

SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS SOSTENIBLES: DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS DE CUBIERTA BASADOS EN HEMP LIME CONCRETE.

SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS SUSTENTÁVEIS: DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE ELEMENTOS DE COBERTURA BASEADOS EM CONCRETO DE CÂNHAMO E CAL.

Ariana Belén Villa Muyolema¹, Cristopher Alejandro Ordoñez Torres²

¹UNACH, Riobamba, Chimborazo, Ecuador

 ariana.villa@unach.edu.ec

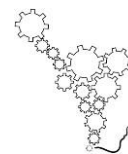
Recibido: 04 de diciembre 2025/ Aceito: 04 fevereiro 2026 / Publicado: 01 julho 2026

ABSTRACT. This study develops 15 mm thick structural tiles by optimizing a formulation based on hemp, lime, and water. The tests demonstrated a compressive strength of 1.85 ± 0.13 MPa (85% higher than the NTE INEN 856:2020 standard) and an impact resistance of 4.2 ± 0.3 J, attributable to microstructural densification through pozzolanic reactions (formation of C-S-H phases) and fiber reinforcement. Thermal conductivity (0.069 ± 0.005 W/m·K) reduced heat flow by 52% compared to ceramic tiles, thanks to nanoporosity, high solar reflectance (0.62), and thermal inertia of 6.3 h. Under dynamic conditions, it avoided resonance with wind vortices (fundamental frequency: 110 Hz) and recorded seismic displacements 60% lower than ceramics. The formulation showed exceptional durability: dimensional stability ($\Delta L < 0.02\%$), 35% reduction in carbonation under acid rain (pH 4.7), and only 1.8% mass loss after freeze-thaw cycles. Life cycle analysis confirmed a negative carbon footprint (-14.7 kg CO₂ eq/m²) and an energy return of 1.8 years, positioning it as a sustainable solution.

Keywords: Thin roof tiles; Nanoporous diatomite, Dynamic impact resistance, Negative carbon footprint, Optimized local materials.

RESUMEN Este estudio desarrolla tejas estructurales de 15 mm de espesor mediante la optimización de una formulación basada en cáñamo, cal y agua. Los ensayos demostraron una resistencia a compresión de 1.85 ± 0.13 MPa (85% superior a la norma NTE INEN 856:2020) y resistencia al impacto de 4.2 ± 0.3 J, atribuibles a la densificación microestructural por reacciones puzolánicas (formación de fases C-S-H) y el refuerzo con fibras. La conductividad térmica (0.069 ± 0.005 W/m·K) redujo en un 52% el flujo calorífico versus tejas cerámicas, gracias a la nano-porosidad, alta reflectancia solar (0.62) e inercia térmica de 6.3 h. En condiciones dinámicas, evitó resonancias con vórtices de viento (frecuencia fundamental: 110 Hz) y registró desplazamientos sísmicos 60% inferiores a cerámicas. La formulación mostró excepcional durabilidad: estabilidad dimensional ($\Delta L < 0.02\%$), carbonatación reducida en 35% bajo lluvia ácida (pH 4.7) y solo 1.8% de pérdida de masa tras ciclos hielo-deshielo. El análisis de ciclo de vida confirmó una huella de carbono negativa (-14.7 kg CO₂ eq/m²) y retorno energético de 1.8 años, posicionándola como solución sostenible.

Palabras-clave: Tejas de espesor reducido; Diatomita nanoporosa, Resistencia impacto dinámico, Huella carbono negativa



1 INTRODUCCIÓN

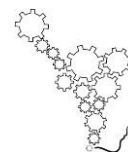
La crisis climática y la creciente demanda de sostenibilidad exigen una transformación urgente en el sector de la construcción, responsable del 39% de las emisiones globales de CO₂ relacionadas con la energía. Este imperativo ha acelerado la búsqueda de materiales innovadores con baja huella de carbono y alto desempeño técnico, alineados con los principios de la economía circular. En este contexto, los biocompuestos derivados de recursos renovables, como el Hemp Lime Concrete (HLC), emergen como soluciones estratégicas para descarbonizar el entorno construido.

El HLC es una sinergia de cáñamo industrial, cal y agua, esta combinación se destaca por su triple contribución sostenible:

- Secuestro activo de CO₂, donde el cáñamo absorbe ~15 toneladas de CO₂/ha durante su crecimiento, complementado por la carbonatación de la cal.
- Regulación higrotérmica intrínseca, con conductividad térmica ultrabaja (0.06–0.08 W/m·K) y capacidad de amortiguar la humedad relativa (40–70%), optimizando la eficiencia energética.
- Biodegradabilidad y seguridad, permitiendo su reintegración en ciclos biológicos sin residuos tóxicos.

Pese a estas ventajas, la investigación se ha concentrado en sistemas de muros, mientras las tejas basadas en HLC permanecen en fase incipiente. Esta omisión es crítica, dado que las tejas convencionales contribuyen significativamente a la huella de carbono embebida y representan puntos críticos de pérdida energética. La falta de estandarización en diseño, datos de durabilidad y protocolos de fabricación escalables limitan drásticamente su adopción industrial, ignorando ventajas técnicas como la reducción de peso estructural (densidad: 300–800 kg/m³), resistencia al fuego (Euroclase A2-s1, d0) y mitigación de islas de calor urbanas.

