1-394.8 300 (=)			0.12-0.13 0.15 0.13 0.10 0.09-0.12 0.07	300-469 1700	[100] [100] [100] [92] [161] [140]
CL + pozzolanic additive	549.7-604.5 508	0.29-0.39 0.77-1.14 0.14	0.06-0.09 0.13	0.11-0.13 0.13	1627	[169] [109] [160]
NHL	450	1.97		0.11	470	[133]

formulated binder (CL + NHL or PC and pozzolanic additive)	790-1100 587-733 (~) 391-485 (*) 430-607 (*) 417-551 (*)	0.30-0.73 0.15-0.83 0.18-0.80	0.83-1.21	0.07-0.11  0.18-0.54		[113] [144] [114] [114] [114]
NC	422.1-488.88 335-327	0.32-0.46		0.1		[9] [167]
CL + NHL		0.53				[112]
PC		0.55-2.14				[112]
PC + chemical pretreatment	819-1055	1.79-8.03		0.1-0.17		[122]
gypsum		0.71				[112]
clay	373.71-509.48	0.39-0.48				[53]
stabilized clay	410.28-577.41 1078.5-1187.81 (~) 1054.34-1124.14 1100 (=)	0.47-0.68 1.26-1.33 1.18-1.20 1.40	0.55-0.58 0.43-0.45 0.61	0.19	1113	[53] [55] [55] [73]
MgO-cement	1040-1110 1040-1150	1.86-2.73 2.73-5.20		0.07-0.08 0.11-0.12		[113] [54]
silica sol	175-240	0.49-1.05		0.05-0.06	762-1050.28	[50]
starch	182-188.30 163.60-174.30	0.57-0.63	0.03-0.13	0.06-0.07	1264-1288	[52] [51]

## 5. CONCLUSIONS

The systematic analysis of the research carried out on hemp concretes shows that this relatively novel construction material has many advantages resulting from the significant efforts made in the investigation of energy-efficient construction over the last 10 years, as manifested by the increase in the construction of zero energy buildings. Hemp concretes also contribute to the reduction of carbon emissions in new building. The design of hemp concrete materials and technologies is therefore becoming an interesting way to help reduce the construction sector's climate change impact.

Research into the functional properties of hemp concretes shows that important technological advances have been made with a construction material which in practice has already proven a durability of more than two and a half decades. Studies of the physical and chemical properties of hemp as a priority objective building material highlight the important and growing number of achievements in this field over the last few years. Apart from its environmental benefits hemp concrete has also demonstrated a number of advantageous, user-friendly hygrothermal and acoustic properties, compared with a large number of energy and resource-consuming construction and insulation materials, which still dominate the building sector and which in less than two centuries have replaced thousands of years of tradition, knowledge and experience with natural building materials, including natural concretes and mortars made with plant aggregates. The properties of most building materials are clearly focused on achieving particular mechanical, thermal, acoustic or economic specifications, and rarely take into account life cycle assessments of costs and effects on health, while hemp concretes have shown clear advances in all these fields.

The present review shows that hemp concrete can be used to replace the multilayer walls composed of typical construction and insulation materials and can also be easily adapted to retrofitting work and restoration of historic buildings, without affecting water vapour permeability.

Due to the fact that it can be used both as a construction and an insulation material and the anisotropic behaviour of hemp aggregates, researchers were faced with various difficulties when trying to measure its functional performance. This might explain the often broad range of values, in particular for specific heat.

While great efforts were made to create formulations that lower the thermal conductivity (the best values were close to those for hemp shives themselves), more work must be done on thermal effusivity. The next generation of research could focus on adjusting formulations to the environment in which the hemp concrete will be used, taking into account local aggregates and binders as well as building techniques specifically adapted to the culture and climate.

In order to obtain better mechanical results that could minimize the structural dimensions and remove its dependence on a support structure, research could focus on the drawbacks of the leaching of organic compounds and could also look at the use of the stem material (about which little research has been conducted) that ends up as agricultural waste from the plants farmed for cannabinoid production.

It is obvious that most tests are carried out on a laboratory scale and mainly with small test samples.

With a growing number of hemp-based houses being built in different climate zones, and an increasingly wide range of hemp concrete formulations and technologies (e.g. tamped and sprayed applications or premade elements), researchers today have an increasing number of possible subjects for case studies, which could envision, among other things, indoor air quality, energy consumption, environmental gains and the durability of hemp concrete materials in different climate contexts.

The properties of the final hemp concrete product are affected by the natural variation and qualities of the plant aggregate (e.g. genotype, growing conditions, processing, particle size), its final density and texture, the kind of binders used, the drying conditions, the degree of compaction and the application method. It has also been noted that changes made to the formulation or method in order to improve a certain aspect of performance, e.g. thermal performance, can also improve its acoustic or mechanical properties, while others can cause unintended side effects.

Based on the results of this review, further research can be tailored towards more specific purposes.

The main results of this analysis can be summarized in the following sections:

- There has been increasing interest in the study of the physical and chemical composition of hemp, especially over the last 10 years, in which great advances have been made in terms of our knowledge of the material itself and the parts of the plant that may be useful in this type of application. Researchers have also tried to identify the most suitable conditions for cultivation, growth and harvesting, although the experimental studies carried out by the different authors produced widely varying results. Over 35% of all the publications cited in this research refer to this topic.
- The properties of hemp concrete and its applications account for 65% of all research, mainly focused on the characterization and improvement of these properties, including mechanical strength, thermal and acoustic properties, hygrothermal behaviour and durability.
- As regards the specific studies of hemp concrete as a building material, 25% are devoted to its mechanical performance, focusing particularly on the compactness and deformability of the material, which has a direct impact on its performance as a load-bearing material.
- For their part, binders are referred to in about 30% of the research articles. As discussed above, the main binders used in the manufacture of hemp concrete and mortars are inorganic binders that harden by carbonation.
- About 20% of the studies on hemp concrete focus on its thermal and acoustic properties, highlighting its advantages in both these aspects compared to other materials.
- The hygrothermal behaviour of this material is also a matter of interest, with up to 10% of the publications we studied experimenting with different densities of material, offering very positive results and evident improvements.



- One of the most interesting characteristics is durability, which is referred to in around 10% of the hemp concrete characterization studies, which describe it as a new material used increasingly widely in very varied locations exposed to different climatic conditions.

The following graphic (Figure 4) shows the percentages of the bibliographical references to the different topics covered in this review.

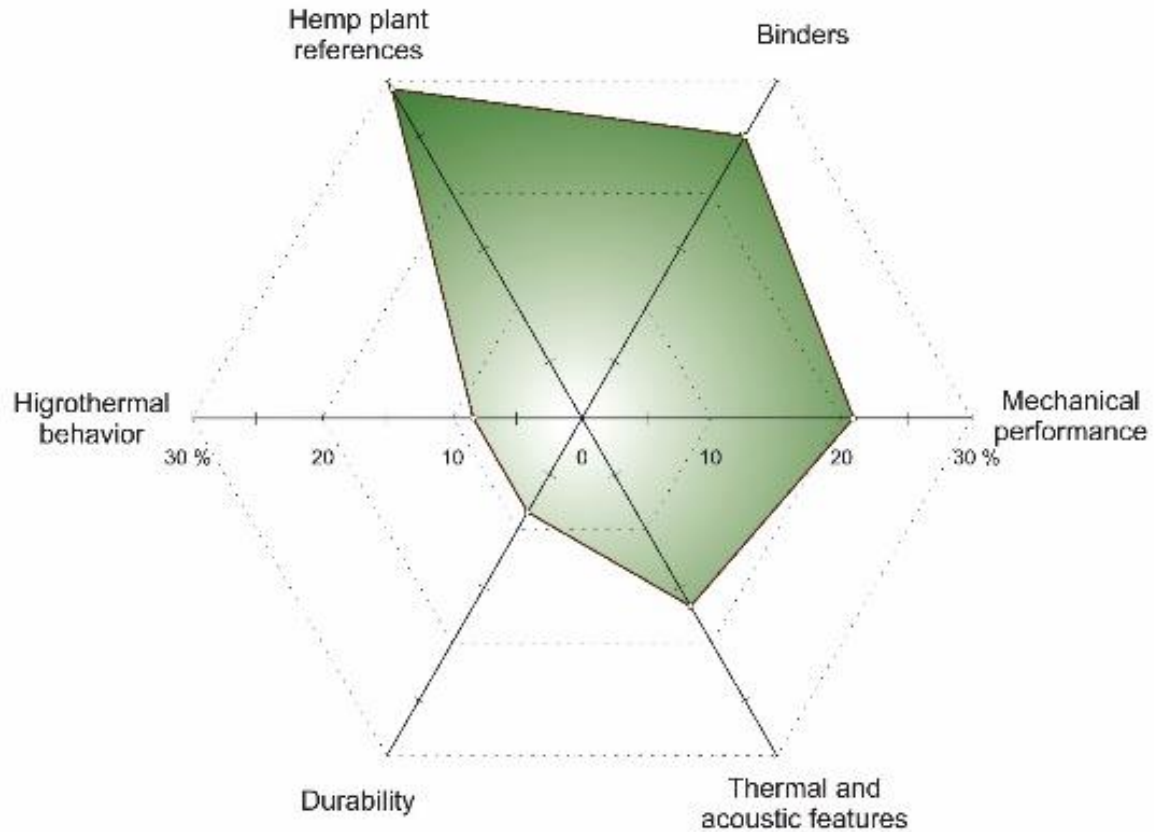


Fig. 4. Interest in particular aspects of this subject as shown by the percentage of publications on each topic.

The authors believe that the research carried out so far on this subject has made a significant contribution to the development of materials of this kind and has greatly boosted their use in bio-construction and retrofit projects.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the REMINE Programme for Research and Innovation Horizon 2020 Marie Skłodowska-Curie Actions and Project MAT2016-75889-R of the National Plan for Scientific Research, Development and Technological Innovation (Ministry of Science and Technology) and was carried out under the auspices of Research Groups RNM 0179 and HUM 629 of the Junta de Andalucía. Authors would like to thank experts and colleagues for providing or exchanging information on the subject of this article, in particular members of ENTPE (France) and IHBA (Ireland). Photographs used in this article are donated by CANNABRIC (Spain) and ARBIO (Switzerland).

#### REFERENCES

[1] IPCC fourth assessment report: climate change 2007 (AR4).

[2] Maalouf C, Ingrao C, Scrucca F, Moussa T, Bourdot A, Tricase C, Presciutti A, Asdrubali F. An energy and carbon footprint assessment upon the usage of hemp-lime concrete and recycled-PET façades for office facilities in France and Italy. *Journal of Cleaner Production* 2018; 170: 1640-1653

- [3] Balčiūnas G, Vėjelis S, Vaitkus S, Kairyte A. Physical Properties and Structure of Composite Made by Using Hemp Hurds and Different Binding Materials. *Procedia Engineering* 2013; 57: 159-166
- [4] Fraanje PJ. Cascading of renewable resources hemp and reed. *Industrial Crops and Products* 1997; 6(3-4): 201-212
- [5] Senga Kiessé T, Ventura A, Van der Werf HMG, Cazacliu B, Idir R, Andraina A. Introducing economic actors and their possibilities for action in LCA using sensitivity analysis: Application to hemp-based insulation products for building applications. *Journal of Cleaner Production* 2016; 142: 3905-3916
- [6] Hung Mo K, Johnson Alengaram U, Zamin Jumaat M, Poh Yap S, Cheng Lee S. Green concrete partially comprised of farming waste residues: a review. *Journal of Cleaner Production*, 2016; 117:122-138
- [7] Rame JM. Synthèse des deuxièmes journées du Réseau d'Allergologie de Franche-Comté (RAFT). *Habitat et Santé, Revue Française d'Allergologie* 2010; 50(2): 46-54
- [8] Magniont C, Escadeillas G, Coutand M, Oms-Multon C. Use of plant aggregates in building ecomaterials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 2016; 16(1):17-33
- [9] Niyigena C, Amziane S, Chateaneuf A, Arnaud L, Bessette L, Collet F, Lanos C, Escadeillas G, Lawrence M, Magniont C, Marceau S, Pavia S, Peter U, Picandet V, Sonebi M, Walker P. Variability of the mechanical properties of hemp concrete. *Materials Today Communications* 2016; 7: 122-133
- [10] Cisse O. Caractérisation du comportement hygro-mécanique des fibres libériennes élémentaires issues du chanvre. Université de Franche-Comté, école doctorale pour l'ingénieur et microtechniques 2014
- [11] Placet V. Contributions a la caractérisation de matériaux composites de fibres élémentaires de chanvre aux modes de défaillance de structures. Université de Franche-Comté, HDR Besançon 2013
- [12] Chen T, Yao S, Merlin M, Mai H, Qiu Z, Hu Y, Wang B, Wang C, Jiang H. Identification of *Cannabis* fiber from the Astana Cemeteries, Xinjiang, China. *Economic Botany* 2014; 68(1): 59-66
- [13] Struik PC, Amaducci S, Bullard MJ, Stutterheim NC, Venturi G, Cromack HTH. Agronomy of fibre hemp (*Cannabis sativa L.*) in Europe. *Industrial Crops and Products* 2000; 11(2-3): 107-118
- [14] Boutin M-P, Flamin C, Quinton S, Gosse G. Etude des Caractéristiques Environnementales du Chanvre par l'Analyse de son Cycle de Vie. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, étude par l'INRA (France) 2006
- [15] Kozłowski R, Baraniecki P, Barriga-Bedoya J. Bast fibres (flax, hemp, jute, ramie, kenaf, abaca). *Biodegradable and Sustainable Fibres* 2005; 36-88
- [16] Sawler J, Stout JM, Gardner KM, Hudson D, Vidmar J, Butler L, Page JE, Myles S. The Genetic Structure of Marijuana and Hemp. *PLOS ONE* 2015; 10(8).
- [17] Amaducci S, Scordia D, Liu FH, Zhang Q, Guo H, Testa G, Cosentino SL. Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. *Industrial Crops and Products*; 2015
- [18] Clarke RC, Merlin MD. *Cannabis: Evolution and Ethnobotany*. Berkeley and Los Angeles: University of California Press, Ltd.; 2013
- [19] Bouby L. Le chanvre (*Cannabis sativa L.*): une plante cultivée à la fin de l'âge du Fer en France du Sud-Ouest? *Comptes Rendus Palevol* 2002; 1(2): 89-95

