



Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química



Desarrollo de concreto eco amigable de alto desempeño mecánico incorporando fibras de cáñamo como agente de refuerzo

POR

Pablo Ignacio Cuello Moreno

Memoria de título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Químico

Profesores Guías:

Luis Felipe Montoya

Siva Avudaiappan

Profesora Comisión:

Katherina Fernández

Marzo 2023

Concepción (Chile)

© Pablo Ignacio Cuello Moreno

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

La industria de la construcción se enfrenta a problemas que afectan al medio ambiente, como lo es la producción del cemento convencional que contribuye con grandes cantidades de emisiones de CO₂, para la elaboración del concreto. Por otra parte, el concreto de cáñamo a base de cal es un material de construcción sostenible y respetuoso con el medio ambiente que ha llamado la atención en los últimos años debido a sus propiedades únicas. Este estudio tuvo como objetivo investigar el rendimiento mecánico y térmico de este concreto y el efecto del contenido de cáñamo en sus propiedades. Se prepararon muestras con distintas concentraciones de cáñamo en base al peso de aglutinante, concretamente 2%, 4% y 6% además de una concentración patrón la cual no incorpora la fibra natural. Previamente se realizó una caracterización a la fibra de cáñamo para determinar el tamaño de partículas, los resultados indicaron una amplia distribución en un rango de 0,006 a 2 milímetros.

Los ensayos mecánicos mostraron resultados que promedian desde 1,19 a 2,31 MPa para resistencia a la compresión para las distintas dosificaciones de cáñamo mostrando una disminución en los valores mediante el aumento de fibra. Por el contrario, en los ensayos de resistencia a la flexión, donde se mostraron resultados que promedian desde 1,91 a 3,16 MPa, para las distintas dosificaciones de cáñamo, los valores aumentaron con la incorporación de la fibra.

El concreto de cáñamo se presenta como material aislante, los cuales se caracterizan con valores bajos de conductividad térmica. Los resultados de los ensayos de conductividad térmica de este trabajo mostraron valores prometedores que promedian desde 0,17 a 0,22 W/m*K para las distintas dosificaciones de cáñamo.

La incorporación de fibra de cáñamo demostró ser un refuerzo mecánico frente al desprendimiento explosivo del concreto al ser expuesto a 800°C, además redujo la pérdida de valor en la resistencia mecánica a la compresión cuando las muestras fueron expuestas a 400°C.

Finalmente, el concreto de cáñamo carece de la resistencia requerida para la construcción de cimientos, sin embargo los resultados sugieren que el concreto de cáñamo tiene el potencial de ser una alternativa viable al concreto convencional en otras aplicaciones específicas sin capacidad portante donde la sostenibilidad ambiental es una prioridad.

Abstract

The construction industry is facing problems that affect the environment, such as the production of conventional cement that contributes large amounts of CO₂ emissions for concrete production. On the other hand, hempcrete made from lime is a sustainable and environmentally friendly building material that has gained attention in recent years due to its unique properties. This study aimed to investigate the mechanical and thermal performance of this concrete and the effect of hemp content on its properties. Samples were prepared with different concentrations of hemp based on binder weight, specifically 2%, 4%, and 6%, in addition to a standard concentration that does not incorporate the natural fiber. Prior to this, a characterization of the hemp fiber was performed to determine the particle size, and the results indicated a wide distribution ranging from 0.006 to 2 millimeters.

The mechanical tests showed results that averaged from 1.19 to 2.31 MPa for compressive strength for the different hemp dosages, showing a decrease in values as the fiber increased. On the other hand, in the flexural strength tests, where results averaged from 1.91 to 3.16 MPa for the different hemp dosages, the values increased with the incorporation of the fiber.

Hempcrete is an insulating material, characterized by low thermal conductivity values. The thermal conductivity tests in this study showed promising values ranging from 0.17 to 0.22 W/m*K for the different hemp dosages.

The incorporation of hemp fiber proved to be a mechanical reinforcement against explosive spalling of concrete when exposed to 800°C, and it also reduced the loss of value in compressive strength when the samples were exposed to 400°C.

Finally, hempcrete lacks the required strength for the construction of foundations, however, the results suggest that hempcrete has the potential to be a viable alternative to conventional concrete in other specific applications without load-bearing capacity where environmental sustainability is a priority.

Contenido

1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. Marco teórico.....	4
3.1. Composición del concreto de cáñamo	4
3.1.1. Cal hidráulica	4
3.1.2. Cáñamo	5
3.1.3. Agua de amasado.....	5
3.2. Fraguado del concreto de cáñamo	6
3.3. Propiedades generales del concreto de cáñamo	7
4. Metodología	9
4.1. Materiales	9
4.2. Molienda de cáñamo	10
4.3. Granulometría del cáñamo	11
4.3.1. Tamizado mecánico.....	11
4.3.2. Difracción láser.....	12
4.4. Metodología experimental	13
4.4.1. Dosificación adecuada	13
4.4.2. Diseño experimental	14
4.4.3. Producción de mezclas	15
4.5. Ensayos mecánicos	16
4.6. Ensayos de conductividad térmica	18
4.7. Ensayos mecánicos tras exposición a altas temperaturas.....	19
4.8. Microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de dispersión de energía (EDS).....	20
5. Resultados y discusiones	21
5.1. Caracterización cáñamo.....	21
5.1.1. Tamizado mecánico.....	22
5.1.2. Difracción laser.....	23
5.2. Ensayos mecánicos	24

5.2.1. Resistencia a la flexión.....	25
5.2.2. Compresión porciones de prismas	28
5.2.3. Resistencia a la compresión	30
5.3. Ensayos de conductividad térmica	33
5.4. Ensayos de mecánicos tras exposición a altas temperaturas.....	35
5.4.1. Primera prueba a 800°C.....	35
5.4.2. Segunda prueba a 400°C.....	36
5.5. Caracterización microestructural SEM.....	39
5.6. Consideraciones para futuras investigaciones.....	43
6. Conclusión	45
Referencias	46
Anexos.....	50
Anexo A. Resultados mecánicos	50
Anexo B. Resultados de muestras.....	54
Anexo C. Resultados conductividad térmica	56
Anexo D. Caracterización química EDS.....	57

Índice de figuras

Figura 1: Fibra de cáñamo.....	9
Figura 2: Molino de cuchillos.....	10
Figura 3: Fibra de cáñamo antes del proceso de molienda.....	11
Figura 4: Fibra de cáñamo después proceso de molienda	11
Figura 5: Tamizado mecánico	12
Figura 6: Analizador de difracción laser Microtrac S3500.....	12
Figura 7: Ensayos de dosificación	13
Figura 8: Ensayos de óptimos tiempos de desmoldados.....	13
Figura 9: Instrumentación para la fabricación de muestras.....	15
Figura 10: Izquierda: muestras de ensayos de concreto de cáñamo. Derecha: probetas sobre una piscina de curado.	16
Figura 11: Maquina doble rango para ensayos de concretos, modelo PC-42-D. ..	17
Figura 12: Ensayo de propiedades de transmisión térmica.....	19
Figura 13: Procedimiento de exposición a 400°C	20
Figura 14: Muestras de concreto de cáñamo sometidas a altas temperaturas dentro de una mufla	20
Figura 15: Partículas de cáñamo, zoom 10x Lupa Nikon.....	21
Figura 16: Distribución de tamaño de partícula de cáñamo obtenida por tamizado mecánico.....	22
Figura 17: Distribución tamaño de partícula de cáñamo obtenido por analizador láser Microtrac S3500.....	24
Figura 18: Densidades aparentes de las muestras prismáticas y cilíndricas.	25
Figura 19: Ensayo de resistencia a la flexión con probeta prismática de dosificación 6% de cáñamo.	26
Figura 20: Resultados promedio de resistencia a la flexión.	26
Figura 21: Evolución de la resistencia a la flexión en el tiempo.....	27
Figura 22: Ensayo de resistencia a la compresión con probeta de prisma roto en flexión de dosificación 6% de cáñamo.	28
Figura 23: Resultados promedio de resistencia a la compresión de prismas rotos	29
Figura 24: Evolución de la resistencia a la compresión en el tiempo de los restos de probetas prismáticas.....	30
Figura 25: Ensayo de resistencia a la compresión con probeta cilíndrica de dosificación 6% de cáñamo.	31
Figura 26: Resultados promedio de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas.	31
Figura 27: Evolución de la resistencia a la compresión en el tiempo.	32
Figura 28: Relación entre la conductividad térmica y el contenido de cáñamo para muestras de concreto a 7 y 28 días.....	34
Figura 29: Muestras de concreto de cáñamo antes y después de exposición a altas temperaturas	35
Figura 30: Restos de muestras patrón.....	36

Figura 31: Rotura de muestras de ensayos por choque térmico	36
Figura 32: Muestras de concreto de cáñamo antes y después de exposición a 400°C.....	36
Figura 33: Ensayo de resistencia a la flexión con probeta prismática de dosificación 6% de cáñamo tras exposición a 400°C	37
Figura 34: Resultados promedio de resistencia a la flexión con y sin sometimiento a 400°C.....	37
Figura 35: Ensayo de resistencia a la compresión con probeta de prisma roto en flexión de dosificación 6% de cáñamo tras exposición a 400°C.	38
Figura 36: Resultados promedio de resistencia a la compresión con y sin sometimiento a 400°C.	39
Figura 37: Imagen SEM de fibra de cáñamo	40
Figura 38: Imagen SEM de concreto de cal de cáñamo en cáñamo 2%	41
Figura 39: Imagen SEM de concreto de cal de cáñamo en cáñamo 4%	41
Figura 40: Imagen SEM de concreto de cal de cáñamo en cáñamo 6%	41
Figura 41: Mapeo elemental EDS de la adhesión de la cal a la fibra de cáñamo (muestra de concreto con 6% cáñamo).....	43
Figura 42: Prueba de flexión de muestra de concreto con 2% de cáñamo.....	54
Figura 43: Prueba de flexión de muestra de concreto con 4% de cáñamo.....	54
Figura 44: Prueba de compresión de muestra de concreto con 2%, 4% y 6% de cáñamo	54
Figura 45: Prueba de compresión de prisma roto de muestra de concreto con 2% de cáñamo	54
Figura 46: Prueba de compresión de prisma roto de muestra de concreto con 4% de cáñamo	55
Figura 47: Prueba de compresión de prisma roto de muestra de concreto con 6% de cáñamo	55
Figura 48: Pruebas de flexión y compresión tras exposición a 400°C de muestra patrón	55
Figura 49: Pruebas de flexión y compresión tras exposición a 400°C de muestra de concreto con 2% de cáñamo.....	55
Figura 50: Pruebas de flexión y compresión tras exposición a 400°C de muestra de concreto con 4% de cáñamo.....	56
Figura 51: Mapeo elemental EDS de la adhesión de la cal a la fibra de cáñamo (muestra de concreto con 2% cáñamo).....	59
Figura 52: Mapeo elemental EDS de la adhesión de la cal a la fibra de cáñamo (muestra de concreto con 4% cáñamo).....	61

Índice de tablas

Tabla 1: Densidades y resistencias mecánicas de compresión encontradas en la literatura publicada por varios autores. Jami et al. (2016).....	8
Tabla 2: Densidades y resistencias mecánicas de flexión encontradas en la literatura publicada por algunos autores.	9
Tabla 3: Composición química y propiedades físicas del aglutinante SOPROCAL 6 (Soprocál, s. f.)	10
Tabla 4: Dosificaciones de ensayos.....	14
Tabla 5: Composición en peso de las materias primas utilizadas en la elaboración de los concretos de cáñamo	15
Tabla 6: Granulometría cáñamo.....	22
Tabla 7: Granulometría cáñamo fino.....	23
Tabla 8: Resultado de resistencia a la flexión 7 días.....	50
Tabla 9: Resultado de resistencia a la flexión 28 días.....	50
Tabla 10: Resultado de resistencia a la compresión 7 días	51
Tabla 11: Resultado de resistencia a la compresión 28 días	51
Tabla 12: Resultado de resistencia a la compresión prismas rotos 7 días	52
Tabla 13: Resultado de resistencia a la compresión prismas rotos 28 días	52
Tabla 14: Resultado de resistencia a la flexión 400°C.....	53
Tabla 15: Resultado de resistencia a la compresión de prismas rotos 400°C	53
Tabla 16: Resultados conductividad térmica	56
Tabla 17: Concentración elemental en especímenes de concreto de cáñamo	57

1. Introducción

Actualmente la industria de la construcción debe hacer frente a una serie de problemas que afectan al medio ambiente. El concreto, o también llamado hormigón, es el material más utilizado en la industria de la construcción, con 10 mil millones de toneladas fabricadas cada año y utilizadas en una variedad de aplicaciones (Barbhuiya & Bhusan Das, 2022). La producción de cemento contribuye alrededor del 5-7% a las emisiones mundiales de CO₂ y del 2% al consumo total de energía (Benhelal et al., 2013; Worrell et al., 2001), por lo que es necesario desarrollar sustitutos del cemento de bajo impacto ambiental. De acuerdo con una evaluación del ciclo de vida de un muro de concreto de cáñamo, el aglutinante como el cemento se considera el principal contribuyente al impacto ambiental (Pretot et al., 2014).

Una de las opciones para solucionar esta problemática son los aglutinantes a base de cal debido a su abundancia y bajas emisiones de su fabricación. Al mismo tiempo, investigaciones recientes indicaron que los agregados vegetales tienen interesantes beneficios ambientales y económicos (Sáez-Pérez et al., 2020; Sanjay et al., 2018), y podrían usarse para reemplazar agregados convencionales. Las fibras de cáñamo son biodegradables y sostenibles, lo que las hace una alternativa más amigable con el medio ambiente en comparación con otros materiales de refuerzo tradicionales.

Además del beneficio ambiental, los aglutinantes de cal son más compatibles con las fibras de cáñamo que con el cemento, ya que absorben grandes cantidades de agua e interfieren con la actividad hidráulica, evitando el fraguado de las partes internas del compuesto de cáñamo-cemento (Walker, 2013). Por lo tanto, la investigación del concreto de cáñamo y las aplicaciones comerciales en todo el mundo dependen de la cal hidráulica natural.

El concreto de cáñamo también más conocido como Hempcrete o Lime-Hemp Concrete del anglosajón, es un concepto innovador que está ganando terreno. El concreto de cáñamo es un nuevo material de construcción sostenible hecho comúnmente de astillas de cáñamo como bioagregados y cal como aglutinante (Bevan & Woolley, 2008) . Es un material compuesto que ha despertado interés en la industria de la construcción debido a su potencial como una alternativa ecológica y sostenible al concreto tradicional. En la actualidad, la construcción de concreto de cáñamo sólo es practicada por un pequeño grupo de personas principalmente en el Reino Unido y Europa.

Debido a su naturaleza y componentes únicos, el concreto de cáñamo se comporta de manera diferente a los materiales de construcción convencionales como bloques de cemento, ladrillos rojos, concretos celulares, entre otros. Algunas de las características distintivas del concreto de cáñamo son que es negativo en

carbono, liviano, tiene una baja densidad, excelente capacidad de amortiguación de humedad, baja conductividad térmica y aislamiento acústico.

El presente trabajo realiza un análisis de este nuevo concreto compuesto con materiales locales. Se investigan las propiedades mecánicas y térmicas del concreto a diferentes concentraciones de cáñamo. Se discutirán los hallazgos del concreto de cáñamo, y se evaluará su efecto en las propiedades de resistencia, conductividad térmica y durabilidad tras exposición a alta temperatura en comparación con la muestra patrón. Además se realiza análisis de microscopia electrónica de barrido para entender las interacciones entre el aglutinante y el agregado orgánico de origen natural. Finalmente el estudio busca también incorporar el concreto de cáñamo en construcciones en Chile ya que puede ser una alternativa innovadora y sostenible que no solo brinda beneficios medioambientales, sino que también puede mejorar la calidad de vida de las personas al reducir las fluctuaciones de temperatura en el interior de las edificaciones.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Desarrollar y caracterizar un concreto eco amigable de alto desempeño mecánico, incorporando fibras de cáñamo a diferentes concentraciones como agentes de refuerzo.

2.2. Objetivos específicos

- Mezclar y optimizar la dosificación de fibras de cáñamo y que maximicen distintas propiedades del concreto.
- Determinar las propiedades térmicas de las probetas de concreto.
- Analizar experimentalmente el comportamiento de las propiedades mecánicas de la probetas tras exposición a altas temperaturas.
- Investigar las características microestructurales de las muestras

3. Marco teórico

A continuación se presenta el marco teórico como la revisión de la literatura y la identificación de los conceptos relevantes con el objetivo de proporcionar contexto teórico y conceptual para entender la investigación que se aborda.

3.1. Composición del concreto de cáñamo

El concreto de cáñamo es un material de construcción sostenible y resistente, hecho de fibras de cáñamo, agua y cal.

3.1.1. Cal hidráulica

La cal hidráulica es un material utilizado como aglutinante en la fabricación de concreto. Al combinarse normalmente con agua y arena, forma un material duro y resistente que es ampliamente utilizado en la construcción. La cal hidráulica se adquiere a partir de la cal natural la cual se obtiene directamente de rocas calizas sin aditivos, no es el caso del cemento, que tiene una composición más compleja. La producción de cal hidráulica involucra los siguientes pasos básicos:

- Extracción de caliza: Se extrae caliza de una cantera o mina.
- Trituración: La caliza extraída se tritura en partículas más pequeñas.
- Hornear: Se calienta la caliza triturada a una temperatura alta (aproximadamente 900°C) en un horno para producir cal viva.
- Reacción química: La cal viva reacciona con el agua para producir cal hidráulica (proceso de hidratación o apagado de la cal viva).
- Enfriamiento: La cal hidráulica recién producida se enfría y se almacena para su uso posterior.
- Molienda: La cal hidráulica se muele a un tamaño de partícula deseado para su uso en aplicaciones específicas.

En el proceso de elaboración del cemento, se requiere una temperatura de 1450°C, lo que es alrededor de 550°C más alto que la temperatura necesaria para elaborar la cal y, por ello, esta última tiene una energía incorporada más baja. Además, durante el proceso de carbonatación que ocurre durante la dureza de la cal, la mayoría del CO₂ emitido como resultado en la producción de cal se incorpora de nuevo en el sistema. Por lo tanto, su carbono incorporado es significativamente menor que el del cemento (Barbhuiya & Bhusan Das, 2022).

Actualmente la población mundial y el nivel de vida se están expandiendo constantemente. El consumo mundial de energía, las emisiones de carbono y la generación de basura han aumentado. Como resultado, es realmente vital encontrar formas de reducir las altas demandas de energía y carbono del sector de la

construcción para que pueda ser más sostenible y tener un menor impacto ambiental.

3.1.2. Cábano

El cáño es una planta de la familia de las Cannabaceae, y es una de las variedades de la planta de cannabis. A diferencia de otras variedades de cannabis, el cáño tiene niveles muy bajos de tetrahidrocannabinol (THC), la sustancia psicoactiva que produce efectos eufóricos en los usuarios, por lo que no tiene efectos psicoactivos (Jami et al., 2019).