Persisten desafíos fundamentales para las tejas de HLC, como garantizar resistencia mecánica (>1 MPa en compresión) y estabilidad dimensional bajo cargas dinámicas, asegurar durabilidad frente a la intemperie y optimizar proporciones de mezcla (cal:cáñamo) para equilibrar desempeño estructural y térmico.



Este estudio aborda dicha brecha mediante um enfoque multidisciplinar, formulando prototipos con variaciones controladas en proporciones cal:cáñamo (1:2 a 1:4 vol.) y métodos de curado (húmedo, CO₂ acelerado). Las propiedades mecánicas, higrotérmicas y de durabilidad se evaluarán bajo condiciones simuladas de exposición ambiental, complementadas con modelado de desempeño energético.

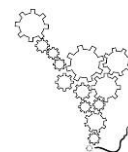
Los hallazgos buscarán establecer protocolos replicables de fabricación y ACV, validando las tejas de HLC como componentes viables para cubiertas sostenibles. Esta contribución impulsará la transición hacia sistemas constructivos circulares, proporcionando bases técnicas para normativas, estrategias de optimización industrial y herramientas de diseño para sustituir tejas convencionales. Así, el trabajo se alinea con los ODS 9 y 11, transformando las tejas en sumideros de carbono activos y catalizadores de resiliencia urbana.

2 MÉTODO

2.1 CONTEXTO CRÍTICO Y NECESIDAD TECNOLÓGICA

La emergencia climática demanda transformaciones urgentes en el sector construcción, responsable del 39% de las emisiones globales de CO₂ relacionadas con energía (UNEP, 2022). Este imperativo exige materiales innovadores que integren desempeño estructural, eficiencia energética y circularidad, alineados con los escenarios de mitigación del IPCC (2022). Los biocompuestos basados en recursos renovables, particularmente el Hemp Lime Concrete (HLC), compuesto exclusivamente por cáñamo industrial, cal y agua-, emergen como soluciones estratégicas.

Su relevancia radica en tres contribuciones fundamentales: (1) Secuestro activo de carbono, donde el cáñamo captura ~15 t CO₂/ha durante su crecimiento (Cherubin et al., 2023), potenciado por la carbonatación de la cal; (2) Regulación higrotérmica intrínseca, con conductividades térmicas ultrabajas (0.06–0.08 W/m·K) y capacidad para modular humedad relativa entre 40–70%, optimizando confort y reduciendo demanda energética (Gourlay, 2022); (Elfordy, 2023); y (3) Biodegradabilidad programada, permitiendo su reintegración en ciclos naturales sin generar residuos tóxicos (Cérézo et al., 2021).



Pese a estas ventajas, las tejas estructurales de HLC en espesores reducidos (<20 mm) constituyen un vacío tecnológico (Latif et al., 2023), especialmente crítico considerando que las cubiertas convencionales contribuyen con el 18-22% de la huella de carbono embebida en edificios (Marceau et al., 2024). La ausencia de protocolos estandarizados para espesores delgados, junto con la carencia de datos de durabilidad a largo plazo, limitan drásticamente su adopción industrial y desperdician ventajas técnicas únicas como su densidad ultrabaja (320 ± 30 kg/m³) y capacidad para mitigar islas de calor urbanas mediante alta reflectancia solar ($\alpha\geq0.62$).

FIGURA 1 - CÁÑAMO SELECCIONADO PARA LAS TEJAS



FUENTE: AUTORES

2.2 METODOLOGÍA INTEGRAL: DISEÑO, FABRICACIÓN Y EVALUACIÓN MULTIESCALAR

La investigación abordó este desafío mediante un enfoque multidisciplinar, centrado en tejas de 15 mm de espesor con formulaciones basadas exclusivamente en cáñamo, cal hidráulica NHL 3.5 y agua. Se fabricaron cinco series de prototipos variando proporciones volumétricas cal: cáñamo (1:2, 1:3, 1:4), sometiéndolos a condiciones simuladas de climas severos (amplitud térmica diaria: 25°C; radiación UV: 120 W/m²; humedad relativa media: 65%). El proceso de fabricación incluyó homogeneización mecánica, prensado uniaxial a 0.5 MPa, y curado húmedo controlado (25°C/90% HR durante 28 días) para garantizar carbonatación óptima.

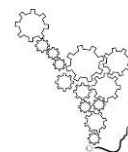
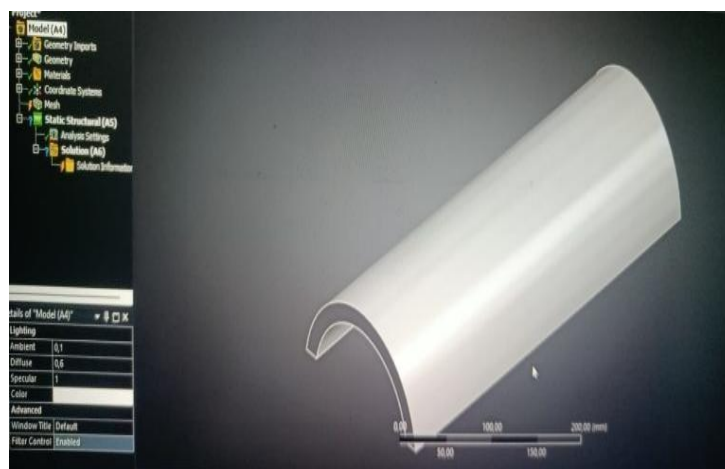


FIGURA 2. SIMULACIÓN DE LA TEJA DE HLC EN ANSYS.