- [20] Elfordy S, Lucas F, Tancret F, Scudeller Y, Goudet L. Synthèse des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre. Construire en Chanvre, France 2008
- [21] Kymäläinen H-R, Koivula M, Kuisma R, Sjöberg A-M, Pehkonen A. Technologically indicative properties of straw fractions of flax, linseed (*Linum usitatissimum L.*) and fibre hemp (*Cannabis sativa L.*). Bioresource Technology 2004; 94(1): 57-63
- [22] Van der Werf HGM. Crop physiology of fibre hemp (*Cannabis sativa L.*). Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 1994; p. 153
- [23] Long Wang HJ, Merlin MD, Clarke RC, Yong Zhang YP, Xiao G, Ding X. Ancient Cannabis Burial Shroud in a Central Eurasian Cemetery. Economic Botany 2016; 70 (3): 213-221
- [24] Cosentino SL, Testa G, Scordia D, Copani V. Sowing time and prediction of flowering of different hemp (*Cannabis sativa L.*) genotypes in southern Europe. Industrial Crops and Products 2012; 37(1): 20-33
- [25] Shahzad A. Hemp fiber and its composites – a review. Journal of Composite Materials 2011; 0(0):1-14
- [26] Wambua P, Ivens J, Verpoest I. Natural fibers: Can they replace glass in fiber reinforced plastics? Composite Science and Technology 2003; 53: 1259-1264
- [27] [www.invent-gmbh.de](http://www.invent-gmbh.de) [accessed 1.3.2019]
- [28] Kymäläinen H-R, Sjöberg A-M. Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. Building and Environment 2008; 43(7): 1261-1269
- [29] Carus M, Karst S, Kauffmann A, Hobson J, Bertucelli S. The European Hemp Industry: Cultivation, processing and applications for fibres, shivs and seeds. European Industrial Hemp Association 2013
- [30] Li Fang L, Hong Qiang L, Lazzaretto A, Manente G, Chun Yi T, Qi Bin L, Nian Ping L. The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017; 69: 912-932
- [31] Asdrubali F, D'Alessandro F, Schiavoni S. A review of unconventional sustainable building insulation materials. Sustainable Materials and Technologies 2015; 4:1-17
- [32] Ingrao C, Giudice AL, Bacenetti J, Tricase C, Dotelli G, Fiala M, Siracusa V, Mbohwa C. Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: a review. Renewable and Sustainable Energy Review 2015; 51: 29-42
- [33] Stanwix W, Sparrow S. The Hempcrete Book - Designing and Building with Hemp Lime. 1<sup>st</sup> ed. Cambridge: Green Books; 2014
- [34] Allin S. Building with Hemp. 2<sup>nd</sup> ed. Ireland: Seed Press; 2012
- [35] Daly P, Ronchetti P, Woolley T. Hemp Lime Bio-composite as a Building Material in Irish Construction. EPA STRIVE Programme 2007-2013, STRIVE Report 2009; ET-DS-2-S2
- [36] Bevan R, Wooley T. Hemp lime Construction: A guide to Building with Hemp Lime. 1<sup>st</sup> ed. England: HIS BRE Press; 2008
- [37] World Drug Report 2005. Statistics. Vol. 2. UNODC 2005. United Nations Publication. [https://www.unodc.org/pdf/WDR\\_2005/volume\\_2\\_web.pdf](https://www.unodc.org/pdf/WDR_2005/volume_2_web.pdf)

- [38] Piluzza G, Delogu G, Cabras A, Marceddu S, Bullitta S. Differentiation between fiber and drug types of hemp (*Cannabis sativa L.*) from a collection of wild and domesticated accessions. *Genetic Resources and Crop Evolution* 2013; 60(8): 2331-2342
- [39] Real Herráiz T, Real Herráiz JI, Montalbán Domingo L, Carrión Domingo F. *Posidonia Oceanica* used as a new natural fibre to enhance the performance of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials* 2016; 102 (1): 601-612
- [40] Atakan Z. Cannabis, a complex plant: different compounds and different effects on individuals. *Therapeutic Advances in Psychopharmacology*. 2012; 2(6): 241-254.
- [41] Coatanlem P, Jaubertie R, Rendell F. Lightweight wood chipping concrete durability. *Construction and Building Materials* 2006; 20(9): 776-781
- [42] Chabannes M, Bénézet J-C, Clerc L, Garcia-Diaz E. Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: An innovative application. *Construction and Building Materials* 2014;70: 428-438
- [43] Jarabo R, Fuente E, Monte MC, Savastano H, Mutjé P, Negro C. Use of cellulose fibers from hemp core in fiber-cement production. Effect on flocculation, retention, drainage and product properties. *Industrial Crops and Products* 2012; 39: 89–96.
- [44] Kidalova L, Stevulova N, Terpakova E, Sicakova A. Utilization of alternative materials in lightweight composites. *Journal of Cleaner Production* 2012; 34: 116-119
- [45] Dalmay P, Smith A, Chotard T, Sahay-Turner P, Gloaguen V, Krausz P. Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibers on the properties of set gypsum. *Journal of Materials Science* 2010; 45: 793-803
- [46] Nguyen TD, Steinbrecht D, Beu J, Backhaus E. Experimental Study on Hemp Residues Combustion in a Small Scale Stationary Fluidized Bed Combustor. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal* 2008; Manuscript EE 08 006. Vol. X
- [47] Arnaud L, Boyeux B. La chenevotte comme nouveau Granulat écologique et performant pour une utilisation dans le batiment. *Académie d'Agriculture de France; Nouvelles utilisations de plantes à fibres* 2011
- [48] Williams J, Lawrence M, Walker P. A method for the assessment of the internal structure of bio-aggregate Concretes. *Construction and Building Materials* 2016; 116: 45-51
- [49] Arnaud L, Gourlay E. Experimental study of parameters influencing mechanical properties of Hemp Concretes. *Construction and Building Materials* 2012; 28(1): 50-56
- [50] Hussain A, Calabria-Holley J, Lawrence M, Jiang Y. Hygrothermal and mechanical characterisation of novel hemp shiv based thermal insulation composites. *Construction and Building Materials* 2019, 212: 561-568
- [51] Le AT, Gacoin A, Li A, Mai TH, El Wakil N. Influence of various starch/hemp mixtures on mechanical and acoustical behavior of starch-hemp composite materials. *Composites* 2015; 75(B): 201-211
- [52] Bourdot A, Moussa T, Gacoin A, Maalouf C, Vazquez, Thomachot-Schneider C, Bliard C, Merabtine A, Lachi M, Douzane O, Karaky H, Polidori G. Characterization of an agro-material for building envelope: influence of hemp/starch ratio and hemp shive size on physical, mechanical, and hygrothermal properties. *Energy and Buildings* 2017, 153: 501-512

- [53] Mazhoud B, Collet F, Pretot S, Lanos C. Mechanical properties of hemp-clay and hemp stabilized clay composites. *Construction and Building Materials* 2017; 155: 1126-1137
- [54] Stevulova N, Kidalova L, Junak J, Cigasova J, Terpakova E. Effect of hemp shive sizes on mechanical properties of lightweight fibrous composites N. *Procedia Engineering* 2012; 42: 496 – 500
- [55] Brümmer M, Sáez-Pérez MP, Durán Suárez J. Hemp fibre based light weight concretes for environmental building – parameters that influence the mechanical strength. 3rd International Conference on Natural Fibres ICNF 2017; 2017
- [56] Nozahic V, Amziane S, Torrent G, Saïdi K, De Baynast H. Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice-lime binder. *Cement and Concrete Composites* 2012; 34(2): 231-241
- [57] Liu J, Li C, Liu J, Cui G, Yang Z. Effect of fiber dispersion on multiple cracking of cement composites. *Journal of Engineering Mechanics* 2001; 127(4): 311-316
- [58] Bachar M, Azzouz L, Rabehi M, Mezghiche B. Characterization of a stabilized earth concrete and the effect of incorporation of aggregates of cork on its thermo-mechanical properties: Experimental study and modeling. *Construction and Building Materials* 2015; 74: 259-267
- [59] Emiroğlu M, Yalama A, Erdoğdu Y. Performance of ready-mixed clay plasters produced with different clay/sand ratio. *Applied Clay Science* 2015; 115: 221-229
- [60] De Andrade Salgado F. *Análise Macro-Mecânica do Comportamento da Terra como Revestimento Externo com ou sem Reforço de fibras Vegetais*. Pontifícia Universidade Católica Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil 2010
- [61] Delinière R, Aubert JE, Rojat F, Gasc-Barbier M. Physical, mineralogical and mechanical characterization of ready-mixed clay plaster. *Building and Environment* 2014; 8: 11-17
- [62] Awwad E, Mabsout M, Hamad B, Talal Farran M, Khatib H. Studies on fiber-reinforced concrete using industrial hemp fibers. *Construction and Building Materials* 2012; 35: 710-717
- [63] Li Z, Wang X, Wang L. Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2006; 37(3): 497-505
- [64] Ali M, Liu A, Sou H, Chouh N. Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 2012; 30: 814-825
- [65] Andres DM, Manea DL, Fechete R, Jumate E. Green plastering mortars based on Clay and wheat straw. *Procedia technology* 2016; 22: 327-334
- [66] Kinnane O, Reilly A, Grimes J, Pavia S, Walker R. Acoustic absorption of hemp-lime construction. *Construction and Building Materials* 2016; 122: 674-682
- [67] Zomers FHA, Gosselink RJA, Van Dam JEG, Tjeerdsma BF. Organosolv pulping and test paper characterization of fiber hemp. *Tappi Journal* 1995;78(5): 149-155
- [68] Carus M, Vogt D. European hemp industry: Cultivation, processing and product lines. *Euphytica* 2004; 140: 7-12
- [69] Jankauskienė Z, Butkutė B, Gruzdevienė E, Cesevičienė J, Fernandoc AL. Chemical composition and physical properties of dew- and water-retted hemp fibers. *Industrial Crops and Products* 2015; 75(B): 206-211

- [70] Müssig J. Industrial Applications of Natural Fibres, Structure, Properties and Technical Application. 1<sup>st</sup> ed. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.; 2010
- [71] Buranov AU, Mazza G. Lignin in straw of herbaceous crops. *Industrial Crops and Products* 2008; 28: 237-259
- [72] Rodríguez García I.M. Caracterización química de fibras de plantas herbáceas utilizadas para la fabricación de pastas de papel de alta calidad. Universidad de Sevilla 2006, p. 202
- [73] Cannabric, Spain.  
[http://www.cannabric.com/catalogo/cannabric\\_bloque\\_aislante\\_de\\_canamo\\_estructural/](http://www.cannabric.com/catalogo/cannabric_bloque_aislante_de_canamo_estructural/) ;  
[http://www.cannabric.com/media/documentos/00b20\\_CANNAHABITAT\\_ficha\\_tecnica.pdf](http://www.cannabric.com/media/documentos/00b20_CANNAHABITAT_ficha_tecnica.pdf) 2019 [accessed 1.5.2019]
- [74] Kymäläinen H-R. Quality of *Linum Usitatissimum L.* (Flax and Linseed) and *Cannabis Sativa L.* (Fibre Hemp) during the Production Chain of Fibre Raw Material for Thermal Insulation. University of Helsinki, Faculty of Agriculture and Forestry 2004
- [75] Kozłowski R, Mieleniak B, Przepiera A. Particleboards and insulating board on base hemp shives and hemp straw. In: Sharma HS, Sumere C-F van, editors. The biology and processing of flax. M. Publications Belfast; 1992: 92-100.
- [76] Stevulova N, Cigasova J, Estokova A, Terpakova E, Geffert A, Kacik F, Singovszka E, Holub M. Properties Characterization of Chemically Modified Hemp Hurds. *Materials* 2014; 7: 8131-8150
- [77] Arnaud, L. Iste: Bio-Aggregate-Based Building Materials Applications to Hemp Concretes (1). Somerset, US: Wiley-ISTE, 2013
- [78] García-Jaldón C, Dupeyre D, Troede MR. Fibers from semi-retted hemp bundless by steam explosion treatment. *Biomass and Bioenergy* 1998; 14: 251-260
- [79] Vignon MR, Dupeyre D, García-Jaldón C. Morphological characterization of steam exploded hemp fibers and their utilization in polypropylene-bases composites. *Bioresource Technology* 1996; 58: 203-215
- [80] Sedan D, Pagnoux C, Smith A, Chotard T. Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: influence of the fibre/matrix interaction. *Journal of the European Ceramic Society* 2008; 28: 183-192
- [81] Le Tröedec M, Sedan D, Peyratout C, Bonnet JP, Smith A, Guinebretiere R., Gloaguen V, Krausz P. Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibers. *Composites* 2008; 39(A): 514-522
- [82] Haudek HW, Viti E. Textilfasern. Wien-Perchtoldsdorf, Austria: Verlag Johann L. Bondi & Sohn; 1978.
- [83] Pasila A. The dry-line method in bast fibre production. University of Helsinki, Department of Agricultural Engineering and Household Technology: MMTEK Publications; 2004
- [84] Keller M. Caracterisation Acoustique et thermique des éco-isolants à base de laine naturelle. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat en France, Ecole Doctorale Mécanique - Energétique - Génie Civil - Acoustique (MEGA); 2011
- [85] Duval A, Bourmaud A, Augier L, Baley C. Influence of the sampling area of the stem on the mechanical properties of hemp fibers. *Materials Letters* 2011; 65(4): 797-800