El cáño se ha utilizado históricamente para producir una variedad de productos, como fibras para la producción de papel, textiles y cuerdas, y también como fuente de aceites y proteínas para la alimentación humana y animal.

En la actualidad, el cáño se está convirtiendo en un cultivo cada vez más popular debido a su versatilidad, su rápido crecimiento y su resistencia a las plagas y enfermedades. Aunque en algunos lugares todavía existe cierta controversia sobre el cultivo y uso del cáño debido a su relación con la marihuana y su asociación con la sustancia psicoactiva THC, en muchos otros países se está reconociendo su potencial y se están creando nuevas oportunidades para el desarrollo de una industria sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Además, se está explorando su uso potencial en la industria de la construcción, ya que se ha demostrado que el cáño puede ser utilizado como aislante y como material para la producción de ladrillos y paneles de construcción. Así como también, un agregado a mezclas de concreto para la construcción debido no solo a mejoras en ciertas propiedades sino que también a beneficios ambientales. El cáño es una planta de crecimiento rápido que absorbe grandes cantidades de dióxido de carbono de la atmósfera y en adición al proceso de carbonatación de la cal, el concreto de cáño puede poseer un carbono incorporado en realidad negativo, esto quiere decir que puede consumir más dióxido de carbono de lo que produce su elaboración (Barbhuiya & Bhusan Das, 2022).

3.1.3. Agua de amasado

El agua de amasado es un componente crítico en la elaboración de mezclas de concreto, ya que tiene un gran impacto en las propiedades y la resistencia del concreto final. El agua de amasado es el agua que se agrega a la mezcla de concreto para producir una consistencia adecuada que permita el trabajo y el moldeo de la mezcla.

La cantidad de agua de amasado necesaria dependerá de diversos factores, como la relación agua-aglutinante deseada que es la relación entre la cantidad de agua y la cantidad de aglutinante en la mezcla, la granulometría de los agregados y

las condiciones ambientales. Una cantidad de agua de amasado en exceso puede reducir la resistencia y la durabilidad del concreto, mientras que una cantidad insuficiente puede hacer que la mezcla sea difícil de trabajar y de moldear. Además, la cantidad de agua de amasado también afecta la plasticidad, la trabajabilidad y la resistencia al desgaste y al impacto del concreto final.

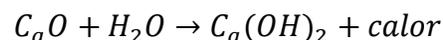
En general, se recomienda utilizar la menor cantidad posible de agua de amasado que produzca una mezcla de concreto trabajable, consistente y manejable. Ya que un exceso o falta de agua afecta no solo a las propiedades anteriores sino que también a la calidad y resistencia del concreto. Para lograr una buena mezcla con poca agua, se utilizan aditivos reductores de agua, como plastificantes y superplastificantes, que pueden reducir la cantidad de agua de amasado necesaria mientras se mantiene la trabajabilidad de la mezcla (MOP, 2015).

La norma NCh 1498 establece la clasificación y requisitos de las aguas que se pueden utilizar en la confección de concreto y concreto. A su vez, dicta que el agua potable que proviene directamente de la red pública y que no se ha contaminado antes de su uso, no requiere de una verificación previa de los requisitos para ser usada en las mezclas para la elaboración de concreto y concreto (INN, 2012).

3.2. Fraguado del concreto de cáñamo

El fraguado del concreto de cáñamo a base de cal es un proceso diferente al del concreto de cáñamo con cemento Portland. En primer lugar, el fraguado de la cal hidráulica comprende dos reacciones (Arehart et al., 2020). Durante la primera reacción se da la hidratación de los silicatos y los aluminatos de calcio con el agua de amasado. En la segunda reacción, carbonata el hidróxido cálcico transformándose en carbonato cálcico que se produce por la absorción de dióxido de carbono del aire, esto causa que el concreto se endurezca y se vuelva resistente.

La reacción de hidratación de la cal hidráulica con agua se produce en dos etapas. En la primera etapa, la cal hidráulica reacciona con el agua para formar hidróxido de calcio, también conocido como cal viva o cal apagada. Esta reacción química es altamente exotérmica, lo que significa que libera una gran cantidad de calor. La ecuación química para la primera etapa de la reacción de hidratación de la cal hidráulica con agua es:



En la segunda etapa, el hidróxido de calcio reacciona con el dióxido de carbono del aire para formar carbonato de calcio. Esta reacción química se conoce como carbonatación, y es la responsable de la dureza y durabilidad de los

materiales de construcción producidos con cal hidráulica. La ecuación química para la segunda etapa de la reacción de hidratación de la cal hidráulica con agua es:



El tiempo de fraguado del concreto de cáñamo a base de cal tiende a ser más lento que el del concreto de cáñamo con cemento Portland. Puede tomar varios días o incluso semanas para que el concreto alcance su resistencia máxima. Sin embargo, el concreto de cáñamo a base de cal tiene la ventaja de ser más ecológico que el concreto de cemento Portland y ser una alternativa más sostenible para la construcción.

3.3. Propiedades generales del concreto de cáñamo

El concreto de cáñamo, así como el concreto tradicional de arena y grava, es un material con propiedades las cuales están condicionadas por sus diferentes componentes y sus dosificaciones, el proceso de mezclado, compactación, curado, las condiciones ambientales y la edad.

Propiedades generales

- **Trabajabilidad:** el concreto es un material moldeable y puede ser moldeado en diferentes formas y tamaños. La trabajabilidad del concreto depende de una dosificación adecuada de los componentes. Ya que el objetivo de los métodos de dosificación en concretos es determinar las cantidades adecuadas de cada componente para crear mezclas con características deseadas como consistencia, compacidad, resistencia y durabilidad. La trabajabilidad depende también del tamaño de los agregados.
- **Resistencia:** el concreto es un material fuerte y resistente a la compresión. La resistencia del concreto depende de la cantidad y calidad de los materiales utilizados, así como de la relación agua-cal.
- **Durabilidad:** el concreto de cáñamo es resistente al fuego, al moho y a los insectos, lo que lo hace ideal para aplicaciones de construcción en áreas propensas a incendios o plagas (Benmahiddine et al., 2020).
- **Ligereza:** el concreto convencional es un material pesado, lo que puede afectar su uso en ciertas aplicaciones. Sin embargo, el concreto de cáñamo tiene una menor densidad que el concreto convencional debido a la cantidad y calidad de los materiales utilizados en su composición, tamaño y porosidad de las partículas y energía de compactación por lo que se considera un material ligero, lo que lo hace fácil de transportar y de manejar en la construcción. (Niyigena et al., 2016)
- **Aislamiento térmico:** el concreto convencional tiene una baja capacidad de aislamiento térmico, lo que puede resultar en pérdidas de calor y frío. Sin embargo, el concreto puede ser combinado con otros materiales aislantes para mejorar su capacidad de aislamiento. Sin embargo, el concreto de

cáñamo tiene una alta capacidad de aislamiento térmico y acústico, lo que lo hace ideal para la construcción de edificios eficientes en energía (Jami et al., 2019).

- Sostenibilidad: el cáñamo es una planta de rápido crecimiento que requiere muy poca agua y fertilizantes para su cultivo. Además, el concreto de cáñamo es biodegradable y puede ser reciclado.
- Versatilidad: el concreto de cáñamo puede ser utilizado para una variedad de aplicaciones de construcción, incluyendo paredes, techos, pisos y revestimientos.

A continuación, las tabla 1 y 2 muestran algunas propiedades del concreto de cáñamo realizado por varios investigadores.

Tabla 1: Densidades y resistencias mecánicas de compresión encontradas en la literatura publicada por varios autores. Jami et al. (2016).

Autores	Composición de la mezcla*	Densidad (kg/m³)	Resistencia a la compresión (MPa)
(Nguyen et al., 2009)	-	850	-
(Arnaud & Gourlay, 2012)	Cal hidráulica natural	460	0,18
(Kioy, 2005)	-	610	1,88
(Sutton et al., 2011)	Aglutinante comercial preformulado a base de cal	270 – 330	0,10 – 0,20
(Sassoni et al., 2014)	Aglutinante patentado basado en MgO y	300	1,15
	una proteína vegetal reactiva	600	3,04
(Sinka et al., 2014)	60% Cal Dolomítica + 40% Metacaolina	540	0,266
(Sassu et al., 2016)	Cemento Portland	638	0,622
Trabajo presente	Cal hidráulica natural (Patrón)	1357	3,08
	Cal hidráulica natural (2% cáñamo)	1381	2,31
	Cal hidráulica natural (4% cáñamo)	1371	2,41
	Cal hidráulica natural (6% cáñamo)	1346	1,87

*Todas las composiciones de mezcla incorporan cáñamo.

Tabla 2: Densidades y resistencias mecánicas de flexión encontradas en la literatura publicada por algunos autores.

Autores	Composición del aglutinante*	Densidad (kg/m³)	Resistencia a la flexión (MPa)
(Abbott, 2014)	Cal hidráulica natural 5	-	0,30 – 0,40
(Zerrouki et al., 2022)	HCS**	530	1,78 – 0,22
	HCMS***	520	1,64 – 0,56
(Sassoni et al., 2014)	Aglutinante patentado basado en MgO y una proteína vegetal reactiva	300	0.90
		600	6,83
		1025	10,08
		1210	16,41
		1280	17,47
Trabajo presente	Cal hidráulica natural (Patrón)	1357	2,65
	Cal hidráulica natural (2% cáñamo)	1381	3,02
	Cal hidráulica natural (4% cáñamo)	1371	3,16
	Cal hidráulica natural (6% cáñamo)	1346	2,94

*Todas las composiciones de mezcla incorporan cáñamo.

**Aglutinante comercial preformulado a base de cal

***Aglutinante comercial preformulado a base de cal + (20% remplazo) metacaolin

Como se observa, existe una gran variedad de densidades. La composición de masa de los compuestos que también es variada, determina la masa del producto. Adicionalmente, la densidad también es afectada por la compactación.

4. Metodología

4.1. Materiales

El cáñamo utilizado en esta investigación fue suministrado por la empresa “Diamond Hemp”, que se encuentra en la región del Maule. La forma de las muestras se muestra en la figura 1. Tal como se observa, la fibra de cáñamo está dada en forma de filamento.



Figura 1: Fibra de cáñamo

El aglutinante utilizado en este estudio es un producto comercial llamado “SOPROCAL 6”. Es una cal hidráulica natural que cumple con los requisitos de las normas NCh 1928 y NCh 2256/1 (INN, 2001, 2009) producida por la empresa SOPROCAL.

Se emplea en la fabricación de concretos que son utilizados en construcciones de tipo comercial, habitacional, industrial y edificaciones en general. La composición química y propiedades físicas se informan en la tabla 3.

Tabla 3: Composición química y propiedades físicas del aglutinante SOPROCAL 6 (Soprocal, s. f.)

Composición química/Propiedades físicas	Valor
CaO Total	30 – 39 %
SiO ₂	22 – 45 %
MgO	0,4 – 1,6 %
Fe ₂ O ₃	0,5 – 2,0 %
Al ₂ O ₃	0,2 – 0,5 %
S	0,2 – 1,0 %
R. Insoluble	0,8 - 15 %
Peso Molecular	74 g/mol
Densidad	0,65 – 0,75 g/cm ³

4.2. Molienda de cáñamo

La fibra de cáñamo pasó por un proceso de molienda para reducir su tamaño de partícula, para ello se hizo uso de un molino de cuchillos como se muestra en la Figura 2. El equipo cuenta con 10 cuchillas de las cuales 4 se encuentran en el centro el cual es impulsado por un motor eléctrico de 1hp.



Figura 2: Molino de cuchillos

El equipo cuenta con un tamiz inferior por donde pasa la fibra cortada permitiendo una selección de tamaño máximo de 3 milímetros. Las figuras 3 y 4 muestran la fibra antes de ser cortada como también la fibra obtenido luego de pasar por la máquina.



Figura 3: Fibra de cáñamo antes del proceso de molienda



Figura 4: Fibra de cáñamo después proceso de molienda

Dado que la rejilla solo limita el tamaño máximo de la fibra, se realizaron análisis de caracterización para conocer la distribución de tamaño de partículas que se utilizaron.

4.3. Granulometría del cáñamo

4.3.1. Tamizado mecánico

Se realizó un ensayo de tamizado usando el equipo de la figura 5, como método de separación de partículas para conocer la distribución de tamaño de acuerdo con la norma chilena NCh 165 (INN, 2009b). Se consideraron tamices en el rango de 350 – 2000 μm con tamices N°10, N°18, N°20, N°30 y N°45.



Figura 5: Tamizado mecánico

Una vez realizado el ensayo, se tabularon los resultados de peso retenido por bandeja de tamiz y porcentajes de retención. Se realizó luego una representación gráfica de los resultados de porcentaje de partícula acumulado que pasa en base al tamaño de partícula a través de una curva granulométrica.

4.3.2. Difracción láser

A la fracción más fina luego del tamizado, se procede con la caracterización por medio de un analizador de difracción láser modelo Microtrac S3500 (figura 6).



Figura 6: Analizador de difracción laser Microtrac S3500

El dispositivo permite realizar un análisis de tamaño de partícula preciso en un rango de medición de 0,02 a 2.800 μm .

Con una configuración para partículas de forma irregular y con un índice de refracción de cáñamo de 1,47 (Anwar et al., 2006). La muestra fue sonificada durante 60 segundos en el mismo equipo previo a cada medición, para evitar aglomeraciones. Los resultados tabulados que entrega el dispositivo permitieron realizar una curva granulométrica, mostrando los resultados de porcentaje de partícula acumulado en base al tamaño de partícula.

4.4. Metodología experimental

4.4.1. Dosificación adecuada

La dosificación tiene por finalidad determinar la proporción adecuada en que deben mezclarse los diferentes componentes, de manera de conseguir las mejores condiciones y características buscadas para la mezcla.

Se realizan premezclas a fin de encontrar una buena relación agua/cal evitando que esta sea líquida como se muestra en la figura 7 (a) pero que luego del añadir el agregado de cáñamo sea aún moldeable debido a la absorción de agua del cáñamo (figura 7 b). De esta forma se encuentra la cantidad máxima de añadido de cáñamo que permite conservar una buena trabajabilidad de la mezcla.

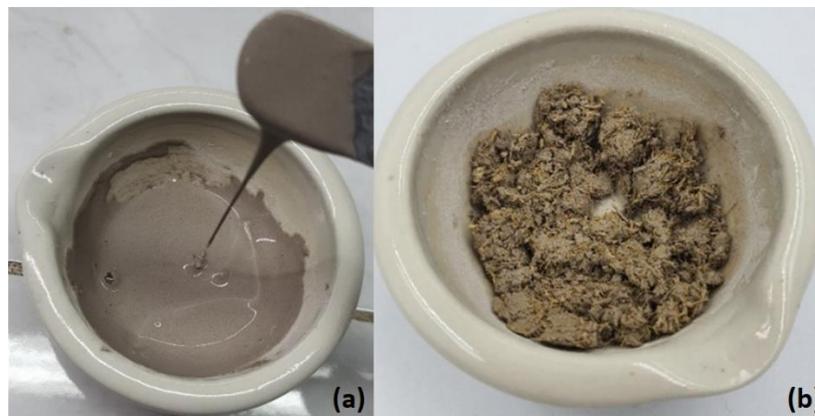


Figura 7: Ensayos de dosificación

Una vez encontradas dosificaciones adecuadas, se realizan distintas mezclas, como se muestra en la figura 8, para determinar cuál tiene un óptimo tiempo de desmoldado, con el objetivo de encontrar muestras con el rango de 1 o 2 días.

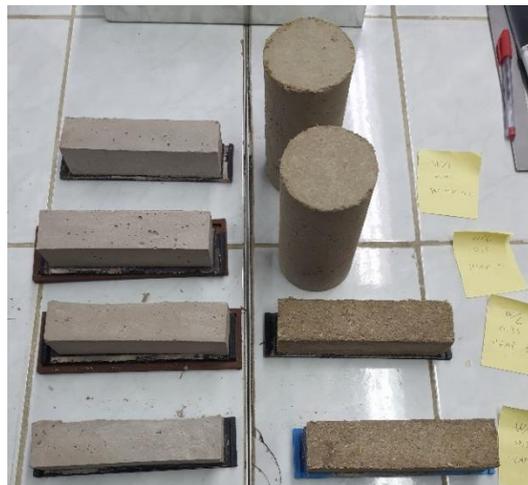


Figura 8: Ensayos de óptimos tiempos de desmoldados

Se realizan 4 mezclas con distintas relaciones agua/cal así como también con distintas cantidades de agregado de cáñamo con respecto al peso de cal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4: Dosificaciones de ensayos

	Relación agua/cal	Agregado de cáñamo con respecto al peso de cal
Mezcla 1	0,45	9%
Mezcla 2	0,4	9%
Mezcla 3	0,35	8%
Mezcla 4	0,3	7%

Las muestras fueron desmoldadas a las 48 horas siguiente. Cabe destacar que a mayor relación agua/cal mayor es la trabajabilidad de la mezcla luego de añadir el cáñamo. Se selecciona la dosificación de la mezcla 3 debido a que mostró mejor consistencia al momento de desmoldado. Sin embargo se realiza una última modificación en cuanto a la cantidad de cáñamo máximo a utilizar, en orden de mejorar aún más la trabajabilidad de la mezcla y un adecuado análisis para el diseño experimental. El porcentaje de cáñamo máximo para la mezcla se modifica de 8% a 6% con respecto al peso de cal de la muestra.

4.4.2. Diseño experimental

El estudio del concreto eco-amigable a base de cáñamo, tiene como base los siguientes ensayos experimentales:

- Resistencia a la flexión y compresión: se realiza un ensayo de tracción por flexión y de compresión con el fin de determinar el máximo rendimiento mecánico de las muestras de concreto.
- Aislamiento térmico: se realiza un ensayo de transmisión de calor a fin de determinar el valor de conductividad térmica del material.
- Resistencia mecánica tras exposición a alta temperatura: se realizan los mismos ensayos mecánicos de flexión y compresión luego de someter las muestras a altas temperaturas.

El factor experimental en este trabajo es el porcentaje de cáñamo con respecto al peso de cal en cada muestra, siendo estos 0% (muestra patrón), 2%, 4% y 6%.

La tabla 5 presenta las proporciones en peso de las materias primas utilizadas en la elaboración de los concretos de cáñamo. Las muestras están compuestas únicamente de cal, agua y fibra de cáñamo a cuatro diferentes cantidades: 0%, 2%, 4% y 6% por unidad de peso de cal. Se fijó además, una relación agua/cal en peso de 0,35.

Tabla 5: Composición en peso de las materias primas utilizadas en la elaboración de los concretos de cáñamo

Relación agua/cal	Porcentaje de cáñamo con respecto al peso de cal en la mezcla
0,35	0% (Patrón)
	2%
	4%
	6%

Para los ensayos de resistencia a la flexión, compresión y resistencias tras exposición a alta temperatura se realizaron 3 pruebas por cada dosificación de cáñamo. Para el ensayo de conductividad térmica se realizaron 3 pruebas por cada dosificación de cáñamo. Todos los ensayos se realizaron por duplicado (7 y 28 días). En total se elaboraron 88 muestras, de las cuales 24 son muestras cilíndricas y 64 son muestras prismáticas.

