

Artículo científico

Evaluación experimental del comportamiento físico-mecánico del fibrocemento reforzado con pulpa de cartón kraft mediante el proceso hatschek

Experimental evaluation of the physical-mechanical behavior of fiber cement reinforced with kraft cardboard pulp using the hatschek process

 Nahúm Gamalier Cayo Chileno¹.  Daniella Dutra Carneiro².  Lúcia Maria Joaquim Assane³.
 Bianca de Fátima Souza⁴.  Jhonatan Sales Satiro⁵.  Marisa Aparecida Pereira⁶.  Keoma Defáveri do Carmo e Silva⁷.  Saulo Rocha Ferreira⁸.

1. Programa de Ingeniería Civil. Universidad Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ. Brasil. nahum.chileno@coc.ufri.br.
2. Programa de Ingeniería de Biomateriales. Universidad Federal de Lavras. Lavras - MG. Brasil. danielladutracarneiro@gmail.com.
3. Programa de Ciencia y Tecnología de la Madera. Universidad Federal de Lavras. Lavras - MG. Brasil. lucia.assane1@estudante.ufla.br.
4. Programa de Ingeniería de Biomateriales. Universidad Federal de Lavras. Lavras - MG. Brasil. bianca.souza13@estudante.ufla.br.
5. Programa de Ingeniería de Biomateriales. Universidad Federal de Lavras. Lavras - MG. Brasil. satiro.arqurb@gmail.com.
6. Programa de Ingeniería de Biomateriales. Universidad Federal de Lavras. Lavras - MG. Brasil. marisa.pereira1@estudante.ufla.br.
7. Professor. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto - MG. Brasil. keoma.silva@ufla.br.
8. Professor. Universidad Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Brasil. saulo.ferreira@ufla.br.

RESUMEN

El estudio de materiales de construcción reforzados con elementos reciclables impulsa el desarrollo de alternativas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo evaluar experimentalmente el comportamiento físico-mecánico del fibrocemento reforzado con pulpa de celulosa proveniente de cartón kraft. La metodología se centró en la caracterización de los materiales, la elaboración de especímenes mediante técnicas adaptadas al proceso Hatschek y la evaluación físico-mecánica a los 7 y 28 días de curado. Los resultados muestran que la matriz cementicia reforzada con pulpa de celulosa tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presenta un mayor porcentaje de absorción de agua y porosidad, efectos atribuibles exclusivamente al tratamiento y no a la edad de curado. En cuanto a la densidad aparente, no se observaron diferencias estadísticamente significativas relacionadas con la edad o el tratamiento. Respecto al comportamiento mecánico, el módulo de elasticidad (MOE) mostró un incremento estadísticamente significativo a los 28 días en las muestras tratadas, evidenciando una mayor rigidez. Sin embargo, los valores de límite proporcional (LOP) y resistencia máxima a la flexión (MOR) no presentaron diferencias significativas. Estos resultados evidencian el potencial del uso de pulpa de celulosa reciclada como refuerzo en matrices cementicias, destacando su viabilidad como una alternativa sostenible en aplicaciones industriales.

Palabras clave: Fibrocemento. Hatschek. Resistencia a la flexión. Kraft. Materiales ecoeficientes.

ABSTRACT

The study of construction materials reinforced with recyclable elements drives the development of sustainable and environmentally friendly alternatives. In

Citar como: Cayo Chileno, N.G., Dutra Carneiro, D., Assane, L.M.J., de Fátima Souza, B., Sales Satiro, J., Pereira, M.A., do Carmo e Silva, K.D., Rocha Ferreira, S. Evaluación experimental del comportamiento físico-mecánico del fibrocemento reforzado con pulpa de cartón kraft mediante el proceso hatschek. *Journal Boliviano De Ciencias*, 21(57) 49-63 <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i57.1335>

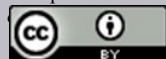
Recepción: 19/05/2025

Aceptado: 02/06/2025

Publicado: 30/06/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Cayo Chileno, N.G., Dutra Carneiro, D., Assane, L.M.J., de Fátima Souza, B., Sales Satiro, J., Pereira, M.A., do Carmo e Silva, K.D., Rocha Ferreira, S. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este



this context, the present article aims to experimentally evaluate the physical and mechanical behavior of fiber cement reinforced with cellulose pulp from kraft paperboard. The methodology focused on material characterization, specimen fabrication using techniques adapted to the Hatschek process, and physical-mechanical testing at 7 and 28 days of curing. The results show that the cementitious matrix reinforced with cellulose pulp treated with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ exhibits higher water absorption and porosity, effects attributed exclusively to the treatment and not to curing age. Regarding apparent density, no statistically significant differences were observed in relation to either age or treatment. Concerning mechanical behavior, the modulus of elasticity (MOE) showed a statistically significant increase at 28 days in the treated samples, indicating greater stiffness. However, the proportional limit (LOP) and modulus of rupture (MOR) values did not present significant differences. These results demonstrate the potential of using recycled cellulose pulp as reinforcement in cementitious matrices, highlighting its feasibility as a sustainable alternative for industrial applications.

Keywords: Fiber cement. Hatschek. Flexural strength. Kraft. Eco-efficient materials.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción el cemento se ha convertido en uno de los materiales más demandados, esto debido a su buena resistencia, durabilidad y trabajabilidad (Scrivener *et al.*, 2018). A pesar de ello, este es débil ante esfuerzos de tracción y flexión (Alshahrani *et al.*, 2023; Anandan y Alsubih, 2023), por lo que, tradicionalmente son reforzados con fibras de acero, polietileno, basalto y vidrio (Chen *et al.*, 2022; Rosas *et al.*, 2023; Jianbing *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023; Cui *et al.*, 2023; Gong *et al.*, 2023). No obstante, con la finalidad de desarrollar enfoques alternativos y sustentables, se estudian las fibras naturales de origen vegetal, tales como la fibra de jute (Zakaria *et al.*, 2018), coco (Bui *et al.*, 2020), sisal (Ferreira *et al.*, 2021), entre otras (Booya *et al.*, 2018; Akinyemi *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021; Borges *et al.*, 2024), mismas que presentan un menor coste e impacto ambiental (Hamada *et al.*, 2023).

