



ARTÍCULO

Rigidez dinámica en compuestos lignocelulósicos de *Pinus pseudostrobus* aglutinados con proteína de trigo y aditivos minerales.Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{1*} ; Sonia Correa Jurado² ; Kayo Kudo³ ¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, javier.sotomayor@umich.mx² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, 0213761h@umich.mx³ Universidad Prefectoral de Akita, Noshiro, Japón, kayokudo@iwt.akita-pu.ac.jp

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2026.665>

Recibido: 09.06.2026; Aceptado 17.06.2026.

RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de aditivos minerales sobre el comportamiento dinámico de compuestos lignocelulósicos a base de aserrín de *Pinus pseudostrobus* aglutinados con proteína de trigo. Se incorporaron bentonita, carbonato de calcio e hidróxido de calcio al 5 % en masa. La densidad y el contenido de humedad se determinaron conforme a normas estandarizadas, mientras que la velocidad de onda y el módulo dinámico se evaluaron mediante ensayos no destructivos de ondas de esfuerzo. La densidad varió entre 438 y 457 kg·m⁻³ sin diferencias significativas ($p = 0,071$; $\eta^2 = 0,13$), mientras que la velocidad de onda y el módulo dinámico mostraron diferencias altamente significativas ($p < 0,001$; $\eta^2 \geq 0,77$). Los tratamientos con bentonita y carbonato de calcio incrementaron la velocidad de onda (~9 %) y el módulo dinámico (18–20 %) respecto al control, mientras que el hidróxido de calcio redujo ambas propiedades (~10 % y 21 %). Se concluye que los aditivos modifican diferencialmente la microestructura, favoreciendo la continuidad estructural en bentonita y carbonato de calcio y deteriorando la cohesión en el sistema con hidróxido de calcio. Las ondas de esfuerzo se validan como herramientas sensibles para evaluar la integridad estructural en biocompuestos.

Palabras clave: Compuestos lignocelulósicos; ondas de esfuerzo; módulo dinámico; aditivos minerales

SUMMARY

The objective of this study was to evaluate the effect of mineral additives on the dynamic behavior of lignocellulosic composites based on *Pinus pseudostrobus* sawdust bonded with wheat protein. Bentonite, calcium carbonate, and calcium hydroxide were incorporated at 5% by mass. Density and moisture content were determined according to standardized methods, while wave velocity and dynamic modulus were evaluated using non-destructive stress wave techniques. Density ranged from 438 to 457 kg·m⁻³ without significant differences ($p = 0.071$; $\eta^2 = 0.13$), whereas wave velocity and dynamic modulus showed highly significant differences ($p < 0.001$; $\eta^2 \geq 0.77$). Treatments with bentonite and calcium carbonate increased wave velocity (~9%) and dynamic modulus (18–20%) compared to the control, while calcium hydroxide reduced both properties (~10% and 21%). It is concluded that mineral additives differentially modify the microstructure, enhancing structural continuity in bentonite and calcium carbonate systems and reducing cohesion in the calcium hydroxide system. Stress wave techniques are validated as sensitive tools for assessing structural integrity in biocomposites.

Key words: Lignocellulosic composites; stress waves; dynamic modulus; mineral additives

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de compuestos lignocelulósicos se ha consolidado como una estrategia sostenible para valorar residuos forestales y reducir la dependencia de polímeros sintéticos, en el marco de la transición hacia materiales de menor impacto ambiental. En estos sistemas, el desempeño mecánico está controlado por la interacción entre la matriz lignocelulósica, el sistema adhesivo y los aditivos incorporados, donde la



calidad interfacial determina la eficiencia en la transferencia de esfuerzos y la rigidez efectiva del material (Mohammed *et al.*, 2022). En este contexto, los aditivos minerales se emplean para modificar la microestructura; sin embargo, su influencia sobre las propiedades dinámicas evaluadas mediante propagación de ondas de esfuerzo aún no ha sido establecida de manera consistente en sistemas particulados.

Los compuestos lignocelulósicos a base de aserrín presentan una estructura heterogénea caracterizada por vacíos, interfaces débiles y distribución irregular de partículas, lo que condiciona la transferencia de esfuerzos y la respuesta mecánica. En estos sistemas, la densidad constituye un descriptor volumétrico asociado a la porosidad, mientras que la distribución y conectividad de los poros controlan la respuesta mecánica al actuar como zonas de disipación de energía y discontinuidad estructural; en particular, la porosidad reduce significativamente el módulo elástico al interrumpir la transmisión de esfuerzos en el medio (Chakma & Luo, 2024), por lo que la propagación de ondas y el módulo dinámico dependen principalmente de la integridad estructural y la continuidad del sistema.

