

**INFLUÊNCIA DA CARBOXIMETILCELULOSE NA INTERAÇÃO ENTRE FIBRAS DE  
*CANNABIS SATIVA L.* E UMA MATRIZ À BASE DE CAL-METACAULIM**

**INFLUENCE OF CARBOXYMETHYLCELLULOSE ON THE INTERACTION BETWEEN  
FIBERS OF *CANNABIS SATIVA L.* AND A LIME-METAKAOLIN BASED MATRIX**

**INFLUENCIA DE LA CARBOXIMETILCELULOSA EN LA INTERACCIÓN ENTRE LAS  
FIBRAS DE *CANNABIS SATIVA L.* Y UNA MATRIZ A BASE DE CAL Y METACAOLÍN**

 <https://doi.org/10.56238/arev7n11-003>

**Data de submissão:** 04/10/2025

**Data de publicação:** 04/11/2025

**Vinícius Gantus de Oliveira Teixeira**

Mestre em Ciência dos Materiais

Instituição: Universidade Federal do Vale do São Francisco

E-mail: vinigantus@gmail.com

**Nelson Cárdenas Olivier**

Doutor em Engenharia Mecânica

Instituição: Universidade Federal do Vale do São Francisco

E-mail: nelson.cardenas@univasf.edu.br

**Márcio Rodrigo de Araújo Souza**

Doutor em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Federal da Paraíba

E-mail: marciosouza@cear.ufpb.br

**Erlon Rabelo Cordeiro**

Doutor em Engenharia Industrial

Instituição: Universidade Federal do Vale do São Francisco

E-mail: erlon.cordeiro@univasf.edu.br

---

**RESUMO**

O concreto de cânhamo é um material de baixo carbono incorporado, que usa fibras de Cannabis Sativa L. em um ligante a base de cal e pozolana, o que tem atraído grande interesse devido suas propriedades higrotérmicas e acústicas, com principal limitação de baixas propriedades mecânicas. Duas abordagens foram empregadas para aprimorar as propriedades mecânicas do material. A primeira se concentrou na Zona de Transição Interfacial (ZTI) usando Carboximetilcelulose (CMC). A segunda abordagem focou na melhoria da resistência à compressão, por meio da incorporação de um suporte estrutural no interior dos corpos de prova. Análises no MEV mostraram que teores de 1 gCMC/IH<sub>2</sub>O apresentou melhorias na ZTI. O suporte influenciou diretamente a resistência à compressão, resultando em 1,85 MPa de tensão, enquanto o módulo de elasticidade permaneceu em 36 MPa. Além disso, o centro mais interno do corpo de prova exibiu um aglutinante não endurecido.

**Palavras-chave:** Éter de Celulose. Concreto de Cânhamo. Resistência à Compressão. Zona de Transição Interfacial.

## ABSTRACT

Hemp concrete is a low-carbon embedded material that utilizes fibers from Cannabis Sativa L. in a binder based on lime and pozzolan. It has attracted significant interest due to its hygrothermal and acoustic properties, with the main disadvantage being its low mechanical properties. Two approaches were employed to enhance the material's mechanical properties. The first focused on the Interfacial Transition Zone (ITZ) using Carboxymethylcellulose (CMC). The second approach aimed to enhance compressive strength by incorporating a structural support within the test specimens. Scanning Electron Microscopy (SEM) analyses revealed that CMC contents of 1 gCMC/lH<sub>2</sub>O exhibited improvements in the Interfacial Transition Zone (ITZ). The support directly influenced compressive strength, resulting in 1.85 MPa, while the modulus of elasticity remained at 36 MPa. Additionally, the innermost center of the specimen exhibited unhardened binder.

**Keywords:** Cellulose Ether. Compressive Strength. Hemp Concrete. Interfacial Transition Zone.

## RESUMEN

El hormigón de cáñamo es un material con bajas emisiones de carbono que utiliza fibras de Cannabis sativa L. en un aglomerante a base de cal y puzolana. Ha despertado un gran interés debido a sus propiedades higrotérmicas y acústicas, siendo su principal limitación sus bajas propiedades mecánicas. Se emplearon dos enfoques para mejorar las propiedades mecánicas del material. El primero se centró en la Zona de Transición Interfacial (ZTI) mediante el uso de carboximetilcelulosa (CMC). El segundo enfoque se centró en mejorar la resistencia a la compresión incorporando un soporte estructural dentro de las probetas. Los análisis SEM mostraron que un contenido de 1 g de CMC/1 H<sub>2</sub>O mejoró la ZTI. El soporte influyó directamente en la resistencia a la compresión, resultando en una resistencia a la tracción de 1,85 MPa, mientras que el módulo de elasticidad se mantuvo en 36 MPa. Además, la zona central de la probeta presentaba un aglomerante sin endurecer.

**Palabras clave:** Éter de Celulosa. Hormigón de Cáñamo. Resistencia a la Compresión. Zona de Transición Interfacial.

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de fibras vegetais em materiais compósitos apresenta uma alternativa promissora com impacto ambiental reduzido, particularmente à luz dos esforços para diminuir a dependência de fibras sintéticas (Mohanty et al., 2005). Os resíduos lignocelulósicos da produção agrícola podem ser aproveitados na criação de materiais compósitos versáteis com potenciais aplicações na construção civil, o que pode ajudar a reduzir o consumo de outros recursos naturais, como a madeira (Karade, 2010). A incorporação de fibras vegetais lignocelulósicas em materiais de construção pode também valorizar estas fibras, apoiando a sua produção localizada em pequena ou média escala e promovendo a economia circular. Segundo as Nações Unidas (Global Alliance for Building and Construction, 2020), o desenvolvimento e utilização de materiais de construção de baixo carbono é uma diretriz a seguir na indústria da construção, ajudando a reduzir as emissões ligadas ao setor, que já representam 38% das emissões relacionadas com a energia, cujos materiais de construção que mais contribuem para este problema são o aço, o cimento e o vidro.

O concreto de cânhamo é um material de construção com baixo teor de carbono que surgiu na década de 1990 na França. Possui alto potencial de aplicação na indústria da construção civil e pode ser utilizado em paredes, pisos, tetos e revestimentos (Magwood, 2016), (Evrard, 2008), (Evrard & De Herde, 2005). De acordo com Seng et al. (2019), a secagem rápida de blocos pré-fabricados de concreto de cânhamo atende às demandas da construção contemporânea, e sua disseminação pela Europa e América do Norte aumentou o interesse na produção em escala industrial desses blocos (Arrigoni et al., 2017).

A natureza porosa e hidrofílica das fibras vegetais promove alta absorção de água durante a fabricação dos compósitos, levando a uma Zona de Transição Interfacial (ZTI) mais porosa devido ao gradiente de água resultante da presença do agregado vegetal (Savastano & Agopyan, 1999). Este comportamento cria um problema de competição por água entre a absorção pelas partículas e a água necessária para a coesão e hidratação do ligante hidráulico e/ou pozolânico (Nozahic, 2012). Para contornar ou reduzir problemas associados aos agregados, a pesquisa em materiais compósitos ao longo dos anos concentrou-se em tratamentos aplicados às fibras para melhorar a interação e adesão entre as fases de fibra e matriz. Estes tratamentos são geralmente químicos (Nozahic & Amziane, 2012), (Stevulova et al., 2014), (Adam et al., 2022), ou térmica (Karam et al., 2021).