La aplicación de las fibras naturales en materiales a base de cemento presenta diversas ventajas en su comportamiento físico, térmico y mecánico (Kouta *et al.*, 2020; Singh y Gupta, 2020; Raut y Gómez, 2016), por lo que su aplicación resulta ideal en el desarrollo de materiales de construcción (paneles, tejas, drywall, etc); sin embargo, la falta de tratamiento puede resultar desfavorable en la durabilidad ya que esta puede llegar a perder de forma parcial o total sus prestaciones mecánicas a causa de la degradación (Mármol y Savastano Jr, 2017). Para contrarrestar este efecto Ferrara *et al.* (2015) redujo los materiales de celulosa a escala micro y/o nano, logrando alcanzar resultados eficientes dentro de las matrices a base de cemento. Esta práctica es reportada en pastas de cemento (Cao *et al.*, 2016), morteros (Ardanuy Raso *et al.*, 2012), concretos (Hisseine *et al.*, 2018) y fibrocemento (Mohammadkazemi *et al.*, 2017), siendo esta última uno de los composites que ha presentado un aumento de interés científico en los últimos años (Mejía-Ballesteros *et al.*, 2023; Taiwo *et al.*, 2024), a través del refuerzo de materiales reutilizables como solución sostenible.

En la literatura se pueden identificar algunos materiales a base de pulpa de celulosa aplicados como refuerzo en los composites de fibrocemento, representando entre el 6 y 20% de la masa total del material. Las principales pulpas de celulosa reportadas

son provenientes de: eucalipto (Mejia-Ballesteros *et al.*, 2015, 2019; Urrea-Ceferino *et al.*, 2017); pino (Mármol y Savastano Jr., 2017; Mejia-Ballesteros *et al.*, 2023; Borges *et al.*, 2024); bambú (Correia *et al.*, 2018) y cartón reciclado (Taiwo *et al.*, 2024). La respuesta de comportamiento físico-mecánico de estos compósitos se encuentra comúnmente ligadas a distintos parámetros y condiciones, tales como tipo de celulosa, uso de materiales cementicios suplementarios, procesos de curado y tratamiento de la pulpa. En la literatura se observa que el tratamiento químico es uno de los más explorados, tales como el uso de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) (Borges *et al.*, 2024) y el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, cada uno presentando resultados favorables; sin embargo estos requieren de una mayor exploración. Por lo que, es necesario profundizar con más estudios para lograr una mejor comprensión de estos materiales, a fin de proponer diferentes usos en la industria de la construcción.

Bajo este aspecto, el presente artículo tiene por objetivo evaluar de forma experimental el comportamiento físico y mecánico del composite de fibrocemento reforzado con pulpa de celulosa kraft de cartón en dos condiciones (tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y no tratada). Las placas de fibrocemento, elaboradas a través del proceso hatschek, con filler calcareo como material cementicio suplementario, son analizadas a dos edades (7 y 28 días).

2. METODOLOGÍA

2.1. Materiales

Se utilizó cemento comercial Cimento Portland CPV-ARI y filler calcareo, las propiedades de ambos materiales se detallan en la Tabla 1.

Tabla N° 1. Composición química de los materiales.

Parámetro	Cemento	Calcareo
CaO	73,09	45,70
SiO ₂	13,64	7,10
Fe ₂ O ₃	4,50	0,53
Al ₂ O ₃	3,77	1,10
SO ₃	3,96	-
K ₂ O	0,38	0,21
SrO	0,29	-
TiO ₂	0,29	-
MnO	0,06	-
ZnO	0,05	-
Propiedades físicas		
Gravedad específica (g/cm ³)	3,18	2,83
Área de superficie específica (cm ² /g)	3331	4895

Fuente: Elaboración propia, 2025

En cuanto a la pulpa de celulosa, esta fue obtenida a través cartón kraft reciclado. Estas fueron tratadas con la adición del 10% de hidróxido de calcio con relación a la masa total de los residuos de cartón, para ello se siguieron las técnicas reportadas en la literatura (Arantes *et al.*, 2023). Las propiedades morfológicas y físicas de las fibras de celulosa tratadas y no tratadas se muestran en la Tabla 2.

Tabla N° 2. Características de la pulpa de celulosa.

Tipo de fibra	Diametro (μm)	Comprimento (μm)	Densidade específica (g/cm ³)
Sin tratamiento	0,03	0,82	0,78
Con tratamiento	0,04	0,81	0,80

Fuente: Elaboración propia, 2025

2.2. Proceso experimental

En el presente trabajo se elaboraron cuerpos de prueba laminados, para ello se adaptaron técnicas reportadas en la literatura para el proceso hatshek (Tonoli *et al.*, 2007; Borges *et al.*, 2024), este consistió en tres fases (Figura 1). En la primera se realizó la mezcla de los materiales con relación a la dosificación descrita en la Tabla 3, durante los primeros 15 minutos se mezclaron 8,25 g de pulpa de celulosa en 2 litros de agua a 2000 rpm, seguidamente se añadieron 271,26 g de cemento y 50,49 g de filler calcareo, para ser mezclados por 5 minutos. Para la segunda fase, el material fue vertido en una cámara que retiró el excedente de agua con la ayuda de una bomba de vacuo, para lograr una superficie homogénea se usó un apisonador de 5 kilos, todo el proceso en un tiempo máximo de 10 minutos. En la última fase, el cuerpo de prueba laminado de 200x200x5 mm fue compactado a través de una prensa hidráulica, donde se logró una compresión uniforme a través del uso de placas de acero cuyas dimensiones fueron próximas al cuerpo de prueba. Este proceso fue realizado por medio de una secuencia de cargas durante 5 minutos; un minuto para 3 y 6 Toneladas y, 3 minutos con 10 Toneladas. Posteriormente, los cuerpos de prueba fueron cortados a una dimensión aproximada de 180x40x5 mm con un disco de diamante enfriado con agua. Por último, estos fueron curados durante 7 y 28 días para posteriores ensayos físicos y mecánicos.

