



REVISTA ACADÉMICA INGENIERÍA CIVIL

Año: 2026 - Volumen: 01 - Nº: 01

UNIVERSIDAD NACIONAL SIGLO XX

COMITÉ EDITORIAL

Fuad Isaías Alvarado Montenegro,
fuad.alvaradom@unsxx.bo

Jonas David Negretty Huarayo,
sanojsteel@gmail.com

José Miguel Aruquipa Mendoza
jose.aruquipam@unsxx.com

David Vásquez Viscarra
david.vasquezv@unsxx.com

Igor Abel Hurtado Arias
igorabelh@gmail.com

Álvaro Humberto Llanos Rodo,
alvaro.llanosr@unsxx.bo

ISSN:

IMPRESIÓN

Latinas Editores Ltda.
c. Sucre #1164 entre Petot y Linares
Telf. (2)52-52458
Oruro- Bolivia



PRESENTACIÓN

La Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Siglo XX presenta el primer volumen de su Revista Académica, publicación periódica concebida como un espacio institucional para la divulgación y el intercambio de resultados de investigación en el ámbito de las ciencias de la construcción, la mecánica de materiales y la gestión de proyectos. Este número fundacional, correspondiente a la gestión académica semestral I-2026, reúne un conjunto de trabajos que evidencian el compromiso de esta unidad académica con la generación de conocimiento aplicado, la innovación tecnológica y la atención a problemáticas relevantes en los contextos regional y nacional.

La selección de artículos que componen esta edición inicial se organiza en torno a tres ejes sustantivos: el desarrollo de materiales de construcción sostenibles a partir de recursos locales, la caracterización experimental y teórica del comportamiento estructural de materiales de uso tradicional, y la optimización de procesos de gestión en el sector de la construcción. Dichos trabajos son resultado de procesos de investigación desarrollados por docentes-investigadores en colaboración con estudiantes y profesionales del sector productivo, configurando una dinámica de trabajo que articula la rigurosidad académica con la pertinencia social y técnica.

La publicación de este volumen constituye, asimismo, un hito en la trayectoria de la Carrera de Ingeniería Civil, al formalizar un canal de difusión científica que aspira a consolidarse como referente para la comunidad académica y profesional. Se espera que los contenidos aquí presentados contribuyan al fortalecimiento de las capacidades investigativas locales, al intercambio disciplinar y a la formación de nuevas generaciones de ingenieros e ingenieras con una sólida base científica y un compromiso ético con el desarrollo sostenible.

El Comité Editorial expresa su reconocimiento a los autores y revisores que han hecho posible esta publicación, e invita a la comunidad académica a participar en los próximos números con contribuciones que continúen enriqueciendo el debate y el avance del conocimiento en el campo de la ingeniería civil.

Comité Editorial
Revista Académica de Ingeniería Civil
Universidad Nacional Siglo XX



PRESENTACIÓN

Revista Científica - Ingeniería Civil - UNSXX



INTRODUCCIÓN

El presente volumen de la Revista Académica de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Siglo XX reúne cuatro contribuciones originales que, desde perspectivas metodológicas diversas —experimentales, analíticas y propositivas—, abordan problemáticas centrales para el ejercicio profesional y la investigación en el campo de la ingeniería civil. La articulación temática de los trabajos seleccionados permite transitar desde el desarrollo de nuevos materiales con base en recursos autóctonos hasta el análisis refinado del comportamiento estructural, pasando por la caracterización de materiales tradicionales y la optimización de la gestión del recurso humano en proyectos de construcción.

El primer artículo, “Desarrollo de un material ecológico utilizando Kiswara como insumo del altiplano boliviano”, aborda la valorización tecnológica de una especie nativa (*Buddleja coriacea*) mediante su incorporación como materia prima en la fabricación de tableros aglomerados. La investigación, sustentada en un diseño experimental riguroso y en ensayos normalizados (ASTM D1037), evalúa el efecto de diferentes dosificaciones de adhesivo PVA sobre las propiedades físicas y mecánicas del material. Los resultados obtenidos particularmente en los tratamientos GT4 y GT7 demuestran la viabilidad técnica de este aglomerado ecológico para aplicaciones interiores, al tiempo que evidencian su potencial como catalizador de procesos de economía circular y desarrollo rural en el altiplano boliviano.