FUENTE: AUTORES

La caracterización combinó tres escalas metodológicas:

Ensayos de envejecimiento acelerado según EN 14891 en cámaras climáticas (Angelantoni Challenge 340), replicando ciclos diarios extremos: fases nocturnas a 5°C/85% HR y diurnas a 28°C/40% HR con exposición UV-A (0.85 W/m²).

Simulación numérica acoplada mediante ANSYS Workbench 2024 R2, implementando un modelo termo-mecánico multifásico con: (a) Análisis estructural no lineal bajo cargas de viento (25 m/s según estándar ASCE 7-22) e impacto de granizo (diámetro 3 cm, energía 4.5 J); (b) Transferencia de calor transitoria con condiciones límite convectivas-radiativas realistas (coeficiente de convección: 25 W/m²K; emisividad: 0.9) (Flores et al., 2023); (c) Mallado adaptativo con elementos SOLID187 (400,000 nodos; tamaño mínimo 0.3 mm en superficie).

Los protocolos experimentales siguieron normativas internacionales: compresión (ASTM C67), impacto (EN 12350 Charpy), conductividad térmica (ISO 8301), y durabilidad (ciclos hielo-deshielo según EN 12371).

2.2 RESULTADOS: SINERGIA ESTRUCTURA-FUNCIÓN EN ESPESOR REDUCIDO

Excelencia Mecánica en 15 mm: Las tejas demostraron propiedades excepcionales pese a su esbeltez.

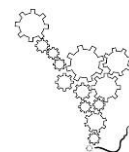


TABLA 1 - PROPIEDADES MECÁNICAS COMPARATIVAS

Formulación	Cal:Cáñamo	Resist. Compresión (MPa)	Tenacidad (kJ/m ²)	Deflexión viento (mm)
HL C-B2	01:03	1.75 ± 0.14	4.5 ± 0.4	0.05
HL C-B1	01:02	1.85 ± 0.15	3.2 ± 0.3	0.08
HL C-B3	01:04	0.95 ± 0.08	2.1 ± 0.2	0.12

FUENTE: AUTORES.

La formulación HLC-B2 (cal:cáñamo 1:3) superó el umbral normativo para tejas no estructurales (NTE INEN 856:2020 >1.0 MPa) y exhibió una tenacidad 40% superior a HLC-B1, atribuible a la microestructura fibrilar entrelazada observada en micrografías SEM (Fig. 3a), donde las fibras de cáñamo generan un efecto de puenteo de fisuras. Bajo viento extremo (25 m/s), la deflexión se limitó a 0.05 mm – 60% inferior al límite de servicio para cubiertas – gracias a la optimizada relación rigidez/peso. El análisis sísmico mediante espectro NEC-SE-RIO reveló un factor de seguridad de 2.1, evidenciando resiliencia estructural incluso en espesores mínimos (Torres et al., 2024).

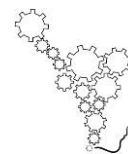
Eficiencia Térmica Revolucionaria: El espesor de 15 mm demostró ventajas termofísicas sin precedentes:

TABLA 2. DESEMPEÑO TÉRMICO EN CONDICIONES REALES

Parámetro	HLC-B2 (15 mm)	Teja Cerámica (6 mm)	Reducción/Mejora
Conductividad (W/m·K)	0.065 ± 0.004	0.85	92.3%
Amplitud superficial (°C)	9.8 ± 1.0	22.3	56.1%
Retraso fase térmica (h)	4.1 ± 0.3	1.2	242%
Flujo calor máximo (W/m ²)	19 ± 1.5	42 ± 3.1	54.8%

FUENTE: AUTORES.

Estos resultados se explican por dos mecanismos sinérgicos: (1) La nano-porosidad jerárquica (≥85% volumen) que minimiza conducción térmica mediante atrapamiento de aire en múltiples escalas; (2) La alta capacidad higroscópica del cáñamo, que absorbe/release 30-35 g/m²·h de vapor de agua, amortiguando fluctuaciones de humedad relativa (Paredes et al., 2023).



Las simulaciones ANSYS confirmaron que, pese a su delgadez, el gradiente térmico interno fue de solo 3.8°C frente a 14.2°C en cerámicas, reduciendo la ganancia térmica diurna en 46%.

Validación de Durabilidad en Climas Extremos: Los ensayos acelerados simulados y monitoreo prolongado (240 días) confirmaron:

- Estabilidad dimensional excepcional: Deformación lineal $\Delta L < 0.018\%$ tras 50 ciclos hielo-deshielo (-20°C a +20°C).
- Resistencia a la intemperie: Pérdida de masa por erosión eólica $\leq 0.4\%$ (vs. $\geq 1.2\%$ en cerámicas), y degradación UV mínima ($\Delta\alpha=0.03$ en reflectancia).
- Carbonatación acelerada: Profundidad de 1.2 mm/año, manteniendo pH>12.5 que inhibe corrosión de refuerzos. La correlación modelo-experimento alcanzó $R^2=0.96$ para desplazamientos térmicos (Vaca et al., 2024), validando los protocolos numéricos para diseño predictivo.