Los adhesivos derivados de proteínas vegetales, debido a su origen renovable y al menor impacto que producen en el medioambiente, se han presentado como una opción ecológica frente a las resinas sintéticas. No obstante, estos adhesivos presentan limitaciones asociadas a su sensibilidad a la humedad y a una menor resistencia mecánica, derivadas de la naturaleza de sus redes de enlace y su estabilidad estructural en presencia de agua (Frihart & Hunt, 2025). Desde el punto de vista de los mecanismos de interacción, la eficiencia adhesiva depende de la conformación molecular de las proteínas, la disponibilidad de grupos funcionales y su capacidad de formar redes cohesivas e interacciones con la superficie lignocelulósica. Esto condiciona la transferencia de esfuerzos a nivel interfacial, por lo que la modificación mediante agentes que refuerzan estas redes resulta necesaria para mejorar su desempeño.

La incorporación de aditivos minerales en compuestos lignocelulósicos modifica la rigidez del material mediante la reducción de la porosidad y la mejora de la continuidad estructural, lo que incide directamente en la eficiencia de la transferencia de esfuerzos. En estos sistemas, los rellenos actúan como fases de refuerzo que alteran la distribución de tensiones y la interacción matriz-partícula, donde la dispersión, el tamaño de partícula y la calidad de la interfaz determinan la respuesta mecánica global (Fu *et al.*, 2008). En particular, una adhesión interfacial deficiente limita la eficiencia de carga y genera variabilidad en el comportamiento mecánico del material, lo que restringe la extrapolación de resultados entre sistemas y hace necesaria su evaluación específica en matrices lignocelulósicas con adhesivos proteicos.

La bentonita sódica, compuesta principalmente por montmorillonita, presenta una estructura laminar con elevada superficie específica que favorece su interacción con matrices lignocelulósicas. En sistemas compuestos, la incorporación de arcillas laminares reduce la porosidad y mejora la cohesión interna mediante el incremento del área interfacial efectiva y la redistribución de tensiones, lo que se traduce en un aumento de la rigidez del material (Ray & Okamoto, 2003). No obstante, su carácter hidrofílico puede incrementar la absorción de humedad, afectando la estabilidad dimensional y el desempeño mecánico bajo condiciones higroscópicas. En consecuencia, el efecto de la bentonita depende del equilibrio entre densificación estructural, interacción interfacial y sensibilidad a la humedad.

El carbonato de calcio es un relleno mineral ampliamente utilizado en compuestos lignocelulósicos debido a su estabilidad química y disponibilidad. En estos sistemas, su incorporación modifica la microestructura mediante un efecto de relleno que reduce la porosidad y mejora la continuidad estructural, favoreciendo la transferencia de esfuerzos; la magnitud de este efecto depende críticamente de la dispersión, del tamaño de partícula y de la calidad de la interfaz con la matriz, factores que controlan la eficiencia de carga y la respuesta mecánica global del material (Srivabut *et al.*, 2018). En consecuencia, la variabilidad en estos parámetros condiciona el desempeño y limita la extrapolación entre sistemas lignocelulósicos particulados.

El hidróxido de calcio introduce un componente químicamente activo debido a su naturaleza alcalina, lo que puede modificar el entorno químico del sistema lignocelulósico. En sistemas con adhesivos proteicos, condiciones alcalinas inducen desnaturalización y reorganización estructural de las proteínas, promoviendo la exposición de grupos funcionales reactivos que modifican su comportamiento adhesivo (Lei *et al.*, 2008). Esto altera su capacidad de formar redes cohesivas y afecta la adhesión interfacial; asimismo, la alcalinidad

puede modificar la lignina y las hemicelulosas, influyendo en la interacción matriz–adhesivo. Sin embargo, la evidencia experimental en sistemas particulados con propiedades dinámicas sigue siendo limitada.

Las técnicas no destructivas basadas en la propagación de ondas de esfuerzo permiten evaluar la integridad estructural de materiales lignocelulósicos sin alterar su configuración interna. En estos sistemas, la velocidad de propagación está directamente relacionada con la rigidez dinámica y, junto con la densidad, permite estimar el módulo dinámico como indicador del comportamiento mecánico (Hillig *et al.*, 2024). En compuestos lignocelulósicos, la propagación de ondas está controlada por la microestructura, particularmente por la distribución de fases, la porosidad y la calidad de las interfaces, factores que gobiernan la transmisión y la atenuación de la energía mecánica. Sin embargo, su aplicación en sistemas particulados con aditivos minerales y adhesivos naturales es aún limitada, por lo que requiere una validación específica.