4.4.3. Producción de mezclas

Las materias primas se homogenizaron en un mezclador modelo 5K45SS de la marca “KITCHENAID”, el cual posee un movimiento de órbita. Los materiales se agregaron al recipiente de mezcla en el siguiente orden: cal, agua y fibras de cáñamo.



Figura 9: Instrumentación para la fabricación de muestras

Las metodologías de mezcla y fabricación de las muestras de concreto de cáñamo fueron las siguientes:

- Primero, la cal y el agua se mezclaron a baja velocidad hasta percibir un mezcla homogénea y similar a la obtenida en los ensayos de dosificaciones iniciales (generalmente 80 segundos).
- Una vez obtenida una mezcla adecuada, se agregó el cáñamo lenta y uniformemente, para evitar la mayor polución y pérdida de material posible por polvo dado los tamaño de partículas del cáñamo.

- Una vez agregado todos los componentes, se aumentó la velocidad de mezclado y se mantuvo durante 200 segundos.
- Después del proceso de mezcla, se realizó una medición de pH con un pHmetro de sobremesa HI 3222 de la marca “HANNA”, antes de verterlos en los moldes metálicos prismáticos (40 x 40 x 160 mm) o moldes de plásticos cilíndricos (75 x 150 mm) previamente preparados con desmoldante.
- Para mejorar la compactación del material, se hizo uso de una vara metálica para compactar la mezcla en el molde a través de golpes verticales además de someterla a una vibración para minimizar la presencia de burbujas de aire en la muestra.
- Después del proceso de disposición en los moldes, estos fueron masados con el fin de medir la masa húmeda de la muestra y posteriormente fueron colocados en el laboratorio en condiciones ambientales durante 48 horas para su endurecimiento antes del desmoldeo.
- Después del desmoldeo, las muestras se curaron en húmedo bajo una temperatura ambiente ($20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) y condiciones de humedad relativa del $74 \pm 2\%$ durante 7 y 28 días antes de las pruebas. Las condiciones ambientales fueron medidas un termómetro de infrarrojos láser dual con video modelo EXTECH VIR 50. La forma de los especímenes después del desmoldeo así como su curado se muestran en la figura 10.



Figura 10: Izquierda: muestras de ensayos de concreto de cáñamo. Derecha: probetas sobre una piscina de curado.

Adicionalmente, para las pruebas mecánicas los especímenes fueron introducidos a un horno a 100°C durante 24 horas con el fin de eliminar toda humedad restante en su interior.

4.5. Ensayos mecánicos

Para evaluar la influencia de la concentración de cáñamo en las propiedades mecánicas del concreto de cáñamo después de 7 y 28 días, se midió la resistencia a la flexión y a la compresión de las muestras prismáticas y cilíndricas respectivamente mediante ensayos mecánicos. Los ensayos mecánicos de compresión y flexión se realizaron según las normas ASTM C39 y ASTM C78

respectivamente además del Manual de Carreteras. En la figura 11 se muestra el instrumento utilizado para los ensayos, el cual corresponde a una maquina doble rango para ensayos de concretos, modelo PC-42-D de la marca "PINZUAR".

Tanto la resistencia a la flexión como a la compresión se determinó como el promedio de 3 muestras de ensayos de probetas prismáticas y cilíndricas respectivamente para cada mezcla de concreto de cáñamo y tiempo de curado.



Figura 11: Maquina doble rango para ensayos de concretos, modelo PC-42-D.

La resistencia a la tracción por flexión se calcula como la tensión de rotura por flexión a partir de la siguiente fórmula:

$$f_t = \frac{3 * P * L}{2 * b * h^2}$$

donde f_t es la tensión de rotura por flexión en MPa, P la carga máxima aplicada por la maquina en N, L la Luz de ensaye de la probeta la cual para todo el presente trabajo tendrá el valor de 103 mm, b el ancho promedio de la probeta en la sección de rotura en mm y h la altura promedio de la probeta en la sección de rotura en mm.

Para el cálculo de resistencia a la compresión en probeta cilíndrica, primero se calcula la sección de ensaye según la siguiente formula:

$$S = \frac{\pi}{4} * D^2$$

Donde S es la sección de ensaye en mm^2 y D el diámetro de la probeta en mm^2

Luego la resistencia a la compresión se calcula como la tensión de rotura por compresión a partir de la siguiente formula:

$$f = \frac{P}{S}$$

Donde f corresponde a la tensión de rotura por compresión en MPa, P a la carga máxima aplicada por la máquina de ensaye en N y S a la sección de ensaye en mm^2

Adicionalmente, haciendo uso de los restos de la prueba de flexión se realizaron nuevamente pruebas de compresión de acuerdo con la norma ASTM C349 utilizando porciones de prismas rotos en flexión. La resistencia a la compresión en este caso se determinó como el promedio de 4 muestras obtenidas después de la prueba de flexión para cada mezcla de concreto de cáñamo y tiempo de curado. Cabe destacar que los valores de resistencia a la compresión de este método son para fines de referencia, y no como sustitutos de los valores obtenidos por el primer método de ensayo de compresión.

Para el cálculo de resistencia a la compresión en probeta prismática rota, primero se calcula la sección de ensaye según la siguiente formula:

$$S = \frac{(a_1 + a_2)}{2} * \frac{(b_1 + b_2)}{2}$$

Donde a_1 , a_2 , b_1 y b_2 corresponden a la medida de las distintas caras del prisma roto en mm. Sin embargo, dado que el área de compresión del adaptador del instrumento es cuadrada con lados de 40 mm, el largo del prisma roto está limitado por ende se asumirá a_2 y b_1 igual a 40 mm. Por ello también se hablará de probetas cubicas. Luego la resistencia a la compresión se calcula como la tensión de rotura por compresión a partir de la misma fórmula que para las probetas cilíndricas.

4.6. Ensayos de conductividad térmica

Para evaluar la influencia de la concentración de cáñamo en la capacidad de transferencia de calor de los concretos de cáñamo después de 7 y 28 días, se midió la conductividad térmica de las muestras de ensayo prismáticas utilizando el método de placa caliente (figura 12), siguiendo la norma ASTM C518 . El equipo cuenta con un plato caliente, dos platos fríos refrigerados por agua y 6 sensores térmicos, ubicados 2 en cada plato frio y 2 en cada lado del plato caliente, que permiten el registro de temperaturas por medio de un software de computadora.

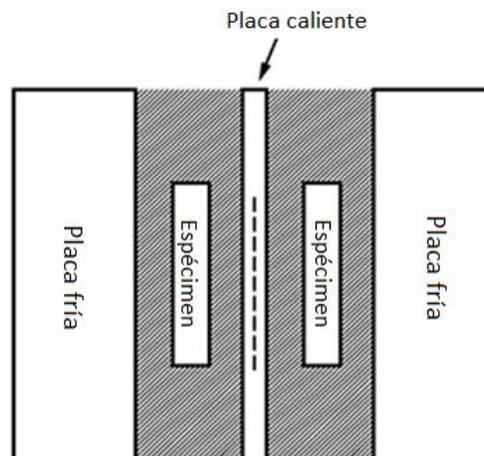


Figura 12: Ensayo de propiedades de transmisión térmica.

Para la realización del ensayo se insertan las muestras dentro del equipo, donde el contorno de las probetas fue aislado con poliestireno expandido con una densidad de 15 kg/m³ para que la transferencia de calor se realice únicamente a través de la probeta. La fuente de poder, de 60 ohm de resistencia, conectada a la placa media se calibra a 4,58 voltio y 0,076 ampere, de esta forma la placa se calienta entregando un flujo de calor de 0,174 vatios (W) a cada lado de la placa de área 0,01 m².

El software registra de forma continua la temperatura detectada por los sensores por un periodo de 4 horas. Los datos obtenidos son analizados, mediante el siguiente cálculo con el cual se determina el coeficiente de conductividad térmica.

$$\lambda = \frac{E}{A} * \frac{L}{\Delta T}$$

Donde λ es la conductividad térmica en W/(m*K), E es el flujo de calor entregado por la placa en W, A es el área de calefactor central (placa caliente) en m², L es la separación entre placa caliente y placa fría (espesor de la muestra) en m, ΔT es la diferencia de temperatura a través de la muestra en K.

La conductividad térmica se determinó como el promedio de resultados de 2 muestras de ensayo de probetas prismáticas para cada mezcla de concreto de cáñamo y tiempo de curado.

4.7. Ensayos mecánicos tras exposición a altas temperaturas

Para evaluar la influencia de la concentración de cáñamo en las propiedades mecánicas del concreto de cáñamo tras una exposición a altas temperaturas después de 7 y 28 días, se midió la resistencia a la flexión y a la compresión de muestras prismáticas y porciones de prismas rotos respectivamente mediante ensayos mecánicos luego de someterse a altas temperaturas en una mufla.

Para los especímenes de 7 días, estos fueron introducidos a una mufla precalentada con anterioridad a 800°C y permanecieron a esas condiciones durante 45 min hasta ser removidos y enfriados a temperatura ambiente. Sin embargo, este procedimiento se alteró para los especímenes de 28 días debido a la imposibilidad de realizar las pruebas mecánicas por motivos que se presentarán más adelante en la sección de resultados. Para los especímenes de 28 días, estos fueron introducidos a una mufla a temperatura ambiente y se sometieron a una escalada de temperatura hasta los 400°C durante un tiempo de 3 horas, a continuación permanecieron a esas condiciones por 90 minutos hasta finalmente someterse a un enfriamiento de 24 horas dentro de la mufla apagada donde se retiraron a 30°C.



Figura 13: Procedimiento de exposición a 400°C

A continuación, se sometieron a las pruebas mecánicas de compresión y flexión descritas anteriormente para prismas y porciones de prismas rotos en flexión. La resistencia a la flexión se determinó como el promedio de resultados de 3 muestras de ensayos de probetas prismáticas para cada mezcla de concreto de cáñamo y tiempo de curado. La resistencia a la compresión en este caso se determinó como el promedio de 4 muestras obtenidas después de la prueba de flexión para cada mezcla de concreto de cáñamo y tiempo de curado.



Figura 14: Muestras de concreto de cáñamo sometidas a altas temperaturas dentro de una mufla

4.8. Microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de dispersión de energía (EDS)

La microscopía electrónica de barrido con la espectroscopía de dispersión de energía permiten la investigación de las características microestructurales y químicas de las muestras experimentales. Para ello se utilizó un microscopio electrónico de barrido de alto rendimiento y bajo costo con una alta resolución de 3.0nm modelo JSM-6380 de la marca "JEOL".

Estos microanálisis permitieron evaluar la microestructuras, morfología y la composición química del resultado de la mezcla del concreto de cáñamo.

5. Resultados y discusiones

En este apartado de resultados y discusiones, se presentan y analizan los hallazgos obtenidos a partir del estudio del concreto de cáñamo y sus distintas concentraciones de fibra natural. Estos resultados se comparan con los resultados obtenidos con la muestra patrón que no posee la fibra, para discutir las implicaciones de los hallazgos para el futuro del uso del concreto de cáñamo en la construcción.

5.1. Caracterización cáñamo

El tamaño y la geometría de la fibra de cáñamo puede tener un papel importante en la determinación de las propiedades finales del concreto de cáñamo (Benmahiddine et al., 2020). Cabe destacar el tomar en cuenta la forma irregular de las partículas de cáñamo que presentan formas ovaladas y prismáticas además de planas y alargadas, como se observa en la figura 15, esta consideración es importante puesto que conduce a una dificultad para caracterizar su distribución de tamaño de partícula utilizando el método de tamizado mecánico, debido al mecanismo del tamizado mecánico que se rige por la abertura de los tamices, es decir el diámetro circular de los agujeros de la malla. Por lo cual el método es mayormente efectivo mientras más esférica sea la partícula. Como ejemplo dos partículas de forma irregulares de mismo diámetro pero distinto largo pueden pasar por el mismo tamiz y, a su vez dos partículas similares pueden ser encontradas en distintos tamices debido a un hecho aleatorio del como la partícula se encuentra con el tamiz para pasar a través de la malla.



Figura 15: Partículas de cáñamo, zoom 10x Lupa Nikon

5.1.1. Tamizado mecánico

La tabla 6 presenta los resultados de granulometría de las partículas de cáñamo obtenidas del ensayo de tamizado mecánico y en la figura 16 se muestra el análisis granulométrico del mismo material.

Tabla 6: Granulometría cáñamo

Tamiz		Peso retenido (g)	Porcentaje Retenido		Porcentaje que pasa
mm	ASTM No.		Total (%)	Acumulado (%)	
2	10	1,3	1,02	1,02	98,98
1	18	46,2	36,24	37,25	62,75
0,84	20	18,7	14,67	51,92	48,08
0,59	30	17,8	13,96	65,88	34,12
0,35	45	13,2	10,35	76,24	23,76
Fondo		30,3	23,76	100,00	0,00
Peso total (g)		127,5			
Error		0%			

La retención de cáñamo en el tamiz de mayor abertura indica que un 1,02% de la muestra es superior a 2 milímetros, así como también lo acumulado en el fondo indica que un 23,76% de la muestra es inferior a 0,35 milímetros. Se destaca entonces, una amplia distribución en el tamaño de las partículas puesto que los resultados indican una retención de material a lo largo de todos los tamices.

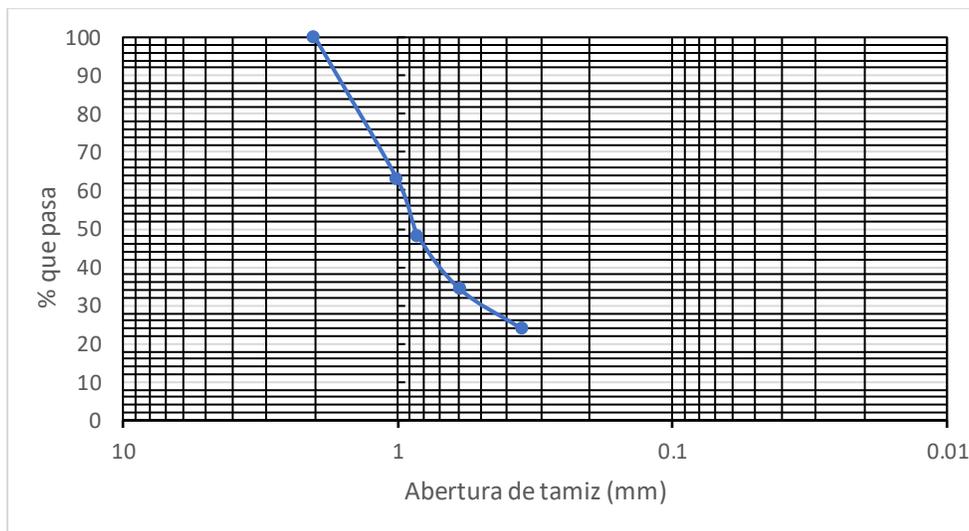


Figura 16: Distribución de tamaño de partícula de cáñamo obtenida por tamizado mecánico

Los valores de d_{50} y d_{80} son dos parámetros comunes utilizados en la curva granulométrica para describir la distribución de tamaño de partículas en un material.

El D50 se refiere al tamaño de partícula en el que la mitad del material se encuentra por debajo de ese tamaño y la mitad por encima. En otras palabras, es una medida de la mediana de la distribución de tamaño de partículas. El valor D50 para este análisis se obtiene gráficamente y es de 1,5 mm aproximadamente.

Por otro lado, el D80 se refiere al tamaño de partícula en el que el 80% del material se encuentra por debajo de ese tamaño y el 20% por encima. El D80 es una medida útil para describir la amplitud de la distribución de tamaño de partículas. El valor D80 para este análisis se obtiene gráficamente y es de 0,8 mm aproximadamente

Habiendo un considerable porcentaje de cáñamo retenido en el fondo, se realiza nuevamente un estudio del tamaño de partícula enfocado en estos residuos.

5.1.2. Difracción laser

Para el siguiente análisis, se realizan las mismas consideraciones en cuanto a la forma irregular de las partículas de cáñamo. La efectividad del método de difracción laser es variable en cuanto a la forma de las partículas de las muestras, por lo cual el método es mayormente efectivo mientras más esférica sea la partícula.

La tabla 7 presenta la granulometría de las partículas finas de cáñamo obtenidas del fondo del ensayo de tamizado y en la figura 17 se muestra el análisis granulométrico.

Tabla 7: Granulometría cáñamo fino

% Acumulado	Tamaño (um)	Tamaño (mm)
0,00	5,50	0,0055
0,13	6,54	0,0065
10,00	37,7	0,0377
20,00	65,6	0,0656
30,00	96,9	0,0968
40,00	135,4	0,1354
50,00	185,6	0,1856
60,00	249,3	0,2493
70,00	326,2	0,3262
80,00	441,1	0,4411
90,00	716,7	0,7167
95,00	1025,0	1,0250
100,00	2000,0	2,0000

Se observa en los datos la existencia de partículas de tamaños superiores a 0,35 milímetros, sin embargo se debe recordar del análisis anterior, que la muestra

finas corresponde a partículas inferiores a este último valor. Esta inconcordancia valida las consideraciones iniciales acerca del problema de caracterización del cáñamo debido a sus formas irregulares.

Adicionalmente al último punto, cabe recalcar que el dispositivo de medición es capaz de registrar tamaños de partículas de hasta 2 milímetros, existiendo entonces la posibilidad de haber partículas de mayor tamaño. Se observa además, que el menor tamaño registrado es $6,54 \mu\text{m}$ ($0,00654 \text{ mm}$) que corresponde a un 0,13% acumulado.

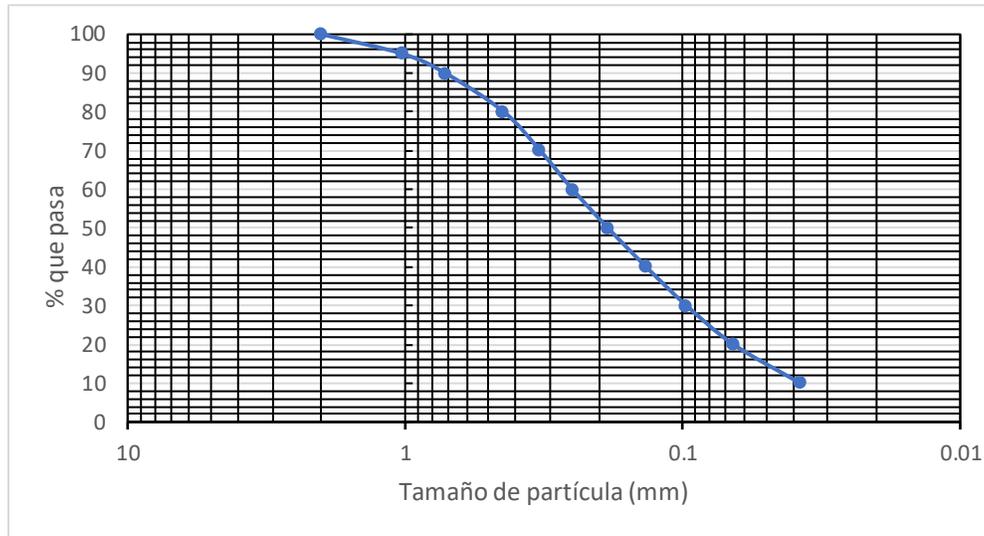


Figura 17: Distribución tamaño de partícula de cáñamo obtenido por analizador láser Microtrac S3500.