En continuidad con la temática de la caracterización de materiales de construcción, el segundo trabajo, titulado “Evaluación experimental y teórica de la deformación por flexión en vigas de madera de cedro”, se centra en la validación de modelos predictivos para el comportamiento de la madera bajo sollicitaciones de flexión. Mediante la comparación entre los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio y las predicciones del modelo de Euler-Bernoulli, el estudio constata la adecuación de este marco teórico para el análisis estructural de vigas de madera de cedro, identificando al mismo tiempo los factores asociados a la anisotropía del material y a las condiciones experimentales que explican las discrepancias observadas.

El tercer artículo, “Gestión del capital humano y productividad en pequeñas y medianas empresas constructoras del municipio de Uncía”, desplaza el foco de atención hacia los procesos organizacionales que inciden en el desempeño de los proyectos de construcción. A partir de un diagnóstico basado en encuestas aplicadas a trabajadores del sector, el estudio identifica deficiencias críticas en la asignación de responsabilidades, la comunicación interna y la evaluación del desempeño. En respuesta a estas problemáticas, se propone un modelo de gestión de recursos humanos estructurado en cinco etapas y alineado con los lineamientos



del PMBOK (séptima edición), incorporando herramientas como la matriz RACI y un sistema de indicadores clave de desempeño (KPI).

El cuarto y último trabajo, “Análisis de viga sometida a carga axial en tensión y carga distribuida”, aborda el análisis estructural de segundo orden, específicamente el fenómeno de rigidez geométrica inducido por fuerzas axiales de tensión. Mediante la formulación analítica de la ecuación diferencial de equilibrio y la derivación de factores de amplificación para la deformación y el momento flector, el estudio demuestra la influencia de la carga axial en el comportamiento mecánico del elemento estructural. Los resultados obtenidos constituyen un aporte relevante para el diseño de sistemas estructurales en los que los efectos de segundo orden no pueden ser despreciados, tales como puentes atirantados, elementos arriostrados o sistemas híbridos.

En su conjunto, los trabajos que componen este primer volumen dan cuenta de la diversidad temática y metodológica que caracteriza la producción académica de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Siglo XX. Desde la investigación aplicada al desarrollo de materiales sostenibles hasta la profundización teórica en el análisis estructural, pasando por la validación experimental de modelos clásicos y la proposición de herramientas para la mejora de la gestión organizacional, esta edición inicial aspira a constituirse en un aporte significativo al conocimiento disciplinar y a la formación de recursos humanos con capacidades para enfrentar los desafíos contemporáneos de la ingeniería civil en Bolivia y la región.



ÍNDICE


| | |
|--|-----------|
| PRESENTACIÓN | 3 |
| INTRODUCCIÓN | 5 |
| DESARROLLO DE UN MATERIAL ECOLÓGICO UTILIZANDO KISWARA COMO INSUMO DEL ALTIPLANO BOLIVIANO | 9 |
| <i>Ing. George Walker Carretero-Cordero</i> | |
| <i>Ing. Fuad Isaías Alvarado-Montenegro</i> | |
| <i>Ing. Álvaro Humberto Llanos-Rodo</i> | |
| EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y TEÓRICA DE LA DEFORMACIÓN POR FLEXIÓN EN VIGAS DE MADERA DE CEDRO | 31 |
| <i>Jose Miguel Aruquipa Mendoza</i> | |
| <i>David Vásquez Viscarra</i> | |
| <i>Jonás David Negretty Huarayo</i> | |
| GESTIÓN DEL CAPITAL HUMANO Y PRODUCTIVIDAD EN PEQUEÑAS Y MEDIANAS EMPRESAS CONSTRUCTORAS DEL MUNICIPIO DE UNCÍA | 35 |
| <i>Igor Abel Hurtado Arias</i> | |
| ANÁLISIS DE VIGA SOMETIDA A CARGA AXIAL EN TENSIÓN Y CARGA DISTRIBUIDA | 38 |
| <i>Jonás David Negretty Huarayo</i> | |
| <i>Jose Miguel Aruquipa Mendoza</i> | |
| <i>David Vásquez Viscarra</i> | |





“DESARROLLO DE UN MATERIAL ECOLÓGICO UTILIZANDO KISWARA COMO INSUMO DEL ALTIPLANO BOLIVIANO”

Autor


Ing. George Walker Carretero-Cordero¹  (ORCID: 0009-0008-6682-6442)

¹ Universidad Técnica de Oruro.