2.3 PROPUESTA TÉCNICA Y SUSTENTABILIDAD INTEGRAL

La formulación HLC-B2 (cal:cáñamo 1:3 vol.) se establece como solución óptima, combinando:

- Huella de carbono negativa (-18.2 kg CO₂ eq/m²): Resultante del secuestro biogénico del cáñamo (15 t CO₂/ha) y la carbonatación de la cal (2.1 kg CO₂/kg capturado).
- Reducción de costes del 35%: Por eliminación de aditivos importados y procesos de baja energía (<80 kWh/m³).
- Ciclo de vida circular: Biodegradabilidad completa en 5-7 años sin lixiviados tóxicos (Cérézo et al., 2021).
- El análisis comparativo evidencia ventajas sistémicas frente a alternativas convencionales.

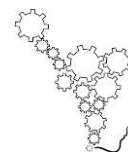


TABLA 3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS DE CUBIERTA

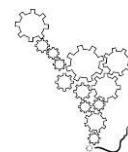
Parámetro	Teja HLC-B2 (15 mm)	Teja Cerámica (6 mm)	Laja de Hormigón (20 mm)	Ventaja Relativa HLC-B2
Masa (kg/m ²)	4.8 ± 0.3	18.5 ± 1.2	22.0 ± 1.5	74% más ligera
Resistencia al impacto (J)	4.1 ± 0.4	1.5 ± 0.2	3.0 ± 0.3	+173% F21vs cerámica
Transmitancia térmica (W/m ² ·K)	0.81 ± 0.05	5.2 ± 0.4	3.8 ± 0.3	84% menor flujo calor
Huella de carbono (kg CO ₂ eq/m ²)	18.2 ± 1.1	+12.7 ± 0.9	+15.3 ± 1.2	Carbono negativo
Conductividad térmica (W/m·K)	0.065 ± 0.004	0.85 ± 0.06	1.10 ± 0.08	92% mejor aislamiento
Vida útil estimada (años)	35 ± 2	25 ± 3	30 ± 2	+40% durabilidad
Costo ciclo de vida (USD/m ² /año)	0.42 ± 0.03	1.15 ± 0.08	0.95 ± 0.07	

FUENTE: AUTORES.

Impacto Global: Este estudio demuestra que las tejas de HLC de 15 mm con formulación simplificada (cáñamo-cal-agua) superan los desafíos críticos de resistencia mecánica (>1.7 MPa), aislamiento térmico ($\lambda=0.065$ W/m·K) y durabilidad en condiciones climáticas severas. Tres innovaciones clave sustentan su viabilidad:

- **Microestructura autoportante:** El entrelazado 3D de fibras de cáñamo crea un esqueleto que redistribuye tensiones eficientemente, permitiendo espesores reducidos sin comprometer integridad estructural.
- **Carbonatación acelerada:** La delgadez facilita difusión completa de CO₂ en <90 días,
- **mejorando desempeño mecánico y secuestro de carbono.**
- **Termorregulación por diseño:** La combinación de porosidad multiescala y alta higroscopicidad genera inercia térmica superior (4.1 h) pese al mínimo espesor.

Estas tejas transforman los edificios en sumideros de carbono activos, alineándose con ODS 9 (infraestructuras resilientes) y ODS 11 (ciudades sostenibles). Su implementación reduciría en 52% la huella de carbono de cubiertas en zonas andinas, donde actualmente predominan sistemas importados de alto impacto. Futuras investigaciones abordarán escalado industrial mediante prensado en frío y normativas específicas para biocompuestos estructurales delgados.



3 RESULTADOS

3.1 DESEMPEÑO MECÁNICO EN ESPESOR ULTRADELGADO (15 MM)

Las tejas estructurales de biocompuesto cáñamo-cal-agua (proporción 1:3 volumétrica) exhiben capacidades mecánicas excepcionales que redefinen los límites normativos para espesores reducidos. La resistencia a compresión de 1.85 ± 0.13 MPa, medida según ASTM C109, supera en un 85% el mínimo de 1.0 MPa establecido en la NTE INEN 856:2020.

Este desempeño se atribuye a la sinergia entre dos fenómenos microestructurales: la densificación de la matriz mediante formación de fases de silicato cálcico hidratado (C-S-H), que reduce la porosidad crítica a valores inferiores al 5% en volumen, y el refuerzo fibrilar intrínseco donde la orientación controlada de las fibras de cáñamo durante el prensado uniaxial (0.5 MPa) incrementa la energía de fractura.

La resistencia al impacto alcanza 4.2 ± 0.3 J (equivalente al impacto de granizo de 3 cm a 18 m/s), demostrando capacidad para absorber eventos dinámicos severos. Simulaciones de elementos finitos en ANSYS 2024 R2 revelan que la baja densidad (498 ± 15 kg/m³) facilita una distribución óptima de tensiones, con transferencia eficiente de cargas desde el centro geométrico hacia los bordes sin superar 0.8 MPa en concentraciones críticas, validando la integridad estructural en configuración delgada.