- [86] De Meijer EPM. Variation of *Cannabis* with reference to stem quality for paper pulp production. *Industrial Crops and Products* (1994); 3(3): 201-211
- [87] Marrota L, Lefeuvre A, Pontoire B, Bourmauda A, Baleya C. Analysis of the hemp fiber mechanical properties and their scattering (Fedora 17). *Industrial crops and products* 2013; 51: 317-327
- [88] Crônier D, Monties B, Chabbert B. Structure and chemical composition of bast fibers isolated from developing hemp stem. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2005; 53(21): 8279-8289
- [89] Li X, Wang S, Du G, Wu Z, Meng Y. Variation in physical and mechanical properties of hemp stalk fibers along height of stem. *Industrial Crops and Products* 2013; 42: 344-348
- [90] Liu M, Dinesh F, Meyer AS, Bo M, Geoffrey D, Thygesen A. Characterization and biological depectinization of hemp fibers originating from different stem sections. *Industrial Crops and Products* 2015; 76: 880-891
- [91] Majibur Rahman Khan MD, Chen Y, Laguë C, Landry H, Peng Q, Zhong W. Compressive properties of Hemp (*Cannabis sativa L.*) stalks. *Biosystems Engineering* 2010; 106(3): 315-323
- [92] Cérézo V. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat; 2005
- [93] Anderson LC. A Study of Systematic Wood Anatomy in Cannabis. *Botanical Museum Leaflets Harvard University* 1974; 24: 29-36
- [94] Kymäläinen H-R, Hautala M, Kuisma R, Pasila A. Capillarity of flax/linseed (*Linum usitatissimum L.*) and fibre hemp (*Cannabis sativa L.*) straw fractions. *Industrial Crops and Products* 2001; 14(1): 41-50
- [95] Ceyte I. Béton de chanvre, définition des caractéristiques mécaniques de la chènevotte. École nationale des travaux publics de l'État, Lyon 2008
- [96] Fourmentin M, Faure P, Pelupessy P, Sarou-Kanian V, Peter U, Lesueur D, Rodts S, Daviller D, Coussot P. NMR and MRI observation of water absorption/uptake in hemp shives used for hemp concrete. *Construction and Building Materials* 2016; 124: 405-413
- [97] Amaducci S, Zatta A, Pelatti F, Venturi G. Influence of agronomic factors on yield and quality of hemp (*Cannabis sativa L.*) fibre and implication for an innovative production system. *Field Crops Research* 2008;107: 161-169
- [98] Nishino T. Green Composites: Polymer Composites and the Environment. Natural fiber sources. In: Baille C (ed.) Ch. 4. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2004, pp. 49-80.
- [99] Delannoy G, Marceau S, Glé P, Gourlay E, Guéguen-Minerbe M, Diafi D, Nour I, Amziane S, Farcas F. Aging of hemp shiv used for concrete. *Materials & Design* 2018; 160: 752-762
- [100] Collet F, Pretot S. Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Construction and Building Materials* 2014; 65: 612-619
- [101] Collet F, Chamoin J, Pretot S, Lano C. Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. *Energy and Buildings* 2013; 62: 294-303

- [102] Glé P, Gourdon E, Arnaud L. Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. *Applied Acoustics* 2011; 72: 249-259
- [103] McLaggan MS. Novel fire testing frameworks for Phase Change Materials and hemp-lime insulation. The University of Edinburgh, 2016
- [104] Arizzi A, Viles H, Martín-Sánchez I, Cultrone G. Predicting the long-term durability of hemp-lime renders in inland and coastal areas using Mediterranean, Tropical and Semi-arid climatic simulations. *Science of The Total Environment* 2016; 542(A): 757-770
- [105] Mukherj A. Structural Benefits of Hempcrete infill in timber stud wall. Queen's University, department of civil Engineering, Kingston, Ontario, Canada 2012
- [106] Arizzi A, Brümmer M, Martín-Sánchez I, Cultrone G, Viles H. The Influence of the Type of Lime on the Hygric Behaviour and Bio-Receptivity of Hemp Lime Composites Used for Rendering Applications in Sustainable New Construction and Repair Works. *PLOS ONE* 2015.
- [107] Kenneth IP, Miller A. Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime wall constructions in the UK. University of Brighton, School of Environment and Technology, United Kingdom 2012
- [108] Agence qualité construction (AQC), Commission prévention produits. « Règles Professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre » (RP2C), France 2012
- [109] Dinh TM, Magniont C, Coutand M, Escadeillas G. Hemp concrete using innovative pozzolanic binder. First International Conference on Bio-based Building Materials, Clermont-Ferrand, France 2015
- [110] Tran Li AD. Etude des transferts hygrothermiques dans le Béton de Chanvre et leur Application au bâtiment. Université de Reims Champagne-Ardenne, U.F.R. Sciences Exactes et Naturelles, France 2010
- [111] Arbio, Switzerland. <https://www.arbio.ch/isolation-periph.html>; 2019 [accessed 1.5.2019]
- [112] De Bruijn PB. Hemp Concretes: Mechanical Properties using both Shives and Fibres. Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Sciences, Alnarp, 2008
- [113] Kidalova L, Številova N, Terpakova E, Sicakova A. Use of magnesium oxide-cement binder in composites based on hemp shives. *Journal of Environmental Science and Engineering* 2011; 5: 736-741
- [114] Elfordy S, Lucas F, Tancret F, Scudeller Y, Goudet L. Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete ("hempcrete") manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials* 2008; 22(10): 2117-2123
- [115] Barras C. Contribution à l'élaboration d'un mélange terre-chanvre, approche expérimentale et théorique des aspects mécaniques. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France), VA Bâtiment Promotion 55; 2010
- [116] Arizzi A, Brümmer M, Martín-Sánchez I, Molina E, Cultrone G. Optimization of lime and clay-based hemp-concrete wall formulations for a successful lime rendering. *Construction and Building Materials* 2018; 184: 76-86
- [117] Balčiūnas G, Žvironaitė J, Vėjelis S, Jagniatinskis A, Gaidučis S. Ecological, thermal and acoustical insulating composite from hemp shives and sapropel binder. *Industrial Crops and Products* 2016; 91: 286-294



- [118] Ye H, Zhanga Y, Yua Z, Mu J. Effects of cellulose, hemicellulose, and lignin on the morphology and mechanical properties of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials* 2018; 173: 10-16
- [119] Umurigirwa Benitha S, Vroman I, Mai Ton H, Chadi M. Influence of chemical modification on hemp-starch concrete. *Construction and Building Materials* 2015; 81: 208-215
- [120] Arizzi A, Cultrone G, Brümmer M, Viles H. A chemical, morphological and mineralogical study on the interaction between hemp hurds and aerial and natural hydraulic lime particles: Implications for mortar manufacturing. *Construction and building materials* 2014; 12: 375-384
- [121] Diquélou Y, Gourlay E, Arnaud L, Kurek B. Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix. *Cement and Concrete Composites* 2015; 55: 112-121
- [122] Balčiūnas G, Pundienė I, Lekūnaitė-Lukošiūnė L, Vėjelis S, Korjakins A. Impact of hemp shives aggregate mineralization on physical–mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material. *Industrial Crops and Products* 2015; 77: 724-734
- [123] Di Candilo M, Ranalli P, Bozzi C, Focher B, Mastromei G. Preliminary results of tests facing with the controlled retting of hemp. *Industrial Crops and Products* 2000; 11(2-3): 197-203
- [124] Terpáková E, Kidalová L, Eštoková A, Čigášová J, Številová N. Chemical Modification of Hemp Shives and their Characterization. *Procedia Engineering* 2012; 42: 931-941
- [125] Sedan D, Pagnoux C, Chotard T, Smith A, Lejolly D, Gloaguen V, Krausz P. Effect of calcium rich and alkaline solutions on the chemical behavior of hemp fibres. *Journal of Materials Science* 2007; 42: 9336–9342
- [126] Diquélou Y, Gourlay E, Arnaud L, Kurek B. Influence of binder characteristics on the setting and hardening of hemp lightweight concrete. *Construction and Building Materials* 2016; 112: 506–517
- [127] Noorbaini Sarmin S. Lightweight Building Materials of Geopolymer Reinforced Wood Particles Aggregate - A Review. *Applied Mechanics and Materials* 2015; 802: 220-224
- [128] Patel R, Joshi R. Analysis of Development of Porous fly ash-based Geopolymer with Low Thermal Conductivity. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology* 2016; 3(12)
- [129] Biagotti J, Puglia D, Kenny JM. A review on natural fiber based composites, Part I Structure, Processing and properties of natural fibers. *Journal of Natural Fibers* 2004; 1(2): 37-68
- [130] Nguyen T-T, Picandet V, Carre P, Lecompte T, Amziane S, Baley C. Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 2010; 14(5): 545-560
- [131] Shea A, Lawrence M, Walker P. Hygrothermal performance of an experimental hemp–lime building. *Construction and Building Materials* 2012; 36: 270-275
- [132] Pretot S, Collet F, Garnier C. Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating. *Building and Environment* 2014; 72: 223-231
- [133] Florentin Y, Pearlmutter D, Givoni E. A life-cycle energy and carbon analysis of hemp-lime bio-composite building materials. *Energy and Buildings* 2017; 156: 293-305

- [134] Arrigoni A, Pelosato R, Melià P, Ruggieri G, Sabbadini S, Dotelli G. Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks. *Journal of Cleaner Production*, 2017; 149: 1051-1061
- [135] Hustache Y, Arnaud L. Synthèse des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, France 2008
- [136] Hanffaser, Germany. <https://www.hanffaser.de/uckermark/index.php/produkte/stopf-hanf-daemmwohle>, <https://www.hanffaser.de/uckermark/index.php/produkte/feinputz>, <https://www.hanffaser.de/uckermark/index.php/produkte/hanf-lehm-schallschuettung>; 2018 [accessed 1.12.2018]
- [137] Belchanvre, Belgium. <https://www.belchanvre.be/doc/ISOVRAC.pdf>; 2018 [accessed 1.12.2018]
- [138] Thermo Natur, Germany. <https://www.thermo-natur.de/daemmstoffe/thermo-hanf/thermo-hanf-premium/>; 2018 [accessed 1.5.2019]
- [139] Hempflax, The Netherlands. <http://hempflax.com/en/products/construction/hempflax-panel-insulation>; 2018 [accessed 1.12.2018]
- [140] Technichanvre, France. <http://www.technichanvre.com/isolation-chanvre-isolation-ecologique-et-saine/feutres-de-chanvre-sous-couche-et-autre/>, <http://www.technichanvre.com/isolation-chanvre-isolation-ecologique-et-saine/chanvre-et-chaux-enduits-et-finitions/granulat-c005-finition-et-decoration/>, <http://www.technichanvre.com/isolation-chanvre-isolation-ecologique-et-saine/chanvre-et-chaux-enduits-et-finitions/granulat-c015-enduit-et-corps-denduit/>, <http://www.technichanvre.com/wp-content/uploads/2013/09/Chanvribloc-Notice-technique-2016.pdf>; 2018 [accessed 1.12.2018]
- [141] Naporo, Austria. <http://www.naporo.com/file.php?ID=532>; 2018 [accessed 1.12.2018]
- [142] NPSP Composieten, The Netherlands. <http://www.npsp.nl/page.asp?ID=14>; 2018 [accessed 1.12.2018]
- [143] Nguyen T-T, Picandet V, Amziane S, Baley C. Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 2011; Organic materials for construction: 1039-1050
- [144] De Bruijn PB, Jeppsson K-H, Sandin K, Nilsson C. Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres. *Biosystems Engineering* 2009; 103(4): 474-479
- [145] Hemp Ecosystems, Switzerland. <http://www.hempecosystems.com/hes-systems>; 2018 [accessed 1.12.2018]
- [146] CMF Greentech, Italy. <http://www.cmfgreentech.com/it/prodotti/canapalithos/>; 2018 [accessed 1.12.2018]
- [147] Almusawi A, Lachat R, Atcholi KE, Gomes S. Proposal of manufacturing and characterization test of binderless hemp shive composite. *International Biodeterioration and Biodegradation* 2016; 115: 302-307
- [148] Biofib Isolation, France. <https://www.biofib.com/biofib-chape.php>; 2018 [accessed 1.12.2018]
- [149] Ashori A, Nourbakhsh A. Bio-based composites from waste agricultural residues. *Waste Management* 2010; 30: 680-684
- [150] Truedsson H, Jacobsson H. Prefabricerade väggelement av Hampabetong. Högskolan, Halmstad, Sweden, 2013

- [151] [Hemp-Production, Czech Republic. http://www.ekonopi.cz/es/barvy-laky.html](http://www.ekonopi.cz/es/barvy-laky.html) 2018 [accessed 1.12.2018]
- [152] Stevulova N, Kidalova L, Cigasova J, Junak J, Sicakova A, Terpakova E. Lightweight Composites Containing Hemp Hurds. *Procedia Engineering* 2013; 65: 69-74
- [153] Gourlay E, Arnaud L. Des matières premières au béton de chanvre: optimisation des propriétés thermiques et mécaniques. 20ième Congrès Français de Mécanique Besançon, 2011.
- [154] Nozahic V, Amziane S. Vers des bétons de chanvre à hautes performances mécanique. Prix Jeunes Chercheurs "René Houpert". Chambéry, 2012.
- [155] Benfratello S, Capitano C, Peri G, Rizzo G, Scaccianoce G, Sorrentino G. Thermal and structural properties of a hemp-lime biocomposite. *Construction and Building Materials* 2013; 48: 745-754.
- [156] Dartois S, Mom S, Dumontet H, Ben Hamida A. An iterative micromechanical modeling to estimate the thermal and mechanical properties of polydisperse composites with platy particles: Application to anisotropic hemp and lime concretes. *Construction and Building Materials* 2017; 152: 661-671
- [157] Nguyen ST, Tran Le AD, Vu MN, To QD, Douzane O, Langlet T. Modeling thermal conductivity of hemp insulation material: A multi-scale homogenization approach. *Building and Environment* 2016; 107: 127-134
- [158] Latif E, Lawrence M, Shea A, Walker P. Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime. *Building and Environment* 2015; 93(2): 199-209
- [159] Mazhoud B, Collet F, Pretot S, Chamoin J. Hygric and thermal properties of hemp-lime plasters. *Building and Environment* 2016; 96: 206-216
- [160] Reilly A, Kinnane O, Lesage FJ, McGranaghan G, Pavía S, Walker R, O'Hegarty R, Robinson AJ. The thermal diffusivity of hemplime, and a method of direct measurement. *Construction and Building Materials* 2019; 212: 707-715
- [161] De Bruijn PB, Johansson P. Moisture fixation and thermal properties of lime-hemp concrete. *Construction and Building Materials* 2013; 47: 1235-42
- [162] Maalouf C, Tran Le AD, Umurigirwa SB, Lachi M, Douzane O. Study of hygrothermal behaviour of hemp concrete building envelope under summer conditions in France. *Energy and Buildings* 2014; 77: 48-57
- [163] Fabbri A, McGregor F. Impact of the determination of the sorption-desorption curves on the prediction of the hemp concrete hygrothermal behaviour. *Construction and Building Materials* 2017; 157: 108-116
- [164] Walker R, Pavía S. Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes. *Construction and Building Materials* 2014; 64:270-6.
- [165] Glé P. Caractérisation, Modélisation et Optimisation des Propriétés Acoustiques des Matériaux du Bâtiment à base de Fibres et Particules Végétales. L'Université de Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État, Laboratoire Génie Civil et Bâtiment 2012
- [166] Degrave-Lemeurs M, Glé P, Hellouin de Menibus A. Acoustical properties of hemp concretes for buildings thermal insulation: Application to clay and lime binders. *Construction and Building Materials* 2018; 160: 462-474
- [167] Delannoy G, Marceau S, Glé P, Gourlay E, Guéguen-Minerbe M, Diafi D, Nour I, Amziane S, Farcas F. Aging of hemp shiv used for concrete. *Materials & Design* 2018; 160: 752-762

[168] Marceau S, Glé P, Guéguen-Minerbe M, Gourlay E, Moscardelli S, Nour I, Amziane S. Influence of accelerated aging on the properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials* 2017; 139: 524-530

[169] Nilsson D, Svennerstedt B, Wretfors C. Absorption Equilibrium Moisture Contents of Flax Straw, Hemp Stalks and Reed Canary Grass Biosystems. *Engineering* 2005; 91(1): 35-43

[170] Walker R, Pavia S, Mitchell R. Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes. *Construction and Building Materials* 2014; 61; 340–348

## PAPER 3



Construction and Building Materials

Volume 285, 24 May 2021, 122853



# Effect of the state of conservation of the hemp used in geopolymer and hydraulic lime concretes

M. Paz Sáez-Pérez <sup>a</sup>, Monika Brümmer <sup>b</sup>, Jorge A. Durán-Suárez <sup>c</sup>

Indicios de calidad.