Los valores D50 y D80 se obtienen fácilmente de la tabla 7 anterior, siendo 0,19 y 0,44 respectivamente.

Finalmente, de la etapa de ensayos de caracterización se concluye una distribución heterogénea de las partículas de cáñamo en el material que implica una distribución amplia del tamaño de los poros y aumenta la complejidad de la microestructura del concreto de cáñamo, lo que tiene un impacto significativo en las propiedades finales del material (Benmahiddine et al., 2020).

5.2. Ensayos mecánicos

Previo a los ensayos mecánicos de las probetas prismáticas y cilíndricas, es necesario pesirlas y medir el ancho, largo y alto de cada una, así como también su diámetro respectivamente. De esta forma se registran los datos necesarios para el cálculo de volumen, densidad aparente, resistencia a la flexión y compresión de las probetas. Las mediciones son hechas posterior al periodo de secado de 24 horas. En las tablas del anexo A se detalla las dimensiones, peso, volúmenes y densidades

así como también lo valores de resistencia a la flexión y compresión de cada probeta ensayada.

La figura 18 presenta el promedio de las densidades aparentes de la probetas ensayadas, se muestra el promedio de seis valores para las probetas cilíndricas y prismáticas para las tres distintas concentraciones de cáñamo así como también la muestra patrón.

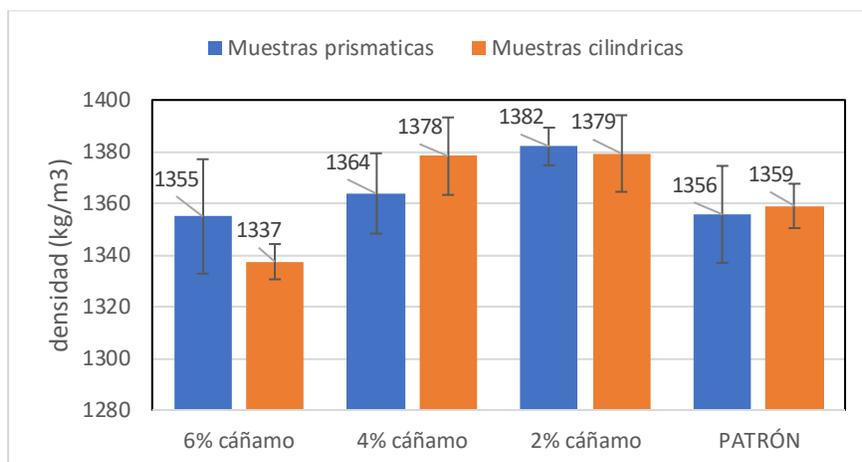


Figura 18: Densidades aparentes de las muestras prismáticas y cilíndricas.

La densidad de la fibra de cáñamo es menor que la de los agregados de concreto típicos. El concreto de cáñamo, como resultado, tiene una densidad mucho más baja que el concreto normal. Comúnmente el concreto a base de cemento portland tiene una densidad de $2400 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ (Neville, 1995; Scanlon & McDonald, 1994). El concreto de cáñamo es un material de construcción cuya densidad no siempre es constante y no tiene un valor medio con una pequeña dispersión, como otros materiales estandarizados como el concreto convencional.

En este trabajo la relación cáñamo/cal es menor, en comparación con la densidad de concreto de cáñamo elaborado por otros autores (tablas 1 y 2), como resultado, la densidad de las muestras es mayor como se observa debido a la mayor cantidad de cal presente.

5.2.1. Resistencia a la flexión

La figura 19 ilustra la realización y resultados del ensayo de resistencia a la flexión de las probetas prismáticas mediante el método estándar de ensayo para concreto usando una viga simple con carga a los tercios del claro.



Figura 19: Ensayo de resistencia a la flexión con probeta prismática de dosificación 6% de cáñamo.

Resistencia

La figura 20 muestra el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de rotura por flexión, se muestra el promedio de tres valores para los ensayos a las edades de 7 y 28 días para las tres distintas concentraciones de cáñamo así como también la muestra patrón.

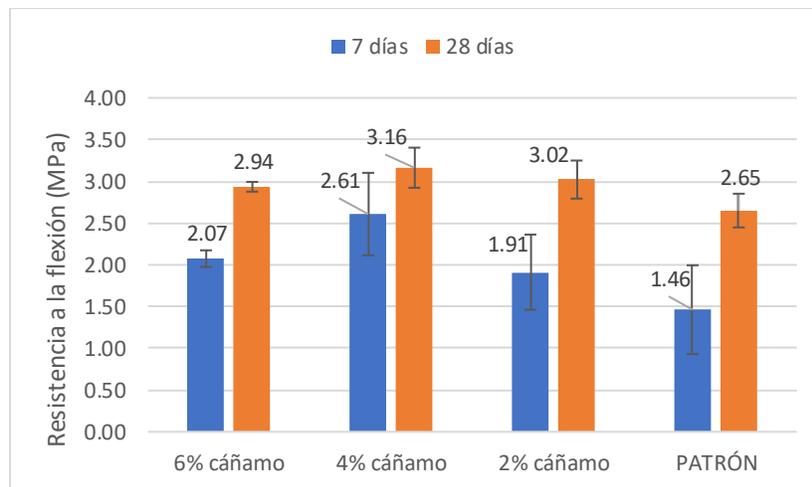


Figura 20: Resultados promedio de resistencia a la flexión.

La resistencia a la flexión varió entre 1,91 y 2,61 MPa a los 7 días y entre 2,94 y 3,16 MPa a los 28 días para las muestras reforzadas con fibra. En cuanto a las muestras sin fibra los resultados fueron menores siendo 1,46 y 2,65 MPa a los 7 y 28 días respectivamente.

Se observa que a los 7 días existe una mayor dispersión entre las medias de las distintas concentraciones que a los 28 días. Esto significa que, a mayor edad,

las diferencias en las propiedades mecánicas relacionadas a la flexión disminuye entre las distintas cantidades de agregado de cáñamo así como la muestra patrón.

Los resultados indican un aumento de rendimiento con respecto a las muestras sin agregado de cáñamo de 41,8%, 78,8% y 30,8% de las concentraciones de 6%, 4% y 2% de cáñamo respectivamente para la edad de 7 días. En cuanto a la edad de 28 días, se sigue observando un aumento con respecto a la muestra patrón pero no tan significativa como a la edad temprana. El aumento de rendimiento para 28 días es de 10,9%, 19,3% y 13,9% para las concentraciones de 6%, 4% y 2% de cáñamo respectivamente. Esto demuestra que los enlaces cal-cáñamo contribuyen a la resistencia a la flexión de la mezcla.

Comparativamente la tabla 2 muestra los resultados mecánicos de flexión de concreto de cáñamo publicados por algunos autores, donde se observa que los resultados de este trabajo están por encima de otros autores que utilizan cal hidráulica natural y adición de metacaolín.

Evolución de resistencia

Dado los resultados anteriores se decidió graficar de manera lineal los resultados a fin de ilustrar en la figura 21 el comportamiento de las probetas en cuanto a la evolución de la resistencia desarrollada en el tiempo, y comparar resultados entre las distintas dosificaciones.

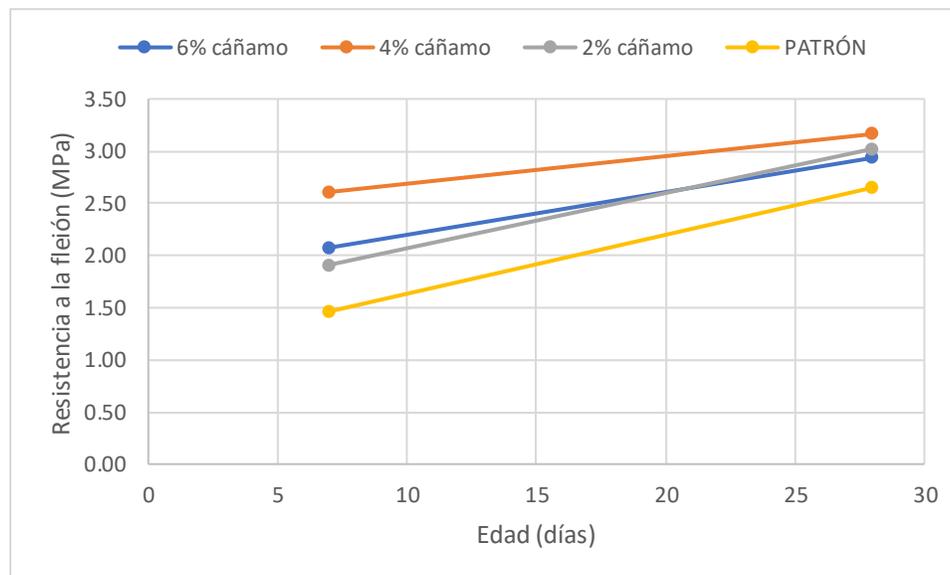


Figura 21: Evolución de la resistencia a la flexión en el tiempo

Del gráfico se observa que la dosificación de 4% de cáñamo obtiene los mejores valores en la interpolación de los resultados de 7 a 28 días, además de la dosificación con 2% de cáñamo que supera los valores de la dosificación de 6% de cáñamo a una edad aproximada de 22 días. Destacar además, que las

dosificaciones patrón, 2% y 6% de cáñamo poseen mejor tendencia al aumento de resistencia en el tiempo con respecto al 4% de cáñamo dadas sus pendientes.

Esto se corrobora realizando un cálculo para obtener las pendientes de las rectas. Resultando en los siguientes valores: 0,041, 0,026, 0,052 y 0,057 para las dosificaciones de 6%, 4%, 2% de cáñamo y patrón respectivamente.

Sin embargo, cabe destacar que estos valores de pendiente no indican necesariamente un cambio a futuro en el liderazgo de la resistencia a la flexión dado que a los 28 días el concreto desarrolla la mayoría de su resistencia y no se puede prever el cambio en su tendencia de desarrollo para estas mezclas a partir de los 28 días como se evidencia en la investigaciones de distintos autores quienes realizan ensayos a muestras de mayores edades (Jami et al., 2019).

5.2.2. Compresión porciones de prismas

La figura 22 ilustra la realización y resultados del ensayo de resistencia a la compresión de las porciones de prismas rotos en flexión mediante el método de prueba estándar de ensayo de concretos.



Figura 22: Ensayo de resistencia a la compresión con probeta de prisma roto en flexión de dosificación 6% de cáñamo.

Cabe recordar que los valores de resistencia a la compresión de este método son para fines de referencia de acuerdo con su norma, y no como sustitutos de los valores obtenidos por el método de ensayo de compresión con cilindros. Estos resultados permiten observar posibles tendencias y relaciones en cuantos a las distintas dosificaciones cáñamo.

Resistencia

La figura 23 muestra el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de rotura por compresión, se muestra el promedio de cuatro valores para los ensayos a las edades de 7 y 28 días para las tres distintas concentraciones de cáñamo así como también la muestra patrón.

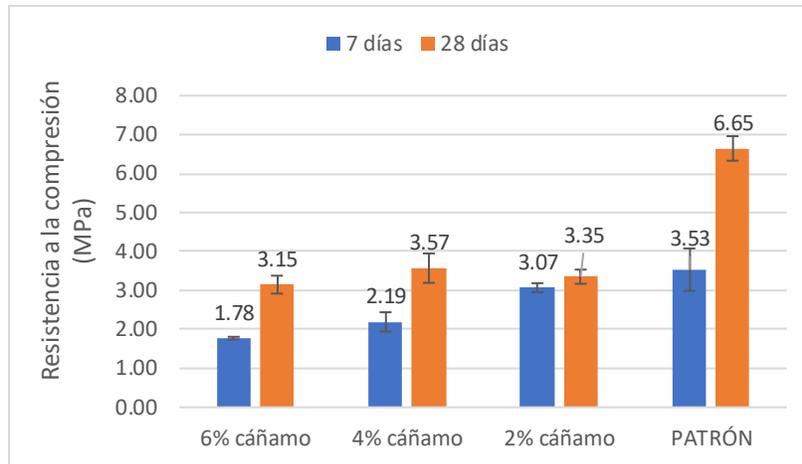


Figura 23: Resultados promedio de resistencia a la compresión de prismas rotos

La resistencia a la compresión varió entre 1,78 y 3,07 MPa a los 7 días y 3,15 y 3,57 MPa a los 28 días para las muestras reforzadas con fibra. En cuanto a las muestras sin fibra fue en promedio mayor variando entre 3,53 y 6,65 MPa a los 7 y 28 días respectivamente.

Los resultados indican una disminución en el rendimiento con respecto a las muestras sin agregado de cáñamo de 49,3%, 38% y 13% de las concentraciones de 6%, 4% y 2% de cáñamo respectivamente para la edad de 7 días. En cuanto a la edad de 28 días, se sigue observando una disminución con respecto a la muestra patrón pero más significativa que a la edad temprana. La disminución en el rendimiento para 28 días es de 52,6%, 46,3% y 49,6% para las concentraciones de 6%, 4% y 2% de cáñamo respectivamente. La muestra patrón destaca además por su aumento de resistencia en un 88,2% a los 28 días con respecto a los 7 días.

Evolución de resistencia

Dado los resultados anteriores se decidió graficar de manera lineal los resultados a fin de ilustrar en la figura 24 el comportamiento de las probetas en cuanto a la evolución de la resistencia desarrollada en el tiempo, y comparar resultados entre las distintas dosificaciones.

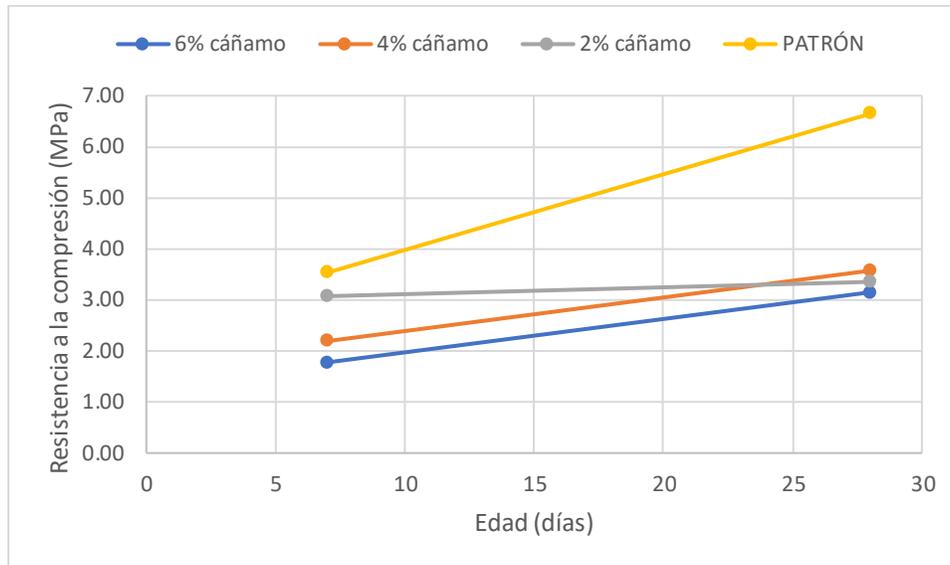


Figura 24: Evolución de la resistencia a la compresión en el tiempo de los restos de probetas prismáticas.

Del gráfico se observa que la dosificación patrón obtiene los mejores valores en la interpolación de los resultados de 7 a 28 días, seguidas de las concentraciones de 2%, 4% y 6% de cáñamo. La dosificación con 2% de cáñamo supera los valores de la dosificación de 4% de cáñamo a una edad aproximada de 24 días. Se destaca además visualmente, que la dosificación patrón posee significativamente mejor tendencia al aumento de resistencia en el tiempo con respecto al resto de dosificaciones dadas sus pendientes.

Esto se corrobora realizando un cálculo para obtener las pendientes de las rectas. Resultando en las siguientes pendientes: 0,065, 0,066, 0,013 y 0,15 para las dosificaciones de 6%, 4%, 2% de cáñamo y patrón respectivamente.

Cabe recordar nuevamente que a los 28 días el concreto desarrolla la mayoría de su resistencia y esta puede seguir aumentando pero a una medida distinta que no se puede prever para estas mezclas a partir de los 28 días como se evidencia en la investigaciones de distintos autores quienes realizan ensayos a muestras de mayores edades (Jami et al., 2019).

En el siguiente apartado se corroboran los aspectos observados de esta prueba.

5.2.3. Resistencia a la compresión

La figura 25 ilustra la realización y resultados del ensayo de resistencia a la compresión de las probetas cilíndricas mediante el método de prueba estándar de ensayo para concreto.



Figura 25: Ensayo de resistencia a la compresión con probeta cilíndrica de dosificación 6% de cáñamo.

Resistencia

La figura 26 muestra el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de rotura por compresión, se muestra el promedio de tres valores para los ensayos a las edades de 7 y 28 días para las tres distintas concentraciones de cáñamo así como también la muestra patrón.

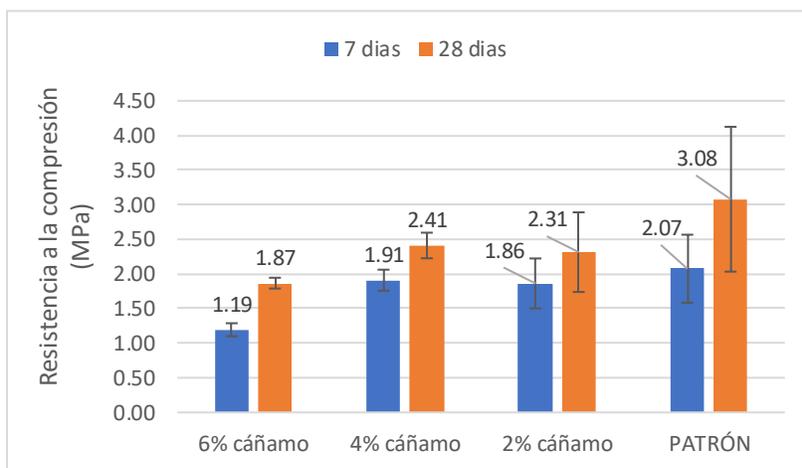


Figura 26: Resultados promedio de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas.