Poucos estudos foram realizados sobre a influência dos éteres de celulose na adesão entre agregado e matriz. Hayakawa & Soshiroda (1986) relatou que a metilcelulose aumentou a resistência de adesão entre o concreto à base de cimento e seus agregados. O uso de polímeros solúveis, como a Hidroxietilcelulose (HEC), um tipo de éter de celulose, foi empregado para reduzir problemas

associados aos agregados vegetais. Em pesquisa realizada por Nozahic (2012), utilizou-se um ligante composto por 80% de pozolana e 20% de cal hidratada. A presença de HEC reduziu o gradiente de porosidade na ZTI e aumentou a resistência à compressão de compósitos à base de cal e metacaulim reforçados com fibras lignocelulósicas de cânhamo, quando ensaiados perpendicularmente à direção de compactação, condição em que as forças interfaciais são mais intensas (Amziane et al., 2015). A influência do éter de celulose no compósito pode ser compreendida, segundo Nozahic (2012), considerando a relação estabelecida por Washburn, que correlaciona a altura de ascensão capilar,  $h_L$ , com a raiz quadrada do tempo. Essa relação é observada quando um líquido está em contato com um substrato poroso, onde se manifestam forças capilares, levando à absorção pelo substrato, como as fibras lignocelulósicas. Consequentemente, o fenômeno de absorção de água pelo agregado vegetal é significativamente afetado pela viscosidade. Essa relação é descrita pela seguinte equação:

$$h_L^2 = \frac{r\gamma_L \cos\theta}{2\mu} \cdot t \quad (1)$$

Aqui,  $\mu$  representa a viscosidade dinâmica [Pa·s],  $r$  é o raio do poro capilar [m],  $\gamma_L$  denota a tensão superficial do meio líquido em contato com o gás circundante [N/m<sup>2</sup>],  $\theta$  é o contato ângulo entre o líquido e a superfície porosa do agregado, e  $t$  representa o tempo.

Alguns éteres de celulose têm a capacidade de afetar a morfologia dos cristais de Ca(OH)<sub>2</sub>, conforme relatado por Knapen & Van Gemert (2009). A carboximetilcelulose (CMC) demonstrou efeito sinérgico com ligantes à base de cal e metacaulim, regulando a transição de fase de compostos hidratados e contribuindo para a estabilização da resistência a longo prazo de argamassas à base de cal e metacaulim (Liu et al., 2020). A quimissorção de CMC pela cal leva a alterações na morfologia e tamanho dos cristais de CaCO<sub>3</sub>, na concentração de 600 mL/g, e o CMC aumenta o número de sítios de nucleação de cristais de calcita (Liu et al., 2016).

O objetivo deste estudo é analisar a influência do CMC como agente intensificador de viscosidade na interação entre partículas lignocelulósicas de cannabis e ligantes minerais à base de cal e metacaulim, reduzindo a capacidade do agregado vegetal de absorver e liberar água nesse meio. Dado que a hidroxietilcelulose (HEC) e a hidroxipropilmelcelulose (HPMC) são aditivos caros no mercado interno brasileiro, alternativas mais baratas como o CMC, se comprovadamente eficazes, poderiam oferecer uma opção mais econômica.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 MATERIAIS E PROPORÇÃO DE MISTURA

As fibras de Cannabis Sativa L. foram coletadas e doadas pela Polícia Federal do Brasil, resultantes de apreensões em plantios ilegais em município do estado da Bahia-Brasil (Latitude: 08° 59' 25" S e Longitude: 39° 54' 34 "W, em fevereiro de 2018). Os estudos foram autorizados pela Justiça Federal do Brasil (Número ALE.Pje.0017.0001/2016), Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA (Número 016/2016) e Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e do Conhecimento Tradicional Associado - SISGEN (Número AC1D0D9). A identificação da amostra foi confirmada pelo Herbário do Vale do São Francisco (HVASF), em comparação com o depósito sob o código 23.331, da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF).

A cal hidratada usada foi do tipo I, obtida em loja comercial da cidade de Juazeiro-BA. O metacaulim foi adquirido por meio de uma amostra grátis cedida pela empresa Metacaulim do Brasil®, o Metacaulim HP ULTRA. Os dados fornecidos pela fabricante informam um diâmetro de 44 µm, área superficial específica BET de 17 m<sup>2</sup>/g e composição sendo 57,9% de SiO<sub>2</sub>, 34,1% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1,6% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1,6% de K<sub>2</sub>O, 1,2% de TiO<sub>2</sub>, 0,4% de MgO e 0,3% de CaO. O éter de celulose usado foi uma carboximetilcelulose de sal sódico da marca Dinâmica®. Para confecção do suporte estrutural usado foram usadas as próprias fibras aglutinadas com resina epóxi de baixa viscosidade da marca Redlease®.

As formulações tanto para o ligante puro, de cal e metacaulim, assim como os compósitos, são escritas usando um ID, cujos dígitos informam a % mássica do constituinte que é denominado por uma letra após o dígito, sendo ‘C’ para cal hidratada, ‘M’ para metacaulim, e ‘A’, quando presente, denomina o aditivo carboximetilcelulose em gramas/litro de água (gCMC/lH<sub>2</sub>O). Por exemplo, 25C75M5A, informa 25% de cal, 75% de metacaulim e 5 gCMC/lH<sub>2</sub>O. Foi variado tanto o metacaulim (25%, 50% e 75%), como também a dosagem de CMC (5 gCMC/lH<sub>2</sub>O, 10 gCMC/lH<sub>2</sub>O e 20 gCMC/lH<sub>2</sub>O) no ligante puro a fim de identificar a formulação de maior resistência para ser usada na fabricação dos compósitos. Na presença da CMC, a razão em massa de água/ligante (A/L) foi de 0,9 devido a maior viscosidade, sem o uso de aditivo a relação A/L é de 0,75. A formulação aplicada nos compósitos com suporte foi uma razão mássica Cannabis/Ligante (C/L de 100g/333g = 0,3), o que corresponde a um teor mássico de fibra de aproximadamente 30%.

### 2.2 PREPARAÇÃO DOS ESPÉCIMES

O processo de fabricação dos Corpos de Provas (CP's) destinados aos ensaios de compressão usou moldes cúbicos padronizados com 50 mm de aresta, baseado na NBR 13207-3. A preparação dos

moldes constitui no revestimento com plástico filme e recobrindo-os com uma camada de vaselina para evitar aderência e fissuras excessivas dos CP's no molde. O aditivo quando usado foi solubilizado na água de mistura agitada, a solução resultante foi adicionada à cal hidratada e então misturada manualmente por 5 minutos, depois foi adicionado o metacaulim e misturado por mais 3 min (Liu et al., 2020), (Liu et al., 2016). Na ausência do aditivo, os componentes do ligante são misturados a seco antes de adicionar a água. Para ligante puro, os CP's foram fabricados em triplicatas para cada formulação.