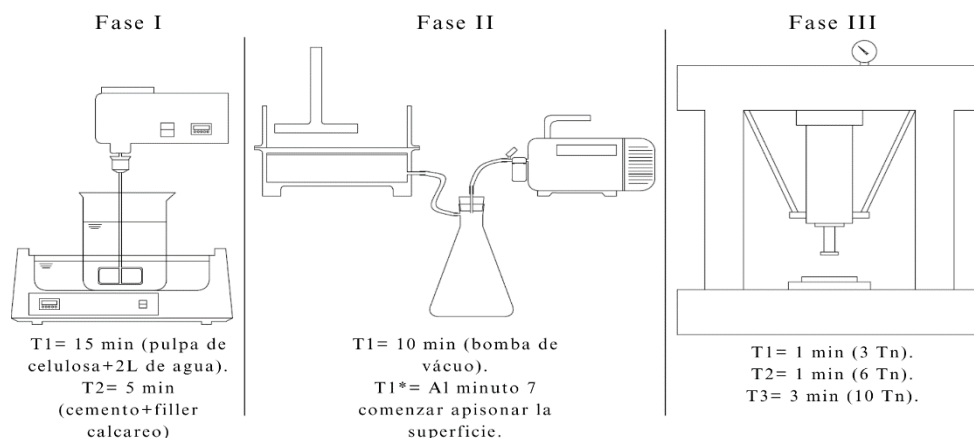


Figura N° 1. Procedimiento Hatschek. Fuente: Elaboración propia, 2025

Tabla N° 3. Distribución de mezclas.

Matriz	Cimento (g)	Calcareo (g)	Pulpa de celulosa (g)	Água (ml)
2,5% de pulpa	271,26	50,49	8,25	2000,00
2,5% de pulpa + CaOH ₂	271,26	50,49	8,25	2000,00

Fuente: Elaboración propia, 2025

2.3. Caracterización físico-mecánica

Para la caracterización de las propiedades físico-mecánica se determinó la densidad aparente, porcentaje de absorción y porosidad aparente en base a la ASTM C948-81 (ASTM, 2023).

En cuanto a la caracterización mecánica, se realizaron ensayos de resistencia a la flexión de 3 puntos con una velocidad de carga de 1,5 mm/min. Se determinó el módulo de rotura (MOR) (Ec.1), límite de proporcionalidad (LOP) (Ec.2) y el módulo de elasticidad (MOE) (Ec.3) en base a las ecuaciones adaptadas de la ASTM D790-17 (ASTM, 2017).

$$MOR = \frac{3 * P_{m\acute{a}x} * L}{2 * b * h^2} \quad (Ec. 1)$$

$$LOP = \frac{3 * P_{Lop} * L}{2 * b * h^2} \quad (Ec. 2)$$

$$MOE = \frac{m * L^3}{4 * b * h^3} \quad (Ec. 3)$$

Donde:

$P_{m\acute{a}x}$ = Carga máxima (N)

P_{Lop} = Carga máxima antes de que la curva gire (N)

L = Distancia entre los apoyos (mm)

b = Ancho del cuerpo de prueba (mm)

h = Altura del cuerpo de prueba (mm)

m = Pendiente de la curva fuerza/desplazamiento (N/mm)

α = Coeficiente angular de la región lineal de la curva carga/desplazamiento

2.4. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se evaluaron 3 cuerpos de prueba para cada caso. Los datos cuantificados fueron analizados por medio de ANOVA-Tukey con un p-value de 0,05.

3. RESULTADOS

La Figura 2a muestra la respuesta del comportamiento físico en términos de porcentaje de absorción y el valor de la densidad aparente. El valor máximo de absorción se observó en la matriz de celulosa tratada con Ca(OH)_2 , alcanzando 18,16% a los 7 días y 19,03% a los 28 días. Este resultado presenta una diferencia estadísticamente significativa ($p\text{-value} < 0,05$) en comparación con la matriz de pulpa no tratada.

Los valores elevados de absorción obtenidos son consistentes con los reportados por Mejía-Ballesteros *et al.* (2019, 2023), quienes, utilizando 6% de pulpa de pino y eucalipto, obtuvieron absorciones del 22,4% y 20,10%, respectivamente. Por otro lado, el promedio de absorción de la matriz de pulpa sin tratar (11,83%) es similar al 13,40% reportado por Taiwo *et al.* (2024) para una aplicación del 10% de pulpa de cartón kraft.

El efecto de mayor absorción tras el tratamiento con hidróxido de calcio se justifica con estudios previos como el de Arantes *et al.* (2023). Este estudio demostró que el pretratamiento de pulpa de eucalipto y pino con 10% de Ca(OH)_2 incrementa la absorción de agua en un 9,97% y 36,22%, respectivamente, en relación con

la muestra control. Este incremento en la absorción se explica por la alteración estructural de la pulpa: la presencia de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aumenta los grupos funcionales hidroxilo, lo que resulta en una mayor capacidad de absorción de agua (Santos *et al.*, 2018).