La resistencia a la compresión varió entre 1,19 y 1,91 MPa a los 7 días y 1,87 y 2,41 MPa a los 28 días para las muestras con fibra. En cuanto a las muestras sin fibra fue en promedio mayor variando entre 2,07 y 3,08 MPa a los 7 y 28 días respectivamente. El aumento de la concentración de aglutinante en el concreto de cáñamo aumenta la resistencia a la compresión (Murphy et al., 2010). Al mismo tiempo otros investigadores postulan que la resistencia del concreto de cáñamo endurecido es principalmente el resultado de las propiedades y la proporción de mezcla del aglutinante elegido para su formulación (Jami et al., 2016). La tabla 1 muestra valores de compresión obtenidos por varios investigadores, como se observa en general los resultados mecánicos de este trabajo están por encima de

otros autores, esto posiblemente debido a la mayor densidad de las muestras como fue mencionado anteriormente.

Los resultados de este trabajo indican una disminución en el rendimiento con respecto a las muestras sin agregado de cáñamo de 43%, 8,2% y 10,1% de las concentraciones de 6%, 4% y 2% de cáñamo respectivamente para la edad de 7 días. En cuanto a la edad de 28 días, se sigue observando una disminución con respecto a la muestra patrón pero más significativa que a la edad temprana. La disminución en el rendimiento para 28 días es de 39,1%, 21,7% y 25,1% para las concentraciones de 6%, 4% y 2% de cáñamo respectivamente.

La reducción de la resistencia a la compresión puede atribuirse al mayor porcentaje de cáñamo. Que a su vez puede deberse al hecho de que las fibras de cáñamo son menos rígidas y fuertes que el aglutinante de cal, lo que lleva a una unión más débil entre las fibras y la matriz. La creciente cantidad de fibras en la matriz puede llevar a las fibras a golpear y superponerse entre sí, lo que finalmente resulta en una pérdida de cohesión con la matriz y un material compuesto debilitado, según lo informado por investigaciones anteriores (Mostafa & Uddin, 2015; Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). Esta circunstancia puede conducir a una disminución en la resistencia de las muestras de fibra de cáñamo. En general, es importante encontrar un equilibrio entre los beneficios de agregar fibras de cáñamo y la posible reducción de la fuerza que puede ocurrir con concentraciones más altas.

Evolución de resistencia

Dado los resultados anteriores se decidió graficar de manera lineal los resultados a fin de ilustrar en la figura 27 el comportamiento de las probetas en cuanto a la evolución de la resistencia desarrollada en el tiempo, y comparar resultados entre las distintas dosificaciones.

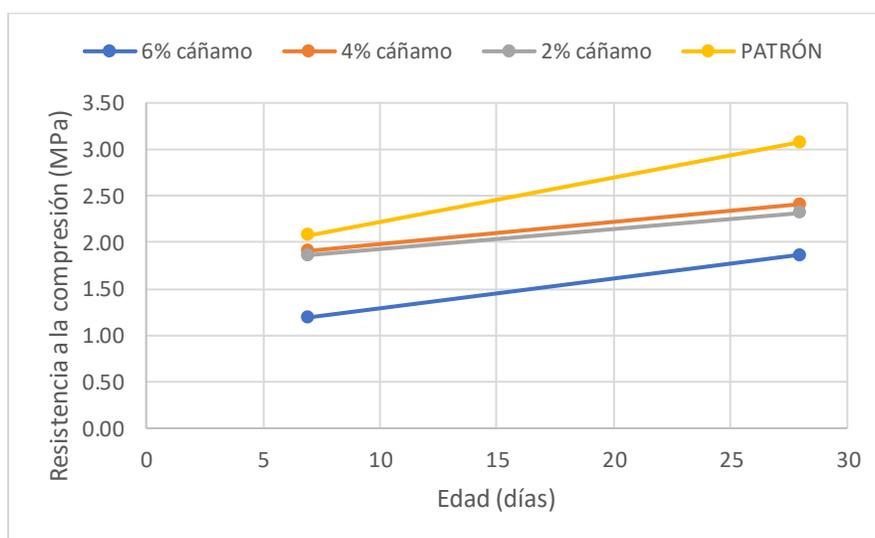


Figura 27: Evolución de la resistencia a la compresión en el tiempo.

Del gráfico se observa que la dosificación patrón obtiene los mejores valores en la interpolación de los resultados de 7 a 28 días, seguidas de las concentraciones de 4%, 2% y 6% de cáñamo. Se destaca además visualmente, que la dosificación patrón posee mejor tendencia al aumento de resistencia en el tiempo con respecto al resto de dosificaciones dadas sus pendientes.

Esto se corrobora realizando un cálculo para obtener las pendientes de las rectas. Resultando en las siguientes pendientes: 0,032, 0,024, 0,022 y 0,048 para las dosificaciones de 6%, 4%, 2% de cáñamo y patrón respectivamente.

Estos valores de pendiente permiten suponer que no habrá cambios en el liderazgo del aumento de resistencia mecánica sin embargo, si bien a los 28 días el concreto desarrolla la mayoría de su resistencia y esta puede seguir aumentando pero a una medida distinta que no se puede prever para estas mezclas a partir de los 28 días como se evidencia en la investigaciones de distintos autores quienes realizan ensayos a muestras de mayores edades (Jami et al., 2019)

La resistencia mecánica a la compresión tiende a disminuir en general conforme aumenta la concentración de cáñamo en las muestras tal como se observó en la prueba de prismas rotos pero mostrando una menor diferencia entre las distintas concentraciones. Cabe mencionar que no fue posible explicar la diferencia en los resultados de compresión entre probetas prismas rotos y probetas cilíndricas de esta prueba. Sin embargo se propone como hipótesis una posible mejora del empaquetamiento del cáñamo en la cal debido a posibles diferencias en su compactación al momento de disponer en los moldes de distintas naturalezas. Se recomienda profundizar los estudios en este tema.

Finalmente, dado que es un material de baja densidad y resistente a las grietas en movimiento, es muy adecuado para su uso en áreas propensas a terremotos. Según (Bouloc, 2006), la baja resistencia a la compresión del concreto de cáñamo se puede atribuir a la disposición imperfecta de las partículas, la alta flexibilidad del agregado, y la naturaleza porosa del concreto de cáñamo. Debido a su baja resistencia a la compresión, el concreto de cáñamo no se puede utilizar como material de carga en su forma actual. Para la aplicación de soporte de carga, se requiere una mayor resistencia a la compresión y una mayor rigidez (Tronet et al., 2016).

5.3. Ensayos de conductividad térmica

El presente apartado se enfocará en analizar los resultados obtenidos del ensayo de conductividad térmica del concreto de cáñamo. En la figura 28 se muestran los promedio de dos valores de conductividad para cada concentración de cáñamo, incluida muestra patrón, para las edades de 7 y 28 días. Los primeros resultados a los 7 días muestran un aumento en el valor al 2% de cáñamo el cual luego disminuye incluso por debajo de la muestra patrón al 4% seguido de un leve

aumento al 6%. Pasado 21 días, los resultados muestran un modelo simétrico pero invertido al de los primeros días, teniendo la concentración de 6% el valor más bajo y el 4% el valor más grande. Sin embargo luego, la conductividad muestra una mayor tendencia a disminuir al aumentar la concentración de fibra a partir del 4% de cáñamo. Esto último concuerda con los autores donde el valor de conductividad térmica disminuye al aumentar la concentración de cáñamo, además coincide con el factor de la densidad ya que las variaciones en la densidad pueden afectar en gran medida el rendimiento térmico y, por lo tanto, constituyen una variable importante. Esta postulación puede ser confinada por los estudios realizados por (Sinka et al., 2014), donde se encontró que la conductividad térmica del concreto de cáñamo aumenta en $0,005 \text{ W/m}^2\text{K}$ por cada 50 kg/m^3 ganados. Las investigaciones de otros autores tienen como rango de valores de conductividad térmica $0,09\text{--}0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ para densidades de 330 kg/m^3 con altos porcentajes de agregado de cáñamo en la dosificación de la mezcla de concreto (Evrard et al., 2006). Sin embargo, en este trabajo la relación cáñamo/cal es menor por lo que la densidad de las muestras es mayor debido a la mayor cantidad de cal presente. Comparando densidades, tomando el valor 1346 kg/m^3 promedio para 6% de cáñamo, se tiene una diferencia de 1016 kg/m^3 , luego al multiplicar este valor por el aumento de conductividad en función de la densidad mencionado anteriormente, se tiene que la conductividad aumenta $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ con lo cual se llega a los resultados obtenidos.

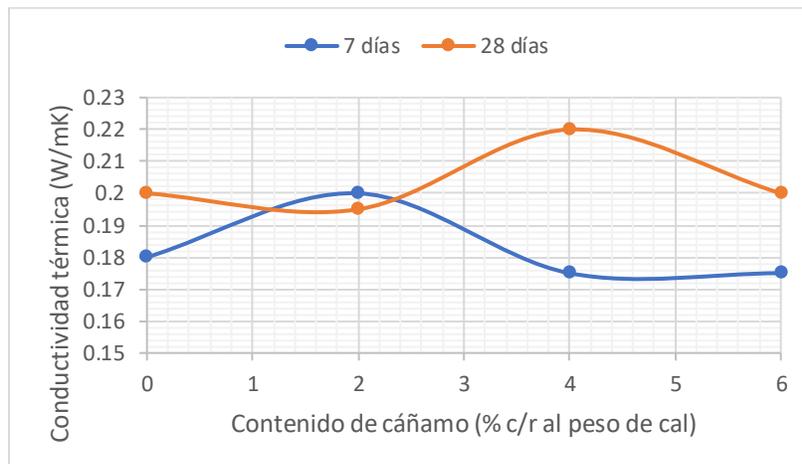


Figura 28: Relación entre la conductividad térmica y el contenido de cáñamo para muestras de concreto a 7 y 28 días

Algunos autores formulan que independientemente del tipo de aglutinante mineral utilizado o la porosidad, a medida que aumenta el contenido del aglutinante, también lo hace su conductividad térmica (Arnaud et al., 2013), lo cual también se relaciona con la concentración de cáñamo puesto que a medida que uno aumenta el otro disminuye. Sin embargo no se encontraron estudios que abarquen la relación entre la conductividad térmica y la edad de las muestras.

Por otra parte, se ha investigado que la conductividad térmica aumenta con la humedad y la temperatura. además, la influencia de la densidad en la

conductividad térmica es mucho mayor que la del contenido de humedad (Barbhuiya & Bhusan Das, 2022).

5.4. Ensayos de mecánicos tras exposición a altas temperaturas

Se midió la pérdida de resistencia del material después de la exposición a altas temperaturas, lo que permitió evaluar su capacidad frente a situaciones de emergencias producto de incendios o para su uso en aplicaciones donde se requiera una alta resistencia al fuego.

5.4.1. Primera prueba a 800°C

La figura 29 muestra las muestras de ensayo antes y después de su exposición a 800°. Como se observa, la falta de tres ejemplares, lo cuales corresponden a las dosificaciones patrón, se debe a que explotaron dentro de los primeros minutos del ensayo (figura 30), lo que demuestra, como afirman otros autores que la incorporación de fibras es eficaz para evitar el desprendimiento explosivo de concretos (Piña Ramírez et al., 2020). Cabe señalar el choque térmico al cual fueron expuestas las muestras al retirarlas a temperatura ambiente para su enfriamiento, esto provocó roturas (figura 31) dejando las muestras incapaces de ser sometidas a pruebas mecánicas.

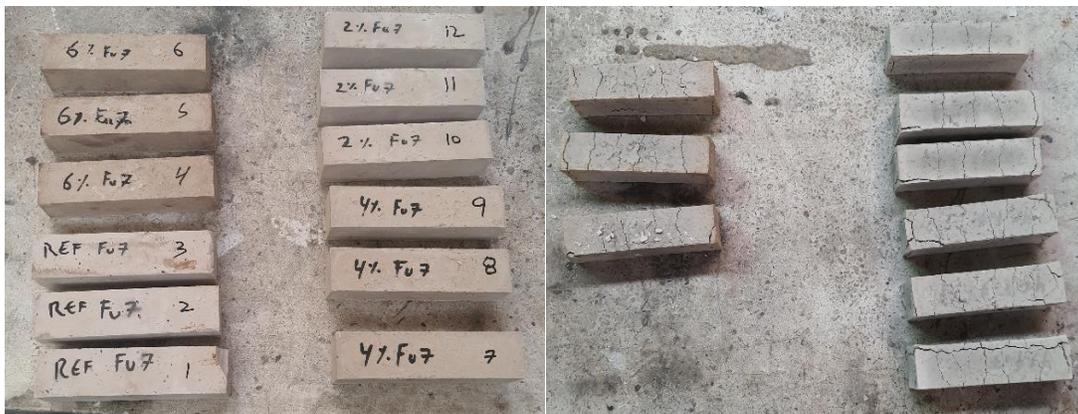


Figura 29: Muestras de concreto de cáñamo antes y después de exposición a altas temperaturas



Figura 30: Restos de muestras patrón



Figura 31: Rotura de muestras de ensayos por choque térmico

5.4.2. Segunda prueba a 400°C

Para la realización de la prueba de sometimiento de alta temperatura a las 28 días, debido a los resultados anteriores, la temperatura de exposición fue modificada a 400°C además de que el proceso de enfriamiento se llevó a cabo al interior de la mufla durante un periodo de 24 horas. La figura 32 ilustra la realización y resultados del ensayo de exposición a alta temperatura, en esta ocasión todas las muestras permanecieron intactas lo que permitió la ejecución de las pruebas mecánicas.



Figura 32: Muestras de concreto de cáñamo antes y después de exposición a 400°C

5.4.2.1. Ensayo de flexión

La figura 33 ilustra la realización y resultados del ensayo de resistencia a la flexión mediante el método estándar de ensayo para concreto usando una viga simple con carga a los tercios del claro.

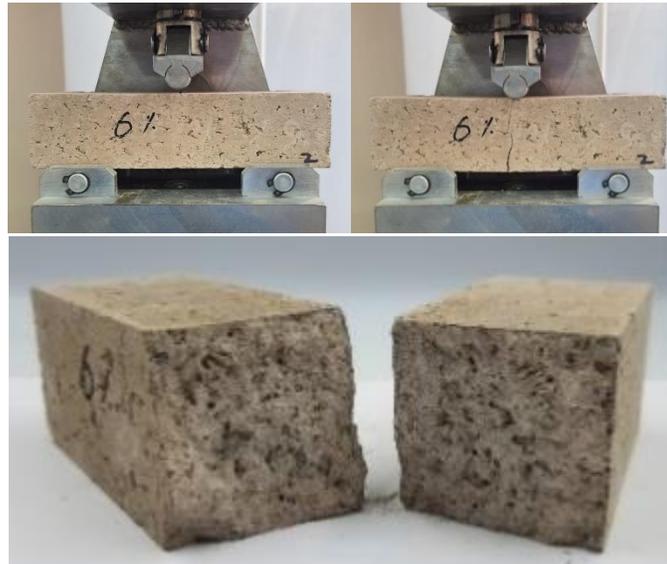


Figura 33: Ensayo de resistencia a la flexión con probeta prismática de dosificación 6% de cáñamo tras exposición a 400°C

Resistencia

La figura 34 muestra el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de rotura por flexión, se muestra el promedio de tres valores para las tres distintas concentraciones de cáñamo así como también la muestra patrón, junto con el promedio de resultados de ensayo de flexión sin sometimiento a alta temperatura.

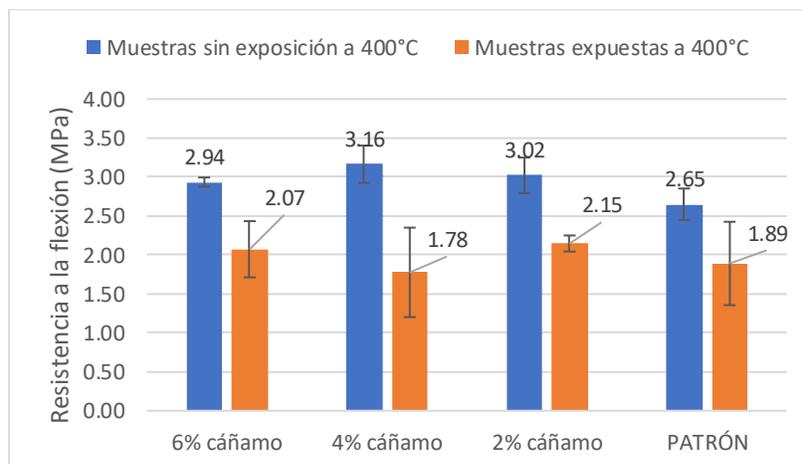


Figura 34: Resultados promedio de resistencia a la flexión con y sin sometimiento a 400°C

Los resultados muestran una variación en el rendimiento con respecto a las muestras sin agregado de cáñamo de 9,47%, -5,8% y 14,3% de las concentraciones de 6%, 4% y 2% de cáñamo respectivamente para la edad de 28 días. Se observa además, que la resistencia mecánica de todas las probetas disminuyó luego de ser sometidas a 400°C para todas las dosificaciones de cáñamo, en concreto disminuyeron un 29,7% para 6% de cáñamo, un 43,6% para 4% de cáñamo, un 28,7% para 2% de cáñamo y un 28,7% para la muestra patrón.

Debido a la naturaleza resultante de las muestras a los 7 días tras la primera prueba, no se realizaron ensayos mecánicos por lo que no es posible la realización de un estudio de la evolución de la resistencia en el tiempo.

5.4.2.2. Ensayo de compresión

La figura 35 ilustra la realización y resultados del ensayo de resistencia a la compresión de las porciones de prismas rotos en flexión mediante el método de prueba estándar de ensayo de concretos.



Figura 35: Ensayo de resistencia a la compresión con probeta de prisma roto en flexión de dosificación 6% de cáñamo tras exposición a 400°C.

Resistencia

La figura 36 muestra el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de rotura por compresión, se muestra el promedio de cuatro valores para los ensayos a las edades 28 días para las tres distintas concentraciones de cáñamo así como también la muestra patrón, junto con el promedio de resultados de ensayo de compresión sin sometimiento a alta temperatura.

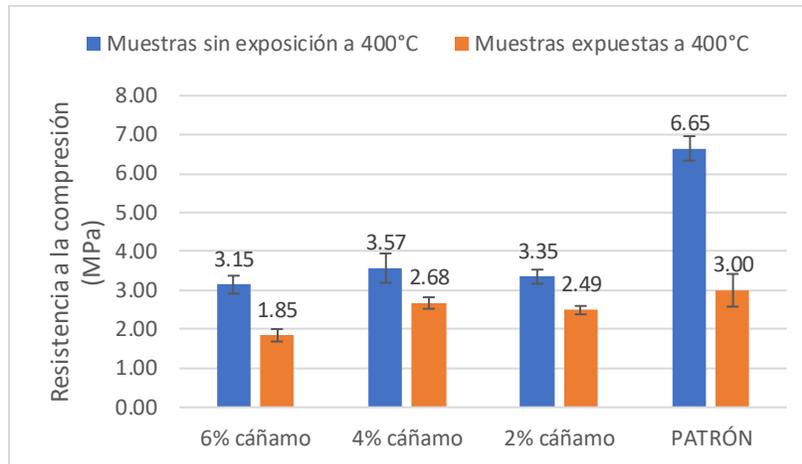


Figura 36: Resultados promedio de resistencia a la compresión con y sin sometimiento a 400°C.