1. Artículo científico publicado en Construction and Building Materials, en 2021. Con un Factor de Impacto de 4.419 (2020) y 5.036 de los últimos 5 años según WOS, Web of science, Clarivate Analytics. Su CiteScore es de 7.4.

2. Para las categorías JCR de CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY, tiene una clasificación de 10 respecto a 63 con cuartil Q1, en ENGINEERING, CIVIL el ranking es 11 respecto a 134 y cuartil Q1, y en MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY es 78 respecto a 314 y cuartil Q1.

3. Según SJR, la revista tiene H-Index de 147 y en las diferentes áreas (Building and Construction, Civil and Structural Engineering y Materials Science (miscellaneous) se encuentra indizada en Q1.

4. La revista está incluida en las siguientes bases de datos:

- Materials Science Citation Index
- Compendex
- Engineering Index
- Research Alert
- Scopus
- INSPEC
- Science Citation Index Expanded

# **EFFECT OF THE STATE OF CONSERVATION OF THE HEMP USED IN GEOPOLYMER AND HYDRAULIC LIME CONCRETES**

## **ABSTRACT**

This paper evaluates two types of concrete with hemp fibres as natural aggregates prepared with inorganic binders, based on reactions (Si-Na) and (Si-Ca). It also was tested two states of conservation of the hemp: 1) fresh and 2) preserved in moist conditions for six months. It was confirmed by performing compositional, mineralogical and physical studies of the raw materials and the concretes. The results indicate that the changes induced by wet preservation, above all the increase in the percentage of cellulose, improve the mechanical properties of the concretes and is equivalent to other pre-treatments conducted to improve the conditions of the hemp fibres. The dosages used in this study provided high quality concretes in comparison with other studies with similar dosages.

## **KEYWORDS**

Green geopolymer concrete; green hydraulic lime concrete; Wet-preserved hemp fibres; Mechanical resistance; pre-treatment; reduce production cost, sustainable materials; saving water.

## **1. INTRODUCTION**

Across the world today, one of the basic principles of sustainable development in the building materials sector is that alternative solutions must be developed to replace current building materials that can have negative impacts on the environment [1-4]. Existing materials tend to be based on non-renewable resources and high energy consumption [5-9]. One clear example is Portland cement whose manufacturing process involves high CO<sub>2</sub> emissions [10].

One of the most promising alternative solutions today is the use of technologies based on geopolymer compounds activated with alkalis and strengthened with fibres [11,12]. In recent years there has been growing interest in the use of natural rather than synthetic fibres [1,5,13], an option that is generally considered to be beneficial from an environmental point of view in that it significantly reduces CO<sub>2</sub> emissions calculated in terms of the ecological footprint left by a product [14-17]. As [18] explained, these geopolymers are widely regarded as the cement materials for the future in the building industry and in civil engineering and infrastructure [19,20].

As confirmed by numerous studies [1,5,13,22,23], these natural fibre compounds have mechanical properties that make them suitable for use in building materials [24,25], as well as thermal resistance, low density, low permeability, low thermal conductivity, a stable volume, resistance to sulphates and acid attacks, along with other positive attributes that are important in both their manufacture and their application on the building site [21]. These include a reduction in the amount of water required during the preparation of the compounds, a low processing temperature [1,26,27], earlier removal of the formwork and faster curing at ambient temperature [28-30].

It is also important to point out that building materials made with natural fibres have lower production costs than those made with synthetic fibres [1,5,22]. When locally produced, these products also have a smaller ecological footprint in terms of the environmental impact of transporting them [31,32].

In spite of these numerous advantages listed above, geopolymers made with natural fibres also have recurring problems with biodegradation, and in particular the degradation caused by UV rays, and the weak bonding or degradation of the structures that cement the fibres together or to other stem tissues. These issues are normally resolved using pre-treatments [23,32-38] which improve the final performance.

As regards the different fibres used, it is important to highlight the increase in the cultivation of fibre plants in the agricultural sector worldwide in recent years [39-41]. Research into and the practical application of natural fibre technology have demonstrated that these fibres can be successfully used for strengthening compound materials, in building materials, in thermal and acoustic insulation materials [42] and in many other applications, achieving very similar results to other reinforcement fibres such as metal or carbon fibres [3,21,22,43-45].

Industrial hemp fibre is one of the most resistant, most rigid natural fibres available worldwide and therefore has great potential for use in compound materials as has been demonstrated in numerous research studies on this question [1,5,10,32,43,46].

Hemp fibre is one of the most widely valued of all the natural fibres, because it does not contain herbicides, and due to the fact that its plants are highly resistant to both disease and insects. Its recycling is more economical and, compared to other plant species, it is ideal as a carbon sink, reducing the CO<sub>2</sub> emitted into the atmosphere due to the absorption effect. On this question, several studies have found that hemp has an excellent reabsorption capacity equivalent to 1800 kg of CO<sub>2</sub> for each tonne cultivated [47-49].

Alongside the increasing use of geopolymer compounds as sustainable alternative building materials, the hydraulic lime concretes made with hemp are also widely appreciated within the construction sector as materials that can be produced without consuming large amounts of energy [50]. They also have excellent insulating and thermal properties and an environmental impact that is similar to or less than other materials [51]. However, lime concretes also have a number of disadvantages such as low resistance and a high initial moisture content which would allow limited, although very useful, applications [52-55].

In both these natural fibre-based concretes, the selection of the raw material is very important as is the processing procedure [30,56]. As confirmed by previous authors [32,57], the advantages offered by fibres from the different parts of the plant (cores, stems, leaves) vary significantly from one species to another. The cultivation and harvesting conditions must also be taken into consideration [4]. This can lead to enormous variability in the chemical composition (amount of cellulose, lignin, hemicellulose, etc.) and the structure (shape and size, etc.) of the natural fibres [58,59], which in turn have a significant influence on their general properties and by extension on the properties of the compound materials [58-61].

In addition, several different articles have studied the effect of the state of preservation of the fibres and the influence this can have on their behaviour, bearing in mind that the homogenous properties of natural fibres required by industry are difficult to control because they are highly dependent on the climate conditions in the field. This involves a series of risks and can result in different qualities of fibre [62-63]. In addition to various challenges raised by the traditional harvesting process, other challenges include the availability of harvests, the cost-income ratio in terms of the cost of growing the plants and the income from the sale of the final products, and the management of quality [64-67].

At this point, the research published by a range of authors [23,56,68] proposes an alternative solution that would enable us to simplify the harvesting operations and reduce the dependence of hemp supply on the climate [69], which on occasions can severely inflate production costs. A new technique has been developed that is unaffected by the climate. First, the hemp is harvested with a shredder. It is then anaerobically wrapped and placed in wet storage where natural fermentation takes place [70,71]. This causes changes in its composition (in the proportional content of its elements) due to microbial activity, while maintaining the quality properties essential for subsequent processing and use [56].

In this paper it was studied the influence of the state of preservation on different formulations of geopolymer hempcrete and hydraulic lime hempcrete with small differences in their composition. The hemp fibres used contribute certain qualities to these compounds, as confirmed in the aforementioned research studies. In this case, the main objective was to identify the impact of the storage process on the behaviour of the hemp fibres used in the manufacture of building materials. In this case, the main objective was to identify the impact of the storage process on the behaviour of the hemp fibres used in the manufacture of building materials more than to obtain a material with specific predetermined characteristics (high resistance levels, etc.). In this paper it was present the results of the comparative assessments carried out by analysing morphology, pore size distribution and physical and mechanical properties. It was observed that a minimal difference in the composition could complicate the understanding of the properties of the compounds being strengthened with these fibres.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. RAW MATERIALS. CHARACTERIZATION

#### 2.1.1. Organic binders

In the preparation of the samples tested in this research, it was used hemp plants from the Fedora 17 variety, cultivated in Potsdam (Germany) in 2017 by the Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy (ATB) [72].

The detailed description of all the essential operational parameters for the extrusion and grinding process is offered in [35].

In this study it was used both fresh hemp (F) and hemp that had been wet-preserved for six months (C). After comparing the proportion of structural polymers, the metabolic products content and the pH of the hemp stored in the two different ways, it was observed, as is shown in Figure 1, that changes took place in the period between harvesting and use, due to the metabolism of the anaerobic bacteria.

In the case of the fibres, it was observed that for the wet-preserved samples (C), compared to those stored fresh (F), there was a slight reduction in the percentage of lignin (12%) and of hemicellulose (13%), while the percentage of cellulose increased (4%). These results were similar to previous findings described in the literature [56]. It was also observed a 19% reduction in the alcohol content and a 23% fall in lactic acid, while the total acid content increased by 75%.

Finally, it was proved that after the wet storage period (C), the pH had fallen by 25%, a finding that coincides with [56], so confirming that wet storage increases the total acidity of the hemp.

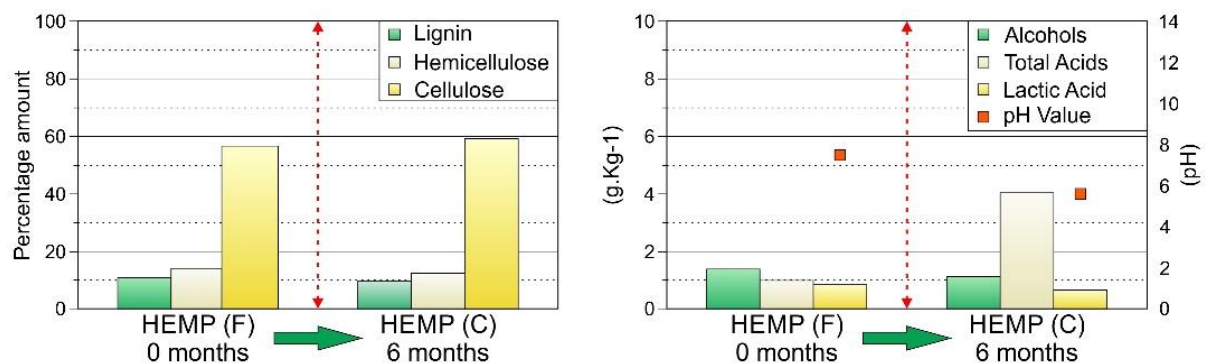


Figure 1. Left. Proportion of structural polymers in the fresh hemp (F), and the wet-preserved hemp (C). Right. Metabolic products content and pH of the fresh hemp (F), and the wet-preserved hemp (C).

Previous researchers found that a high content of fine particles and dust from the fibre material can affect the resistance properties of the manufactured building materials [73,74]. Therefore, it was decided to perform a detailed analysis of the particles of hemp, as preserved in the two different ways, for which purpose the FiberShape image analysis system was used (IST AG, Vilters, Suiza) [75]. This system shows the probability of distribution of frequency for the width of the fibres. (See Figure 2). The experiment was conducted by the Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy (ATB) [72]



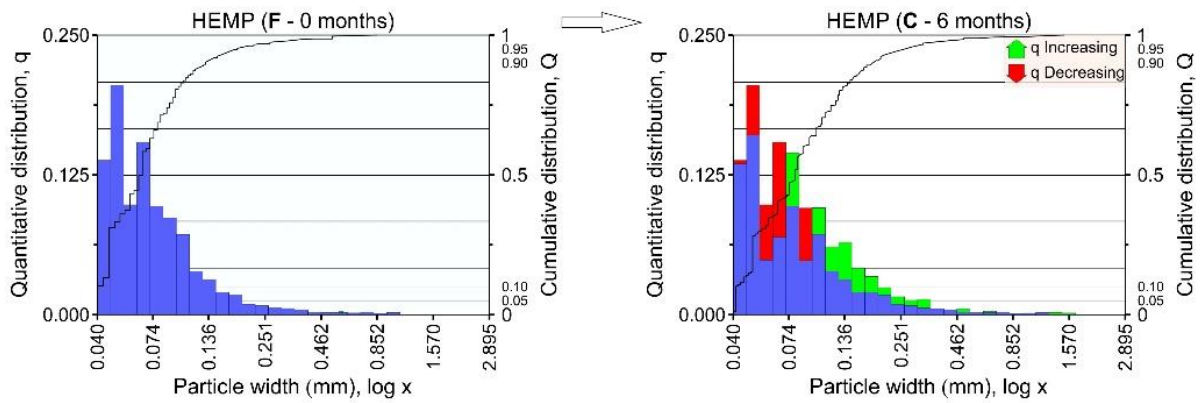


Figure 2. Evaluation of the width of the hemp fibres after wet storage (C), via the accumulative analysis of scanned images (1200 ppp) with particles measured individually using FiberShape.

In the fresh hemp samples (F), the distribution of the thicknesses of the fibres showed that the thinnest fibres were dominant in percentage terms. However, in the wet-preserved hemp (C), the percentage distribution of fibre sizes indicated a progressive thickening. This can be observed on the graphs, both in the values for the smallest widths, which decreased, and in the values for the largest widths, which went up. This can also be seen in Table 1, where the 0.136-0.251 range increased by almost 10 units from fresh hemp (F) to wet-preserved hemp (C), while the proportion in the 0.251-2.895 size range was almost twice as high in (C) as in (F). All of this was due to the process of wet storage for six months and the fermentation of the hemp, which brought about a slight increase in the cellulose content.

Table 1. Width range. Fresh hemp (F) and hemp that was wet-preserved for six months (C).

Width (%)						
SAMPLE	0,04-0,074	0,074-0,136	0,136-0,251	0,251-0,462	0,462-0,852	0,852-2,895
F	68	23	6	2	0,7	0,3
C	45	33	15	5	1,4	0,6

As regards its visual appearance, the hemp had grown darker after wet storage for six months as compared to the fresh hemp. (See Figure 3).