En cuanto a la densidad aparente, los valores son ligeramente mayores en presencia de pulpa tratada; sin embargo, estas no presentan una diferencia estadísticamente significativa con relación a la edad y a la matriz de pulpa no tratada ($p\text{-value} > 0,05$). El promedio de la densidad aparente alcanzada en el presente trabajo ($1,75 \text{ g/cm}^3$) a través de la aplicación de un 2,5% de pulpa de cartón es próximo al reportado por Taiwo *et al.* (2024) quien alcanzó una densidad de $1,68 \text{ g/cm}^3$ tras aplicar 3 veces más la cantidad de la pulpa de cartón, también es ligeramente mayor a los valores reportados por Mármol y Savastano Jr. (2017), Urrea-Ceferino *et al.* (2017) y Mejia-Ballesteros *et al.* (2019, 2023) quienes alcanzaron una densidad entre 1,41 a $1,57 \text{ g/cm}^3$ tras aplicar la pulpa de pino y eucalipto en un porcentaje de aplicación entre el 6 y 10%.

Aunque varios de los valores reportados en la literatura son próximos a los obtenidos en el presente estudio, es importante considerar que la densidad aparente está influenciada por diversos factores, tales como el porcentaje de sustitución de cemento por materiales puzolánicos, la cantidad de adición, así como el tipo y tratamiento del material de refuerzo de origen vegetal. En este sentido, si bien en este estudio se observa una tendencia al incremento de la densidad aparente tras la aplicación de pulpa tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, esta diferencia no es estadísticamente significativa. No obstante, según lo reportado en la literatura, este efecto podría estar asociado a la formación de cristales de carbonato de calcio (CaCO_3), los cuales se depositan en las fibras, así como a la evolución del proceso de hidratación del cemento (Moreira *et al.*, 2022). Para profundizar en esta hipótesis, se recomienda que futuros estudios incorporen análisis microestructurales de los materiales a distintas edades de curado.

La Figura 2b muestra los valores de porosidad aparente, en los cuales se observa una diferencia estadísticamente significativa en las matrices reforzadas con pulpa de celulosa tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Este efecto podría atribuirse a la mayor capacidad de absorción del material orgánico de origen vegetal. En cuanto a la variación de la porosidad en función de la edad, tanto para matrices con pulpa tratada como no tratada, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas. Esto sugiere que la matriz cementicia alcanzó un alto grado de hidratación, posiblemente promovido por la presencia del filler calcáreo, a una edad de 7 días. Este fenómeno ha sido respaldado previamente en la literatura (Wang *et al.*, 2018). Por tanto, el único factor que puede explicar el incremento observado en la porosidad es la incorporación de la pulpa de celulosa tratada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

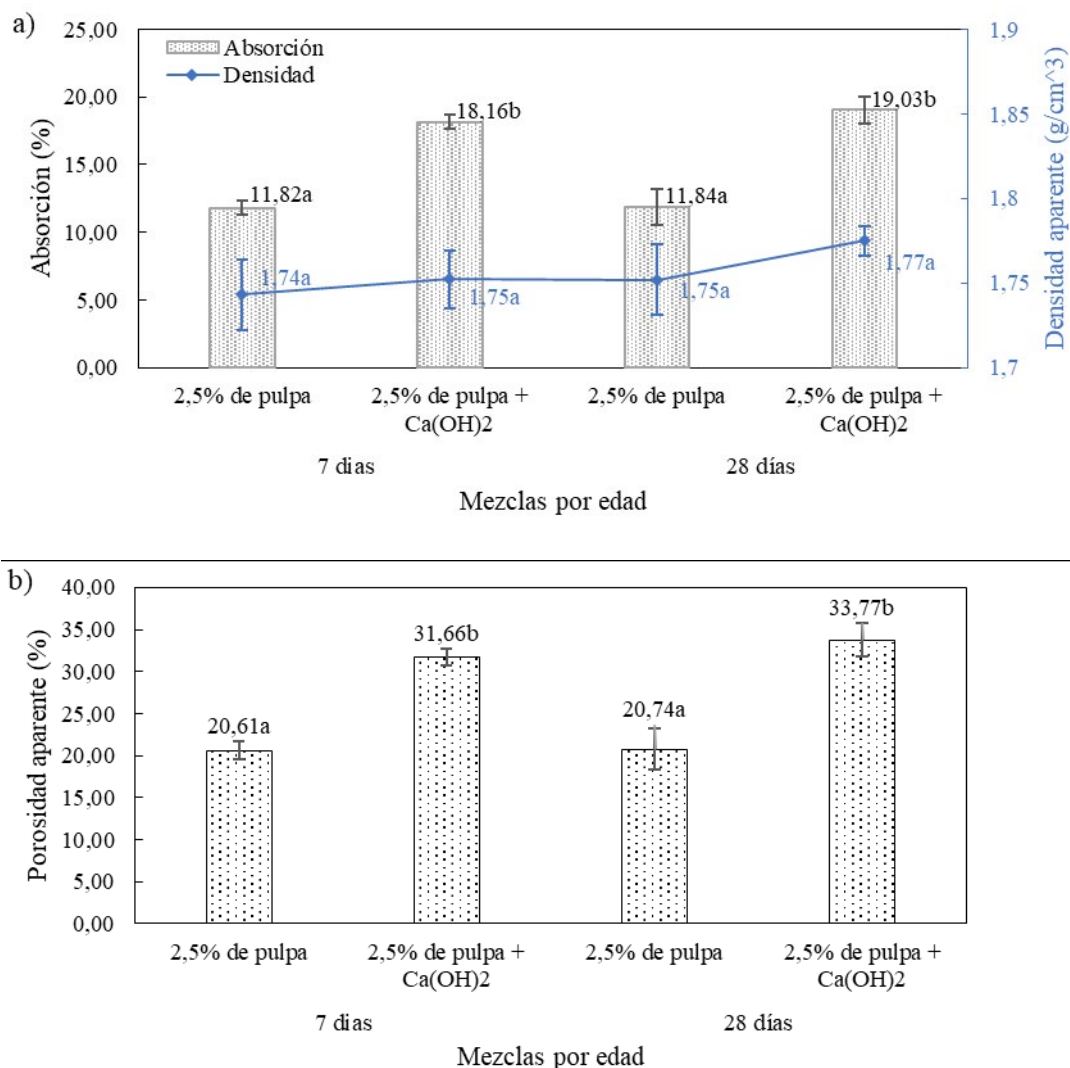


Figura N° 2. Análisis físicos a) absorción - densidad y b) porosidad aparente.
Fuente: Elaboración propia, 2025