Los resultados indican una disminución en el rendimiento con respecto a las muestras sin agregado de cáñamo de 38,33%, 10,67% y 16,33% de las concentraciones de 6%, 4% y 2% de cáñamo respectivamente para la edad de 28 días. Se observa además, que la resistencia mecánica de todas las probetas disminuyó luego de ser sometidas a 400°C para todas las dosificaciones de cáñamo, en concreto disminuyeron 1,3 MPa para 6% de cáñamo, 0,89 MPa para 4% de cáñamo, un 0,86 MPa para 2% de cáñamo y 3,65 MPa para la muestra patrón. Estos resultados demuestran que frente a una gran exposición a altas temperaturas, en específico 400°C durante 90 minutos, el agregado de fibras evita en gran medida el deterioro del concreto.

La falta de ensayos a los 7 días impide la realización de un estudio de la evolución de la resistencia en el tiempo.

5.5. Caracterización microestructural SEM

Para investigar las características microestructurales de las muestras, se realizó un estudio con un microscopio electrónico de barrido (SEM) en concreto de cáñamo al 2, 4 y 6% así como también a las partículas de cáñamo utilizadas. Se utilizaron como muestras de análisis restos de probetas rotas de ensayos, con el objetivo de ver la adhesión de la cal en las fibras. La figura 37 muestra la microestructura de las fibras de cáñamo.

El análisis de microscopía electrónica de barrido reveló que las partículas de cáñamo estaban bien distribuidas por toda la matriz, y que el aglutinante de cal había penetrado en las partículas de cáñamo (figuras 38, 39 y 40), creando una buena adhesión entre los dos componentes. Se observó que la cal estaba presente como una estructura fina y cristalina dentro de la matriz, lo que también ayudó a crear un material compuesto fuerte y duradero. Se observó que las partículas de

cáñamo eran relativamente uniformes en tamaño y forma, con una textura fibrosa que les permitía entrelazarse entre sí, proporcionando resistencia adicional al material.

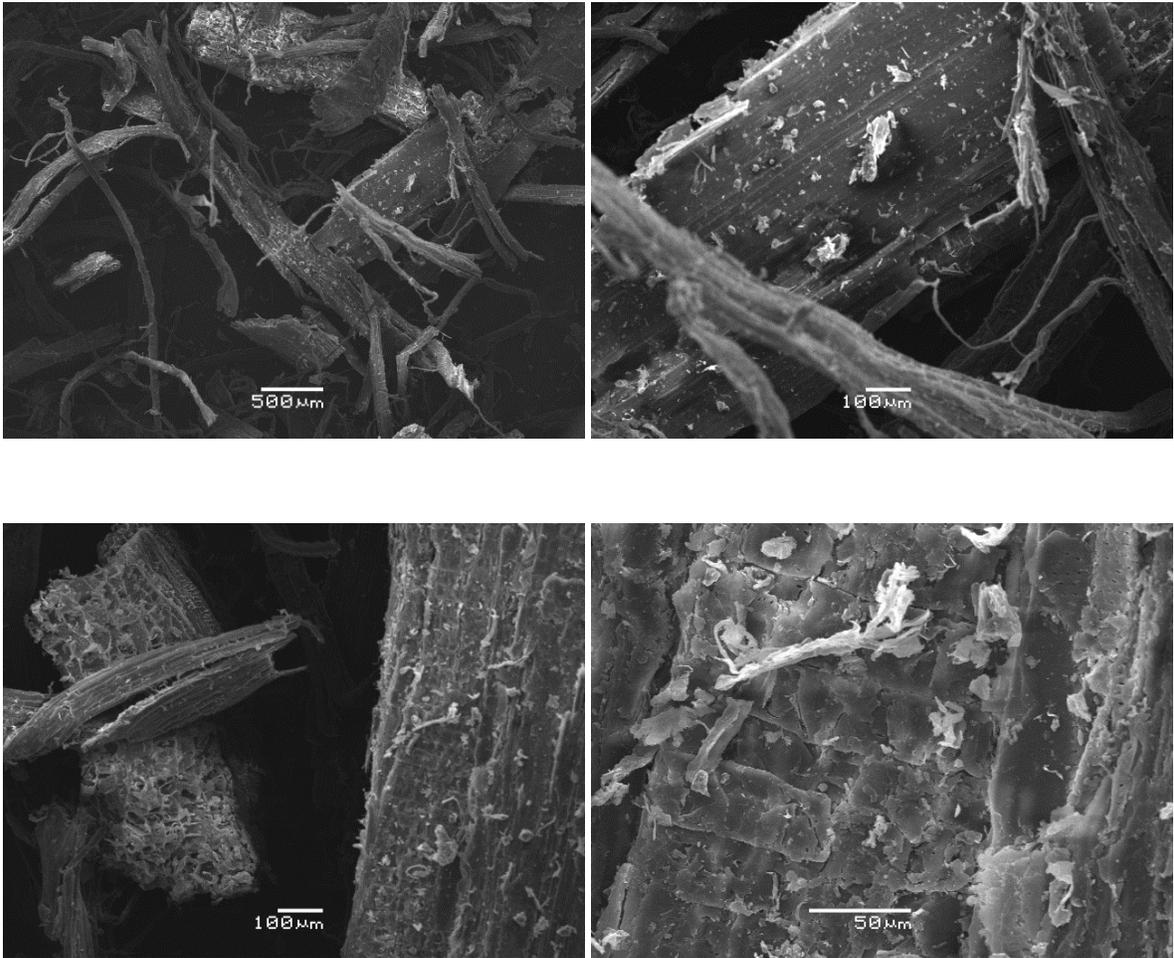


Figura 37: Imagen SEM de fibra de cáñamo

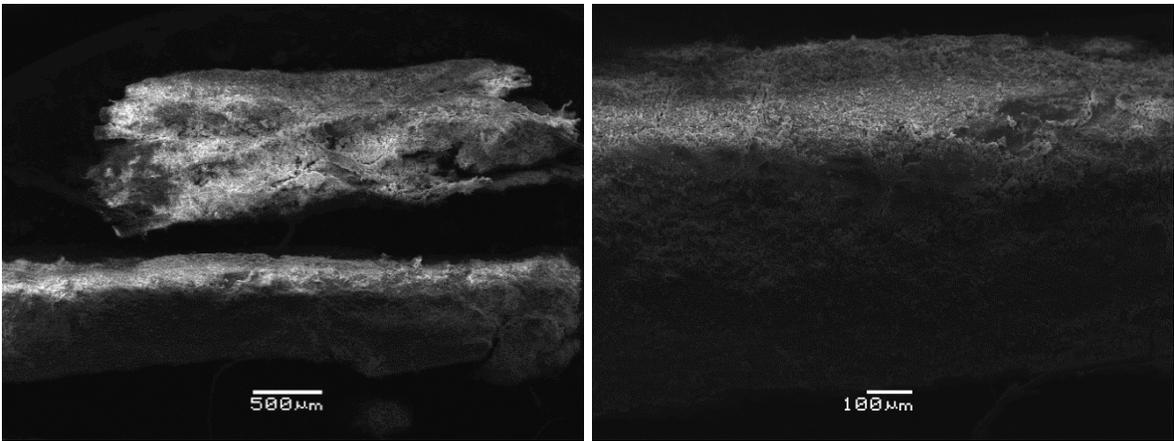


Figura 38: Imagen SEM de concreto de cal de cáñamo en cáñamo 2%

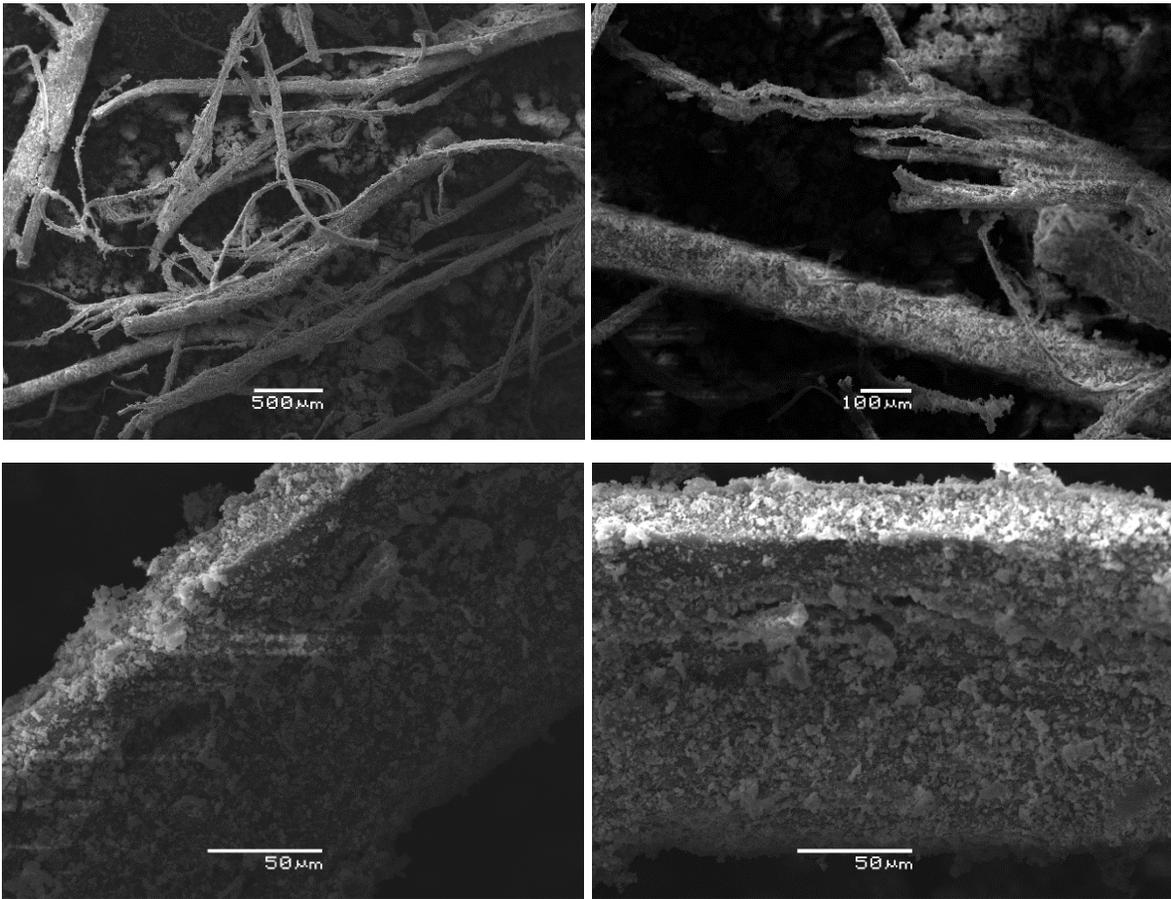


Figura 39: Imagen SEM de concreto de cal de cáñamo en cáñamo 4%

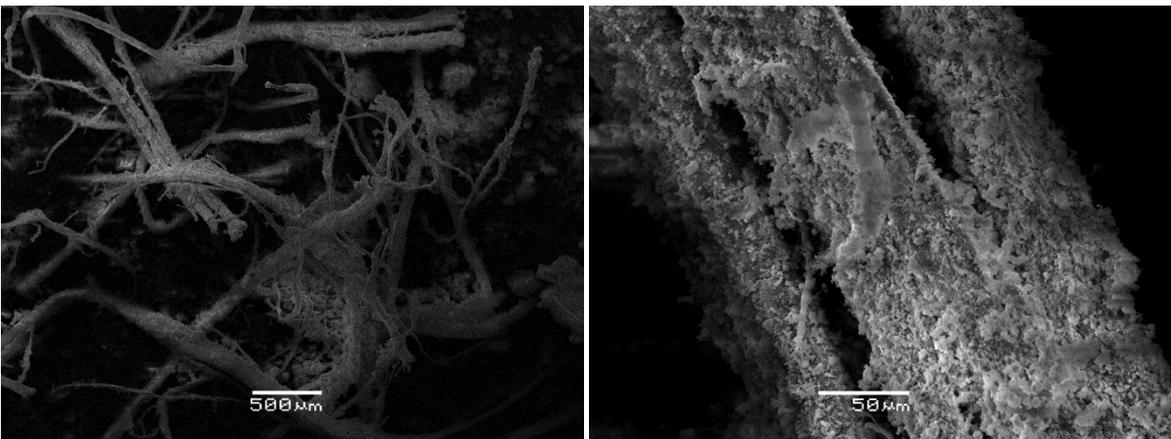
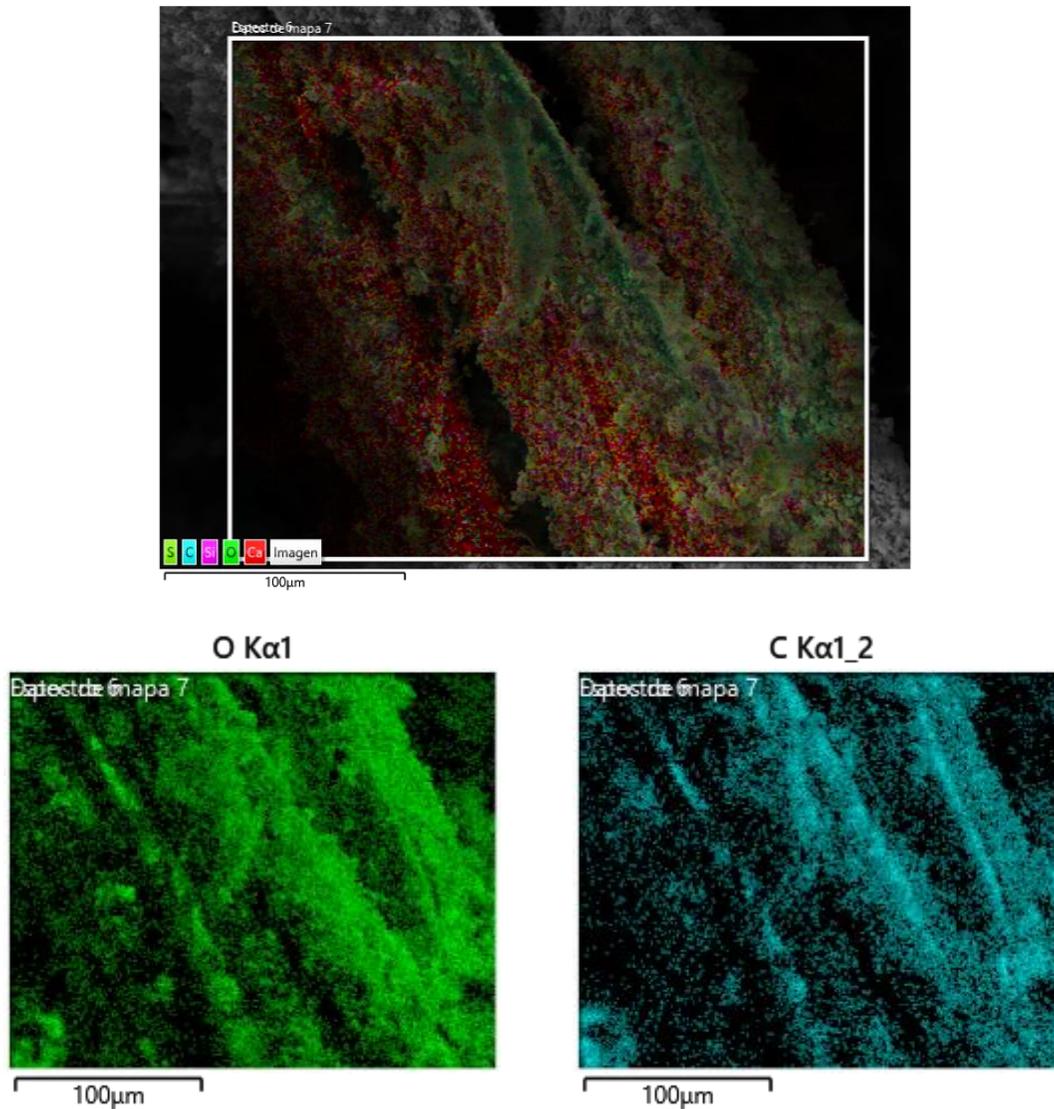


Figura 40: Imagen SEM de concreto de cal de cáñamo en cáñamo 6%

El análisis del espectrómetro de dispersión de energía con mapeo elemental (EDS) se realizó en las mismas muestras del análisis SEM de las diferentes

concentraciones de cáñamo con tal de corroborar la adhesión del aglutinante en las fibras de cáñamo. Como se observa en la figura 41, la fibra de cáñamo se encuentra envuelta por elemento como calcio y silicatos, lo que demuestra una buena mezcla entre el aglutinante y la fibra natural.



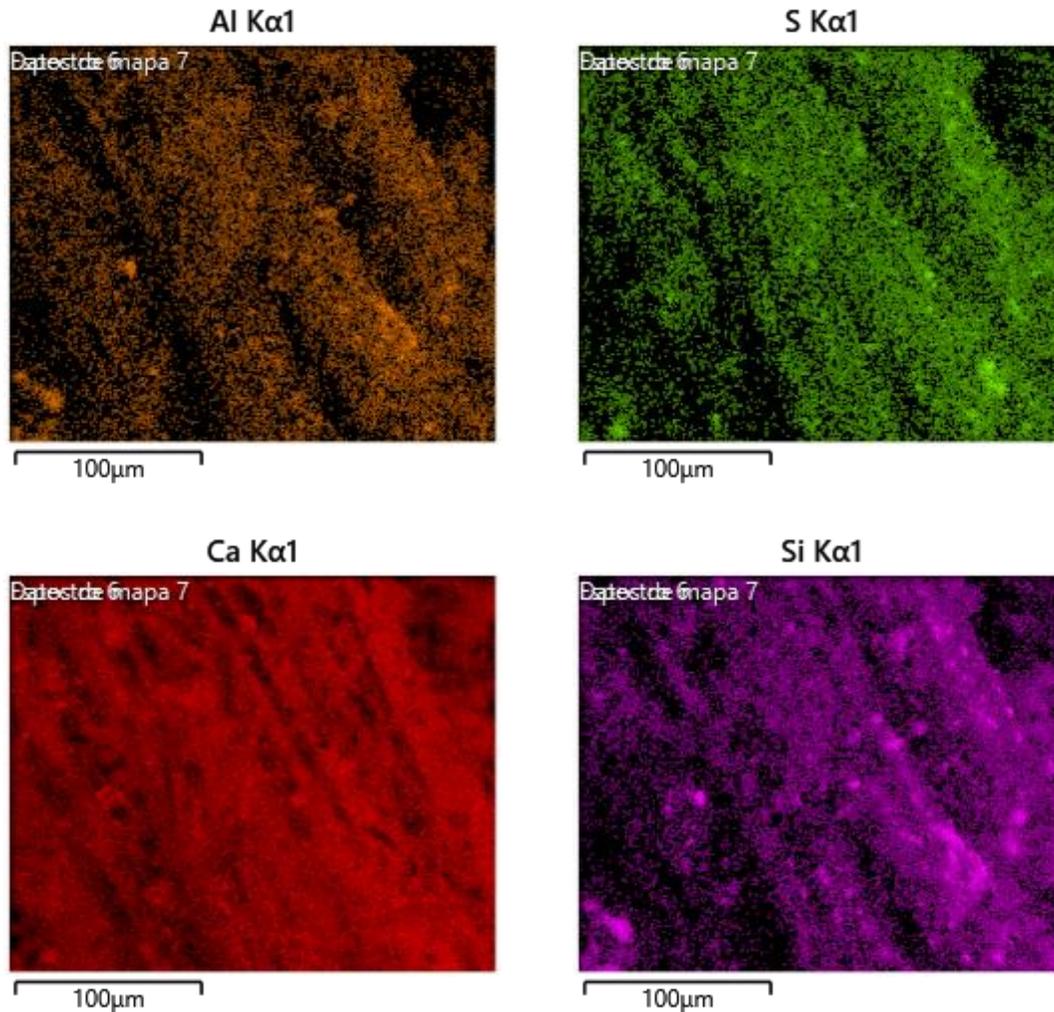


Figura 41: Mapeo elemental EDS de la adhesión de la cal a la fibra de cáñamo (muestra de concreto con 6% cáñamo)

5.6. Consideraciones para futuras investigaciones

Al realizar el trabajo experimental están presente posibles errores en todos los aspectos y condiciones que involucran a las mediciones y ensayos. Uno de ellos es el error humano en la realización de las muestras de concretos, ya que el agregado de fibra natural a diferencia de la grava u otros agregados de concreto tiene una mayor propiedad hidrófila lo que da como resultado una mezcla fresca más espesa y por ende su compactación en el moldeado requiere de más esfuerzo y la replicación de las muestras viene dada con una incertidumbre, esto se evidencia en la diferencia de densidades de las mismas concentraciones en diferentes probetas. Este error se distribuye en todos los ensayos realizados por lo que no afecta considerablemente los resultados. Para este problema se propone la

necesidad de alguna asistencia mecánica para la compresión de las mezclas al momento del moldeado.