La literatura científica evidencia una creciente convergencia hacia el uso de aditivos minerales y adhesivos naturales en compuestos lignocelulósicos, impulsada por su potencial como materiales sostenibles; sin embargo, persisten inconsistencias asociadas a la variabilidad en la microestructura, la compatibilidad matriz-refuerzo y las metodologías de evaluación empleadas. En particular, la relación entre densificación, calidad interfacial y comportamiento dinámico evaluado mediante propagación de ondas no ha sido establecida de manera consistente en sistemas particulados, dado que las propiedades efectivas dependen de forma crítica de la organización microestructural y de las correlaciones espaciales entre fases. Esta falta de integración limita el desarrollo de modelos predictivos coherentes y justifica la necesidad de estudios experimentales controlados.

En este contexto, la presente investigación plantea la siguiente pregunta: ¿Cómo influye la incorporación de bentonita sódica, carbonato de calcio e hidróxido de calcio en el comportamiento dinámico de compuestos lignocelulósicos de *Pinus pseudostrobus* con adhesivo de proteína de trigo? Se plantea como hipótesis que estos aditivos modifican de manera diferenciada la densidad y la propagación de ondas de esfuerzo, generando cambios significativos en la rigidez dinámica del material. En consecuencia, el objetivo del estudio es evaluar experimentalmente estos efectos mediante un diseño controlado y un análisis estadístico robusto.

MATERIAL Y MÉTODO

Material

Se elaboraron compuestos lignocelulósicos a partir de aserrín de *Pinus pseudostrobus* Lindl. y una formulación proteica derivada de harina de trigo. Se definieron un material de referencia y tres tratamientos con aditivos minerales (**Figura 1**). El aserrín se clasificó en fracciones granulométricas de > 850 μm (50 %), 850 μm (25 %), 425 μm (12,5 %) y 250 μm (12,5 %). El aserrín se acondicionó en cámara climática a 20 ± 2 °C y 65 ± 5 % de humedad relativa hasta alcanzar un contenido de humedad del 12 % antes de su uso en la formulación.

La formulación proteica se preparó a partir de proteínas de trigo (25 %) y agua (200 %), en proporción respecto a la masa seca del aserrín, con el fin de obtener una matriz aglutinante capaz de recubrir y cohesionar las partículas lignocelulósicas. La mezcla se sometió a agitación mecánica hasta lograr una dispersión homogénea y la completa hidratación de la fase proteica, asegurando la formación de una red continua. La formulación se utilizó inmediatamente después de su preparación para evitar variaciones en la viscosidad y en su comportamiento reológico¹.

Se definieron cuatro formulaciones experimentales: un material control sin aditivos y tres tratamientos con incorporación de bentonita sódica, carbonato de calcio e hidróxido de calcio, cada uno al 5 % en masa respecto a la masa seca del aserrín. Los aditivos se pesaron de forma individual y se incorporaron durante

¹ Relativo a la **reología**, rama de la física que estudia la deformación y el flujo de la materia cuando se le aplica una fuerza. (Nota del Editor).

la etapa de mezclado con la matriz lignocelulósica, garantizando su dispersión uniforme y su interacción con la fase proteica antes del proceso de conformado.



Figura 1. Aspecto macroscópico del compuesto lignocelulósico a base de aserrín de *P. pseudostrobus* aglutinado con adhesivo natural de proteína de trigo.

Preparación de Probetas

Cada formulación se mezcló mediante agitación mecánica hasta obtener una masa homogénea, asegurando la distribución uniforme del adhesivo y de los aditivos minerales en la matriz lignocelulósica. La mezcla se colocó en moldes de 2 cm × 17 cm × 17 cm y se compactó a una presión de 2,5 MPa durante 5 minutos, aplicando la carga de manera uniforme sobre toda la superficie.

Los paneles se desmoldaron y se sometieron a un secado escalonado a 40 °C, 60 °C, 80 °C y 103 °C, durante 24 horas por etapa, en estufa con control de temperatura hasta alcanzar un estado cercano al anhidro. Posteriormente, se obtuvieron 12 probetas por tratamiento con dimensiones de 2 cm × 2 cm × 15 cm. Las probetas se acondicionaron en cámara climática a 20 ± 2 °C y 65 ± 5 % de humedad relativa hasta alcanzar un contenido de humedad del 12 %.

Determinación de Propiedades Físicas y Dinámicas

El contenido de humedad y la densidad se determinaron conforme a las normas ISO 13061-1 (International Organization for Standardization, 2014a) e ISO 13061-2 (International Organization for Standardization, 2014b), respectivamente.

Las propiedades mecánicas dinámicas se evaluaron mediante la técnica de ondas de esfuerzo en dirección longitudinal, utilizando un equipo instrumentado con sensores colocados en los extremos de la probeta. Se aplicó un impacto controlado en uno de los extremos y se registró el tiempo de tránsito de la señal entre sensores para determinar la velocidad de onda, a partir de la distancia efectiva entre puntos de medición y el tiempo promedio de propagación obtenido a partir de repeticiones del ensayo (Sotomayor & Hadachi, 2023).