As fibras passaram por um triturador forrageiro convencional modelo GTI-3000LM da marca Garthen®, usando uma grade com furos de 3 mm, posteriormente foram peneiradas por 15 min em 90 Hz em um peneirador eletromagnético da marca Contenco®, as peneiras eram de 2 mm, 1 mm, 600 µm, 425 µm e 150 µm. O peneirador foi usado para separar as fibras longas, já que tais fibras menos densas, não são benéficas quando usadas junto com as fibras mais densas e quebradiças do cerne lenhoso, não acarretando aumento em propriedades mecânicas e aumentando a água requerida no processo de fabricação (Brujin, 2008), (Mukherjee, 2010).

Para observação da ZTI foram produzidos espécimes com diâmetro de  $\frac{1}{2}$ ' a partir de canos de Policloreto de Vinila (PVC). As fibras foram colocadas com o auxílio de uma pinça na superfície dos moldes preenchidos previamente com o ligante, as fibras foram levemente pressionadas sem submergí-las (Chabannes et al., 2016). Amostras ficaram no molde por 4 dias e curando em temperatura ambiente não controlada variando de 25-35 °C, e Umidade Relativa (UR) variando entre 25 -55% por mais 10 dias, totalizando 14 dias de preparação nessa fase. As análises foram realizadas no Instituto de Pesquisa em Ciências dos Materiais da UNIVASF (IPCM), utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) (HITACHI®, modelo TM-1000). Antes das análises, todas as amostras foram recobertas com partículas nanométricas de ouro em uma metalizadora (Quorum®, modelo Q150R ES), dispersas em camadas a uma taxa de 10 µm/min por 12 min, totalizando uma camada com 120 µm de espessura, esse processo busca melhorar a qualidade das imagens por meio do aumento da condutividade das amostras.

Para os compósitos o processo de fabricação se inicia com o tratamento de água realizado em 100 gramas de fibras imersas em 15 litros de água por 3h e depois deixados secar em temperatura ambiente por 2 dias e armazenado em sacos plásticos em um local seco até a o dia de fabricação dos espécimes. Esse processo aumenta a compatibilidade entre agregados vegetais e ligantes minerais como cal, gesso e cimento, através da solubilização de extratos solúveis em água (Wang et al., 2021). O procedimento de fabricação dos compósitos na presença do aditivo, é similarmente modificado como

no caso do ligante puro. As fibras são o último componente a ser adicionado na mistura (Hirst, 2013), (Walker & Paiva, 2013).

O processo de fabricação do suporte estrutural é mostrado na Figura 1. Depois de cortada e lixada, as hastes possuíam diâmetro de 7,8 mm, 36,5 mm de altura, a base possuía dimensões de 48x45x5,2 mm, e a massa média total de ~13 g.

Figura 1 - Processo de fabricação do suporte estrutural. a) O molde das hastes depois de preenchido por compactação; b) Moldagem da base do suporte; c) Suporte estrutural depois de desmoldado, cortado e lixado.



Fonte: autores.

A confecção dos CP's com suporte estrutural foi efetuada primeiro colocando uma camada de material de modo a aproveitar a superfície lisa proporcionada pelo contato com o molde, depois foi posicionado o suporte, a mistura foi sendo adicionada e compactada manualmente, cujo processo é resumido na Figura 2. Foram fabricados cinco CP's, desmoldados depois de 24h e deixados por 30 dias em um ambiente com temperatura não controlada variando de 25-35 °C e UR variando de 25-55%.

Figura 2 - Posicionamento dos suportes durante a fabricação dos corpos de prova.



Fonte: autores.

### 2.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A granulometria resultante do peneiramento das fibras teve à distribuição de comprimento obtida através do software ImageJ®.

Os ensaios de compressão foram realizados no laboratório de Ensaios Mecânicos da UnivASF no campus de Juazeiro-BA, usando uma máquina universal de ensaios modelo Emic-DL 10000. A diferença de velocidade (3 a 6 mm/min) não acarretou mudanças na resposta de CP's cilíndricos de concreto de cânhamo (Cerezo, 2005), então a velocidade escolhida foi de 3 mm/min.

As equações usadas converter os valores de força e deformação retornados pela máquina de ensaios são:

$$\sigma_c = F / AS \quad (2)$$

$$\epsilon = \Delta L / L_0 \quad (3)$$

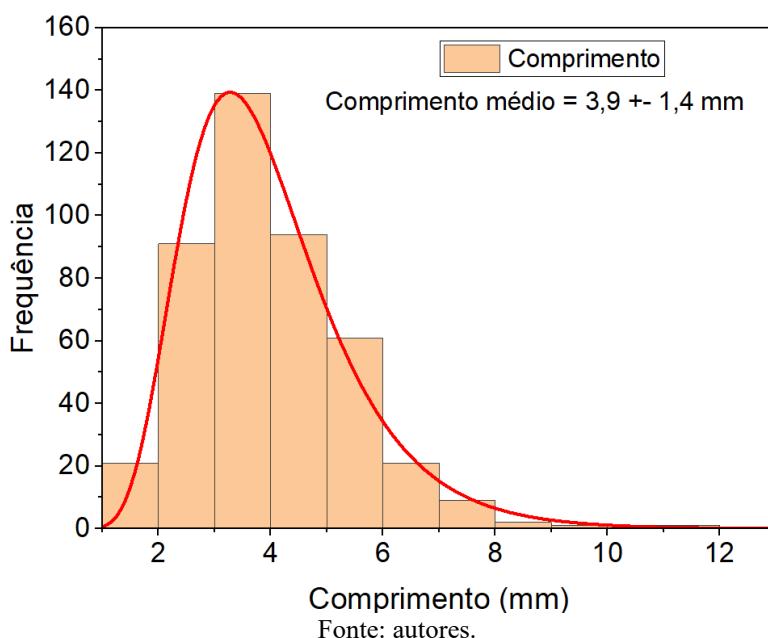
Onde  $\sigma_c$  é a tensão (MPa), F é a força aplicada (N), AS é a área de seção transversal ( $\text{mm}^2$ ),  $\epsilon$  é deformação,  $\Delta L$  (mm) é a diferença no comprimento do CP, e  $L_0$  (mm) é o comprimento inicial. O critério utilizado para extração da resistência à compressão foi introduzido por Walker et al. (2014), cuja resistência à compressão é obtida no ponto onde a curva começa a se afastar da linearidade, ou seja, no começo do platô após a região linear onde é extraído o módulo de elasticidade.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 GRANULOMETRIA

O resultado da distribuição de comprimento das fibras é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Distribuição de comprimento das fibras de cannabis peneiradas depois de serem processadas na forrageira convencional.