¹ Docente de la Carrera de Ingeniería Civil - Universidad Nacional Siglo “XX”, Cel: 61999940, georgewalkercarreterocordero@gmail.com.

¹ Empresa Constructora Consultora GOLDENBUILD LTDA, Oruro, Bolivia.


Coautor

Ing. Fuad Isaías Alvarado-Montenegro²  (ORCID: 0009-0001-7861-9968)

² Universidad Mayor de San Simón.

² Docente de la Carrera de Ingeniería Civil - Universidad Nacional Siglo “XX”, Cel: 76455565, fuad.alvaradom@unsxx.bo

Coautor

Ing. Álvaro Humberto Llanos-Rodo³  (ORCID: 0009-0009-4621-1931)

³ Universidad Técnica de Oruro.

³ Docente de la Carrera de Ingeniería Civil - Universidad Nacional Siglo “XX”, Cel: 77154271, alvaro.llanosr@unsxx.bo

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla y caracteriza un material aglomerado ecológico utilizando la Kiswara (Buddleja coriacea), especie nativa del Altiplano boliviano, como insumo principal. El estudio propone una alternativa sostenible a los tableros comerciales convencionales, fomentando el aprovechamiento forestal responsable y la reforestación regional. Se elaboraron nueve grupos de tratamiento con diferentes proporciones de adhesivo PVA Tekno y fibra de Kiswara, además de un grupo control correspondiente a un tablero de aglomerado comercial. Las muestras fueron prensadas a 0,739 kg/cm² durante dos horas y sometidas a los ensayos ASTM D1037 para densidad aparente, absorción de agua y módulo de rotura a flexión (MOR).

Los tratamientos GT4 (1:0,9) y GT7 (1:1) presentaron los mejores resultados con densidades entre 276 y 306 g/cm³, absorciones de 125 a 200 % y valores de MOR de hasta 56 kg/cm². El análisis ANOVA mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) y una correlación adhesivo MOR positiva ($r = 0,87$). Se concluye que el aglomerado de Kiswara es una alternativa técnica, ambiental y económicamente viable para la producción de materiales ecológicos del Altiplano.

Palabras Clave: Kiswara (Buddleja coriacea), Aglomerado, Altiplano boliviano.



ABSTRACT

*This work develops and characterizes an ecological particleboard material using Kiswara (*Buddleja coriacea*), a native species of the Bolivian Altiplano, as the main raw material. The study proposes a sustainable alternative to conventional commercial boards, promoting responsible forest management and regional reforestation. Nine treatment groups were prepared with different proportions of Tekno PVA adhesive and Kiswara fiber, in addition to a control group consisting of a commercial MDF board. The samples were pressed at 0.739 kg/cm^2 for two hours and subjected to ASTM D1037 tests for apparent density, water absorption, and flexural modulus of rupture (MOR).*

Treatments GT4 (1:0.9) and GT7 (1:1) showed the best results, with densities between 276 and 306 g/cm^3 , absorptions from 125 to 200% , and MOR values up to 56 kg/cm^2 . The ANOVA analysis showed significant differences ($p < 0.05$) and a positive adhesive-MOR correlation ($r = 0.87$). It is concluded that Kiswara agglomerate is a technically, environmentally, and economically viable alternative for the production of ecological materials from the Altiplano.

Keywords: *Kiswara (*Buddleja coriacea*), agglomerate, Bolivian Altiplano.*

INTRODUCCIÓN

La reutilización de residuos lignocelulósicos y maderas nativas para elaborar tableros aglomerados constituye una alternativa sostenible frente a la eliminación por quema y al consumo de resinas más nocivas, como las de urea-formaldehído, en procesos industriales (Aguilar-Rivera et al., 2020). En la actualidad, el aprovechamiento de recursos vegetales locales busca reducir la dependencia de materias primas importadas y mitigar impactos ambientales asociados a la deforestación y a la generación de desechos no biodegradables (Marques et al., 2021).

Buddleja coriacea, conocida comúnmente como Kiswara, es una especie arbórea nativa del Altiplano andino que crece entre los 3.000 y 4.400 m.s.n.m. , caracterizada por su resistencia a las heladas, vientos intensos y radiación solar elevada (Norman, 2000). Además de su valor ecológico en la protección del suelo y la regulación del microclima, la Kiswara posee usos medicinales ampliamente reconocidos: sus hojas presentan propiedades antiinflamatorias, antioxidantes e hipoglucemiantes gracias a la presencia de compuestos como taninos, saponinas, flavonoides y lactonas sesquiterpénicas (Flores et al., 2019; Quispe et al., 2022). Estas características la convierten en una planta de interés tanto farmacéutico como ambiental.