En la Figura 3a se presenta el módulo de ruptura (MOR), donde los valores máximo y mínimo corresponden a la matriz cementicia con pulpa de celulosa tratada, con 8,68 MPa y 6,93 MPa a los 28 y 7 días, respectivamente. Estos resultados evidencian que este tipo de matriz muestra una tendencia al incremento de la resistencia a la flexión con el tiempo de curado. Por el contrario, las matrices con pulpa de celulosa no tratada presentan un comportamiento relativamente constante en ambas edades evaluadas. No obstante, el análisis estadístico mediante ANOVA indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos (p -valor > 0,05).

Según la literatura, aunque el filler calcáreo favorece la hidratación temprana de las matrices cementicias, la evolución de la resistencia puede continuar hasta los 28 días. Sin embargo, en el presente estudio dicha evolución no resultó estadísticamente significativa, lo que sugiere que el material alcanzó un alto grado de hidratación a los 7 días. Los valores de resistencia obtenidos a los 7 días para los especímenes reforzados con pulpa de celulosa tratada con Ca(OH)_2 y sin tratamiento son próximos a los reportados en la literatura: 7,68 MPa (Taiwo *et al.*, 2024) y 7,8 MPa (Mejía-Ballesteros *et al.*, 2023). Por otro lado, los valores reportados para los 28 días son menores en comparación con el estudio de Mármol y Savastano Jr. (2017), quienes alcanzaron 11,35 MPa, indicando un material más resistente y dúctil. En el presente trabajo se considera que el filler calcáreo contribuyó al proceso de precipitación de productos de hidratos de silicato de calcio (C-S-H), efecto ampliamente documentado en la literatura (Wang *et al.*, 2018), lo cual podría explicar la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre las edades estudiadas. Este comportamiento contrasta con el observado en matrices que incorporan otros materiales cementantes suplementarios, como el polvo de concreto reciclado, el cual es considerado inerte (Rocha & Toledo Filho, 2023). Aunque, en general, los materiales a base de cemento presentan un incremento de la resistencia con el tiempo, este efecto sigue siendo objeto de discusión en materiales compuestos reforzados con pulpa de celulosa de cartón y suplementarios del cemento. Este mismo comportamiento fue observado por Taiwo *et al.* (2024), quienes sugieren la posibilidad de que dichos compuestos alcancen sus propiedades mecánicas máximas a edades más tempranas.

Respecto al comportamiento mecánico, la Figura 3b muestra la curva de respuesta representativa para cada caso durante el ensayo de resistencia a la flexión. Se observa que los especímenes exhiben un comportamiento dúctil, lo que indica que la presencia de pulpa de celulosa, ya sea tratada o no, confiere esta característica al actuar como refuerzo en la matriz cementicia. Adicionalmente, se observa que el comportamiento a los 7 días es ligeramente más dúctil en ambos casos, lo cual podría atribuirse a los procesos de reacción química en el material de refuerzo. Según la literatura, los materiales a base de celulosa pueden inducir la precipitación de cristales de carbonato de calcio (CaCO_3), que con el tiempo tienden a fragilizarse, generando un material teóricamente más frágil, pero mecánicamente resistente. De manera general, se puede concluir que no se observa una variación sustancial en el comportamiento mecánico entre las matrices reforzadas con pulpa de celulosa tratada y no tratada.

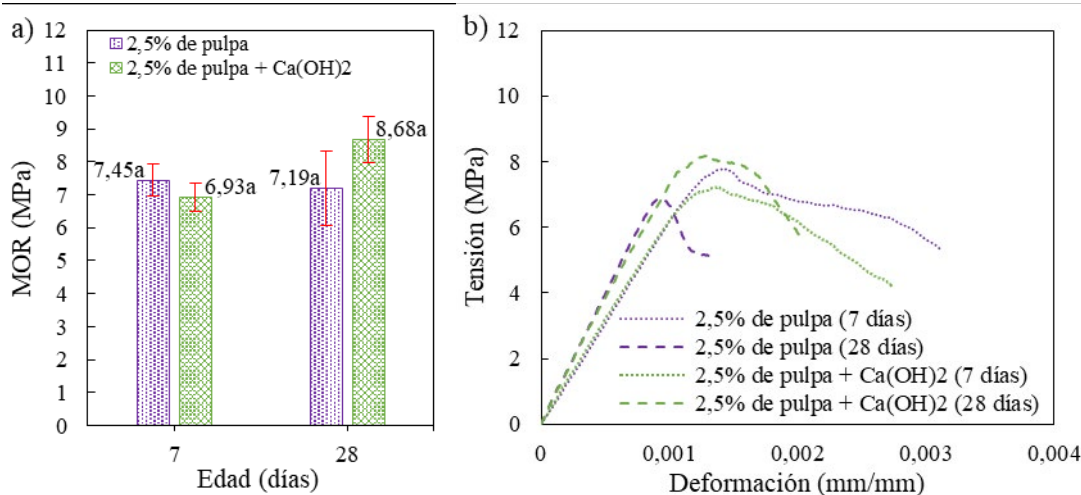


Figura N° 3. Análisis mecánico a) módulo de ruptura (MOR) y b) tensión - deformación. Fuente: Elaboración propia, 2025