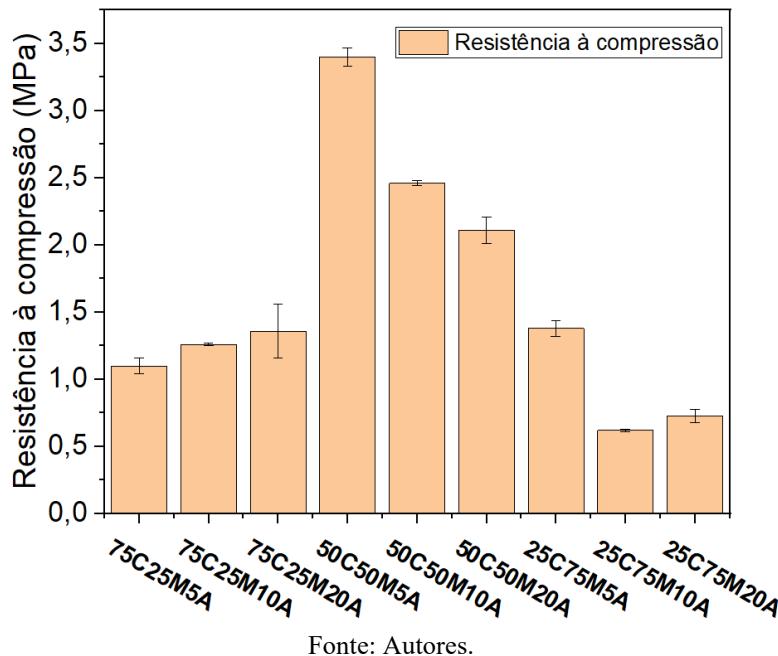
Fonte: autores.

As peneiras de 1-2 mm foram responsáveis por 90% da massa retida para fibras de cannabis, não havendo na presente pesquisa peneiras maiores que 2 mm. Nas peneiras menores a porcentagem de massa retida foi de 10% com essa granulometria mais fina em aspecto de pó sendo descartadas. Esse resultado mostra que o uso de forrageiras convencionais e um peneiramento posterior para retirar a parte mais fina e o remanescente das fibras externas, são suficientes para processar as fibras de modo atingir a granulometria estipulada pela norma francesa que trata do concreto de cânhamo. Tal norma estipula que 90% de massa deve ser retida nas peneiras de 1 – 4 mm, 5% da massa retida em peneiras menores que 1 mm e 3% no máximo em peneiras maiores que 4 mm (Hirst, 2013).

### 3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados dos ensaios de compressão no ligante puro com aditivo são mostrados na Figura 4.

Figura 4 - Resistência à compressão do ligante puro



Fonte: Autores.

Para 25% e 75% de metacaulim, os valores de resistência à compressão são similares ficando em torno 1,3 MPa, exceto para 75% de metacaulim com 10 e 20 gCMC/lH<sub>2</sub>O que apresentaram uma resistência à compressão em torno de 0,4 MPa. Para 50% e 75% de metacaulim as maiores resistências foram obtidas em baixas dosagens de CMC, com a maior resistência em 50% de metacaulim chegando a 3,5 MPa.

Para 25% de metacaulim o módulo de elasticidade foi de 102, 200 e 155 Mpa, com 5, 10 e 20 gCMC / lH<sub>2</sub>O respectivamente. Para 50% de metacaulim os módulos de elasticidade foram de 169, 155 e 151 MPa, com os respectivos teores de CMC, permanecendo em torno de 155 MPa. Para 75% de metacaulim o módulo de elasticidade foi de 137, 81 e 86 Mpa, com 5, 10 e 20 gCMC / lH<sub>2</sub>O respectivamente, tendo valores decrescentes conforme se aumentou o teor de CMC, mesma tendência observada na resistência à compressão.

Com base nos resultados, a formulação de 50% metacaulim e 50% cal hidratada com 5 gCMC/lH<sub>2</sub>O foi a composição mais adequada (de maior resistência). Essa foi a composição usada por Liu et al. (2016) utilizando areia com razão mássica de 1:2 em relação ao ligante e 10 gCMC/lH<sub>2</sub>O resultando em 0,5 MPa. Também foi reportado em outros estudos, como em Liu et al. (2018), valores de resistência à compressão para 2 e 5 gCMC/lH<sub>2</sub>O em torno de 0,4 MPa, chegando até mesmo a 14 Mpa (Liu et al., 2020) usando as mesmas formulações de estudos anteriores, entretanto no referido estudo não foi informado o motivo que levou a valores relativamente mais altos quando comparado

com estudos pregressos (Liu et al., 2016). Os CP's com suporte possuíam densidade aparente de 779 +- 16 kg/m<sup>3</sup>.

Os corpos de prova não apresentaram fratura súbita durante o ensaio, apresentando um adensamento das partículas ocasionando um aumento da tensão conforme a deformação aumenta, típico de CP's cúbicos (Walker & Paiva, 2014). Não foi possível identificar picos de tensão e o platô foi pouco pronunciado, se enquadrando nos casos em que os CP's se apresentam colapsados mesmo sem apresentar reduções de tensões (Benfratello et al., 2013), como pode ser visto na Figura 5. Esse comportamento dúctil pode ser desejado, uma vez que reduz aparecimento de trincas no material já aplicado em uma construção, mesmo não sendo tão resistente como materiais convencionais de construção.

Figura 5 - Corpos de prova momentos antes do ensaio ser parado.