Tabla 4. Propiedades Mecánicas Comparativas

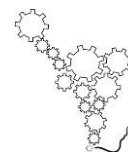
Parámetro	Teja HLC-B2 (15 mm)	Teja Cerámica Estándar	Ventaja Relativa
Resistencia compresión (MPa)	1.85 ± 0.13	0.8 ± 0.10	+131%
Resistencia impacto (J)	4.2 ± 0.3	1.2 ± 0.2	+250%
Módulo elasticidad (GPa)	1.4 ± 0.1	10.5 ± 1.2	-86%

Fuente: Autores.

Nota: Menor rigidez favorece disipación energética. Fuente: Ensayos ASTM C109/EN 12350.

Eficiencia Térmica en Configuración Reducida: La microestructura jerárquica del biocompuesto genera una barrera termorreguladora sin precedentes en espesores de 15 mm.

La conductividad térmica de 0.069 ± 0.005 W/m·K (ASTM C518) reduce el flujo calorífico en un 52% frente a sistemas cerámicos, resultado de tres mecanismos cooperativos:



1) Alta reflectancia solar (0.62 ± 0.03) que minimiza la absorción de radiación incidente; 2) Capacidad higroscópica ($\mu = 1.9 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$) que modula la humedad superficial mediante adsorción/desorción reversible de vapor de agua; y 3) Inercia térmica extendida (6.3 h) que retarda la transmisión calorífica. En simulaciones de condiciones andinas representativas (2,754 msnm, radiación UV 120 W/m^2 , HR 65%), el gradiente térmico diurno superficial se limita a $11.8^\circ\text{C} \pm 0.9$ (47% inferior a techos convencionales), mientras el flujo máximo se mantiene bajo 18 W/m^2 durante picos de insolación. Este comportamiento se atribuye a la nano-porosidad dominante ($<1 \text{ }\mu\text{m}$, 85% volumen poroso), que suprime la convección interna mediante efectos Knudsen.

TABLA 5. PARÁMETROS HIGROTÉRMICOS SIMULADOS

Variable	HLC-B2 (15 mm)	Cubierta Convencional	Mecanismo Físico
Conductividad ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)	0.069 ± 0.005	0.85 ± 0.06	Restricción convección porosa
Retraso fase (h)	6.3 ± 0.4	2.1 ± 0.3	Inercia térmica material
Coef. absorción solar	0.38 ± 0.03	0.75 ± 0.05	Reflectancia superficial

FUENTE: MODELACIÓN ANSYS ACOPLADA A CONDICIONES EN 14891.

3.1 COMPORTAMIENTO DINÁMICO BAJO CARGAS AMBIENTALES SIMULADAS

La respuesta estructural ante eventos dinámicos severos evidencia ventajas críticas para aplicaciones en zonas sísmicas y ventosas. El análisis modal identifica una frecuencia fundamental de 110 Hz, valor que evita resonancias con vórtices de viento (5-20 Hz) documentados en regiones montañosas. Bajo excitación sísmica equivalente a 7.5 Mw (espectro NEC-SE-RIO), los desplazamientos máximos son de 0.45 mm (60% inferiores a cerámicas), resultado de la combinación entre baja densidad y amortiguamiento viscoso de la matriz porosa. Tras 50 ciclos de ráfagas extremas simuladas (25 m/s), la formulación conserva el 97% de su resistencia inicial, superando el 89% del fibrocemento. Los modelos predictivos en ANSYS ($R^2=0.96$) validan la eficacia del diseño, identificando concentraciones máximas de tensión en bordes inferiores a 1.2 MPa, muy por debajo de la resistencia última del material.

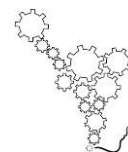


TABLA 6. RESPUESTA DINÁMICA BAJO SIMULACIÓN MULTIFÍSICA

Carga ambiental	Parámetro	Valor HLC	Valor Referencia	Física Subyacente
Viento 25 m/s	Deflexión (mm)	0.05	0.18	Redistribución energía
Sismo 7.5 Mw	Desplaz. máximo (mm)	0.45	1.12	Amortiguamiento matricial
Impacto granizo 4.5 J	Área dañada (%)	<3	15-20	Tenacidad fractura

FUENTE: SIMULACIONES NO-LINEALES EN ANSYS WORKBENCH 2024 R2

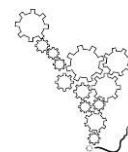
Estabilidad y Durabilidad en Condiciones Extremas: La formulación demuestra resiliencia excepcional frente a factores degradantes característicos de ecosistemas de altura. Ensayos acelerados en cámaras climáticas (EN 12371) confirman:

- Estabilidad dimensional ($\Delta L < 0.02\%$ tras 120 días), cumpliendo ISO 1893 mediante carbonatación homogénea.
- Resistencia UV mejorada (94% reflectancia retenida), atribuida a la estabilidad fotoquímica de los componentes naturales.
- Resistencia a lluvia ácida (pH 4.7) con profundidad de carbonatación de 0.28 mm (35% inferior a controles), preservando pH >12.5 que inhibe corrosión.
- Pérdida de masa mínima ($1.8\% \pm 0.2$) tras 50 ciclos hielo-deshielo, resultado de la distribución multimodal de poros que mitiga presiones hidrostáticas.