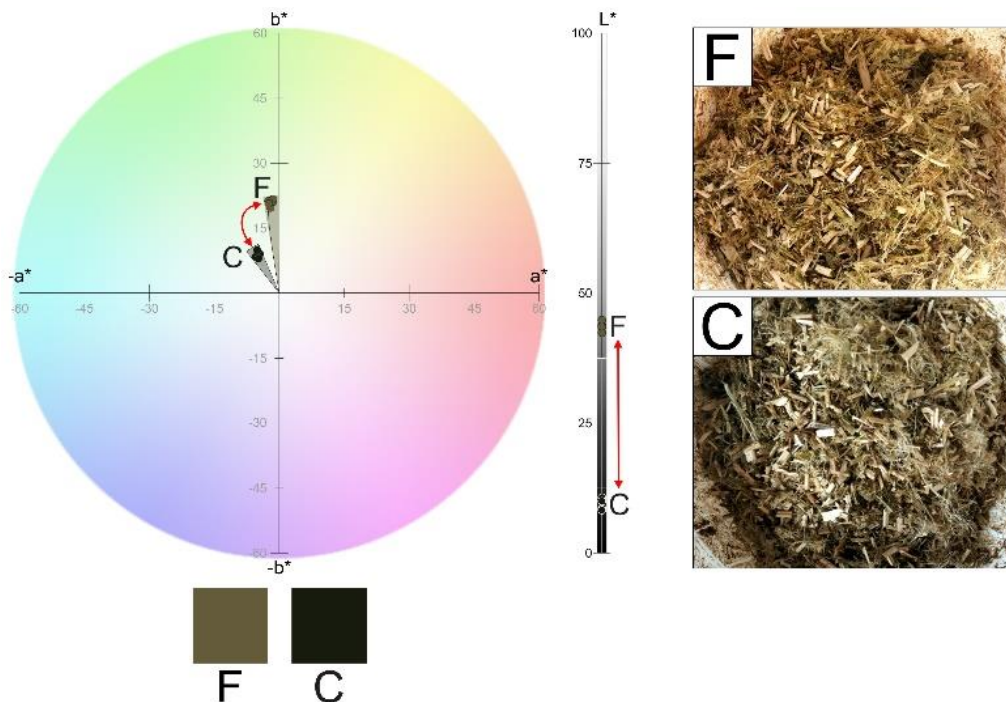


Figure 3. Left. Graphic representation of the CIELab 1976 [76] values for the hemp with Illuminant D65. Right. Detail of the aggregate used. F. fresh hemp and C. wet-preserved hemp (6 months).

### 2.1.2. Inorganic materials

The recycled glass dust was supplied by Silmin Ibérica (Rubí, Spain). The mineral sample of autochthonous soils was collected in the Guadix area of the province of Granada, Spain. The liquid sodium silicate with molecular formula  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , was supplied by Quimipur S.L.U. (Campo Real, España) [77]. The sodium hydroxide in solid form with molecular formula  $\text{NaOH}$  was supplied by Kremer Pigmente (Aichstetten, Germany) in a 5% solution. And NHL5 natural hydraulic lime was supplied by Secil Martingança S.A. (Maceira, Portugal) [78]. Its chemical and mineralogical compositions can be seen in Table 2 and Figure 4.

## 2. CHARACTERIZATION

The chemical and mineralogical properties of the materials used in the samples were studied using X-Ray Fluorescence (XRF) and X-Ray Diffraction (XRD). The results are shown in Table 2 and Figure 4 respectively.

For the XRD experiment, the samples were analysed with a Bruker D8Avance diffractometer with 2-theta geometry, using copper radiation and a Lynxeye detector from the Granada University Scientific Instruments Centre (CIC). The composition was determined using the Xpovder software programme [79].

The samples were analysed using a PANalytical Zetium X-ray fluorescence spectrometer (XRF) with a ceramic x-ray tube, a 4 KW rhodium anode x-ray generator and a non-coupled gonio-meter of  $\theta/2$  (Granada University Scientific Instruments Centre). The XRF samples were mechanically ground in an agate mortar and then sieved to a grain-size fraction of  $<0.354$  mm (mesh size 45).

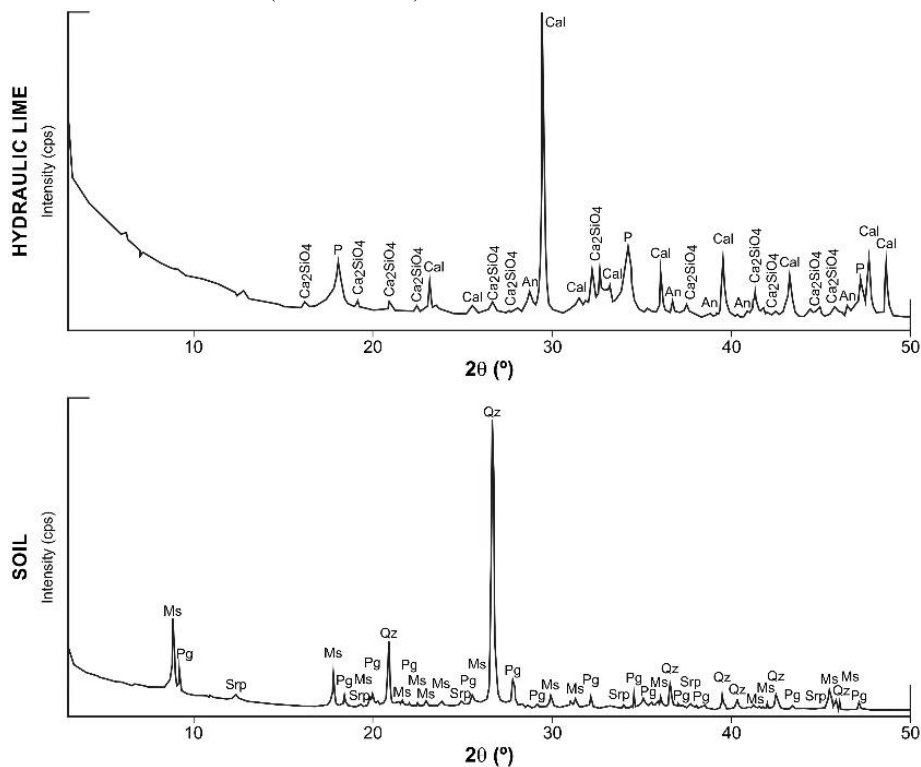


Figure 4. X-ray diffractograms for the binder (Hydraulic lime NHL5) and soil (local soil from Guadix, Granada, Spain). Binder is composed mainly of calcium ( $\text{CaCO}_3$  -  $\text{CaO}$ ), portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), calcium metasilicate ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) and anorthite ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ). The mineralogical composition of the soil is quartz ( $\text{SiO}_2$ ), muscovite ( $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ), paragonite ( $\text{NaAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) and serpentine ( $(\text{Mg},\text{Al},\text{Fe},\text{Mn},\text{Ni},\text{Zn})_2\text{-}3(\text{Si},\text{Al},\text{Fe})_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ). Abbreviations for names of rock-forming minerals [80]. Legend: Cal = calcite; P = portlandite; An = anorthite;  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  = calcium metasilicate; Qz = quartz; Ms = muscovite; Pg = paragonite; Srp = serpentine.

In percentage terms, the NHL5 hydraulic lime contains at least 50% of mineralizations with high binding capacity (Portlandite and  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) and 33% of mineralizations with probable binding capacity (Lime,  $\text{CaCO}_3$  -  $\text{CaO}$ ). The

remaining 17% (An,  $(CaAl_2Si_2O_8)$ ) may facilitate the hydraulicity reaction of the NHL5 lime, due to its calcium aluminosilicate content.

As regards the soil, it has two important roles to play in the concrete mixes, firstly as an aggregate and also when applicable by helping the concretes to harden, given its mineralogical composition (quartz, muscovite, paragonite and serpentine) with high silica and aluminium contents which can facilitate hydraulicity reactions. See Table 2 shows the chemical composition of the raw materials used in the preparation of the samples.

Table 2. Chemical composition by XRF analysis (wt %) of raw materials. Data normalized to 100% (LOI-free).

SAMPLE	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn O	Mg O	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO 2	P <sub>2</sub> O 5	SO 3	LOI
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
SOIL	53,78	24,54	7,88	0,07	0,95	1,17	1,35	3,4	0,83	0,24	0,09	5,48
NHL5	10,83	3,74	1,88	0,02	2,5	55,29	0,18	0,92	0,24	0,05	1,82	19,91
GLASS POWDER	68,42	1,18	0,2	0,01	3,09	10,27	14,86	0,46	0,08	0,02	0,3	0,98
SODIUM SILICAT E	48,09	0,18	0,03			0,03	19,57	0,08	0,01	0,01	0,05	31,78
SODIUM SILICAT E AND GLASS POWDER	50,43	0,31	0,05		0,5	1,32	18,29	0,12	0,02	0,01	0,08	28,73

### 3. SAMPLES USED IN THE EXPERIMENT. EXPERIMENT METHODS.

In view of the proposed objectives of this research, it was prepared 32 test samples (eight test samples from each group) of geopolymer hempcrete and 16 test samples (eight test samples for each group) of hydraulic lime hempcrete. Each group was made up of test samples manufactured with hemp preserved in the two different ways described above (fresh and wet-preserved for six months). Different formulations were established for each group as indicated below. Table 3 indicates the names and the doses used in each group of test samples.

Table 3. Names of the formulations, components and doses (by % volume) of the samples of geopolymer hempcrete and hydraulic lime hempcrete.

Formulation number	Fresh hemp	Conserved hemp	Soil (≤ 1 mm)	Glass powder	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	NaOH	NHL5 lime	Water
	%	%	%	%	%	%	%	%
FS1	60.60		21.60	3.50	12.55	1.75		
CS2		60.60	21.60	3.50	12.55	1.75		
FS3	64.45		13.35	4.45	15.55	2.20		
CS4		64.45	13.35	4.45	15.55	2.20		
FL1	51.45		24.85				8.90	14.80
CL2		51.45	24.85				8.90	14.80

In Figure 5 it can be seen the process for the preparation of the test samples of geopolymer hempcrete and hydraulic lime hempcrete. Binder mix (A) and binder-aggregate mix (B) for preparing the geopolymer hempcrete mix before pouring it into the mould. State of samples after the moulds had been removed - geopolymer hempcrete (C) and hydraulic lime hempcrete stabilized with lime (D). Drying of geopolymer hempcrete samples (E). Curing of geopolymer concrete samples in an oven (F). And finally samples of hydraulic lime hempcrete after the drying process (G).

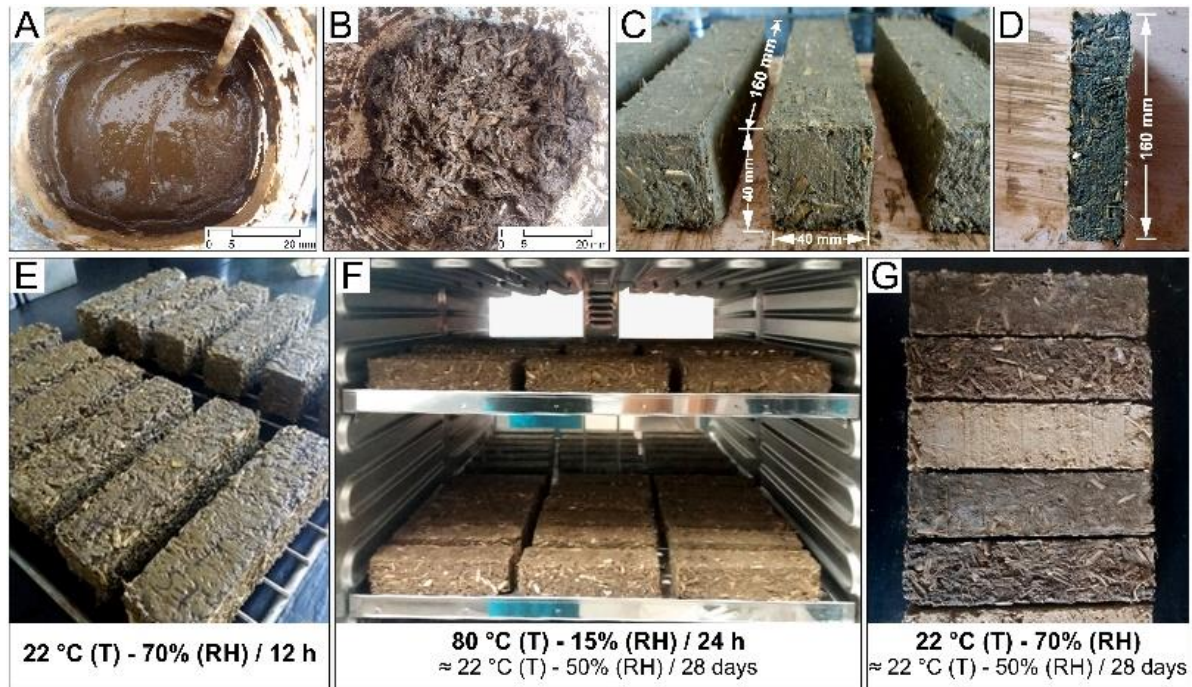


Figure 5. Process for the preparation of the test samples of geopolymer hempcrete and hydraulic lime hempcrete

### 3.3. Test methods

#### Scanning electron microscopy (SEM)

The tests to characterize the mineralogy, texture and microstructure of the samples were conducted with a Zeiss DMS 950 scanning electron microscope (SEM) coupled with Microanalysis Link QX 2000.

#### Pore size distribution

The pore size distribution and the total pore volume were determined using Mercury Intrusion Porosimetry (MIP). The samples were prepared using selected fragments from the different groups that had been collected during the mechanical tests, with a volume of approximately 1 cm<sup>3</sup>. The pore size distribution was measured with an MIP (Autopore IV 9510, Micromeritics) that operates at pressures of 0.01 to 414 MPa. These operating conditions enabled us to measure pores over a wide size range (<0.01–1000 μm).

#### Density

The density of the samples was calculated before conducting the mechanical tests and the exposure conditions were as follows: T = 20° C and HR = 60%. The weight, height, width and length of each sample were measured so as to be able to calculate the density according to standard [81].