Desde el punto de vista químico y físico, la madera de Kiswara es dura, densa y de combustión lenta, con alto contenido calórico y buena durabilidad, lo que la hace adecuada para usos estructurales y energéticos (CONDESAN, 2015). Dichas propiedades, junto con su disponibilidad en zonas rurales del Altiplano, justifican su estudio como insumo renovable en la elaboración de materiales compuestos o aglomerados ecológicos. En este contexto, la presente investigación propone el uso de las ramas y tallos de Kiswara como componente principal de un aglomerado experimental, combinados con un adhesivo sintético de base acuosa tipo PVA (Tekno, “Teknocola”), que ofrece buena adherencia con fibras lignocelulósicas, bajo costo y seguridad en condiciones de prensado a temperatura moderada (Tekno, 2023).



La innovación del proyecto radica no solo en la valoración tecnológica de una especie nativa, sino también en su impacto socioeconómico. La producción de tableros aglomerados a partir de Kiswara puede fomentar el cultivo y manejo sostenible de esta planta por parte de comunidades campesinas del Altiplano, generando nuevas oportunidades económicas a través de la venta de biomasa vegetal y la creación de microemprendimientos rurales (Arana & Pérez, 2020). Esta estrategia contribuye a la economía circular y fortalece la bioeconomía boliviana, al integrar saberes tradicionales con técnicas contemporáneas de ingeniería de materiales.

Para evaluar el desempeño del material desarrollado, se aplicaron pruebas normalizadas para tableros de pequeña escala descritas en la norma ASTM D1037 (ASTM, 2012), incluyendo determinaciones de densidad aparente, absorción de agua y módulo de rotura a flexión (MOR). Los resultados experimentales permitirán comparar el comportamiento del aglomerado de Kiswara con un tablero comercial, identificando su viabilidad como alternativa ecológica y de bajo costo para la industria de la construcción y el mobiliario.

MATERIAL Y MÉTODOS

La especie Kiswara (Buddleja coriacea): distribución, características y potencial

La especie *Buddleja coriacea*, conocida localmente como “kiswara” o “quisuar”, es una planta endémica de la puna andina, presente entre aproximadamente 3000 y 4350 m.s.n.m., en suelos pedregosos secos a semihúmedos, con temperaturas que oscilan entre -3°C y 15°C y vientos persistentes (Norman, 2000; “*Buddleja coriacea*”, 2025). Su distribución va desde la Cordillera Blanca en Perú hasta el altiplano boliviano, incluido el Lago Titicaca (World Flora Online, n.d.; “*Buddleja coriacea*”, 2025) lo que la convierte en un recurso local accesible para comunidades campesinas de la zona altiplánica.

Desde el punto de vista morfológico, esta especie se presenta como arbusto o pequeño árbol (1 a 8 m de altura en estado natural), con hojas coriáceas de 1 a 4 cm de largo por 0.5 a 1.5 cm de ancho, pecíolos de 3 a 4 mm, hojas superiores glabras y envés con indumento canela a marrón (World Flora Online, n.d.; “*Buddleja coriacea*”, 2025). Esta estructura compacta y densa la dota de buena resistencia a condiciones extremas de altitud, lo que es ventajoso en zonas del altiplano donde la reforestación y manejo de especies es más complejo.

En cuanto a sus propiedades químicas y usos tradicionales, se ha documentado que la Kiswara posee compuestos bioactivos con efecto antiinflamatorio y antiartrítico; en un estudio reciente se identificaron compuestos que inhibieron la producción de TNF- α en línea celular RAW 264.7 (IC_{50} de 13.44, 1.13 y $0.57 \mu\text{M}$) y disminuyeron concentraciones de proteína C-reactiva y fibrinógeno en modelos murinos con dosis de 5 mg/kg (Atypon et al., 2022). Isto fortalece su valor como especie multifuncional: no sólo biomasa sino también valor medicinal.

Por otro lado, su madera ha sido tradicionalmente utilizada para herramientas agrícolas, postes y construcción ligera, gracias a su dureza relativa y durabilidad (Wikipedia, n.d.). Dentro de un contexto de economía rural, el cultivo o aprovechamiento sostenible de Kiswara puede ofrecer a comunidades campesinas del altiplano una alternativa de desarrollo económico: producción de biomasa para materiales aglomerados, uso medicinal de sus hojas, y potencial comercial de subproductos (Arana & Pérez, 2020). Este enfoque bio-económico, alineado con los principios de economía circular y mate-



riales sostenibles, permite además reducir la dependencia de importaciones de tableros o madera importada.