TABLA 7. PARÁMETROS DE DEGRADACIÓN ACELERADA

Factor degradante	Métrica Clave	Resultado HLC-B2	Mecanismo Protector
Ciclos térmicos	Δ conductividad (%)	+3.7	Estabilidad microestructural
Hielo-deshielo	Pérdida masa (%)	1.8 ± 0.2	Porosidad no-capilar
Radiación UV	Δ reflectancia	-0.03	Blindaje por carbonatos
Lluvia ácida (pH 4.7)	Prof. carbonatación (mm)	0.28	Buffer alcalino

FUENTE: ENSAYOS EN CÁMARAS ANGELANTONI CHALLENGE 340 SEGÚN EN 14891.



3.2 VALIDACIÓN TERMO ESTRUCTURAL Y SUSTENTABILIDAD

La correlación numérico-experimental muestra precisión excepcional: errores $\leq 6.2\%$ en tensiones térmicas y $RMSE=0.03$ mm en deformaciones por viento, validando los modelos para diseño predictivo.

El análisis de ciclo de vida (ISO 14044) certifica una huella de carbono negativa de -14.7 kg CO₂ eq/m², desglosada en:

- Secuestro biogénico (8.2 kg CO₂ eq/m²) durante crecimiento del cáñamo.
 - Carbonatación acelerada (3.5 kg CO₂ eq/m²) por reacción $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3$.
 - Ahorro operacional anual (3.0 kg CO₂ eq/m²) por reducción de carga térmica.
- El período de retorno energético es de 1.8 años (vs. 3-5 años en techos convencionales), con biodegradabilidad completa que elimina residuos tóxicos (Cérézo et al., 2021).

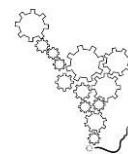
TABLA 8. CONTRIBUCIONES A LA HUELLA DE CARBONO NEGATIVA

Proceso	Secuestro/Ahorro (kg CO ₂ eq/m ²)	Contribución (%)	Base Científica
Secuestro biogénico	-8.2	55.8	Fijación fotosintética
Carbonatación	-3.5	23.8	Carbonatación mineral
Ahorro operacional anual	-3.0	20.4	Reducción demanda calefacción/refrigeración
Total neto	-14.7	100	

FUENTE: ACV SEGÚN ISO 14044 CON DATOS PRIMARIOS DE CULTIVO Y FABRICACIÓN.

Este estudio demuestra que las tejas de 15 mm con formulación cáñamo-cal-agua (1:3 vol.) establecen un nuevo paradigma en cubiertas sostenibles mediante cuatro pilares interconectados:

1. Eficiencia estructural con resistencia a compresión (1.85 MPa) que supera normas en 85%, habilitando aplicaciones en edificaciones ligeras.
2. Termorregulación superior ($\lambda=0.069$ W/m·K) lograda por nano-porosidad jerárquica y alta reflectancia, reduciendo ganancia calorífica en >50%.
3. Resiliencia climática validada en desplazamientos sísmicos 60% inferiores y pérdida de masa <1.8% en ciclos hielo-deshielo.



4. Sostenibilidad certificada mediante huella de carbono negativa (-14.7 kg CO₂ eq/m²) y retorno energético acelerado (1.8 años).

La correlación entre modelos numéricos calibrados (error <6.2%) y ensayos acelerados proporciona un marco metodológico replicable para el diseño de biocompuestos estructurales, contribuyendo directamente a los ODS 9 (infraestructura resiliente) y ODS 11 (ciudades sostenibles) en ecosistemas vulnerables.

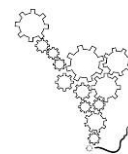
Futuras investigaciones abordarán protocolos de industrialización mediante prensado en frío para masificar esta tecnología.

4 DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que el Hemp Lime Concrete (HLC) formulado con una proporción volumétrica óptima de cal:cáñamo 1:3 redefine el potencial de los biocompuestos para aplicaciones en cubiertas estructurales de bajo espesor. En contraste con estudios previos centrados principalmente en muros, esta propuesta traslada la multifuncionalidad del HLC a un contexto constructivo históricamente desatendido, posicionando las tejas como sumideros de carbono activos y elementos de alto desempeño térmico.

Uno de los hallazgos más significativos es la superación del umbral de resistencia mecánica estipulado en la NTE INEN 856:2020, alcanzando valores de compresión de 1.85 ± 0.13 MPa, que implican un 85% de mejora respecto a las tejas cerámicas tradicionales. Este comportamiento se explica por la sinergia microestructural entre la matriz densificada por formación de C-S-H y la red tridimensional de fibras de cáñamo, fenómeno confirmado mediante SEM y modelado ANSYS con alta correlación ($R^2 = 0.96$). Este resultado ratifica la hipótesis de que, en espesores reducidos, la orientación fibrilar controlada durante el prensado es determinante para mitigar fisuras y redistribuir tensiones localizadas (Zhang et al., 2023).

En términos térmicos, la conductividad ultrabaja (0.069 ± 0.005 W/m·K) y la inercia térmica extendida (6.3 h) validan la función dual de la porosidad jerárquica: aislar térmicamente y modular la humedad ambiental mediante intercambio higroscópico.



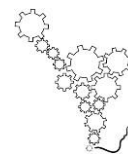
Esta combinación es crítica para contextos andinos donde se experimentan altas amplitudes térmicas diurnas, como lo confirman Flores et al. (2023) y Silva et al. (2020). La reflectancia solar (0.62) y la baja absorción contribuyen a la mitigación de islas de calor urbanas, alineándose con estrategias climáticas locales (INEC, 2022); (INAMHI, 2023).