Las pruebas de ondas de esfuerzo consistieron en medir el tiempo de transmisión de la onda mecánica a través de la distancia entre dos acelerómetros posicionados en la probeta, utilizando el equipo *Metriguard 239A* (Metriguard Technologies, EE. UU.), con una precisión de ± 1 μ s (Figura 2). La velocidad de onda se determinó a partir de la relación entre la distancia efectiva entre sensores y el tiempo promedio de tránsito,

calculado a partir de tres mediciones por muestra. El módulo dinámico se calculó a partir de la densidad y la velocidad de onda, de acuerdo con el modelo físico establecido en la ecuación (1) (Baar *et al.*, 2012).

$$E = \rho v^2 \quad (1)$$

Donde:

E = Módulo dinámico (MN/m²)

ρ = Densidad (kg/m³)

v = Velocidad de onda (m/s)

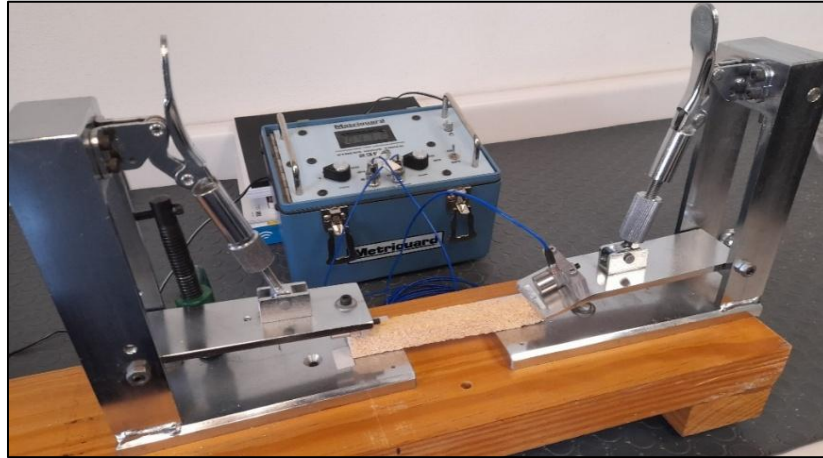


Figura 2. Esquema del montaje experimental para la determinación de la velocidad de onda en probetas lignocelulósicas mediante técnica de impacto longitudinal.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar, considerando cada probeta como unidad experimental y el tipo de material como factor con cuatro niveles: material control sin aditivos, material con bentonita sódica, material con carbonato de calcio y material con hidróxido de calcio. Para cada tratamiento se evaluaron doce probetas obtenidas de paneles fabricados bajo condiciones controladas. Las variables de respuesta fueron la densidad, la velocidad de onda y el módulo dinámico. El análisis estadístico se realizó mediante un análisis de varianza de un factor, con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ (Wahid *et al.*, 2017). Los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas se verificaron mediante las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Levene, respectivamente, y en caso de significancia se aplicó la prueba LSD de Fisher para comparaciones múltiples.

RESULTADOS

El **Cuadro 1** presenta los estadísticos descriptivos de las variables evaluadas, incluyendo la media (μ), la desviación estándar (σ), el coeficiente de variación (CV) y los intervalos de confianza al 95 % (IC), lo que permite caracterizar la tendencia central, la dispersión y la precisión de las mediciones. En este contexto, los valores de CV inferiores al 5 % en densidad y velocidad de onda evidencian alta homogeneidad experimental, mientras que los valores cercanos al 10 % en el módulo dinámico reflejan una mayor sensibilidad de esta propiedad a la variabilidad estructural del material. La superposición o separación de los intervalos de confianza permite una primera aproximación a la diferenciación entre tratamientos, particularmente evidente en las variables dinámicas.

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos de las variables evaluadas por tratamiento.

Variable	Tratamiento	μ	σ	CV	IC
Densidad (ρ) (kg/m ³)	Control	450	12,4	2,8	442–458
	Bentonita	457	16,8	3,7	446–467
	Carbonato de calcio (CaCO ₃)	446	21,3	4,8	432–461
	Hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂)	438	17,7	4,1	426–449
Velocidad de onda (v) (m/s)	Control	831	33,2	3,9	810–851
	Bentonita	904	27,5	3,1	887–920
	Carbonato de calcio (CaCO ₃)	905	26,1	2,9	890–921
	Hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂)	747	32,6	4,4	727–767
Módulo dinámico (E) (MN/m ²)	Control	311	30,5	9,8	292–330
	Bentonita	373	25,3	6,8	357–389
	Carbonato de calcio (CaCO ₃)	366	34,1	9,3	345–387
	Hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂)	244	24,4	9,9	229–260

μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación (%); IC = Intervalo de confianza a 95 %.