En relación con el módulo de elasticidad (Figura 4), se observa que el valor máximo, estadísticamente significativo (p -valor $<0,05$), corresponde a la matriz cementicia reforzada con pulpa de celulosa no tratada a los 28 días, alcanzando 8,41 GPa. Los resultados sugieren que las matrices con pulpa no tratada tienden a comportarse de forma menos rígida en comparación con aquellas reforzadas con pulpa tratada, posiblemente debido a fenómenos de mineralización y cristalización que afectan la rigidez del material. Este comportamiento puede explicarse por la formación de cristales de carbonato de calcio (CaCO_3), tanto en la superficie como en el interior de las fibras de celulosa, como consecuencia de la exposición a ambientes alcalinos ricos en calcio, propios de la matriz cementicia. Según lo reportado por Moreira *et al.* (2022), este proceso de mineralización induce cambios en la microestructura de la fibra, mejorando la adherencia fibra-matriz, disminuyendo la capacidad de deformación de la fibra y, en consecuencia, aumentando la rigidez global del material compuesto.

En cuanto a la comparación entre edades, los módulos de elasticidad de las matrices reforzadas con pulpa tratada con Ca(OH)_2 no presentan diferencias estadísticamente significativas. Sin embargo, en las matrices con pulpa no tratada se evidencia un incremento en el módulo de elasticidad de 7 a 28 días, lo cual podría estar asociado a la progresiva mineralización de las fibras, que se intensifica con el tiempo en contacto con el medio cementicio, promoviendo la formación adicional de CaCO_3 .

Respecto al límite de proporcionalidad (LOP), el valor máximo se registró en la matriz reforzada con pulpa tratada a los 28 días (8,33 MPa), siendo este resultado estadísticamente significativo y superior a los valores observados a los 7 días y en las matrices con pulpa no tratada. Este hallazgo indica que el tratamiento de la pulpa con Ca(OH)_2 puede favorecer la resistencia inicial a la fisuración, posiblemente debido a la mejora en la interfaz fibra-matriz promovida por la mineralización temprana y la posterior formación de productos de reacción cementicia que refuerzan dicha interfaz. No obstante, para confirmar la hipótesis

sobre la mineralización de las fibras y su influencia en las propiedades mecánicas, se recomienda la realización de estudios complementarios mediante técnicas de caracterización microestructural, como microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (DRX) o espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), que permitan identificar y caracterizar los productos minerales formados en y sobre las fibras, así como su distribución y grado de cristalización.

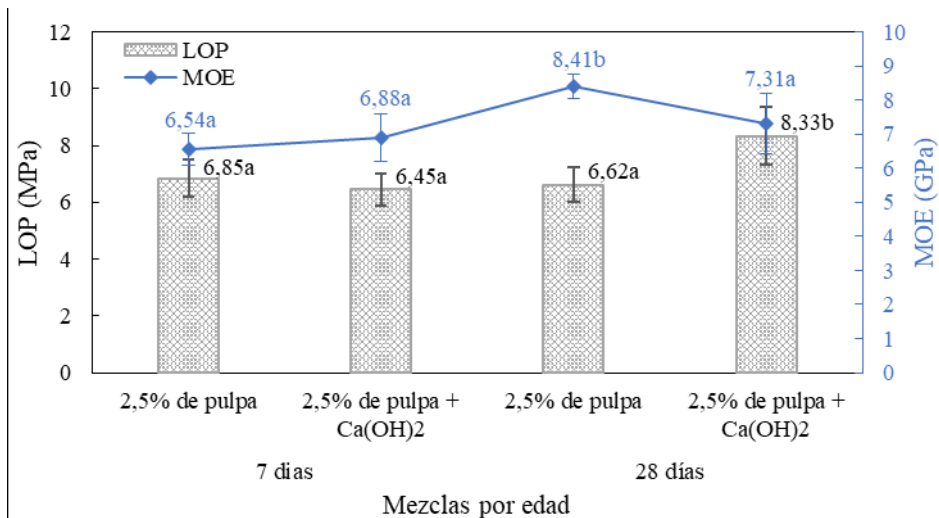


Figura N° 4. Módulo de elasticidad (MOE) y límite de proporcionalidad (LOP).
Fuente: Elaboración propia, 2025

5. CONCLUSIONES

Con el presente estudio se pueden señalar las siguientes conclusiones:

El tratamiento realizado con hidróxido de calcio, en la pulpa de cartón kraft, incrementó de forma significativa el porcentaje de absorción de agua en los composites de fibrocemento; sin embargo, este no influyó de forma estadísticamente significativa en el valor de la densidad aparente. Mientras que, las propiedades mecánicas indican alcanzar un comportamiento más dúctil y resistente con relación a la matriz cuya pulpa no fue tratada.

El uso de un 2,5% de pulpa de cartón tratada con hidróxido de calcio representa una mejora del 20,7% en el Módulo de Ruptura (MOR) en comparación con la pulpa no tratada, alcanzando un valor máximo de 8,68 MPa a los 28 días. Aunque esta diferencia no es estadísticamente significativa, se evidencia una tendencia favorable hacia una mayor resistencia a flexión, atribuida al tratamiento químico aplicado a la pulpa. Asimismo, se observó una progresión en la resistencia a flexión con el tiempo, posiblemente relacionada con el proceso continuo de hidratación del cemento, que típicamente se completa alrededor de los 28 días. Para validar esta hipótesis, se recomienda la realización de análisis complementarios a nivel microestructural, que permitan correlacionar el desarrollo de los productos de hidratación con el comportamiento mecánico observado.