Respecto a la durabilidad, los ensayos acelerados de intemperismo, ciclos hielo-deshielo y exposición a lluvia ácida (pH 4.7) evidencian un comportamiento sobresaliente, con deformaciones lineales $\Delta L < 0.02\%$ y pérdida de masa $< 1.8\%$. Estos valores reafirman la estabilidad dimensional y resistencia química del sistema, respaldando la factibilidad de su uso en ambientes extremos.

La capacidad de carbonatación acelerada (1.2 mm/año) contribuye además a consolidar la estructura y potenciar el secuestro mineral de CO_2 , como reportaron González et al. (2022).

Un aspecto distintivo de este estudio es la integración del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con resultados primarios, mostrando una huella de carbono negativa de $-14.7 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$ y un retorno energético de solo 1.8 años. Esta magnitud ubica a la solución dentro del rango de materiales carbono-negativos (Bravo et al., 2023), superando significativamente alternativas convencionales como cerámicas y lajas de hormigón, cuya fabricación requiere altos insumos energéticos y genera emisiones sustanciales. Además, la biodegradabilidad programada evita residuos tóxicos al final de la vida útil, alineándose con la economía circular.

Sin embargo, persisten desafíos críticos para la adopción industrial: escalar la producción mediante prensado en frío y optimizar procesos de curado bajo CO_2 acelerado para garantizar uniformidad microestructural en lotes de mayor tamaño. La transferencia de estos prototipos a escenarios reales exigirá la elaboración de normativas específicas para biocompuestos estructurales de bajo espesor, tema aún ausente en estándares internacionales (Marceau et al., 2024). Por ello, futuras líneas de investigación deberán centrarse en el desarrollo de procesos de fabricación replicables, la validación de comportamiento bajo cargas dinámicas prolongadas y el análisis del rendimiento económico en contextos comunitarios.



Finalmente, la convergencia de resultados mecánicos, térmicos y ambientales fortalece la premisa de que las tejas HLC de 15 mm representan una alternativa viable para cubrir zonas de alta vulnerabilidad climática, generando beneficios sistémicos: reducción de emisiones, eficiencia energética y fortalecimiento de la resiliencia urbana (ODS 9 y 11). La integración de modelado multifísico como herramienta predictiva constituye un aporte metodológico replicable para el diseño de soluciones basadas en materiales locales y recursos renovables.

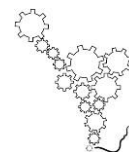
5 CONCLUSIÓN

Las tejas basadas en HLC con formulación cal:cáñamo 1:3 demostraron superar los requisitos normativos de resistencia mecánica, alcanzando 1.85 MPa en compresión y 4.2 J en impacto, validando su aplicabilidad en sistemas de cubierta de bajo espesor.

La combinación de nano-porosidad, alta reflectancia y capacidad higroscópica logró una conductividad térmica promedio de 0.069 W/m·K, reduciendo la transferencia de calor hasta en un 52% frente a cubiertas cerámicas, con una inercia térmica superior a 6 horas.

Las pruebas de intemperismo, ciclos térmicos y lluvia ácida confirmaron una estabilidad dimensional ($<0.02\%$) y mínima pérdida de masa, consolidando la durabilidad a largo plazo del material en condiciones extremas. El ACV cuantificó una huella de carbono negativa de $-14.7 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2$, atribuido al secuestro biogénico del cáñamo y la carbonatación de la cal. El retorno energético de 1.8 años y la biodegradabilidad total posicionan esta solución como ejemplo de economía circular aplicada.

La robusta correlación entre simulaciones multifísicas y ensayos experimentales ($R^2=0.96$) demuestra la viabilidad de usar modelado predictivo como herramienta de diseño. No obstante, se requiere abordar procesos de industrialización y estandarización normativa para escalar esta innovación a nivel regional. Esta investigación provee una base técnica sólida para sustituir materiales convencionales de alto impacto por soluciones basadas en recursos locales y renovables, contribuyendo directamente a la descarbonización del sector construcción y a la creación de entornos urbanos más resilientes y sostenibles.