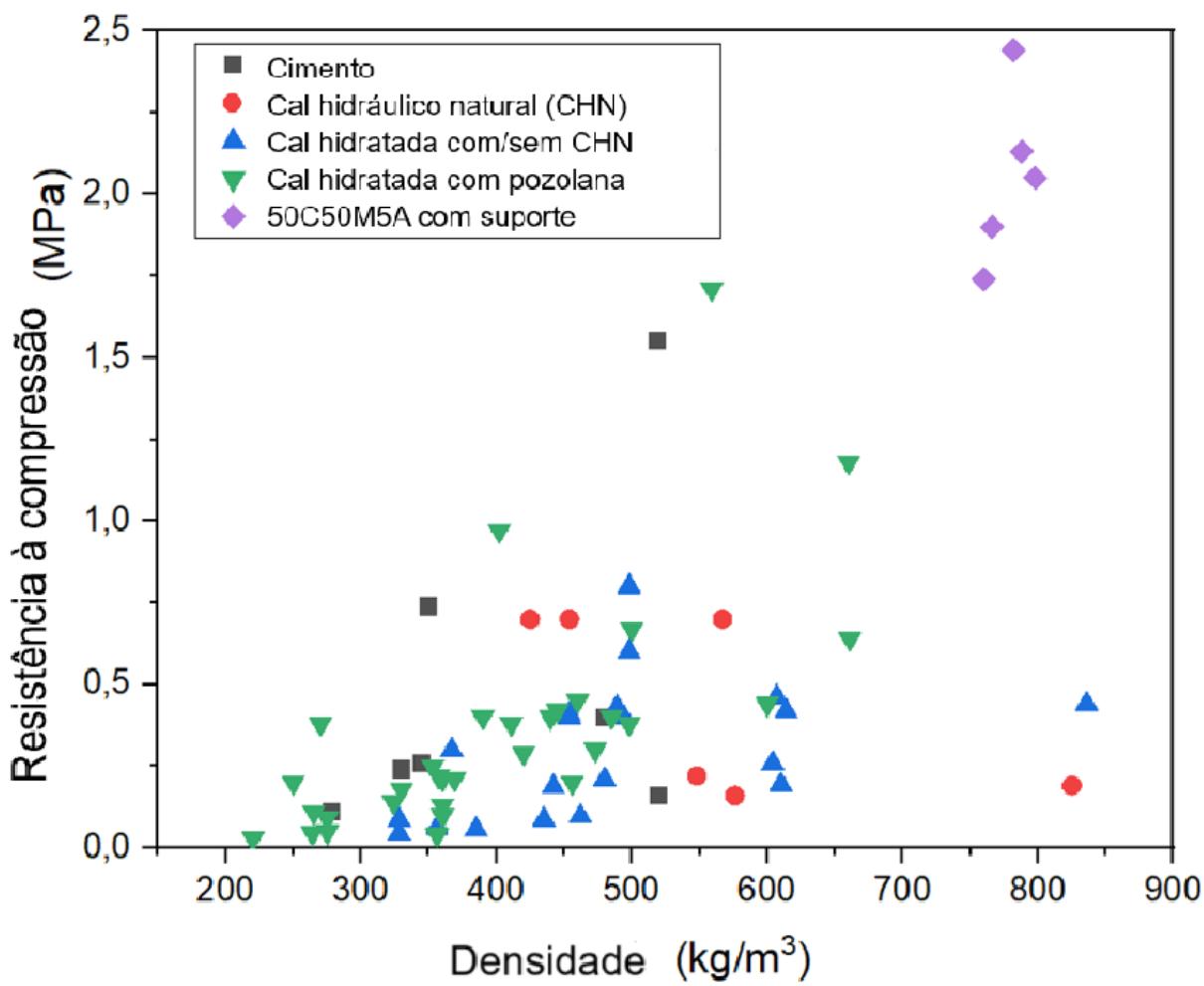


Fonte: Autores.

Curvas encontradas na literatura (Adam et al., 2022), (Benfratello et al., 2013), (Daher et al., 2023), que apresentam comportamento semelhante (sem um claro platô, ou sem um pico evidente de tensão), são encontradas porém os valores de tensão correspondente estão em torno de 0,5 MPa. O suporte parece ter contribuído somente para a resistência, não afetando o módulo de elasticidade, esse por sua vez poderia ter sido maior se a porção interna central do CP estivesse totalmente endurecida. Condições de cura em ar relativamente seco promove uma perda excessiva de água que migra do centro para a superfície e evapora (Colinart et al., 2012), essas condições de ar seco leva a carbonatação somente da superfície com o interior em aspecto de pó (Nozahic, 2012), (Cerezo, 2005), denunciando problemas de endurecimento. O segundo fator que contribui para esse problema é atribuído aos extratos solúveis e alcalinos provenientes da parede vegetal que tem efeitos negativos no endurecimento do ligante (Nozahic, 2012), (Diquélou et al, 2015), (Diquélou et al, 2015), (Sinka et al., 2015).

A resistência à compressão em função da densidade para diferentes ligantes reunidos em um gráfico é mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Mapeamento da resistência à compressão aos 28 dias em função da densidade para o concreto de cânhamo considerando diferentes ligantes.

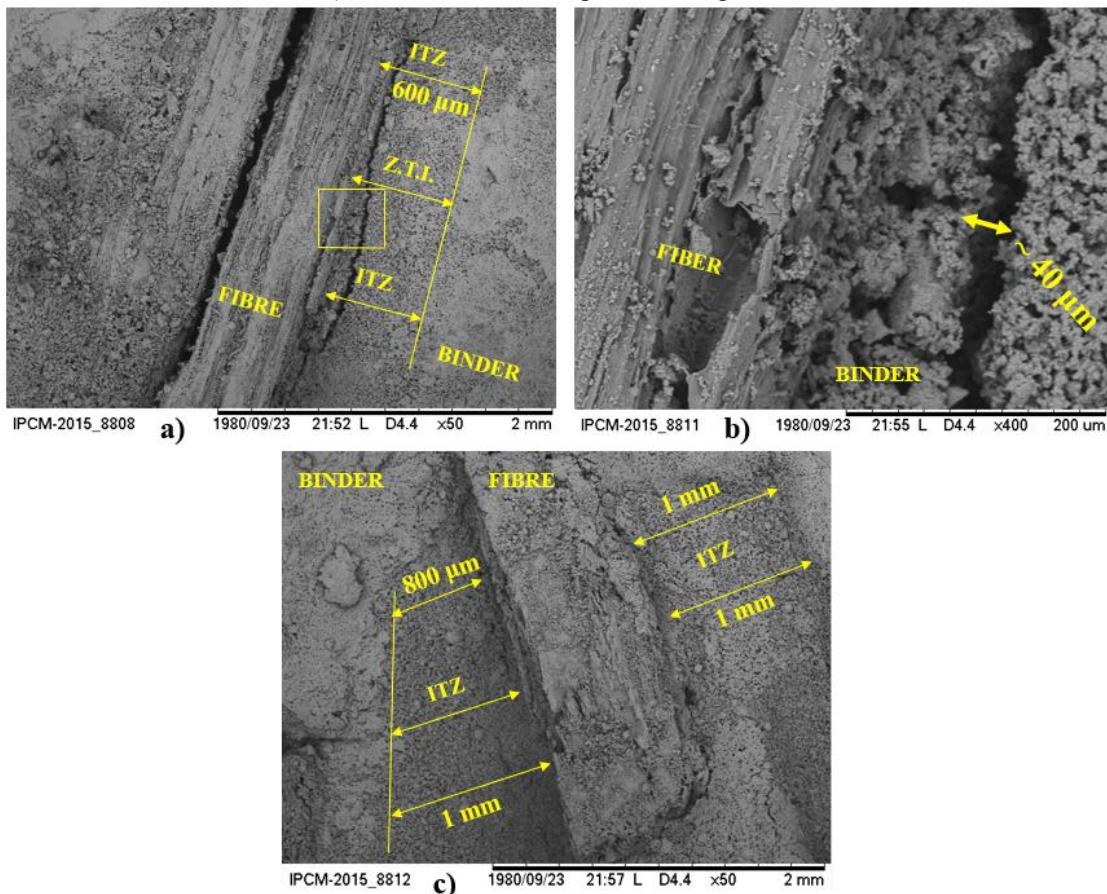


Fonte: Autores.

### 3.3 ZONA DE TRANSIÇÃO INTERFACIAL

As imagens em MEV são mostradas na Figura 77 para a formulação 50C50M.