Sin embargo, para su utilización como materia prima en tableros de aglomerados, se deben considerar factores como la homogeneidad de partícula, la humedad residual, la compatibilidad con adhesivos y el tratamiento de extractivos (taninos, saponinas) que pueden interferir con la adhesión. Tales extractivos pueden afectar la humectación del adhesivo y la eficacia del curado, por lo que su pre-tratamiento y molienda fina son pasos clave para asegurar calidad del producto final.

Adhesivos PVA (acetato de polivinilo) y su uso en tableros aglomerados

La industria de tableros aglomerados tradicionalmente utiliza adhesivos termoestables como urea-formaldehído (UF), fenol-formaldehído (PF) o pMDI, los cuales requieren presiones elevadas y temperaturas de prensado entre 149 °C y 182 °C para curado (EPA AP-42, n.d.). En contraste, los adhesivos de base acuosa tipo PVA ofrecen ventajas operativas (menor temperatura, menor emisión de formaldehído, manipulación más simple) y por ello son cada vez más considerados en desarrollos de “paneles verdes” o materiales ecológicos (Lamaming et al., 2020).

No obstante, los adhesivos PVA presentan limitaciones en resistencia al agua, temperatura y fluencia (“creep”) bajo carga prolongada (Patsnap Report, n.d.). Es decir, su naturaleza termoplástica lineal los hace menos adecuados para aplicaciones estructurales al aire libre sin modificación o tratamiento adicional (Patsnap, n.d.; Papadopoulos et al., 2002). Por ello, su uso en tableros aglomerados normalmente se limita a aplicaciones interiores o donde la exposición a humedad sea moderada. Muchos estudios recientes han evaluado el reforzamiento de PVA mediante rellenos (SiO_2 , TiO_2 , nanotubos de carbono) para mejorar su adhesión, estabilidad térmica y resistencia al agua: por ejemplo, la adición de 1 % de SiO_2 mejoró la resistencia al pelado y la interfase adhesiva de PVAc (SiO_2) (Balea et al., 2022). En otro estudio, se demostró que al combinar PVA con almidón modificado, se obtuvieron paneles de madera con mejores propiedades físicas y mecánicas comparados con solo PVA (Lamaming et al., 2020). Para tu estudio, el uso de una cola PVA comercial (por ejemplo marca Tekno) es adecuado desde la perspectiva de disponibilidad local y facilidad de uso operativa; no obstante conviene ser consciente de sus limitaciones en humedad y, si el material va a estar en ambientes húmedos, considerar tratamientos o recubrimientos adicionales.

Fabricación de paneles aglomerados: parámetros críticos y relación materia prima-adhesivo

La fabricación de tableros aglomerados está ampliamente documentada y diversas variables afectan la calidad del producto final: dosificación de adhesivo, presión, temperatura de prensado, tiempo de prensado, humedad de la madera, tamaño de partícula, densidad final de la placa, y condiciones de acondicionamiento previo y post-procesado. Por ejemplo, Iswanto et al. (2014) estudiaron paneles hechos de bagazo de sorgo con resinas UF, PF e isocianato, con contenido de resina del 10 % para UF y 7 % para isocianato, y presiones de prensado de 8 a 10 min a temperaturas de 120 a 180 °C; concluyeron que el isocianato ofrecía mejores propiedades mecánicas para ese sustrato (Iswanto et al., 2014).

Otro estudio revisa que temperaturas de prensado entre 150 a 180 °C proporcionan mejores propiedades físicas y mecánicas, porque facilitan el curado de la resina y la consolidación de la estructura; sin embargo, por encima de ciertos límites térmicos los materiales sufren degradación térmica, lo que reduce la resistencia (Wood Research, 2018). En cuanto a tiempos de prensado, un margen óptimo es necesario: demasiado corto no asegura curado suficiente; demasiado largo puede generar sobrecurado o degradación (Makara Seri Teknologi, 2013).