El **Cuadro 2** presenta los resultados del análisis de varianza, donde la densidad no muestra diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,071$), con tamaños de efecto bajos ($\eta^2 = 0,13$; $\omega^2 = 0,09$) y potencia insuficiente (0,52), lo que indica limitada capacidad del diseño para detectar diferencias reales en esta variable. En contraste, la velocidad de onda y el módulo dinámico presentan diferencias altamente significativas ($p < 0,001$), con tamaños de efecto grandes ($\eta^2 \geq 0,77$; $\omega^2 \geq 0,75$) y potencia estadística superior a 0,99, evidenciando que la variabilidad observada es atribuible predominantemente al efecto del tratamiento y que el diseño experimental posee alta sensibilidad para detectar cambios en estas propiedades. En conjunto, estos resultados indican que las variables dinámicas son más discriminantes que la densidad para evaluar el comportamiento del sistema, lo que es consistente con la dependencia de la propagación de ondas respecto a la conectividad estructural y la integridad interna del material.

Cuadro 2. Resultados del análisis de varianza y parámetros estadísticos.

Variable	F (3,44)	p	η^2	ω^2	Potencia
Densidad (kg/m ³)	2,51	0,071	0,13	0,09	0,52
Velocidad de onda (m/s)	75,23	< 0,001	0,83	0,82	> 0,99
Módulo dinámico (MN/m ²)	51,36	< 0,001	0,77	0,75	> 0,99

F (3,44) = estadístico F del ANOVA (razón entre varianza entre tratamientos y error); p = valor de probabilidad (significativo si $p < 0,05$); η^2 = proporción de varianza explicada; ω^2 = estimación ajustada de la varianza poblacional explicada; Potencia ($1 - \beta$) = probabilidad de detectar un efecto real (adecuado si $\geq 0,80$).

La densidad presentó valores promedio entre 438 y 457 kg/m³ entre tratamientos, con el mayor valor en bentonita y el menor en hidróxido de calcio (**Cuadro 1**). La variabilidad fue baja, con coeficientes de variación inferiores al 5 %, evidenciando homogeneidad en las mediciones. Los intervalos de confianza al 95 % mostraron traslape entre tratamientos, indicando una distribución similar de los valores de densidad dentro del rango experimental evaluado.

La velocidad de onda presentó valores promedio entre 747 y 905 m/s entre tratamientos, con los mayores valores en bentonita y carbonato de calcio, y el menor en hidróxido de calcio (**Cuadro 1**). La variabilidad fue baja, con coeficientes de variación inferiores al 5 %, evidenciando consistencia en las mediciones. Los intervalos de confianza al 95 % no mostraron traslape entre los tratamientos con mayores valores y el hidróxido de calcio, indicando una separación clara en la respuesta de la velocidad de propagación dentro del rango experimental evaluado.

El módulo dinámico por ondas de esfuerzo presentó valores promedio entre 244 y 373 MN/m² entre tratamientos, con los mayores valores en bentonita y carbonato de calcio, y el menor en hidróxido de calcio (**Cuadro 1**). La variabilidad fue moderada, con coeficientes de variación cercanos al 10 %, evidenciando

mayor dispersión respecto a las otras variables. Los intervalos de confianza al 95 % mostraron separación entre los tratamientos con mayores valores y el hidróxido de calcio, indicando diferencias claras en la rigidez dinámica dentro del rango experimental evaluado.

El análisis de varianza mostró que la densidad no presentó diferencias significativas entre tratamientos, con $p = 0,071$ y tamaños de efecto bajos (**Cuadro 2**). En contraste, la velocidad de onda evidenció diferencias altamente significativas, con $p < 0,001$, tamaños de efecto elevados y potencia estadística superior a 0,99. De manera similar, el módulo dinámico presentó diferencias significativas entre tratamientos, con $p < 0,001$, tamaños de efecto altos y potencia elevada, indicando una respuesta diferenciada de estas variables dinámicas en el sistema evaluado.

Las comparaciones múltiples, mediante la prueba LSD de Fisher, indicaron que los tratamientos con bentonita y carbonato de calcio conforman un grupo homogéneo, con valores superiores de velocidad de onda y módulo dinámico respecto al material control; en tanto, el tratamiento con hidróxido de calcio se ubicó en un grupo estadísticamente inferior ($p < 0,05$). No se detectaron diferencias significativas entre bentonita y carbonato de calcio para estas variables, lo que sugiere la presencia de mecanismos estructurales distintos, pero funcionalmente equivalentes en términos de transmisión de ondas.