#### Mechanical tests

For the mechanical resistance measurements, it was used the average values for three samples of each formulation. The resistance to bending was measured using prisms measuring 40×40×160 mm after 28 days at ambient temperature. In order to measure the resistance to compression, three 40 mm cubes were cut from the prisms tested earlier in the bending test. The resistance to compression test was conducted in accordance with standard [82]. The test was carried out in a universal INSTRON Model 3365 tester (Instron, Norwood, MA, USA), the specific characteristics of which are shown in [83]. In the bending test a velocity of 1 mm/min and a sample interval of 64 mm were used. This broke the sample by applying a concentrated load in the middle, setting the load cell at 5 kN. For the compression test an applied velocity of 5 mm/min was used.

#### Ultrasounds

A range of different properties were measured in all the samples (e.g. compactness and resistance to the direct transmission of ultrasonic pulses) using a Steinkamp BP5 ultrasonic pulse generator with 100 kHz transducers according to [84]. The results show the mean values obtained for each group.

## 4. RESULTS

### 4.1. SEM

Morphological analysis.

The morphological analysis can be seen in Figure 6.

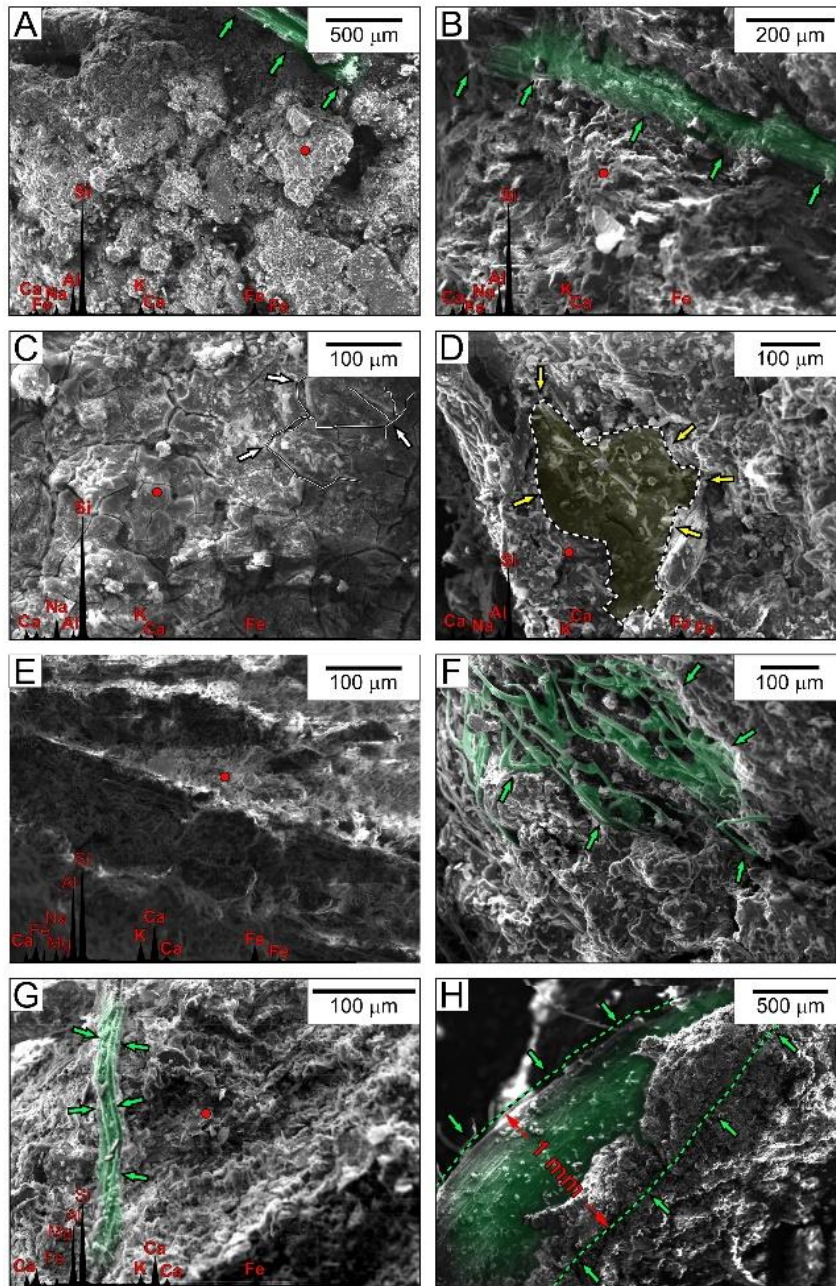


Figure 6. Representative scanning electron microscopy (SEM) images including EDX analyses of samples. (A, C). FS1, geopolymer hempcrete. (B, D). CS2, geopolymer hempcrete. (E, F). FS3 and CS4, geopolymer hempcrete. (G, H). FL1 and CL2, hydraulic lime hempcrete.

The microphotographs reveal a number of different aspects, particularly the progressive thickening of the hemp fibres when the hemp (F) is compared to the wet-preserved hemp (C), as in Images B, F and H of Figure 3. In Image B, which shows a geopolymer concrete made with wet stored hemp (CS2), the thickening of the hemp fibres is highlighted with green arrows. The large pores in all the images are also highlighted, varying in size from 100 μm and above and visibly connected. The EDX analyses of samples FS1 and CS2 (Images A and B of concretes FS1 and CS2) confirm the appropriate composition of the geopolymer concretes made of sodium silicate

and soil with phyllosilicates. Images C and D underline the incorporation of an inorganic oligomer (sodium silicate) as a binder for the geopolymer hempcretes. The cracked paint effect is typical of materials of this kind after undergoing polymerization induced by sodium hydroxide and curing at 80° in a drying oven (white lines and arrows). There is also a detail of the characteristic amorphous silica lump (yellow arrows). A thickening of the hemp fibres can be observed (green arrows) when comparing Image E (FS3), a geopolymer hempcrete made with fresh hemp, with Image F (CS4), a geopolymer hempcrete made with wet-preserved hemp. There are also imprints of plant fibres with thicknesses of 100 µm or more. Finally in Image G (FL1), which shows hydraulic lime hempcrete, there is a detail of the hemp fibres included in the calcareous matrix, while in H (CL2), hydraulic lime hempcrete, the thickening of the fibres is highlighted (green arrows) inside the matrix, together with their estimated thickness of 1 mm. Interconnected medium-sized pores can also be seen.

The EDX microanalyses of the matrices of the geopolymer hempcretes confirmed the presence of the materials used: sodium silicate and soil rich in phyllosilicates. Microphotographs E and F show formulations FS3 and CS4 of the geopolymer hempcretes in which the EDX analysis of the matrix revealed the characteristic elements found in these minerals: a binder based on sodium silicate and soil containing important amounts of silicate minerals, together with sodium (Na), which is present in both the binder itself and in the activator of the binder. Microphotographs G and H show NHL5 hydraulic lime hempcrete. The analysis of the elements in Image G (group FL1) indicates that the matrix does not contain sodium (Na), but is rich in elements typically found in phyllosilicate minerals (Si, Al and Mg), together with traces of calcium from the binder (Ca), iron (Fe) and potassium (K).

As regards the morphology of the pores detected using SEM, there are large numbers of pores of varying sizes and shapes, including fissure-shaped, cylindrical, cavern-shaped and bottleneck pores.

In general, an increase in the thickness of the fibres can be observed in all the concretes made with the hemp that was wet-preserved for six months (C).

#### **4.2. POROSIMETRY**

The total porosity values as a percentage of the volume (quantitative valuation) indicated an increase in the porosity of the wet-preserved samples (C) compared to those made with fresh hemp (F). The same occurs with the silica samples FS1 and CS2, compared with samples FS3 and CS4 and indeed with these latter samples when compared with those made with hemp (FL1-CL2) and with NHL5 lime (porosity values that range between 32% and 51%). In all cases, the porosity values are very high for the average building material, although for certain specific materials such as those studied here, this finding is relative, particularly given the distribution and morphology of the pores, as assessed in the section on electron microscopy. This is because the mercury injection technique uses mathematical models that assume that all the pores are cylinders, without taking into account other factors such as tortuosity or the pores that have bottleneck shapes. Undoubtedly, all the porosity is accessible and none of the pores are closed.

As regards the classification of the pores according to size, trimodal curves could be observed in all the samples (see Figure 7). These curves accumulate very high percentage values (from 81.5% to 91%) in the following pore radius ranges: (r) 100-10 µm, (r) 10-1 µm and (r) 1-0.1 µm. According to some authors, pores within these size ranges could be defined as mezzopores [85-87]. There were also two other types of pores: macropores (1000-100 µm), with values of between 2.5% and 7%, and micropores which ranged from 6.5% to 10.5% for the following size ranges: (r) 0.1-0.01 µm, and (r) >0.01 µm.

In all the samples more than 90% of the pores are large or medium-sized. In addition, in all the samples prepared with wet-preserved hemp (C) the percentage of pores within the macropore radius range of (r) 1000-100 µm is half that of those prepared with fresh hemp (F).

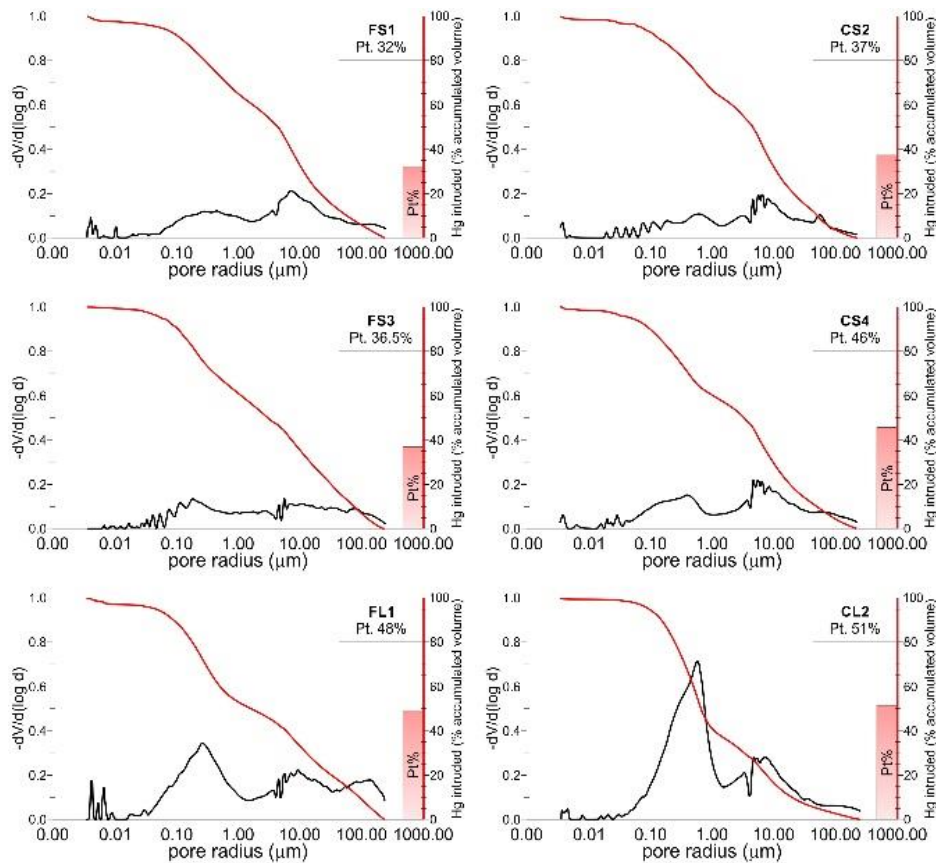


Figure 7. Porosimetric curves for the groups of samples studied. The relative volume of intruded Hg is shown in black. The red curve represents the accumulated volume of intruded Hg (Pt = total porosity).

### 4.3. MECHANICAL RESULTS DENSITY

The resulting values show that the average densities for the geopolymer hempcretes are 1063 kg/m<sup>3</sup> and 1110 kg/m<sup>3</sup> for formulations FS1 and CS2 and 907 kg/m<sup>3</sup> and 913 kg/m<sup>3</sup> for formulations FS3 and CS4. For their part, the hydraulic lime hempcretes reached average densities of 730 kg/m<sup>3</sup> for FL1 samples and 750 kg/m<sup>3</sup> for CL2 samples. These results indicate that the formulations made with wet-preserved hemp (C) obtained better values than those made with fresh hemp (F). This difference may be due to their dosage, in that a higher proportion of soil was used in samples FS1-CS2 than in samples FS3-CS4. In the case of samples FL1 and CL2 there are no significant differences in density values because both have the same percentage of soil.

The mechanical results highlight that the MPa value was higher in all the geopolymer concretes made with the hemp that was wet-preserved for six months (C) than in those made with fresh hemp (F), in both resistance to bending and resistance to uniaxial compression. This was manifested in substantial differences between F and C samples with respective values of 32% and 42% in the case of resistance to bending and of 17% and 28% in the case of resistance to compression.

In summary, formulations FS1 and FS3 show worse mechanical properties in terms of resistance to bending and to compression than formulations CS2 and CS4.

The mechanical results for resistance to compression and to bending for samples FL1 and CL2 are <0.02 MPa and are therefore weak in comparison with all the samples of geopolymer hempcrete. These findings coincide with those of [88] in that the resistance values depend to a large extent on the proportion of hemp and hydraulic lime. These formulations have a relatively low binder content compared to the amount of aggregates and water.

The results are illustrated in Figure 8 Image A.

#### 4.4 ULTRASOUNDS

As regards the ultrasound measurements, Figure 8 Image B presents the average values for the different groups of samples and their standard deviations. All the samples had ultrasonic pulse transmission values of between 750 m/s and 1700 m/s. The samples made with wet-preserved hemp (C) had higher ultrasonic transmission velocities than those made with fresh hemp (F). This increase in velocity was very slight judging by the standard deviation values of some samples compared to others. For example, FS1 and FS3 obtained lower values than CS2 and CS4 for the geopolymer concretes. In the case of the hydraulic lime hempcretes the FL1 samples obtained lower ultrasonic pulse values compared to the CL2 samples.

The low velocity in all the hempcretes is due primarily to the high level of porosity induced by the addition of fibres and also to the addition of soil and the use of binders based on NHL5 lime.