Sin embargo, existen otros motivos que pueden afectar el análisis de resultados y conclusiones, como el instrumento utilizado para medir la resistencia mecánica, ya que por su operación manual en cuanto a velocidad de esfuerzo viene dada también con una incertidumbre.

6. Conclusión

Esta investigación evaluó y caracterizó distintas propiedades de un concreto de cal desarrollado con fibras naturales de cáñamo.

La caracterización de la fibra de cáñamo indicó una amplia dispersión en la distribución de tamaño de partículas. Esta distribución heterogénea que implica una distribución amplia del tamaño de los poros y aumenta la complejidad de la microestructura del hormigón de cáñamo.

De la realización de las pruebas mecánicas, la introducción de fibras de cáñamo en el concreto conduce a un refuerzo en las resistencias a la flexión de las muestras. Sin embargo, una cantidad creciente de fibras en la matriz conduce a una disminución en la resistencia a la compresión de las muestras.

Aunque los resultados de conductividad térmica son prometedores, estos no están a la par con los de otros autores, sin embargo otras investigaciones permiten relacionar estas diferencias de valores a través del factor de la densidad de las muestras, indicando así que a mayor concentración de cáñamo el concreto aumenta sus propiedades aislantes, mostrando potencial a mejorar para ser un buen aislante térmico.

Tras la exposición a alta temperatura la fibra demostró un reforzamiento en el concreto impidiendo un desprendimiento explosivo, además se demostró que la pérdida de resistencia mecánica a la compresión es mucho menor en concretos reforzados con fibras.

El análisis microscópico demostró la distribución de las partículas de cáñamo en el concreto, indicando una buena adhesión entre el cáñamo y el aglutinante. Por otra parte el análisis de la composición química de las muestras de concreto de fibra de cáñamo revela la alta presencia de elementos como C, Ca, Si y Al, lo que mejora las características de unión del concreto.

En conclusión, el concreto de cal de cáñamo ha demostrado ser un material de construcción prometedor y sostenible con varios beneficios. La adición de fibras de cáñamo no refuerza al punto de convertirlo en concreto de carga pero tiene potencial para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Sin embargo, se necesita más investigación para comprender completamente la durabilidad y el comportamiento a largo plazo del concreto de cal de cáñamo en diversas condiciones ambientales. En general, el uso de concreto de cal de cáñamo presenta una oportunidad para crear edificios más sostenibles y ecológicos.

Referencias

- Abbott, T. (2014). *The Limecrete Company LTD. Hempcrete Factsheet*.
- Anwar, F., Latif, S., & Ashraf, M. (2006). Analytical characterization of hemp (*Cannabis sativa*) seed oil from different agro-ecological zones of Pakistan. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 83(4). <https://doi.org/10.1007/s11746-006-1207-x>
- Arehart, J. H., Nelson, W. S., & Srubar, W. V. (2020). On the theoretical carbon storage and carbon sequestration potential of hempcrete. *Journal of Cleaner Production*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121846>
- Arnaud, L., Boyeux, B., & Hustache, Y. (2013). Hemp and the construction industry. En *Hemp: industrial production and uses*. <https://doi.org/10.1079/9781845937935.0239>
- Arnaud, L., & Gourlay, E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 28(1). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>
- ASTM. (2018). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)*. *Astm C349 -18*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2021a). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. *Astm C39/C39M -21*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2021b). *Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*. *Astm C518 -21*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2022). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. *Astm C78/C78M -22*. American Society for Testing and Materials.
- Aydin, S. (2008). Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice. *Fire Safety Journal*, 43(8). <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.02.001>
- Barbhuiya, S., & Bhusan Das, B. (2022). A comprehensive review on the use of hemp in concrete. En *Construction and Building Materials* (Vol. 341). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127857>
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. En *Journal of Cleaner Production* (Vol. 51). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>
- Benmahiddine, F., Bennai, F., Cherif, R., Belarbi, R., Tahakourt, A., & Abahri, K. (2020). Experimental investigation on the influence of immersion/drying cycles on the hygrothermal and mechanical properties of hemp concrete. *Journal of Building Engineering*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101758>

- Bevan, R., & Woolley, T. (2008). Hemp lime construction. *A guide to building with hemp lime composites*, Bracknell.
- Bouloc, P. (2006). *Le chanvre industriel: production et utilisations*. France Agricole Editions.
- Evrard, A., de Herde, A., & Minet, J. (2006). Dynamical interactions between heat and mass flows in Lime-Hemp concrete. *Proceedings of the 3rd International Building Physics Conference - Research in Building Physics and Building Engineering*.
- INN. (2001). *Morteros - Parte 1 - Requisitos generales*. NCh 2256/1.2001. Instituto de Normalización Nacional.
- INN. (2009a). *Albañilería armada - Requisitos para el diseño y cálculo*. NCh 1928.1993. Instituto de Normalización Nacional.
- INN. (2009b). *Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría*. NCh 165.2009. Instituto de Normalización Nacional.
- INN. (2012). *Agua de amasado - Clasificación y requisitos*. NCh 1498.2012. Instituto de Normalización Nacional.
- Jami, T., Karade, S. R., & Singh, L. P. (2019). A review of the properties of hemp concrete for green building applications. En *Journal of Cleaner Production* (Vol. 239). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117852>
- Jami, T., Rawtani, D., & Agrawal, Y. K. (2016). Hemp concrete: Carbon-negative construction. En *Emerging Materials Research* (Vol. 5, Número 2). <https://doi.org/10.1680/jemmr.16.00122>
- Kioy, S. (2005). Lime-hemp composites: compressive strength and resistance to fungal attacks. *MEng dissertation, recalled in Appendix, 1*.
- MOP. (2015). *VOLUMEN N° 8 ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE MUESTREO, ENSAYE Y CONTROL MANUAL DE CARRETERAS*.
- Mostafa, M., & Uddin, N. (2015). Effect of banana fibers on the compressive and flexural strength of compressed earth blocks. *Buildings*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/buildings5010282>
- Murphy, F., Pavia, S., & Walker, R. (2010). *An Assessment of the Physical Properties of Lime-Hemp Concrete*.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (Vol. 4). Longman London.
- Nguyen, T. T., Picandet, V., Amziane, S., & Baley, C. (2009). Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13(9). <https://doi.org/10.1080/19648189.2009.9693171>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.03.003>

- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. En *Construction and Building Materials* (Vol. 25, Número 2).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>
- Piña Ramírez, C., Vidales Barriguete, A., Serrano Somolinos, R., del Río Merino, M., & Atanes Sánchez, E. (2020). Analysis of fire resistance of cement mortars with mineral wool from recycling. *Construction and Building Materials*, 265.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120349>
- Pretot, S., Collet, F., & Garnier, C. (2014). Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating. *Building and Environment*, 72.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.010>
- 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. En *Journal of Building Engineering* (Vol. 31). <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101323>
- Sanjay, M. R., Madhu, P., Jawaid, M., Senthamaraiannan, P., Senthil, S., & Pradeep, S. (2018). Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. En *Journal of Cleaner Production* (Vol. 172).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.101>
- Sassoni, E., Manzi, S., Motori, A., Montecchi, M., & Canti, M. (2014). Novel sustainable hemp-based composites for application in the building industry: Physical, thermal and mechanical characterization. *Energy and Buildings*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.033>
- Sassu, M., Giresini, L., Bonannini, E., & Puppio, M. L. (2016). On the use of vibro-compressed units with bio-natural aggregate. *Buildings*, 6(3). <https://doi.org/10.3390/buildings6030040>
- Scanlon, J. M., & McDonald, J. E. (1994). Thermal properties. En *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. ASTM International.
- Sinka, M., Sahmenko, G., & Korjakins, A. (2014). Mechanical Properties of Pre-Compressed Hemp-Lime Concrete. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 8(3).
<https://doi.org/10.5755/j01.sace.8.3.7451>
- Soprocál. (s. f.). *Cal hidráulica Soprocál 6*.
- Sutton, A., Black, D., & Walker, P. (2011). *Straw bale: an introduction to low-impact building materials*. IHS BRE Press.
- Tronet, P., Lecompte, T., Picandet, V., & Baley, C. (2016). Study of lime hemp concrete (LHC) - Mix design, casting process and mechanical behaviour. *Cement and Concrete Composites*, 67.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.004>
- Walker, R. (2013). *A study of the properties of lime-hemp concrete with pozzolans*. Trinity College.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, 26.
<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>

Zerrouki, R., Benazzouk, A., Courty, M., & ben Hamed, H. (2022). Potential use of matakaolin as a partial replacement of preformulated lime binder to improve durability of hemp concrete under cyclic wetting/drying aging. *Construction and Building Materials*, 333. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127389>

Anexos

Anexo A. Resultados mecánicos

Tabla 8: Resultado de resistencia a la flexión 7 días

Concentración de cáñamo	Altura	Base	Largo	Volumen	Masa	Densidad	Carga máxima	Resistencia a la Flexión
	mm	mm	mm	mm ³	g	kg/m ³	KN	MPa
6%	40.2	39.4	157.3	249144	332.62	1335	0.81	1.97
	40.8	39.1	157.8	251735	335.62	1333	0.91	2.16
	40.6	39.3	157.3	250985	335.33	1336	0.88	2.10
4%	39.3	39.2	156.7	241406	326.86	1354	0.95	2.42
	39.8	39.1	156.7	243853	332.92	1365	1.27	3.17
	39.1	39.4	157.0	241865	323.59	1338	0.87	2.23
2%	39.6	39.2	157.3	244180	334.39	1369	0.94	2.36
	39.7	38.9	156.5	241688	333.84	1381	0.58	1.46
	39.5	39.1	157.0	242479	335.30	1383	0.75	1.90
Patrón	40.1	39.3	156.3	245943	329.38	1339	0.52	1.27
	40.6	39.2	155.5	247414	329.09	1330	0.44	1.05
	40.2	38.9	155.8	243764	329.33	1351	0.84	2.06

Tabla 9: Resultado de resistencia a la flexión 28 días

Concentración de cáñamo	Altura	Base	Largo	Volumen	Masa	Densidad	Carga máxima	Resistencia a la Flexión
	mm	mm	mm	mm ³	g	kg/m ³	KN	MPa
6%	40.2	39.3	156.7	247564	341.18	1378	1.22	2.97
	40.4	39.2	156.7	248115	340.80	1374	1.23	2.97
	40.6	39.3	156.9	250100	343.52	1374	1.20	2.87
4%	40.2	39.2	156.4	246572	340.18	1380	1.37	3.34
	40.3	39.1	156.2	246129	338.60	1376	1.34	3.26
	40.1	38.9	156.3	243811	334.15	1371	1.17	2.89
2%	40.0	39.0	155.9	243067	338.04	1391	1.12	2.78
	39.7	38.9	155.7	240539	332.08	1381	1.28	3.23
	39.9	39.0	156.0	242755	336.78	1387	1.23	3.06
Patrón	40.9	39.3	156.0	250084	341.35	1365	1.21	2.85
	40.2	39.0	156.2	244854	335.83	1372	1.08	2.65
	40.0	39.1	156.0	243804	335.85	1378	0.99	2.45

Tabla 10: Resultado de resistencia a la compresión 7 días

Concentración de cáñamo	Diámetro	Altura	Volumen	Masa	Densidad	Sección de ensayo	Carga máxima	Tensión rotura
	mm	mm	mm ³	g	kg/m ³	mm ²	KN	MPa
6%	74.5	151.9	661671	880.83	1331	4350	4.73	1.09
	74.5	150.4	655135	873.04	1333	4350	5.51	1.27
	74.4	151.5	659127	877.39	1331	4343	5.33	1.23
4%	74.2	150.9	652138	900.22	1380	4315	8.52	1.97
	74.0	149.6	643145	888.88	1382	4291	8.66	2.02
	73.7	149.5	638030	896.22	1405	4259	7.39	1.74
2%	74.3	148.6	643690	882.40	1371	4323	6.27	1.45
	74.1	149.0	641864	889.73	1386	4299	9.09	2.11
	73.6	148.8	633925	889.86	1404	4252	8.61	2.02
Patrón	74.0	149.6	642409	875.64	1363	4288	7.30	1.70
	74.3	149.6	648502	883.20	1362	4327	8.18	1.89
	74.1	148.6	640833	879.64	1373	4304	11.33	2.63

Tabla 11: Resultado de resistencia a la compresión 28 días

Concentración de cáñamo	diámetro	Altura	Volumen	Masa	Densidad	Sección de ensayo	Carga máxima	Tensión rotura
	mm	mm	mm ³	g	kg/m ³	mm ²	KN	MPa
6%	74.7	149.0	652220	873.88	1340	4370	7.84	1.79
	74.4	149.8	650898	873.52	1342	4336	8.45	1.95
	74.3	150.0	650150	876.18	1348	4327	8.04	1.86
4%	73.8	148.7	635393	870.86	1371	4265	9.71	2.28
	74.0	148.6	638327	874.93	1371	4287	11.24	2.62
	74.0	147.8	635621	865.21	1361	4294	10.02	2.33
2%	73.9	149.1	638876	868.84	1360	4279	10.74	2.51
	73.7	148.5	633785	872.40	1376	4259	11.78	2.77
	73.1	151.5	636431	877.35	1379	4193	6.99	1.67
Patrón	74.2	150.5	650517	881.65	1355	4315	17.19	3.98
	74.2	149.9	647486	874.82	1351	4311	8.34	1.93
	74.4	149.4	650122	877.66	1350	4344	14.41	3.32

Tabla 12: Resultado de resistencia a la compresión prismas rotos 7 días

Concentración de cáñamo	Cara a1	Cara a2	Cara b1	Cara b2	Carga máxima	Sección de ensayo	Tensión rotura
	mm	mm	mm	mm	KN	mm ²	MPa
6%	39.4	40	39.4	40	2.85	1576	1.81
	39.4	40	39.4	40	2.83	1576	1.80
	39.3	40	39.3	40	2.78	1572	1.77
	39.3	40	39.3	40	2.72	1572	1.73
4%	39.1	40	39.1	40	3.52	1564	2.25
	39.1	40	39.1	40	3.90	1564	2.49
	39.4	40	39.4	40	3.35	1576	2.13
	39.4	40	39.4	40	2.99	1576	1.90
2%	39.2	40	39.2	40	4.68	1568	2.98
	39.2	40	39.2	40	4.64	1568	2.96
	38.9	40	38.9	40	4.94	1556	3.17
	38.9	40	38.9	40	4.93	1556	3.17
REF	40.1	40	40.1	40	4.83	1604	3.01
	40.1	40	40.1	40	6.32	1604	3.94
	40.2	40	40.2	40	5.01	1608	3.12
	40.2	40	40.2	40	6.53	1608	4.06

Tabla 13: Resultado de resistencia a la compresión prismas rotos 28 días

Concentración de cáñamo	Cara a1	Cara a2	Cara b1	Cara b2	Carga máxima	Sección de ensayo	Tensión rotura
	mm	mm	mm	mm	KN	mm ²	MPa
6%	39.3	40	39.3	40	5.14	1572	3.27
	39.3	40	39.3	40	4.43	1572	2.82
	39.3	40	39.3	40	5.24	1572	3.33
	39.3	40	39.3	40	4.99	1572	3.17
4%	39.2	40	39.2	40	5.77	1569	3.68
	39.2	40	39.2	40	5.66	1569	3.61
	38.9	40	38.9	40	6.15	1556	3.95
	38.9	40	38.9	40	4.75	1556	3.05
2%	38.9	40	38.9	40	4.84	1557	3.11
	38.9	40	38.9	40	5.52	1557	3.55
	39.0	40	39.0	40	5.24	1561	3.36
	39.0	40	39.0	40	5.31	1561	3.40
REF	39.3	40	39.3	40	9.71	1570	6.18
	39.3	40	39.3	40	10.72	1570	6.83
	39.0	40	39.0	40	10.46	1559	6.71
	39.0	40	39.0	40	10.70	1559	6.86

Tabla 14: Resultado de resistencia a la flexión 400°C

Concentración de cáñamo	Altura	Base	Largo	Volumen	Masa	Densidad	Carga máxima	Resistencia a la Flexión
	mm	mm	mm	mm ³	g	kg/m ³	KN	MPa
6%	40.1	39.2	156.5	246005	324.10	1317	0.88	2.16
	39.6	39.4	156.4	243898	322.30	1321	0.67	1.68
	40.0	39.8	156.6	248996	324.04	1301	0.98	2.38
4%	39.5	38.6	155.5	236960	323.53	1365	0.61	1.57
	39.8	38.7	155.1	239141	324.32	1356	0.53	1.33
	40.2	39.0	155.8	244483	325.77	1332	0.99	2.43
2%	39.3	38.8	155.9	237646	329.26	1386	0.79	2.04
	39.1	38.9	155.3	235665	327.19	1388	0.86	2.24
	39.5	39.1	155.7	239859	330.38	1377	0.85	2.16
Patrón	40.2	38.9	156.1	244194	330.35	1353	0.60	1.47
	39.5	39.1	156.1	240506	326.64	1358	0.67	1.70
	39.7	39.0	156.3	241755	328.47	1359	0.99	2.49