DISCUSIÓN

Los resultados evidencian que el comportamiento mecánico dinámico de los compuestos lignocelulósicos está gobernado por la interacción entre microestructura y propiedades físicas, particularmente a través de la continuidad estructural y la conectividad entre fases. En este contexto, la respuesta diferencial observada entre tratamientos indica que la transmisión de ondas de esfuerzo depende de la integridad del medio y de la distribución de heterogeneidades internas, las cuales controlan la propagación de la señal y la disipación de energía mecánica en sistemas particulados (Tippner *et al.*, 2016; Dackermann *et al.*, 2014).

La ausencia de diferencias significativas en la densidad (**Cuadro 1**) indica que esta variable no responde de manera consistente al efecto de los tratamientos, evidenciando una capacidad limitada para reflejar cambios estructurales en el sistema. En materiales lignocelulósicos particulados, la densidad global no representa adecuadamente la organización interna ni la calidad de las interfaces, ya que factores como la variabilidad de las partículas, la distribución del adhesivo y la presencia de vacíos controlan el comportamiento mecánico (Hassan *et al.*, 2013; Černý *et al.*, 2023), por lo que incrementos marginales en densidad no se traducen necesariamente en mejoras mecánicas cuando persisten discontinuidades y una distribución irregular de fases.

La velocidad de onda mostró una alta sensibilidad al tipo de tratamiento (**Cuadro 1**), indicando que la propagación está controlada por la conectividad interna y la continuidad estructural del material. En sistemas lignocelulósicos, la generación y evolución de microgrietas y discontinuidades internas modifican la transmisión de ondas al alterar la propagación de energía mecánica, lo que impacta directamente la velocidad de propagación y la respuesta dinámica del material (Huang *et al.*, 2022), explicando tanto los incrementos asociados a una mayor integridad estructural como las reducciones vinculadas a la degradación interna.

El módulo dinámico presentó una respuesta coherente con la velocidad de onda (**Cuadro 1**), evidenciando que la rigidez dinámica del material está directamente asociada a la capacidad de transmisión de la energía mecánica. En materiales lignocelulósicos, esta propiedad depende de la relación entre la densidad y la velocidad de propagación, de modo que pequeñas variaciones en la velocidad generan cambios amplificados en el módulo dinámico debido a su dependencia cuadrática, lo que explica la correlación directa entre la velocidad de onda y la rigidez en compuestos evaluados mediante técnicas acústicas no destructivas (Hu *et al.*, 2005); en consecuencia, incrementos en la continuidad estructural mejoran la rigidez, mientras que la presencia de discontinuidades reduce la eficiencia en la transferencia de esfuerzos.

La comparación entre tratamientos permite establecer una jerarquía de desempeño en función de las propiedades dinámicas evaluadas. Los sistemas con bentonita y carbonato de calcio presentan respuestas

similares en velocidad de onda, consistente con el efecto de los rellenos minerales sobre la continuidad estructural en compuestos lignocelulósicos, donde la incorporación de partículas reduce la porosidad y la presencia de vacíos, favoreciendo la transmisión de esfuerzos (Huuhilo *et al.*, 2010); la ligera superioridad de la bentonita en el módulo dinámico sugiere una mayor eficiencia en la transferencia de esfuerzos a nivel interfacial. En contraste, el hidróxido de calcio evidencia una reducción marcada en ambas variables, indicando una menor integridad estructural del sistema.

La similitud en el desempeño entre bentonita y carbonato de calcio, pese a sus diferencias morfológicas, indica que ambos aditivos actúan principalmente como agentes de reducción de porosidad y mejora de la continuidad estructural. En sistemas lignocelulósicos, la incorporación de rellenos minerales reduce la presencia de vacíos y mejora la integridad del material al favorecer una distribución más homogénea de esfuerzos, lo que incrementa la rigidez del sistema (Srivabut *et al.*, 2018); adicionalmente, la estructura laminar de la bentonita promueve una mayor superficie de contacto y una transferencia de carga más eficiente a nivel interfacial, lo que explica su ligera superioridad en el módulo dinámico.

Los resultados se interpretan a partir de los cambios en la microestructura del sistema inducidos por cada aditivo y su efecto en la interacción entre fases. La bentonita, debido a su estructura laminar, favorece el empaquetamiento y reduce la porosidad, incrementando la conectividad interna, mientras que el carbonato de calcio actúa como relleno inerte que mejora la continuidad del medio; en contraste, el hidróxido de calcio, por su carácter alcalino, puede alterar la interacción adhesivo-matriz y generar zonas de debilidad estructural, ya que las modificaciones químicas en la interfaz pueden reducir la cohesión y afectar la transferencia de esfuerzos en compuestos lignocelulósicos (Lei *et al.*, 2008).