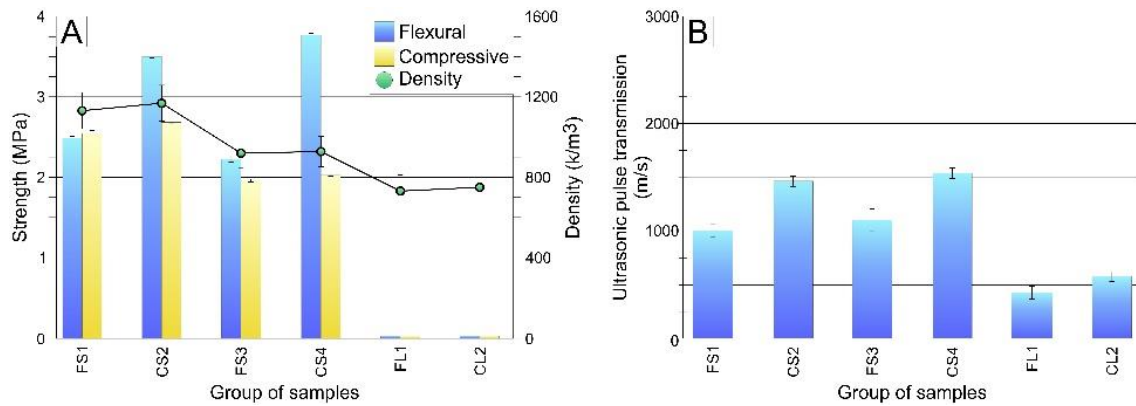


Figure 8. Representative images of mechanical results. (A) Resistance to compression, resistance to bending and density values for the different groups of samples tested. (B) Ultrasonic pulse transmission velocity and standard deviation for the different groups of samples tested.

#### 5. DISCUSSION

The increase in the percentage of cellulose in the wet-preserved hemp (C) compared to the fresh hemp (F) is the main reason for the improvement in the mechanical properties of the different mixtures. These properties improve due to the enhanced structural arrangement of the fibres. This confirms the results of the study conducted by [56] in which it was argued that the cellulose nanocrystals in the wet-preserved hemp (C) make it more resistant to bending and to uniaxial compression, in this way achieving the main objective of wet preservation of hemp, namely the maintenance of the essential qualities of the woody raw material required for its subsequent processing and use. This was also confirmed by [89], who indicated that the cellulose microfibrils from the cell walls of plant species contain a substantial volume of cellulose nanocrystals (CNCs), so creating a hard, light, flexible biomaterial with rigidity and elasticity modulus values that are similar to those for steel. These changes are manifested in the thickening of the fibres after six months of wet preservation, as observed using FiberShape scanning, a finding also confirmed in research by [56]. Another advantage is that wet-preserved hemp is easier to work due to the increase in the proportion of cellulose during the storage process (C). The lignin and hemicellulose content improve the rheology of the concrete mixtures, by enhancing the plasticity and workability and by helping delay setting in line with the studies by [21,90]. Viewed together, the alterations achieved by wet storage are similar to those that might be obtained by performing a pretreatment [91] that ensures better compacting of the cellulose chains and the elimination of amorphous materials from the fibre, so improving the properties of the end product.

In the case of the samples of hydraulic lime hempcrete, the results obtained in our research regarding the mechanical properties are similar to those obtained in research by [51,88,92,93]. In this study and focusing on the objectives established at the beginning, the results offer various minimal advantages in the samples made with wet-preserved hemp (C) compared to the samples made with fresh hemp (F), as regards the compositional variations identified in the fibres. This suggests that the FL1 and FL2 type samples could be very useful in bioconstruction as a filling material with high porosity and low density, factors that make structures lighter while



offering good insulation properties. In addition, the fact that FL2 is denser than FL1 may be due to the increase in the nanocrystals in the wet-preserved hemp fibres.

As regards the dosages used in the different types of concrete proposed in this study, these were based on the fundamental components (binder, aggregates and water) of any formulation of materials of this kind. This is why in our case all the materials that did not have adhesive and/or binding capacities were considered as aggregates, regardless of their chemical properties, which on occasions could enhance geopolymerization in the case of geopolymer hempcretes or the hardening and acquisition of mechanical resistance in the hydraulic lime hempcretes. This explains why the FS3 and CS4 formulations are more resistant to bending than FS1 and CS2, due to the fact that they have a higher proportion of binder.

As can be seen in Figure 9, the proportions used in our study were very different from those used by previous researchers referenced above, a fact that confirms the need to achieve the right balance of components (binder, aggregates and water) so as to obtain better results in terms of the properties of the concretes. In this case the binder content must be increased in relation to the aggregates.

The findings set out above allow us to conclude in general that the materials improve the quality of the concrete although the samples had relatively low mechanical values, perhaps due to the low proportion of binder used in the mixtures, as can be deduced from similar research with a better balance in the proportional content of the different components [51,88,93-95].

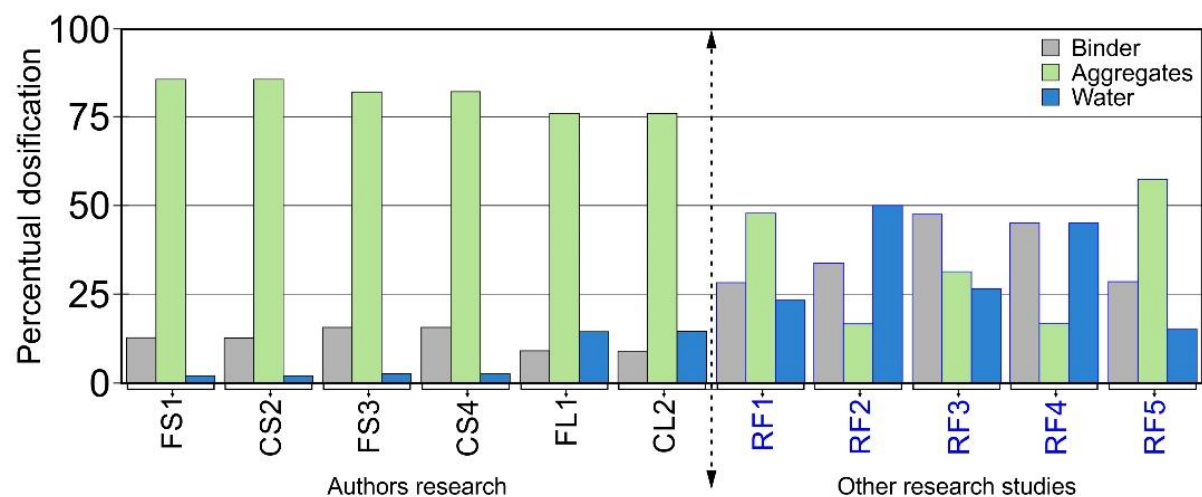


Figure 9. Comparison of the proportions of binder, aggregates and water used in the hempcretes tested in our study and those used in research by other authors RF1 [51,88,93-95].

Nonetheless, in most cases the concretes designed in this study obtained better mechanical resistance values than the majority of the studies listed in Figure 9, and in other cases similar results were obtained. This implies that if in future research it was adjusted these dosages in line with the average amounts used by previous researchers will obtain better mechanical resistance levels in the concretes, and in so doing broaden the range of construction solutions available within the field of bioconstruction.

## 6. CONCLUSIONS

In this study it was investigated the influence of the way the hemp is preserved on the behaviour of geopolymer hempcretes and hydraulic lime hempcretes in different dosages. The different tests confirmed that the way hemp is preserved can affect its performance as an aggregate in the types of concrete studied.

The following conclusions were obtained:

1. Wet preservation of the hemp improves the behaviour of the concretes studied, by improving the qualities of the material as an aggregate in the manufacturer of green concretes.
2. The higher cellulose content in the samples that contained wet-preserved hemp improves their mechanical resistance properties. The hemicellulose and lignin in the cellulose improve the rheology of the mixtures of the concrete by enhancing their plasticity and workability.
3. The dosages used in this study provided high quality concretes in comparison with other studies with similar dosages, although the relatively low binder content led to low mechanical values. It would be interesting to assess the performance of wet-preserved hemp (C) aggregates when used with different binders tested in other research (e. g. Cements from the Si-Al-Ca-Fe system, or geopolymer mixes that contain fly ash (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), metakaolin or silica fume.)
4. In addition, wet preservation reduces the amount of water required in the preparation of the geopolymer hempconcretes, an obvious advantage in areas with limited water resources.
5. The improvements obtained in the concretes made with wet-preserved hemp offer important advantages in relation to the method used for harvesting and preserving hemp. In countries in which the climate conditions are not suitable for harvesting the plant (perhaps due to wet conditions), this system allows the fibre to be used all year round in favourable conditions. In future complementary studies, it would also be useful to determine the optimum level of storage for achieving the results observed and compare them with the maximum storage time.
6. Finally, as wet preservation of the hemp is equivalent to other pre-treatments conducted to improve the conditions of the hemp fibres, the fact that these treatments are no longer required would reduce hemp production costs and therefore the cost of the final building materials.

## 6. ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by REMINE Project, H2020-MSCA-RISE-2014 and Project MAT2016- 75889-R of the National Plan for Scientific Research. Development and Technological Innovation (Ministry of Science and Technology) and Research groups HUM-629 and RNM 0179 (Regional Government of Andalusia).

The authors gratefully acknowledge to Dr. Gusovius and Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy (ATB).

## 7. BIBLIOGRAPHY

- [1] Galzerano B., Formisano, A., Durante, M., Lucolano, F., Caputo, D. and Liguori, B. (2018). Hemp reinforcement in lightweight geopolymers. *Journal of Composite Materials*, Vol. 52(17) 2313–2320. DOI: 10.1177/0021998317744036
- [2] Zhang Y, Wang J, Hu F, Yuanfeng, W. (2017). Comparison of evaluation standards for green building in China, Britain, United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68: 262–271.
- [3] Schiavoni S, D’Alessandro F, Bianchi F, Asdrubali, F. (2016) Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 62: 988–1011.
- [4] Franzoni E. (2011) Materials selection for green buildings: which tools for engineers and architects? *Procedia Engineering* 21: 883–890.
- [5] Korniejenko, K., Łach, M., Hebdowska-Krupa, M. and Mięka, J. (2018a). The mechanical properties of flax and hemp fibres reinforced geopolymer composites *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 379. 012023 doi:10.1088/1757-899X/379/1/012023
- [6] Korniejenko K, Łach M and Mięka J (2018b) Mechanical Properties of Raffia Fibres Reinforced Geopolymer Composite *Advances in Natural Fibre Composites* eds. R. Figueiro S Rana (Springer, Cham) pp 135-144.
- [7] Assaedi H, Shaikh FUA and Low IM (2017). Effect of nanoclay on durability and mechanical properties of flax fabric reinforced geopolymer composites. *Journal of Asian Ceramic Societies* 5 (1): 62-70.

- [8] Korniejenko K, Frączek E, Pytlak E and Adamski M. (2016). Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers. *Procedia Engineering*, 151 388-393.
- [9] Alomayri T, Shaikh FUA and Low IM (2013). Thermal and mechanical properties of cotton fabric-reinforced geopolymer composites. *Journal of Materials Science* 48(19):6746-6752. DOI: 10.1007/s10853-013-7479-2
- [10] Brzyski, P., Barnat-Hunek, D., Suchorab, Z. and Łagód, G. (2017). Composite Materials Based on Hemp and Flax for Low-Energy Buildings. *Materials* 10 (5): 510; doi:10.3390/ma10050510
- [11] Bernhardt, D.; Reilly, J.F. (2019). Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey U.S. Department of the Interior: Washington, VA, USA, 2019; Vol. 3; ISBN 9781411342835.
- [12] Huiskes, D.M.A., Keulen, A.; Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H. (2016). Design and performance evaluation of ultra-lightweight geopolymer concrete. *Materials and Design*, 89, 516–526, doi:10.1016/j.matdes.2015.09.167.
- [13] Alvin J. Malenab, Janne Pauline S. Ngo and Michael Angelo B. Pomentilla (2017). Chemical Treatment of Waste Abaca for NaturalFiber-Reinforced Geopolymer Composite *Roy Materials* DOI. 10, 579; doi:10.3390/ma10060579
- [14] Naidu AL, Jagadeesh V and Bahubalendruni MVAR (2017). A review on chemical and physical properties of natural fiber reinforced composites. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology* 8(1) 56-68
- [15] Alzeer M and MacKenzie K (2013). Synthesis and mechanical properties of novel composites of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (phormium tenax). *Applied Clay Science* s 75–76 148-152
- [16] Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalalic, S. (2008a) Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*. Volume 22, Issue 7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015>).
- [17] Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalalic, S. (2008b). Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. 2008. *Construction and Building Materials*, Volume 22, Issue 7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.019>).
- [18] Taveri, G., Bernardo, E. and Dlouhy, I. (2018). Mechanical Performance of Glass-Based Geopolymer. *Materials*, 11, 2395; doi:10.3390/ma11122395
- [19] Provis, J.L.; Bernal, S.A. (2014). *Alkali Activated Materials: State of the Art Report*. Taylor Francis, 13, 125–144.
- [20] Duxson, P.; Fernandez-Jimenez, A.; Provis, J.L.; Lukey, G.C.; Palomo, A.; Van Deventer, J.S.J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42, 2917–2933
- [21] Mishra, J., Panigrahib, R. (2020). Mini-Review on Structural Performance of Fiber Reinforced Geopolymer Concrete. *International Journal of Innovative Technology and Interdisciplinary Sciences*, 3(2), 435-442, DOI: <https://doi.org/10.15157/IJITIS.2020.3.2.435-442>
- [22] Walbrück, K., Maeting, F., Witzleben, S. and Stephan, D. (2020). Natural Fiber-Stabilized Geopolymer Foams—A Review. *Materials*, 13, 3198; doi:10.3390/ma13143198
- [23] Kirilovs, E., Gusovius, H-J., Kukle, S., Emsins, J. (2014). Performance of Fibreboards made from Wetpreserved Hemp. *Material Science. Textile and Clothing Technology*. doi: 10.7250/mstct.2013.011

- [24] Murri A.N., Medri, V. and Landi, E. (2017). Production and thermomechanical characterization of wool-geopolymer composites. *Journal of the American Ceramic Society* 100(7) 2822-2831.
- [25] Bribián, I.Z, Capilla, A.V., Usón, A.A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment* 46(5) 1133-1140.
- [26] Liguori B, Capasso I, Romeo V, et al. (2017). Hybrid geopolymeric foams with diatomite addition: Effect on chemico-physical properties. *Journal of Cellular Plastics*, 53: 525–536. <https://doi.org/10.1177/0021955X17695092>
- [27] Verdolotti L., Liguori B., Capasso I., Domenico, E., Marino, c. ad Lavorgna S. (2015). Synergistic effect of vegetable protein and silicon addition on geopolymeric foams properties. *Journal of Materials Science* 50: 2459–2466.
- [28] Nath P, Sarker PK. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66: 163-171.
- [29] Lee N.K., Lee H.K. (2013). Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature. *Construction and Building Materials* 47:1201–1209.
- [30] Temuujin J., Williams R.P, Van Riessen A. (2009). Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (12):5276–5280.
- [31] Mastali M, Abdollahnejad Z and Pacheco-Torgal F (2018). Carbon dioxide sequestration of fly ash alkaline-based mortars containing recycled aggregates and reinforced by hemp fibres. *Construction and Building Materials* 160, 48-56
- [32] Kwunjai, S., Jitsangiam, P., Suwan, T., Rinchumphu, D., Thongchua, H., Chindaprasirt, P., Sampattagul, S. (2020). Hemp Fiber Reinforced Geopolymer Composites: Effects of NaOH Concentration on Fiber Pre-Treatment Process *Key Engineering Materials* 841: 171-176. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.841.171>
- [32] Pacheco-Torgal F. (2014). Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020. *Construction and Building Materials* 51: 151-162
- [33] Maichin, P., Suwan, T., Jitsangiam, P., Chindaprasirt, P. & Fan, M. (2020). Effect of self-treatment process on properties of natural fiber-reinforced geopolymer composites 35(10): 1120-1128. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1767294>
- [34] Bleuze, L.; Lashermes, G.; Alavoine, G.; Recous, S.; Chabbert, B. (2018). Tracking the dynamics of hemp dew retting under controlled environmental conditions. *Industrial Crops and Products*, 123, 55–63.
- [35] Lühr C, Pecenka R, Budde J, Hoffmann T, Gusovius H-J. (2018) Comparative investigations of fibreboards resulting from selected hemp varieties. *Industrial Crops and Products* 118: 81-94.
- [36] Sisti, L.; Totaro, G.; Vannini, M.; Celli, A. (2018). Retting process as a pretreatment of natural fibres for the development of polymer composites. In *Lignocellulosic Composite Materials*; Kalia, S. Ed.; Springer: Cham, Switzerland, 97–135.
- [37] Placet, V.; Day, A.; Beaugrand, J. (2017). The influence of unintended field retting on the physicochemical and mechanical properties of industrial hemp bast fibres. *Journal of Materials Science* 52, 5759–5777.