Tabla 15: Resultado de resistencia a la compresión de prismas rotos 400°C

Concentración de cáñamo	Cara a1	Cara a2	Cara b1	Cara b2	Carga máxima	Sección de ensayo	Tensión rotura
	mm	mm	mm	mm	KN	mm ²	MPa
6%	39.4	40	39.4	40	3.18	1576	2.02
	39.4	40	39.4	40	2.88	1576	1.83
	39.8	40	39.8	40	3.04	1592	1.91
	39.8	40	39.8	40	2.61	1592	1.64
4%	38.6	40	38.6	40	3.83	1546	2.48
	38.6	40	38.6	40	4.38	1546	2.83
	38.7	40	38.7	40	4.16	1550	2.68
	38.7	40	38.7	40	4.21	1550	2.72
2%	38.8	40	38.8	40	3.83	1552	2.47
	38.8	40	38.8	40	3.97	1552	2.56
	39.1	40	39.1	40	4.06	1562	2.60
	39.1	40	39.1	40	3.68	1562	2.36
REF	38.9	40	38.9	40	4.71	1556	3.03
	38.9	40	38.9	40	3.75	1556	2.41
	39.0	40	39.0	40	5.27	1560	3.38
	39.0	40	39.0	40	4.99	1560	3.20

Anexo B. Resultados de muestras

Ensayo de flexión



Figura 42: Prueba de flexión de muestra de concreto con 2% de cáñamo



Figura 43: Prueba de flexión de muestra de concreto con 4% de cáñamo

Ensayo de compresión



Figura 44: Prueba de compresión de muestra de concreto con 2%, 4% y 6% de cáñamo

Ensayo de compresión prismas rotos



Figura 45: Prueba de compresión de prisma roto de muestra de concreto con 2% de cáñamo



Figura 46: Prueba de compresión de prisma roto de muestra de concreto con 4% de cáñamo



Figura 47: Prueba de compresión de prisma roto de muestra de concreto con 6% de cáñamo

Ensayo flexión y compresión 400°C



Figura 48: Pruebas de flexión y compresión tras exposición a 400°C de muestra patrón



Figura 49: Pruebas de flexión y compresión tras exposición a 400°C de muestra de concreto con 2% de cáñamo



Figura 50: Pruebas de flexión y compresión tras exposición a 400°C de muestra de concreto con 4% de cáñamo

Anexo C. Resultados conductividad térmica

Tabla 16: Resultados conductividad térmica

Edad probeta	Porcentaje de cáñamo (%)	Conductividad térmica (W/m*K)
7 días	6	0.19
		0.16
	4	0.14
		0.21
	2	0.23
		0.17
	Patrón	0.16
		0.2
28 días	6	0.19
		0.21
	4	0.17
		0.27
	2	0.16
		0.23
	Patrón	0.17
		0.23

Anexo D. Caracterización química EDS

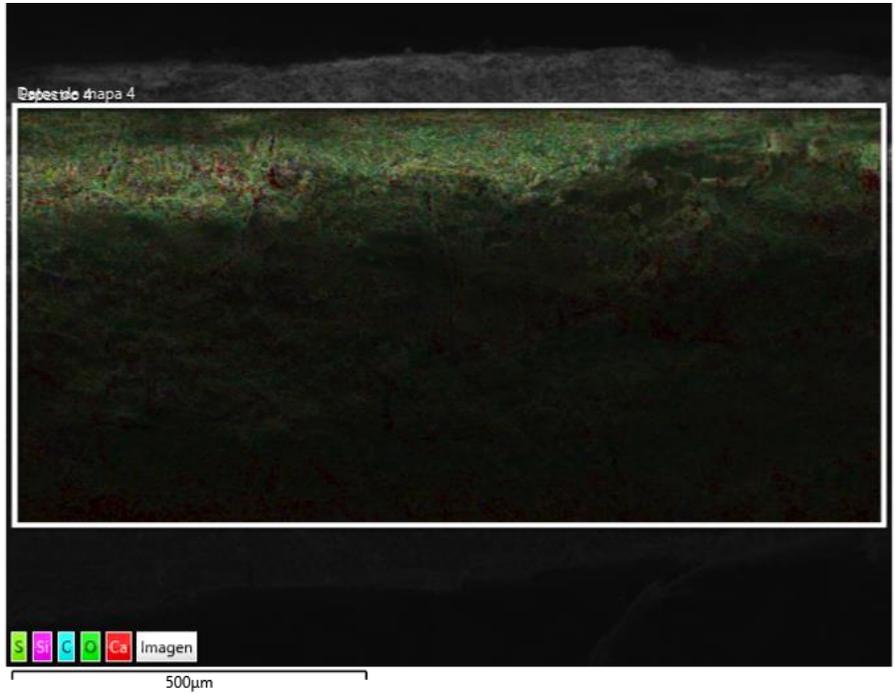
El análisis del espectrómetro de dispersión de energía (EDS) se realizó en tres muestras diferentes de concreto de cal de cáñamo que contenían 2%, 4% y 6% de cáñamo, respectivamente. Se encontró que la concentración en peso de elementos como oxígeno, calcio, silicio y aluminio era mayor en todas las muestras de concreto de cáñamo en comparación con el concreto de cal tradicional. El análisis EDS también identificó la presencia de hidrato de silicato de calcio en las muestras de concreto de cáñamo. La composición elemental se proporciona en la Tabla 17.

Tabla 17: Concentración elemental en especímenes de concreto de cáñamo

2% cáñamo		4% cáñamo		6% cáñamo	
Elemento	% atómico	Elemento	% atómico	Elemento	% atómico
O	51,35	O	57,95	O	55,70
Ca	5,13	Ca	7,52	Ca	4,07
C	42,17	C	32,44	C	38,5
Si	0,58	Si	1,03	Si	0,82
Al	0,31	AL	0,36	AL	0,34
K	0,07	K	0,10	K	0,06
Mg	0,10	Mg	0,14	Mg	0,18
S	0,29	S	0,46	S	0,32
Total	100	-	100	-	100

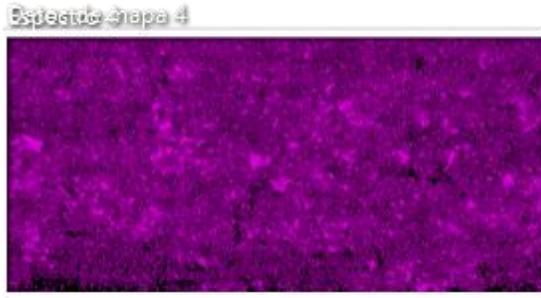
La alta presencia de elementos como calcio, silicio y aluminio, además del contenido orgánico de las fibras de cáñamo, contribuye a las propiedades mecánicas únicas del concreto de cáñamo. Se encontró que el aumento en el contenido de cáñamo en las muestras de concreto aumenta la concentración en peso de C, Si y Mg, mientras que disminuye la concentración en peso de Ca.

El análisis de la composición química de las muestras de concreto de cáñamo revela la alta presencia de elementos como C, Ca, Si y Al, lo que mejora las características de unión del concreto. Estos hallazgos pueden ser útiles en el desarrollo de concreto de fibra de cáñamo.



Si K α 1

Ca K α 1



500µm

500µm

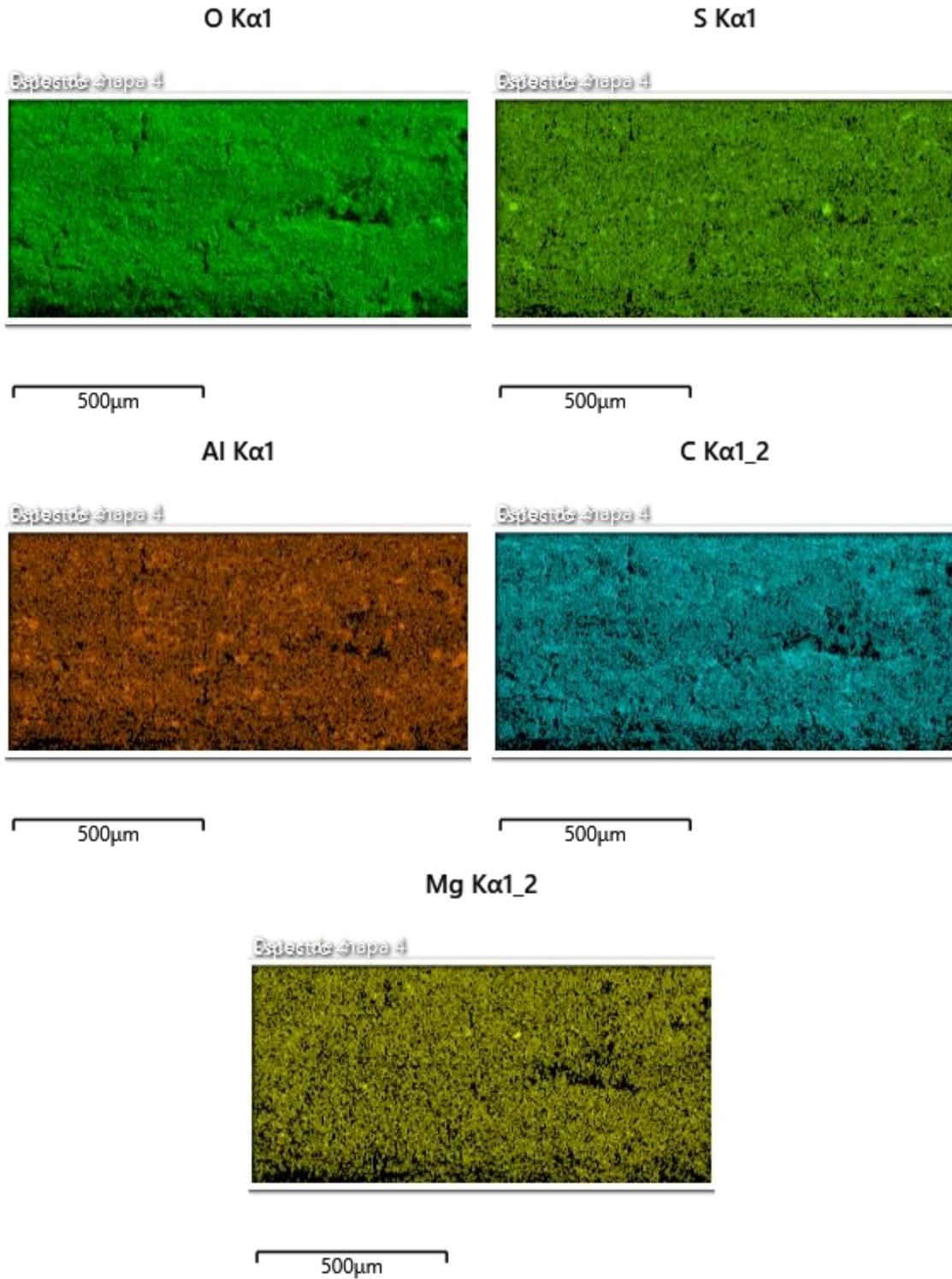
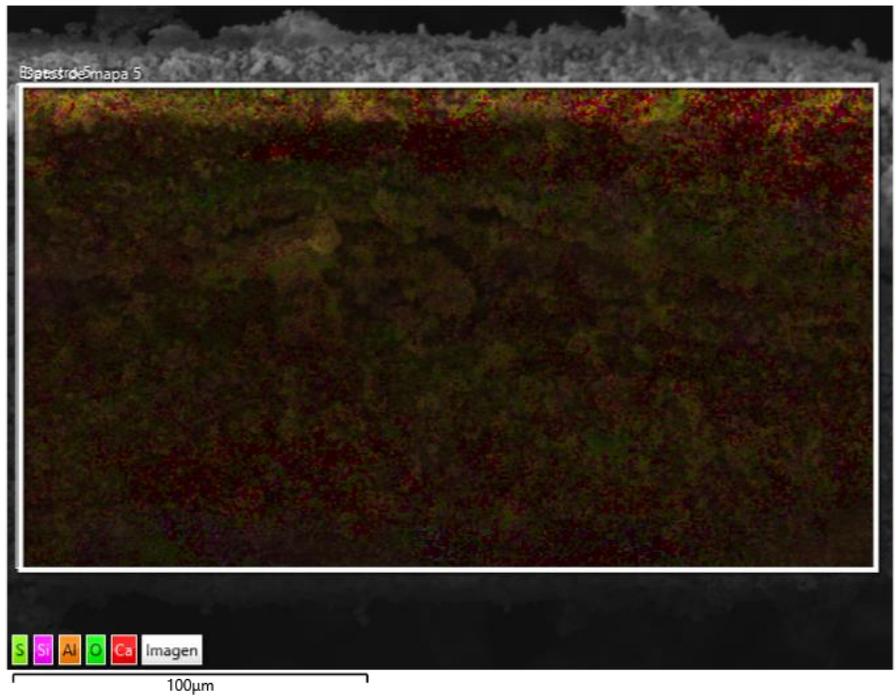
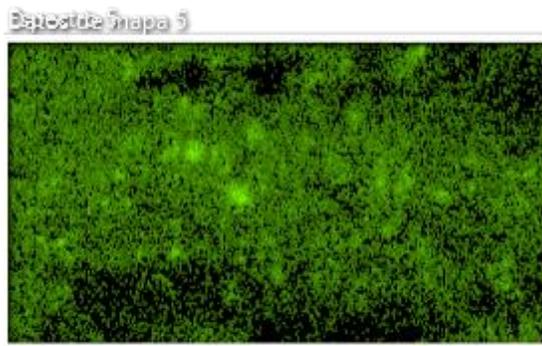


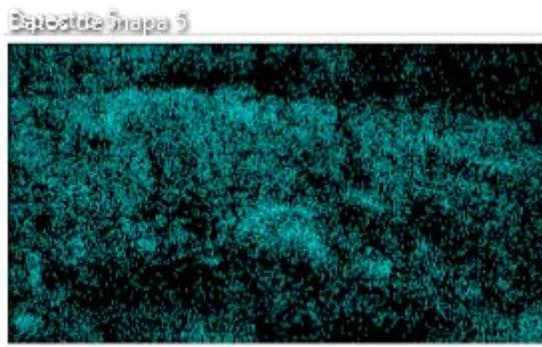
Figura 51: Mapeo elemental EDS de la adhesión de la cal a la fibra de cáñamo (muestra de concreto con 2% cáñamo)



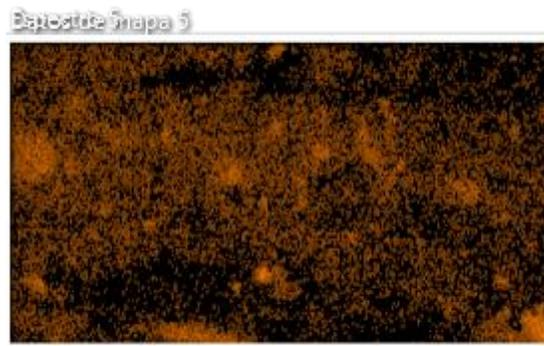
S Kα1



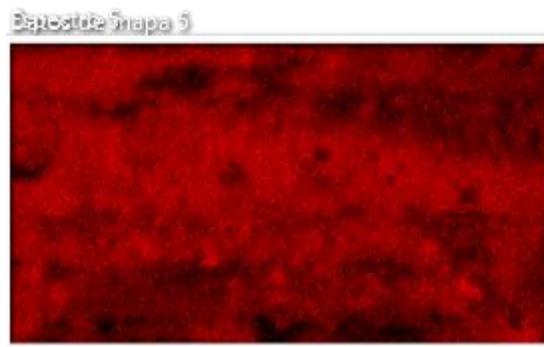
C Kα1_2



Al Kα1



Ca Kα1



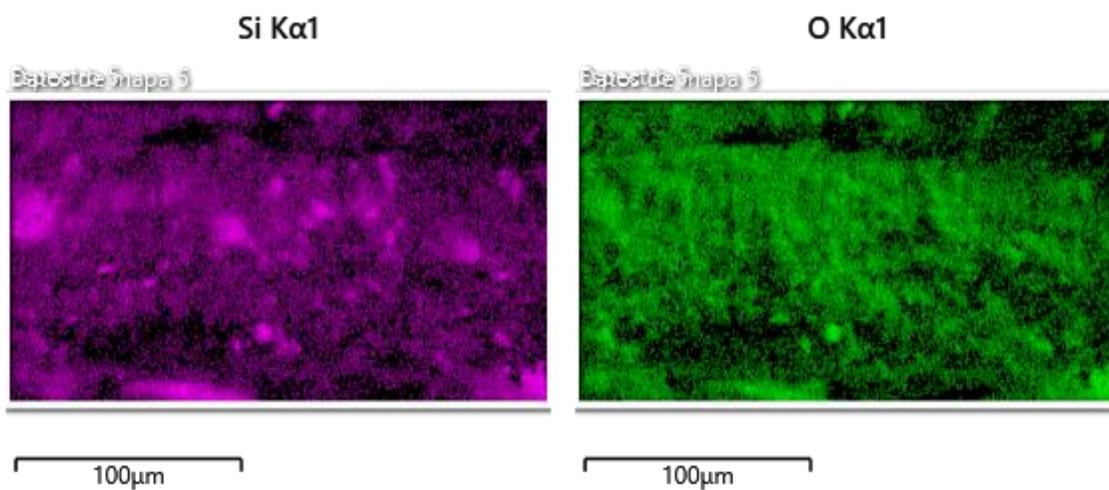


Figura 52: Mapeo elemental EDS de la adhesión de la cal a la fibra de cáñamo (muestra de concreto con 4% cáñamo)

Proceso de publicación en revista científica

✕ Close Re: Regarding Manuscript SREP-23-00632 (Experimental investigation on the physical, microstructural, and mechanical properties of Hemp limecrete)

Dear Dr Avudaiappan,

I hope this email finds you well.

Many thanks for submitting your manuscript for consideration at Scientific Reports as part of the "Natural fibers" Guest Edited Collection. Could you please let us know how you learnt about the Collection? At Scientific Reports, we always strive to enhance the experience of our authors, and as such we are really interested in how you came to know about this Guest Edited Collection and then chose to submit your paper for consideration.

At this stage we can confirm that your manuscript SREP-23-00632 entitled "Experimental investigation on the physical, microstructural, and mechanical properties of Hemp limecrete" will indeed be considered as part of the Collection. If your paper is eventually accepted, it will be published online as soon as it is ready with no additional time required at the production stage. When enough Collection papers are published, we build the Collection itself around them on the same day as the Editorial article from the Guest Editor is published.

I look forward to hearing from you regarding how you learnt about the Collection.

Kind regards,

Scientific Reports' Collections Team

Scientific Reports
4 Crinan Street
London N1 9XW
E-mail: scirep.collection@springernature.com

This email has been sent through the Springer Nature Tracking System NY-610A-NPG&MTS