Desde la perspectiva de la propagación de ondas, los resultados pueden interpretarse en términos de la impedancia acústica del material, definida como el producto entre densidad y velocidad de onda, que controla la transmisión de energía mecánica. En el sistema evaluado, la ausencia de diferencias significativas en densidad (**Cuadro 2**) indica que las variaciones en la impedancia están dominadas por cambios en la velocidad de propagación. En consecuencia, los mayores valores de velocidad y módulo dinámico observados en bentonita y carbonato de calcio (**Cuadro 1**) reflejan una mayor continuidad estructural, mientras que la disminución en el tratamiento con hidróxido de calcio evidencia un incremento de discontinuidades internas que favorecen la dispersión y atenuación de la señal.

Desde el punto de vista estadístico, la diferencia en los tamaños de efecto entre variables (η^2 , ω^2) confirma que el sistema está gobernado predominantemente por propiedades dinámicas (velocidad de onda y módulo mecánico) más que por variables físicas (densidad), dado que los valores elevados observados en ambas variables dinámicas ($\eta^2 \geq 0,77$; $\omega^2 \geq 0,75$), junto con una potencia estadística superior a 0,99, evidencian que la mayor parte de la varianza es explicada por el efecto del tratamiento. En contraste, los valores bajos de tamaño de efecto y potencia en la densidad indican una contribución limitada de esta variable al comportamiento global del sistema. Esta diferenciación demuestra que el diseño experimental posee mayor capacidad discriminante para detectar cambios en la propagación de ondas y en la rigidez dinámica que en propiedades volumétricas. En términos físicos, este comportamiento es coherente con la relación funcional entre velocidad de onda y módulo dinámico, donde variaciones en v se reflejan directamente en E , evidenciando que la respuesta mecánica está controlada principalmente por la conectividad estructural y la integridad interna del material, más que por la densidad global.

Los mecanismos microestructurales propuestos se infieren a partir de la respuesta dinámica obtenida mediante técnicas no destructivas, sin validación mediante caracterización directa, lo que limita su confirmación experimental. Asimismo, el estudio se restringe a una única proporción de aditivos (5 %) y a condiciones específicas de procesamiento, por lo que la extrapolación de los resultados debe realizarse con cautela. La ausencia de técnicas microestructurales complementarias limita la verificación de la distribución de fases y la calidad interfacial, por lo que se recomienda su incorporación en estudios futuros para fortalecer la interpretación mecanística.

En síntesis, la incorporación de aditivos minerales modifica de manera significativa el comportamiento dinámico del material sin generar cambios relevantes en la densidad, lo cual es consistente con los resultados experimentales (**Cuadros 1 y 2**). La velocidad de onda emerge como la variable dominante del

sistema al reflejar la conectividad interna y la eficiencia en la transmisión de energía mecánica, evidenciado por su alta sensibilidad al tratamiento. Asimismo, se establece una diferenciación entre aditivos que favorecen la integridad estructural, como la bentonita y el carbonato de calcio, y aquellos que la reducen, como el hidróxido de calcio. En este sentido, futuras investigaciones podrían integrar caracterización microestructural y modelación multiescalar para fortalecer la interpretación estructural del comportamiento dinámico.

CONCLUSIONES

Los resultados confirman la hipótesis de investigación: la incorporación de aditivos minerales modifica el comportamiento dinámico de compuestos lignocelulósicos con adhesivo de proteína de trigo sin inducir cambios estadísticamente significativos en la densidad. Este desacoplamiento sugiere que, en sistemas particulados, la densidad funciona como un descriptor volumétrico de primer orden, pero no como un predictor mecánico robusto, debido a su limitada capacidad para representar la conectividad estructural y la calidad de las interfaces. En contraste, la velocidad de onda se consolida como la variable más sensible al tratamiento, indicando que la propagación de energía mecánica está estrechamente asociada con la continuidad efectiva del medio. En consecuencia, el módulo dinámico refleja esta dependencia, donde variaciones en la velocidad de propagación se traducen en cambios amplificados en la rigidez.

Desde una perspectiva funcional, se establece una jerarquía entre los aditivos. La bentonita sódica presenta el mejor desempeño, asociado a su estructura laminar, que favorece el empaquetamiento y la interacción interfacial. El carbonato de calcio muestra un comportamiento comparable en términos de propagación de ondas, consistente con su papel como relleno que mejora la continuidad estructural. En contraste, el hidróxido de calcio reduce la respuesta dinámica del sistema, lo que puede asociarse a efectos químicos que afectan la cohesión del adhesivo y la interacción matriz-fase sólida.

En conjunto, los resultados indican que es posible mejorar la rigidez dinámica sin incrementar significativamente la densidad mediante el control de la estructura interna del material. Asimismo, se confirma la utilidad de las técnicas no destructivas basadas en ondas de esfuerzo como herramientas sensibles para evaluar la integridad estructural en compuestos lignocelulósicos. Estudios futuros podrían incorporar caracterización microestructural y enfoques integrados de análisis para fortalecer la interpretación del comportamiento observado.