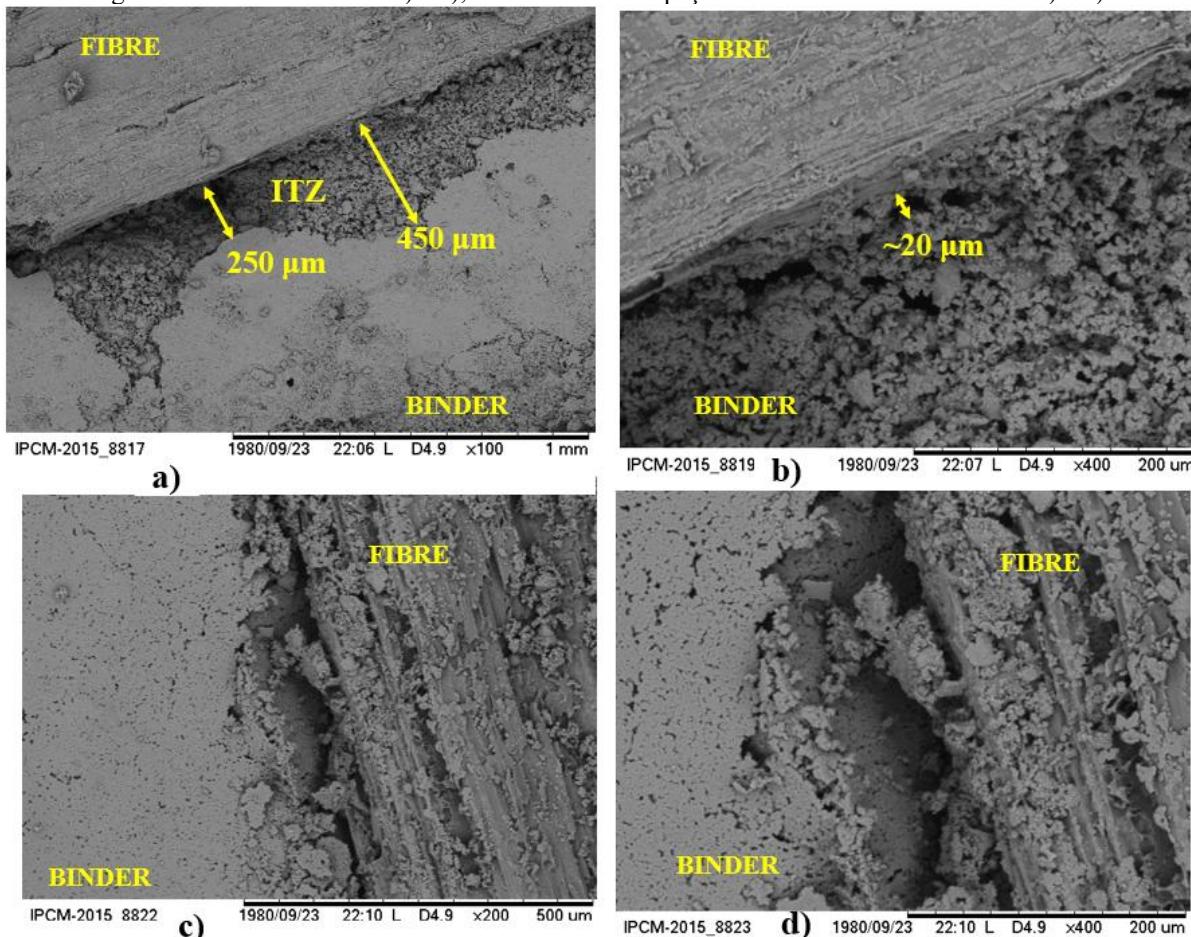
Figura 7 - ZTI mostrada em a) e c); O quadrado amarelo indica a região sob aumento dando ênfase ao espaçamento fibra matriz em b). Quadrado amarelo representa a região em aumento.



Fonte: Autores.

É possível identificar que a ZTI na Figura 7a tem aproximadamente 600  $\mu\text{m}$ , a Figura 7b mostra que o gap entre a partícula e a matriz em torno de 40  $\mu\text{m}$ . Nesse caso, é conveniente falar de uma micro-trinca, ao invés de um espaçamento, uma vez que parece haver uma porção de ligante aderida à fibra. A Figura 7c mostra uma ZTI que varia de 800  $\mu\text{m}$  a 1 mm na região esquerda e 1 mm na região direita, por outro lado os espaçamentos entre a fibra e a matriz não são significativos, sendo difícil observar a sua largura. A Figura 8 mostra os resultados para formulação com aditivo 50C50M5A.

Figura 8 - ZTI mostrada em a) e c); Ênfase dada ao espaçamento entre fibra e matriz em b) e d).

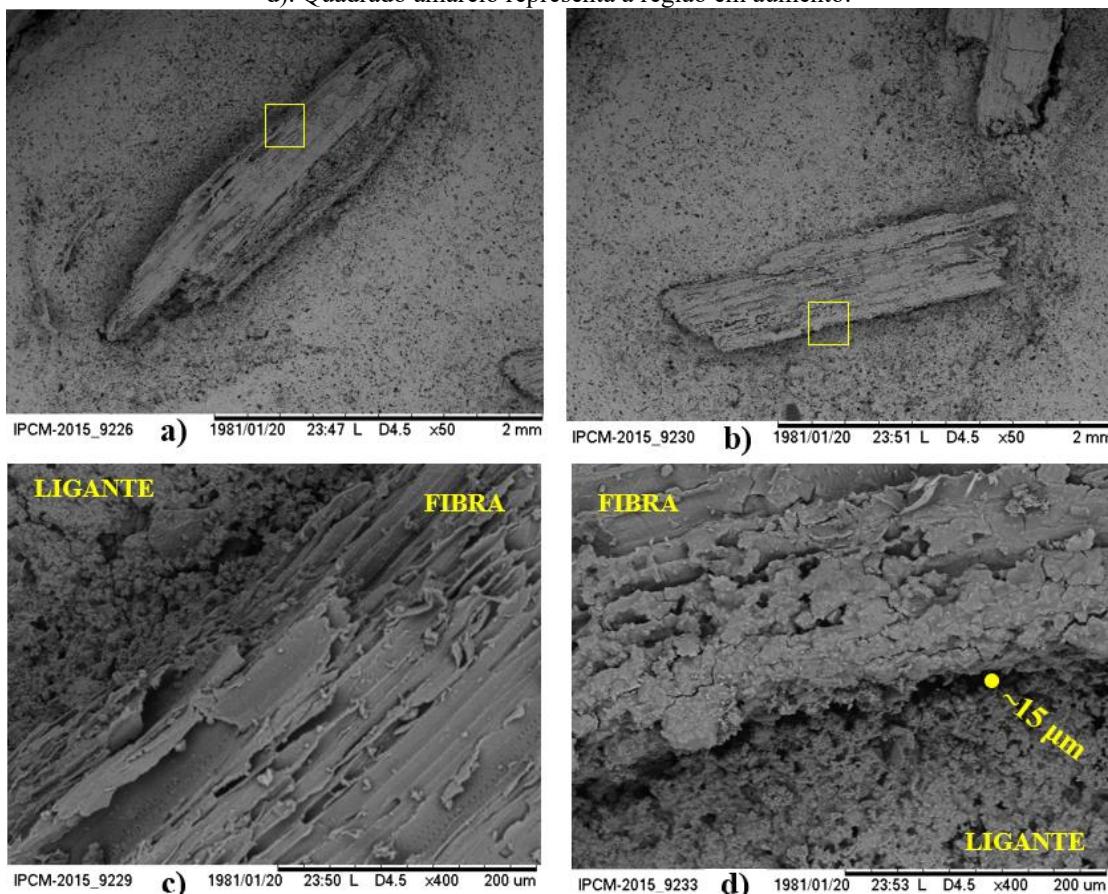


Fonte: Autores.