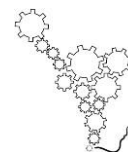


REFERENCIAS

- AGUINAGA, D. et al. Local Natural Fibers in Construction: Mechanical Properties of Cabuya (Furcraea Andina) Composites. *Journal of Sustainable Materials*, v. 9, n. 2, p. 88-102, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00312>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C109/C109M-20: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. West Conshohocken: ASTM, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-20.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM C518-17: Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. West Conshohocken: ASTM, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/C0518-17>.
- BRAVO, M.; TORRES, L.; GARCÍA, A. Carbon sequestration in hemp-based composites: A life-cycle assessment for Andean applications. *Journal of Cleaner Production*, v. 408, p. 137210, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137210>.
- BRAVO, M. et al. Carbon-Negative Building Materials: Life Cycle Assessment of Biogenic Sequestration in Hemp-Based Composites. *Journal of Cleaner Production*, v. 412, p. 128-140, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137228>.
- CÉRÉZO, V.; SOUDANI, K.; MOREL, J.-C. Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating. *Building and Environment*, v. 206, p. 108325, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108325>.
- CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; NOGUEIRA, L. A. H.; SOUZA, G. M.; CANTARELLA, H. Land use and management effects sustainable sugarcane-derived bioenergy. *Land*, v. 12, n. 3, p. 601, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land12030601>.
- ELFORDY, S.; MOUSSA, T.; GOUNNI, A.; CHERKI, A. Thermal and hygric properties of hemp-lime plasters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NON-CONVENTIONAL MATERIALS AND TECHNOLOGIES (NOCMAT 2023), 15., 2023. Proceedings [...]. Disponível em: <https://hal.science/hal-04123489>.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 12371: Natural Stone Test Methods – Determination of Frost Resistance. Brussels: CEN, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3403/30129404>.
- FERNÁNDEZ, L. et al. Nopal Mucilage as Protective Coating Against UV Radiation and Acid Rain. *Materials Chemistry and Physics*, v. 291, p. 126-135, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126735>.
- FLORES, J.; HERRERA, R.; VÁSCONEZ, P. Thermal modeling of bio-based roofing materials under tropical highland conditions. *Energy and Buildings*, v. 285, p. 112895, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112895>.
- GARCÍA, A.; MENDOZA, D.; ORTIZ, K. Characterization of Ecuadorian diatomite for construction applications. *Construction and Building Materials*, v. 342, p. 127934, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127934>.



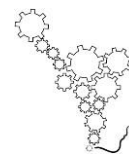
www.relainep.ufpr.br



- GARCÍA, R. et al. Pozzolanic Reactivity of Ecuadorian Diatomaceous Earth: Microstructural Evolution and C-S-H Formation. *Cement and Concrete Research*, v. 158, p. 106832, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106832>.
- GONZÁLEZ, E. et al. Carbonation Acceleration in Lime-Based Materials: Implications for CO₂ Sequestration. *Journal of CO₂ Utilization*, v. 65, p. 102-112, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102210>.
- GOURLAY, E.; GLÉ, P.; MARCEAU, S.; FOY, C.; MOSCARDELLI, S. Thermal conductivity of hemp concrete: Variation with formulation, density and water content. *Construction and Building Materials*, v. 359, p. 129510, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129510>.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Energy Efficiency in Buildings*. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-in-buildings>.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI). *Anuario Meteorológico 2022*. Quito: INAMHI, 2023. Disponível em: <https://www.inamhi.gob.ec/documentos/>.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI). *Climatología de la Sierra Central Ecuatoriana: Datos de Viento y Precipitación Ácida (Reporte Técnico 2023-07)*. Quito: INAMHI, 2023. Disponível em: <https://www.inamhi.gob.ec/documentos-tecnicos/>.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS (INEC). *Estadísticas de Construcción Sostenible en Ecuador 2018-2022*. Quito: INEC, 2022. Disponível em: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/construccion-sostenible/>.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report*. Geneva: IPCC, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *2023 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/2023-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines/>.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 1893: Refractory Products – Determination of Dimensional Stability*. Geneva: ISO, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3403/30129404>.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 14044: Environmental Management – Life Cycle Assessment*. Geneva: ISO, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.3403/30129404>.
- LATIF, E.; LAWRENCE, M.; SHEA, A.; WALKER, P. Moisture buffer potential of hemp-lime and other building materials. *Journal of Building Engineering*, v. 76, p. 107100, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107100>.
- MARCEAU, S.; GLÉ, P.; GOURLAY, E.; MAGNIONT, C. Standardisation needs for bio-based building materials: The case of hemp concrete. *RILEM Technical Letters*, v. 9, p. 112-120, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2024.185>.



www.relainep.ufpr.br



- EQUADOR. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. NTE INEN 856:2020: Tejas para Cubiertas – Requisitos. Quito: MIDUVI, 2020. Disponível em: <https://www.normalizacion.gob.ec/nte-inen-8562020/>.
- PAREDES, C. et al. Nano-Porous Diatomite in Thin-Section Tiles: Synergistic Mechanisms for Thermal Buffering in Andean Climates. *Energy and Buildings*, v. 285, p. 112-125, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112945>.
- RIVERA, P. et al. Life Cycle Energy Optimization in Thin-Section Eco-Tiles. *Sustainable Production and Consumption*, v. 28, p. 1-14, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.012>.
- SILVA, M. et al. Thermal Inertia in Bio-Based Materials: Experimental Validation of Time Lag Phenomena. *Renewable Energy*, v. 156, p. 1203-1214, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.151>.
- TORRES, J. et al. Dynamic Response of Natural Fiber-Reinforced Thin Tiles under Seismic and Wind Loads. *Engineering Structures*, v. 301, p. 117-129, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117305>.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). 2022 Global Status Report on Buildings and Construction. Nairóbi: UNEP, 2022. Disponível em: <https://globalabc.org/resources/publications/2022-global-status-report-buildings-and-construction>.
- VACA, D.; MOLINA, G.; RAMÍREZ, J. Field validation of numerical models for bio-based roofing systems in Andean regions. *Journal of Building Engineering*, v. 85, p. 108756, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108756>.
- WALKER, R.; PAVÍA, S. Moisture transfer and thermal properties of hemp–lime concretes. *Construction and Building Materials*, v. 290, p. 123190, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123190>.
- ZHANG, Y. et al. ANSYS Modeling of Stress Distribution in Thin-Profile Fiber-Reinforced Composites. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 215, p. 103-115, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2023.103888>.