RECONOCIMIENTOS

La investigación fue financiada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, y por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, México.

REFERENCIAS

- Baar, J., Tippner, J. & Gryc, V. (2012). The influence of wood density on longitudinal wave velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(5): 767-769. <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0550-2>
- Chakma, P. & Luo, Y. (2024). Impact of regular and irregular pore distributions on the elasticity of porous materials: A microstructure-free finite element study. *Materials*, 17(18): 4490. <https://doi.org/10.3390/ma17184490>
- Černý, M., Petruš, J. & Chamrádová, I. (2023). The influence of porosity on mechanical properties of PUR-based composites: Experimentally derived mathematical approach. *Polymers*, 15(8): 1835. <https://doi.org/10.3390/polym15081960>
- Dackermann, U., Crews, K., Kasal, B., Li, J., Riggio, M., Rinn, F. & Tannert, T. (2014). In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements. *Materials and Structures*, 47(5): 787-803. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0095-4>

- Frihart, C.R. & Hunt, C.G. (2025). Protein structure and wood adhesives. *Industrial Crops and Products*, 229, 121008. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121008>
- Fu, S.Y., Feng, X.Q., Lauke, B. & Mai, Y.W. (2008). Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 39(6): 933-961. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2008.01.002>
- Hassan, K.T.S., Horáček, P. & Tippner, J. (2013). Evaluation of stiffness and strength of Scots pine wood using resonance frequency and ultrasonic techniques. *BioResources*, 8(2): 1634-1645. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.1634-1645>
- Hillig, É., Bobadilla, I., Arriaga, F. & Íñiguez-González, G. (2024). Using acoustic testing to estimate strength and stiffness of wood–polymer composites. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 26, e0424. <https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.04>
- Hu, Y., Nakao, T., Nakai, T., Gu, J. & Wang, F. (2005). Dynamic properties of three types of wood-based composites. *Journal of Wood Science*, 51(1): 7-12. <https://doi.org/10.1007/s10086-003-0614-y>
- Huuhilo, T., Martikka, O., Butylina, S. & Kärki, T. (2010). Mineral fillers for wood–plastic composites. *Wood Material Science & Engineering*, 5(1): 34-40. <https://doi.org/10.1080/17480270903582189>
- Huang, C., Li, M., Fang, S., Zhao, Y., Mao, F., Yang, Z. & Deng, T. (2022). Research on the effect of wood surface cracks on propagation characteristics and energy attenuation of longitudinal acoustic emission. *Wood Research*, 67(5): 744-759. <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/67.5.744759>
- International Organization for Standardization. (2014a). ISO 13061-1: Physical and mechanical properties of wood—Test methods for small clear wood specimens—Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. <https://www.iso.org/standard/60063.html>
- International Organization for Standardization. (2014b). ISO 13061-2: Physical and mechanical properties of wood—Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. <https://www.iso.org/standard/60064.html>
- Lei, H., Pizzi, A. & Du, G. (2008). Environmentally friendly mixed tannin/lignin wood resins. *Journal of Applied Polymer Science*, 107(1): 203-209. <https://doi.org/10.1002/app.27011>
- Mohammed, M.M., Rasidi, M.S.M., Mohammed, A.M., Rahman, R.B., Osman, A.F., Adam, T., Betar, B.O. & Dahham, O.S. (2022). Interfacial bonding mechanisms of natural fiber–matrix composites: An overview. *BioResources*, 17(4): 7031-7090. <https://doi.org/10.15376/biores.17.4.Mohammed>
- Ray, S.S. & Okamoto, M. (2003). Polymer/layered silicate nanocomposites: A review from preparation to processing. *Progress in Polymer Science*, 28(11): 1539-1641. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002>
- Sotomayor Castellanos, J.R. & Adachi, K. (2023). Anisotropía en velocidades de onda y módulos dinámicos determinados con ondas de esfuerzo en maderas mexicanas y japonesas. *Ciencia & Investigación Forestal*, 29(3): 45–60. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.595>
- Srivabut, C., Ratanawilai, T. & Hiziroglu, S. (2018). Effect of nanoclay, talcum, and calcium carbonate as filler on properties of composites manufactured from recycled polypropylene and rubberwood fiber. *Construction and Building Materials*, N° 162. Pp: 450-458. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.048>
- Tippner, J., Hrivnák, J. & Kloiber, M. (2016). Experimental evaluation of mechanical properties of softwood using acoustic methods. *BioResources*, 11(1): 503-518. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.503-518>
- Wahid, Z., Latiff, A.I. & Ahmad, K. (2017). Application of one-way ANOVA in completely randomized experiments. *Journal of Physics: Conference Series*, 949(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/949/1/012017>