A Figura 8a, mostra uma ZTI que varia de 250 a 450 µm, e na Figura 8c o ligante é significativamente menos afetado, não sendo possível observar onde começa a ZTI. Também é possível identificar na Figura 8d um espaçamento entre fibra e matriz variável e que permite notar que o ligante logo abaixo da superfície, também não aparenta ter sido afetado pelo gradiente excessivo de água. Resultados similares foram obtidos em amostras com dosagens menores de 3 e 1 gCMC/lH<sub>2</sub>O.

A fim de observar a influência do gesso na ZTI com base nos resultados obtidos para a CMC, foi substituído 50% do ligante por gesso, o que promove uma maior resistência inicial, e uma menor alcalinidade do ligante, reduzindo o potencial deletério da solubilização em meio alcalino de polissacarídeos da parede vegetal (Sinka et al., 2015). Os resultados são mostrados na Figura 9.

Figura 9 - Fibra e matriz em a) e b); O quadrado amarelo representa a interface fibra-matriz ampliada mostrada em c) e d). Quadrado amarelo representa a região em aumento.



Fonte: Autores.

É possível observar na Figura 9a e Figura 9b, que a substituição de 50% do ligante por gesso teve efeito similar ao da CMC sob a ZTI quando compara-se com a Figura 8. Ainda é possível notar que o ligante entre duas partículas, visto na Figura 9b, foi levemente afetado a julgar pela coloração mais escura dessa região observada em partículas sem a presença CMC (Figura 77), sendo esse um resultado considerado positivo do ponto de vista do compósito, uma vez que altos teores de fibras promovem ZTI interconectadas, o que pode resultar em uma porosidade mais grosseira devido ao gradiente de água (Ollivier et al., 1995). A melhora na ZTI promovida pelo gesso também é positiva ao se levar em conta que para viabilizar a aplicação de compósitos reforçados com fibras lignocelulósicas na construção civil, é fundamental melhorar a ZTI sem aumentos significativos no custo de fabricação do material (Savastano & Agopyan, 1999), o gesso sendo uma matéria prima barata, atende esses requisitos. Por último, argamassas ternárias compostas por cal hidratada, metacaulim e gesso possuem potencial de substituir o cimento em algumas aplicações como fabricação de blocos para alvenaria, rebocos e preenchimento de fissuras em obras de reparo (Morsy et al., 2017), podendo ser também indicado para compósitos reforçados com fibras lignocelulósicas como no caso

do concreto de cânhamo. Entretanto o uso do gesso nas formulações empregadas na fabricação de elementos de concreto de cânhamo expostos as intempéries exigem cautela, uma vez que o gesso é mais sensível a água (Brujijn, 2008).

#### **4 CONCLUSÃO**

O uso de forrageiras convencionais seguida de um peneiramento mostrou que a granulometria resultante se adequa à norma francesa que trata sobre o concreto de cânhamo, além disso o peneiramento é útil para retirar o excesso partículas pequenas menores que 1mm que não são benéficas para o material.

A CMC não melhorou as propriedades mecânicas do ligante puro. A formulação mais indicada nesse estudo, usando-se a CMC, é 50% de cal hidratada e 50% de metacaulim, com 5 gCMC/lH<sub>2</sub>O apresentando o mesmo efeito com 1 gCMC/lH<sub>2</sub>O.

O suporte estrutural aumentou consideravelmente a resistência à compressão do compósito quando comparado com os valores obtidos pela literatura, não atuando no módulo de elasticidade devido ao ligante não ter endurecido na região mais central dos corpos de prova. Essa abordagem pode ser usada para aumentar indiretamente a resistência de blocos pré-fabricados, contornando uma das principais desvantagens do material, a baixa resistência mecânica.

Imagens em MEV mostraram que a zona transição interfacial sem a presença do éter de celulose possui uma zona de transição de até 1 mm afetada pela maior quantidade de água. A presença da carboximetilcelulose reduziu esse efeito a ponto de não ser possível identificar onde começa a zona de transição interfacial. Em todos os casos o espaçamento entre fibra e a matriz varia de alguns micrometros até 50 µm. O mesmo efeito foi observado ao se substituir 50% do ligante por gesso, evidência que contribui para a sua incorporação em compósitos à base de cal hidratada e metacaulim reforçados com fibras vegetais. Assim o uso de gesso, atrelado ao seu baixo custo, pode reduzir o custo de fabricação de tais compósitos, aumentando a viabilidade econômica de sua aplicação na construção civil.

#### **AGRADECIMENTOS**

À CAPES, pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa que proporcionou a elaboração deste artigo.

## REFERÊNCIAS

Adam L, Isopescu D N, Maxineasa S G. Improving the mechanical and thermal properties of hemp concrete by treating the hemp hurds with sodium hydroxide solution. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 1242(1), 012001, 2022. DOI 10.1088/1757-899X/1242/1/012001. Available in: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1242/1/012001>

Amziane S, Nozahic V, Sonebi M. Design of Mechanically Enhanced Concrete Using Hemp Shiv. I International Conference on Bio-based Building Materials, June 22, Clermont Ferrand, 2015. <https://doi.org/10.26168/icbbm2015.65>.

Arrigoni A, Pelosato R, Melià P, Ruggiei G, Sabbadini S, Dotelli G, Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks. Journal of Cleaner Production, v.149, p. 1051–1061, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.161>

Benfratello S, Capitano C, Peri G, Rizzo G, Scaccianoce G, Sorrentino G. Thermal and structural properties of a hemp-lime biocomposite. Construction and Building Materials, v.48, 745–754, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096>

Bruijn P. de. Hemp concretes: mechanical properties using both shives and fibres. Licentiate thesis - Swedish University of Agricultural Sciences, Husbandry, 2008.