- [38] Uitterhaegen, E.; Labonne, L.; Merah, O.; Talou, T.; Ballas, S.; Véronèse, T.; Evon, P. (2017). Impact of thermomechanical fiber pre-treatment using twin-screw extrusion on the production and properties of renewable binderless coriander fiberboards. *International Journal of Molecular Sciences*. 18(7), 1539.
- [39] Fiber Crops as a Sustainable Source of Bio-based Materials for Industrial Products in Europe and China (2015). <https://cordis.europa.eu/project/id/311965/es>
- [40] Anish M.D., Mittal, V. (2018). Polymer composites with functionalized natural fibers. *Biodegradable and Biocompatible Polymer Composites*. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100970-3.00006-7>
- [41] Nunes, C.L. (2017). Nonwood bio-based materials. *Performance of Bio-based Building Materials* 97-196. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100982-6.00003-3>
- [42] Shahzad, A. (2013). A Study in Physical and Mechanical Properties of Hemp Fibres. *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 325085, 9 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/325085>
- [43] Sáez-Pérez, M.P., Brümmer, M., Durán-Suárez, J.A. (2020). A review of the factors affecting the properties and performance of hemp aggregate concretes. *Journal of Building Engineering* 31, 101323. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101323>
- [44] Kamrun N. Keya Nasrin A. Kona Farjana A. Koly Kazi Madina Maraz Md. Naimul Islam Ruhul A. Khan (2019). Natural fiber reinforced polymer composites: history, types, advantages and applications. *Materials Science and Engineering*, 1(2): 69-85. DOI: 10.25082/MER.2019.02.006
- [45] Mohammed, L., Ansari, M.N.M., Pua, G., Jawaaid, M., and Saiful Islam, M. (2015). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications. *International Journal of Polymer Science*. Volume 2015, Article ID 243947, 15 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/243947>
- [46] Pickering, K.L., Beckermann, G.W., Alam, S.N., Foreman, N.J. (2007). Optimising industrial hemp fibre for composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 38(2), 461-468.
- [47] Busbridge, R. and Rhydwen, R. (2010). An investigation of the thermal properties of hemp and clay monolithic walls. *Proceedings of Advances in Computing and Technology, (AC&T) The School of Computing and Technology 5th Annual Conference, University of East London*, pp.163-170.
- [48] Arief C. Wibowo, Amar K. Mohanty, Manjusri Misra, and Lawrence T. Drzal. (2004). Chopped Industrial Hemp Fiber Reinforced Cellulosic Plastic Biocomposites: Thermomechanical and Morphological Properties. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 43(16), 4883-4888 DOI: 10.1021/ie030873c).
- [49] Pervaiz M. (2003). Carbon storage potential in natural fiber Composites; *Resources, Conservation and Recycling*, 39(4). [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00173-8](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00173-8)
- [50] Bumanis, G., Vitola, L., Pundiene, I., Sinka, M. and Bajare, D. (2020). Gypsum, Geopolymers, and Starch—Alternative Binders for Bio-Based Building Materials: A Review and Life-Cycle Assessment. *Sustainability* 12, 5666; doi:10.3390/su12145666
- [51] Fernea, R., Manea, D.L., Tamas Gravea, D.R., Rosca, J.C. (2019). Hemp-clay building materials. An investigation on acoustic, thermal and mechanical properties. *Procedia Manufacturing* 32 216–223
- [52] Demir, I., and Doğa, C. (2020). Physical and Mechanical Properties of Hempcrete. *The Open Waste Management Journal*. DOI: 10.2174/1874312902014010026)

- [53] Pochwała, S.; Makiola, D.; Anweiler, S.; Böhm, M. (2020). The Heat Conductivity Properties of Hemp–Lime Composite Material Used in Single-Family Buildings. *Materials* 13, 1011. <https://doi.org/10.3390/ma13041011>)
- [54] Bejat, T., Piot, A., Arnaud Jay, T.B., Bessette, L. (2015). Study of Two Hemp Concrete Walls in Real Weather Conditions, *Energy Procedia*, Volume 78, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.221>)
- [55] Bedlivá, H., and Isaacs, N. (2014). Hempcrete – An Environmentally Friendly Material? *Advanced Materials Research*, 1041, 83–86. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.83>)
- [56] Gusovius, H.J., Lühr, C., Homann, T., Pecenka, R. and Idler, C. (2019) An Alternative to Field Retting: Fibrous Materials Based on Wet Preserved Hemp for the Manufacture of Composites. *Agriculture* 9, 140. doi:10.3390/agriculture9070140
- [57] Le Moigne, N., Oever, M., Budtova, T. (2011). A statistical analysis of fibre size and shape distribution after compounding in composites reinforced by natural fibres. *Composites: Part A* 42, 1542–1550
- [58] Bledzki AK, Gassan J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science* 24:221–74.
- [59] Bismarck A, Mishra S, Lampke T. (2005). Plant fibers as reinforcement for green composites. In: Mohanty AK, Misra M, Drzal LT, editors. *Natural fibers biopolymers and biocomposites*. USA: Taylor & Francis, 37–108.
- [60] Oksman K, Mathew AP, Långström R, Nyström B, Joseph K. (2009). The influence of fibre microstructure on fibre breakage and mechanical properties of natural fibre reinforced polypropylene. *Composites Science and Technology* 69:1847–53.
- [61] Puglia D, Terenzi A, Barbosa SE, Kenny JM. (2008) Polypropylene–natural fibre composites. Analysis of fibre structure modification during compounding and its influence on the final properties. *Compos Interfaces* 15:111–29.
- [62] Liu, M.; Fernando, D.; Daniel, G.; Madsen, B.; Meyer, A.S.; Ale, M.T.; Thygesen. (2015). A. Effect of harvest time and field retting duration on the chemical composition, morphology and mechanical properties of hemp fibres. *Industrial Crops and Products*. 69, 29–39.
- [63] Tahir, P.M.; Ahmed, A.A.; SaifulAzry, S.O.; Ahmed, Z. (1995). Retting process of some bast plant fibres and its effect on fibre quality: A review. *BioResources* 2011, 6, 5260–5281, 138.
- [64] Wang, S.; Gusovius, H.-J.; Lühr, C.; Musio, S.; Uhrlaub, B.; Amaducci, S.; Müssig, J. (2018). Assessment system to characterise and compare different hemp varieties based on a developed lab-scaled decortication system. *Industrial Crops and Products*. 117, 159–168.
- [65] Gusovius, H.-J.; Hofmann, T.; Budde, J.; Lühr, C. (2016). Still special? Harvesting procedures for industrial hemp. *Landtechnik* 71, 14–24.
- [66] Pari, L.; Baraniecki, P.; Kaniewski, R.; Scarfone, A. (2015). Harvesting strategies of bast fibre crops in Europe and in China. *Industrial Crops and Products*. 68, 90–96.
- [67] Bouloc, P.; Allegret, S.; Arnaud, L. (2013). *Hemp: Industrial Production and Uses*; CABI: Wallingford, UK, p. 313.
- [68] Pecenka, R., Füll, C., Radosavljevic, L. (2008). Processing of Wet Preserved Hemp to Fibre Boards in a Pilot Plant. *International Conference on Flax and Other Bast Plants*. ISBN #978-0-9809664-0-4. 75-80

- [69] Idler, C.; Ehlert, D.; Ackermann, I.; Kühne, G. Ernte, Konservierung und Erstverarbeitung von Hanf aus Einer Feuchtgutlinie, Harvesting, Conservation and First Processing of Hemp from a Moist Material Line. ATB-Projektabschlussbericht 2000/3; Institut für Agrartechnik: Potsdam, Germany, 2000; p. 43, In German.
- [70] De Maeyer, E.A.A.; Huisman, W. Oogst en Conserveringstechniek van Vezelhenep, Techniques for Harvesting and Storage of Fibre Hemp; IMAG-DLO and Wageningen Agricultural University: Wageningen, The Netherlands, 1995; p. 138, in Dutch with English summary.
- [71] De Maeyer, E.A.A.; Huisman, W. (1994). New technology to harvest and store fibre hemp for paper pulp. Journal of the International Hemp Association 1, 38–41.
- [72] <https://www.leibniz-gemeinschaft.de/en/institutes/leibniz-institutes-all-lists/leibniz-institute-for-agricultural-engineering-and-bioeconomy.html>.
- [73] Dunky, M.; Niemz, P. Holzwerkstoffe und Leime (2002). Technologie und Einflussfaktoren—Wood Based Panels and Resins: Technology and Influence Parameters; Springer-Verlag: Berlin-Heidelberg, Germany, p. 954, In German; ISBN 978-3-642-55938-9.
- [74] Kollmann, F. Holzspanwerkstoffe—Wood Chip Materials; Springer-Verlag: Berlin, Germany; Heidelberg, Germany; New York, NY, USA, 1966; p. 822, In German; ISBN 978-3-642-50247-7.
- [75] Müssig, J.; Schmid, H.G. (2004). Quality control of fibres along the value added chain by using scanning technique—From fibres to the final product. Microscopy and Microanalysis 10, 1332–1333
- [76] NORMA ISO 11664-2:2007. Colorimetry -- Part 2: CIE standard illuminants
- [77] <http://quimipur.com/productos/productos-quimicos/sodio-silicato>.
- [78] <http://www.stonewarestudios.com/PDF/Secil/Secil%20NHL5%20Technical%20Sheet.pdf>.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.02.020>
- [79] Martín Ramos, J.D. (2004). X Powder, a software package for powder X-ray diffraction analysis, Legal Deposit, Spain, (GR1001/04).
- [80] Whitney, D.L., Evans, B.W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals, Am. Mineralogist 95 185–187, <http://dx.doi.org/10.2138/am.2010.3371.185> (0003-004X/10/0001–185\$05.00)
- [81] UNE-EN 12390-7:2020, Testing hardened concrete (2020) - Part 7: Density of hardened concrete
- [82] UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007 Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar].
- [83] <https://www.instron.us/en-us/products/testing-systems/universal-testing-systems/electromechanical/3300/3360-dual-column>
- [84] ASTM D2845-08 Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock (Withdrawn 2017)
- [85] Veniale, F. and Zezza, U. (1988). Nuove indagini sull arenaria della Basilicata di S. Michelle in Pavia. Atti Ticinensi de Scienze della Terra, 31,253-268.).

- [86] Zehnder, K. Verwitterung von Molassesandsteinen an Bauwerken und in Naturaufschlüssen. 130 S., 78 Textfig. 1982.
- [87] Russel SA. Stone preservation committee report (Appendix I). H.M. Stationary Office, London, 1927.
- [88] Mazhoud, B., Collet, F., Pretot, S., Lanos, C. (2017). Mechanical properties of hemp-clay and hemp stabilized clay composites, *Construction and Building Materials* 155 1126–1137
- [89] Fernando L. Dri, Louis G. Hector Jr., Robert J. Moon and Pablo D. Zavattieri (2013). Anisotropy of the elastic properties of crystalline cellulose I $\beta$  from first principles density functional theory with Van der Waals interactions. *Journal: Cellulose*. 6. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-0071-8>
- [90] Lawrence, M., Walker, P. and Heath, A. (2015). Development of a novel mortar for use with unfired clay bricks. *Construction Materials* 166(1):18-26. DOI: 10.1680/coma.11.00011
- [91] Roy Alvin J. R., Malenab, Janne Pauline S. Ngo and Michael Angelo B. Promentilla, M.A. (2017). Chemical Treatment of Waste Abaca for Natural. Fiber-Reinforced Geopolymer Composite *Materials* 10(6), 579; doi:10.3390/ma10060579
- [92] Brümmer, M., Sáez-Pérez, M.P., Durán-Suárez, J.A. (2018). Hemp-Clay Concretes for Environmental Building—Features that Attribute to Drying, Stabilization with Lime, Water Uptake and Mechanical Strength, In: Figueiro R., Rana S. (eds) *Advances in Natural Fibre Composites*. Springer, Cham, 249-265.
- [93] Balčiūnas, G., Vėjelis, S., Vaitkus, S., Kairyte, A. (2013). Physical Properties and Structure of Composite Made by Using Hemp Hurds and Different Binding Materials, *Procedia Engineering* 57 159 – 166.
- [94] Arizzi, A., Brümmer, M., Martín-Sánchez, I., Cultrone, G., and Viles, H. (2015). The Influence of the Type of Lime on the Hygric Behaviour and Bio-Receptivity of Hemp Lime Composites Used for Rendering Applications in Sustainable New Construction and Repair Works. <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0125520>
- [95] Walker, R., Pavia, S., Mitchell, R. (2014). Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes. 61, 30, 340-348. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065>.