En Respecto al módulo de elasticidad (MOE) y al límite de proporcionalidad (LOP), se registró un comportamiento variable en función de la edad de curado, con diferencias estadísticamente significativas a los 28 días: un incremento del MOE en la matriz sin tratamiento y del LOP en la matriz con pulpa tratada. Este comportamiento pone de manifiesto la necesidad de profundizar en la evaluación de los mecanismos de interacción entre la matriz cementicia y la pulpa de celulosa, con especial énfasis en los procesos de mineralización y modificación de la interfaz.

En comparación con lo reportado en la literatura, se corrobora que la aplicación de materiales basados en celulosa presenta resultados favorables en el desarrollo de composites de fibrocemento, destacando no solo por sus propiedades físico-mecánicas, sino también por su carácter ambientalmente sostenible en contraste con las fibras sintéticas. No obstante, es fundamental continuar explorando y optimizando diversos parámetros de procesamiento y tratamiento, que permitan alcanzar un desempeño físico-mecánico acorde a las exigencias de la industria de los materiales de construcción.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Federal de Lavras (UFLA), al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) y a la Fundación de Apoyo a la Investigación de Minas Gerais (FAPEMIG).

7. REFERENCIAS

- Akinyemi, A. B., Omoniyi, E. T., & Onuzulike, G. (2020). Effect of microwave assisted alkali pretreatment and other pretreatment methods on some properties of bamboo fibre reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*, 245, 118405. DOI: <https://10.1016/j.conbuildmat.2020.118405>
- Alshahrani, A., Kulasegaram, S., & Kundu, A. (2023). Elastic modulus of self-compacting fibre reinforced concrete: Experimental approach and multi-scale simulation. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01723. DOI: <https://10.1016/j.cscm.2022.e01723>
- Anandan, S., & Alsubih, M. (2023). Synergistic performance of steel-brass hybrid fibres on the concrete fracture properties. *Journal of Engineering Research*, 11(1), 100022. DOI: <https://10.1016/j.jer.2023.100022>
- Arantes, L., Prazeres Mascarenhas, A. R., Scatolino, M. V., Denzin Tonoli, G. H., Mendes, L. M., Borges, I. O., & Guimarães Júnior, J. B. (2023). Pre-treatment with calcium hydroxide and accelerated carbonation for cellulosic pulp fibrillation. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 38(2), 343-358. DOI: 10.1515/npprj-2022-0101
- Ferrara, L., Ferreira, S. R., Torre, M. D., Krelani, V., de Silva, F. A., & Filho, R. D. T. (2015). Effect of cellulose nanopulp on autogenous and drying shrinkage of cement based composites. In *Nanotechnology in Construction: Proceedings of NICOM5* (pp. 325-330). Springer International Publishing. DOI: https://10.1007/978-3-319-17088-6_42
- Ardanuy Raso, M., Claramunt Blanes, J., Arévalo Peces, R., Parés Sabatés, F., Aracri, E., & Vidal Llucía, T. (2012). Nanofibrillated cellulose (NFC) as a potential reinforcement for high performance cement mortar composites. *BioResources*, 7(3), 3883-3894.

- ASTM, A. (2017). D790-17: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. West Conshohocken: ASTM International. DOI: <https://10.1520/D0790-17>
- ASTM, A. (2023). C948-81: Standard test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. West Conshohocken: ASTM International. DOI: <https://10.1520/C0948-81R23>
- Ballesteros, J. E. M., Mármol, G., Filomeno, R., Rodier, L., Savastano Jr, H., & Fiorelli, J. (2019). Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance. *Construction and Building Materials*, 205, 52-60. DOI: <https://10.1016/j.conbuildmat.2019.02.007>
- Booya, E., Ghaednia, H., Das, S., & Pande, H. (2018). Durability of cementitious materials reinforced with various Kraft pulp fibers. *Construction and Building Materials*, 191, 1191-1200. DOI: <https://10.1016/j.conbuildmat.2018.10.139>
- Borges, I. O., Setter, C., de Menezes, R. C. C., Silva, D. W., Casagrande, N. B., Scatolino, M. V., ... & Tonoli, G. H. D. (2024). Effect of the modification of Pinus Kraft pulp with aluminum sulfate in cementitious composites. *European Journal of Wood and Wood Products*, 82(5), 1551-1566. DOI: <https://10.1007/s00107-024-02109-8>
- Bui, H., Sebaibi, N., Boutouil, M., & Levacher, D. (2020). Determination and review of physical and mechanical properties of raw and treated coconut fibers for their recycling in construction materials. *Fibers*, 8(6), 37. DOI: <https://10.3390/fib8060037>
- Cao, Y., Tian, N., Bahr, D., Zavattieri, P. D., Youngblood, J., Moon, R. J., & Weiss, J. (2016). The influence of cellulose nanocrystals on the microstructure of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 74, 164-173. DOI: <https://10.1016/j.cemconcomp.2016.09.008>
- Chen, Y., He, Q., Liang, X., Jiang, R., & Li, H. (2022). Experimental investigation on mechanical properties of glass fiber reinforced recycled aggregate concrete under uniaxial cyclic compression. *Cleaner Materials*, 6, 100164. DOI: <https://10.1016/j.clema.2022.100164>
- Cui, K., Xu, L., Li, L., & Chi, Y. (2023). Mechanical performance of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete subject to uniaxial constant-amplitude cyclic compression: Fatigue behavior and unified fatigue equation. *Composite Structures*, 311, 116795. DOI: <https://10.1016/j.compstruct.2023.116795>
- Ferreira, S. R., Silva, L. E., McCaffrey, Z., Ballschmiede, C., & Koenders, E. (2021). Effect of elevated temperature on sisal fibers degradation and its interface to cement based systems. *Construction and Building Materials*, 272, 121613. DOI: <https://10.1016/j.conbuildmat.2020.121613>
- Gong, L., Yu, X., Liang, Y., Gong, X., & Du, Q. (2023). Multi-scale deterioration and microstructure of polypropylene fiber concrete by salt freezing. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01762. DOI: <https://10.1016/j.cscm.2022.e01762>
- Hamada, H. M., Shi, J., Al Jawahery, M. S., Majdi, A., Yousif, S. T., & Kaplan, G. (2023). Application of natural fibres in cement concrete: A critical review. *Materials Today Communications*, 105833. DOI: <https://10.1016/j.mtcomm.2023.105833>