Cerezo V. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. Doctoral thesis (Doctorate in Civil Engineering) - L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005. Available in: <[https://www.researchgate.net/publication/37813495\\_Proprietes\\_mecaniques\\_thermiques\\_et\\_acoustiques\\_d'un\\_materiau\\_a\\_base\\_de\\_particules\\_vegetales\\_approche\\_experimentale\\_et\\_modelisation\\_theorique](https://www.researchgate.net/publication/37813495_Proprietes_mecaniques_thermiques_et_acoustiques_d'un_materiau_a_base_de_particules_vegetales_approche_experimentale_et_modelisation_theorique)>

Chabannes M, Garcia-Diaz E, Clerc L, Bénézet J C. Effect of curing conditions and Ca(OH)<sub>2</sub>-treated aggregates on mechanical properties of rice husk and hemp concretes using a lime-based binder. Construction and Building Materials, v.102, p.821–833, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.206>

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

Daher S, Benazzouk A, Hamed H Bem, Langlet T. Performance Improved of a Lime and Hemp-Based Concrete Thought the Addition of Metakaolin. Fluid Dynamics and Materials Processing, v.19(5), p.1091–1113, 2023. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2023.020348>

Diquélou Y, Gourlay E, Arnaud L, Kurek B. Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix. Cement and Concrete Composites, v.55, p.112–121, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.004>

Diquélo Y, Gourlay E, Arnaud L, Kurek B. Influence of binder characteristics on the setting and hardening of hemp lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, v.112, p.506–517, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.138>

E Knapen, D Van Gemert. Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers. *Cement and concrete Research*, v. 39, p. 6-13, 2009•Elsevier

Evrard A. Transient hygrothermal behaviour of lime-hemp materials. PhD thesis (Doctorate in Civil Engineering) – Catholic University of Louvain. 2008. Available in:  
[https://www.researchgate.net/publication/283568943\\_Transient\\_hygrothermal\\_behavior\\_of\\_Lime-Hemp\\_Materials](https://www.researchgate.net/publication/283568943_Transient_hygrothermal_behavior_of_Lime-Hemp_Materials)

Evrard A, De Herde A. Bioclimatic envelopes made of lime and hemp concrete. CISBAT2005 – Renewables in a Changing Climate - Innovation in Building Envelopes and Environmental Systems, September 28, 2005, Lausanne, Suíça. <http://hdl.handle.net/2078.1/73818>

Global Alliance for Building and Construcion. 2020 Global status report for buildings and construction: towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector, 2020. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/34572>

Hayakawa K, Soshiroda T. Effects of Cellulose Ether on Bond Between Matrix and Aggregate in Concrete. In: Hayakawa K, Soshiroda (Eds) *Adhesion between polymers and concrete / Adhésion entre polymères et béton*. Springer US, 1986. [https://doi.org/10.1007/978-1-4899-3454-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-3454-3_3).

Hirst E A J. Characterisation of hemp-lime as a composite building material. 2013. PhD thesis (Doctorate in Philosophy) - University of Bath, 2013. Available in:  
[https://www.researchgate.net/publication/333933758\\_Characterization\\_of\\_Hemp-Lime\\_Bio-Composite](https://www.researchgate.net/publication/333933758_Characterization_of_Hemp-Lime_Bio-Composite).

Karade S R. Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. *Construction and Building Materials*, v.24(8), p.1323–1330, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.003>

Karam R, Becquart F, Abriak N E, Khouja H. Vapothermal curing of hemp shives: Influence on some chemical and physical properties. *Industrial Crops and Products*, v.7(1), 113870, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113870>

Liu H, Wang W, Zhao Y, Song S. Performance Evaluation of Lime Mortars with Metakaolin and CMC for Restoration Application. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.32(10). 2020. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003377](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003377)

Liu H, Zhao Y, Peng C, Song S, López-Valdivieso A. Improvement of compressive strength of lime mortar with carboxymethyl cellulose. *Journal of Materials Science*, v.51(20), 9279–9286, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0174-3>

Liu H, Zhao Y, Peng C, Song S, López-Valdivieso A. Lime mortars – The role of carboxymethyl cellulose on the crystallization of calcium carbonate. *Construction and Building Materials*, v.168, p.169–177, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.119>

Magwood C. The essential guide to hempcrete-a strong, versatile, environmentally-friendly, energy-efficient natural insulating material. [s.l]. New Society Publishers, (1st ed.), 2016.

Mohanty A K, Misra M, Drzal, L T. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Boca Raton: CRC Press. 1.ed. 2005. <https://doi.org/10.1201/9780203508206>.

Morsy M S, Al-Salloum Y A., Almusallam T H, Abbas H. Mechanical properties, phase composition and microstructure of activated Metakaolin-slaked lime binder. Ksce Journal of Civil Engineering, v.21(3), p.863–871, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0667-2>

Mukherjee A. The Structural benefits of Hempcrete infill in Wood stud Walls. 2012. Master thesis (Master of Applied Science) – Queen's University, 2010.

Nozahic V, Amziane S. Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 43(11), p.1837–1849, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.07.011>.

Nozahic, V. Vers Une Nouvelle Demarche de Conception des Betons de Vegetaux Lignocellulosiques Basee sur la Comprehension et l'amelioration de l'interface Liant/Vegetal - Application a Des Granulats de Chenevotte et de Tige de Tournesol Associes a un Liant Ponce/Chaux. Doctoral thesis. (Doctorate in Civil Engineering) - Blaise Pascal University, Clermont Ferrand, 2012. Disponível em: <https://theses.hal.science/tel-00822142>

Ollivier J P, Maso J C, Bourdette B. Interfacial Transition Zone in Concrete. Advanced Cement Based Materials, v. 2(1), p. 30-38, 1995. [https://doi.org/10.1016/1065-7355\(95\)90037-3](https://doi.org/10.1016/1065-7355(95)90037-3)

Savastano H, Agopyan V. Cement & Transition zone studies of vegetable fibre-cement paste composites. Cement and Concrete Composites, v.21, p. 49-57, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00038-9).

Seng B, Magniont C, Lorente S, Characterization of a precast hemp concrete. Part I: Physical and thermal properties. Journal of Building Engineering, v.24, p. 100540, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.07.016>.

Sinka M, Sahmenko G, Korjakins A, Radina L, Bajare D. Hemp thermal insulation concrete with alternative binders, analysis of their thermal and mechanical properties. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v.96(1), 012029, 2015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/96/1/012029>

Stevulova N, Cigasova J, Estokova A, Terpalova E, Geffert A, Kacik F, Singovszka E, Holub M. Properties characterization of chemically modified hemp hurds. Materials, v. 7(12), p. 8131–8150, 2014. <https://doi.org/10.3390/ma7128131>

Walker R, Pavia S. Impact of water retainers in the strength, drying and setting of lime hemp concrete. Bridge and Concrete Research, p.355-360, Dublin, 2013.  
<http://www.tara.tcd.ie/handle/2262/66463>

Walker R, Pavia S. MITCHELL, R. Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, v(61), 340–348, 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.065>

Wang L, Lenorman H, Zmamou H, Leblanc N. Effect of variability of hemp shiv on the setting of lime hemp concrete. Industrial Crops and Products, v.171(1), 113915, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113915>