- Hisseine, O. A., Omran, A. F., & Tagnit-Hamou, A. (2018). Influence of cellulose filaments on cement paste and concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 30(6), 04018109. DOI: [https://10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002287](https://10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002287)
- Jianbing, Y., Yufeng, X., Saijie, L., & Zhiqiang, X. (2022). Experimental study on shear performance of basalt fiber concrete beams without web reinforcement. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01602. DOI: <https://10.1016/j.cscm.2022.e01602>
- Kouta, N., Saliba, J., & Saiyouri, N. (2020). Effect of flax fibers on early age shrinkage and cracking of earth concrete. *Construction and Building Materials*, 254, 119315. DOI: <https://10.1016/j.conbuildmat.2020.119315>
- Li, Y., Wang, Q., Xu, S., & Song, Q. (2023). Study of eco-friendly fabricated hydrophobic concrete containing basalt fiber with good durability. *Journal of Building Engineering*, 65, 105759. DOI: <https://10.1016/j.jobe.2022.105759>
- Mármol, G., & Savastano Jr, H. (2017). Study of the degradation of non-conventional MgO-SiO₂ cement reinforced with lignocellulosic fibers. *Cement and Concrete Composites*, 80, 258-267. DOI: <https://10.1016/j.cemconcomp.2017.03.015>
- Mejia-Ballesteros, J. E., Rodier, L., Filomeno, R., Savastano Jr, H., Fiorelli, J., & Rojas, M. F. (2023). Effect of activated coal waste and treated Pinus fibers on the physico-mechanical properties and durability of fiberement composites. *Construction and Building Materials*, 392, 132038. DOI: <https://10.1016/j.conbuildmat.2023.132038>
- Mohammadkazemi, F., Aguiar, R., & Cordeiro, N. (2017). Improvement of bagasse fiber–cement composites by addition of bacterial nanocellulose: an inverse gas chromatography study. *Cellulose*, 24, 1803-1814. DOI: <https://10.1007/s10570-017-1210-4>
- Moreira, T. N. D. C., Krelani, V., Ferreira, S. R., Ferrara, L., & Toledo Filho, R. D. (2022). Self-healing of slag-cement ultra-high performance steel fiber reinforced concrete (UHPFRC) containing sisal fibers as healing conveyor. *Journal of Building Engineering*, 54, 104638.
- Raut, A. N., & Gomez, C. P. (2016). Thermal and mechanical performance of oil palm fiber reinforced mortar utilizing palm oil fly ash as a complementary binder. *Construction and Building Materials*, 126, 476-483. DOI: <https://10.1016/j.conbuildmat.2016.09.034>
- Rocha, J. H. A., & Toledo Filho, R. D. (2023). The utilization of recycled concrete powder as supplementary cementitious material in cement-based materials: A systematic literature review. *Journal of Building Engineering*, 76, 107319.
- Rosas, M. H., Chileno, N. G. C., Campos, A. A., & Rocha, J. H. A. (2023). Analysis of concrete mechanical properties when adding type-E glass fibers. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8(1), 40. DOI: <https://10.1007/s41024-023-00289-z>
- Santos, E. B. C., Moreno, C. G., Barros, J. J. P., Moura, D. A. D., Fim, F. D. C., Ries, A., ... & Silva, L. B. D. (2018). Effect of alkaline and hot water treatments on the structure and morphology of piassava fibers. *Materials Research*, 21, e20170365. DOI: <https://10.1590/1980-5373-MR-2017-0365>

- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and concrete Research*, 114, 2-26. DOI: <https://10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Singh, H., & Gupta, R. (2020). Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water permeability of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00324. DOI: <https://10.1016/j.cscm.2019.e00324>
- Taiwo, A. S., Ayre, D. S., Khorami, M., & Rahatekar, S. S. (2024). Optimizing the Mechanical Properties of Cement Composite Boards Reinforced with Cellulose Pulp and Bamboo Fibers for Building Applications in Low-Cost Housing Estates. *Materials*, 17(3), 646. DOI: <https://10.3390/ma17030646>
- Tonoli, G. H. D., Joaquim, A. P., Arsène, M. A., Bilba, K., & Savastano Jr, H. (2007). Performance and durability of cement based composites reinforced with refined sisal pulp. *Materials and Manufacturing Processes*, 22(2), 149-156. DOI: <https://10.1080/10426910601062065>
- Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., Jia, H., & Ou, Z. (2018). A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. *Construction and Building Materials*, 181, 659-672.
- Zakaria, M., Ahmed, M., Hoque, M., & Shaid, A. (2018). A comparative study of the mechanical properties of jute fiber and yarn reinforced concrete composites. *Journal of Natural Fibers*. DOI: <https://10.1080/15440478.2018.1525465>
- Zhang, D., Tan, G. Y., & Tan, K. H. (2021). Combined effect of flax fibers and steel fibers on spalling resistance of ultra-high performance concrete at high temperature. *Cement and Concrete Composites*, 121, 104067. DOI: <https://10.1016/j.cemconcomp.2021.104067>