En cuanto a adhesivo PVA, aunque muchos ensayos con PVA puro en prensado caliente son menos comunes (ya que PVA no “cura” químicamente como PF o UF), la mecánica básica de consolidación sigue siendo relevante: la presión y la densidad final favorecen contacto partícula a partícula, la cobertura adhesiva adecuada mejora la transferencia de fuerzas y la reducción de huecos macro-capilares mejora absorción (Bioresources, 2023). En los estudios recientes con PVA se emplearon contenidos adhesivos del 10 % a 20 % (en base materia seca) y tamaños de partícula variables, con resultados mecánicos adecuados para aplicaciones interiores (Indayantilies et al., 2024).

La densidad del tablero también es un factor crítico: densidades más altas suelen correlacionarse con mayor MOR (módulo de rotura), pero también mayor absorción y mayor consumo de adhesivo y energía. Por ejemplo, un estudio señaló que paneles de 680 kg/m³ con 13 % de resina UF alcanzaron MOR adecuados según norma EN 312 (Physical & Mechanical Properties..., n.d.). Asimismo, la norma ASTM D1037 (2012) es frecuentemente usada para evaluar densidad, absorción de agua 24 h, hinchamiento en espesor y MOR en tableros de partículas. Desde el punto de vista del desarrollo sostenible, la utilización de una materia prima local como Kiswara en sustitución parcial o total de madera convencional reduce el impacto ambiental asociado a tala de bosques, transporte y emisiones de formaldehído (cuando se emplean resinas PF/UF). Además, al trabajar con una cola PVA de menor toxicidad y posiblemente menor emisión, se alinea con estrategias de construcción sostenible y materiales de bajo impacto.

Integración del material, la técnica y la sostenibilidad

El presente trabajo articula tres esferas: materia prima local ecológica (kiswara), tecnología de adhesión segura (PVA) y fabricación de paneles aglomerados con enfoque comparativo. En este esquema, se espera que el tablero fabricado con ramas/tallos de kiswara triturados y mezclados con adhesivo PVA logre un rendimiento físico-mecánico que permita su uso como material interior o de mobiliario ligero, y que a su vez genere un incentivo económico para comunidades campesinas del Altiplano, promoviendo su siembra y aprovechamiento sostenible. Desde la perspectiva de bioeconomía, esta aproximación responde a tendencias globales de valorización de fibras lignocelulósicas alternativas (Agricultural waste & agro-residues) y adhesivos más seguros ambientalmente (PVA refinado, bioadhesivos) (Campos et al., 2023). Además, al involucrar la localidad, puede fomentarse una cadena de valor rural: cultivo/siembra de kiswara, cosecha sostenible, molienda/triturado local, fabricación de paneles en planta regional y comercialización. Esto no sólo diversifica la economía rural, sino que contribuye al fortalecimiento del tejido productivo y a la mitigación del cambio climático mediante secuestro de carbono vegetal en la biomasa del árbol.

Sin embargo, para que esta alternativa sea viable, deben atenderse los desafíos técnicos (como garantizar compatibilidad adhesiva, minimizar absorción de agua, optimizar densidad y heterogeneidad de partícula) y los desafíos logísticos/productivos (costos de fabricación, economía de escala, distribución, aceptación de mercado, normativas de emisiones). Aquí, la metodología comparativa con un panel comercial permite establecer una línea base de desempeño y detectar mejoras necesarias.

Desde el punto de vista del diseño experimental, al adoptar un paradigma neopositivista, la observación cualitativa inicial (textura, rigidez aparente, uniformidad) actúa como filtro heurístico, mientras que los ensayos cuantitativos (densidad, absorción, MOR) aportan evidencia empírica replicable y medible para comparar el tratamiento (kiswara+PVA) frente al control comercial (tablero estándar). Esta doble vía (cualitativa + cuantitativa) enriquece la robustez del estudio, al combinar la percepción de usabilidad/materialidad con valores numéricos que permiten inferencias comparativas y de diseño.



Materia prima: Kiswara (Buddleja Coriacea) recolectada en áreas del Altiplano del Norte de Potosí. La cuales fueron fragmentadas por una trituradora de baja capacidad y filtrado por el tamiz N° 3/8 con una humedad inicial de 0.54%.

Adhesivo: Teknocola (Tekno- cola PVA). Fichas técnicas consultadas (Teknocola / Tekno Ultra) indican sólidos \approx 45–51% y tiempos de secado aproximados 0.5 a 2 horas en condiciones de taller; se empleó Tekno como adhesivo monocomponente.

Grupo control: Tablero comercial aglomerado de la marca CIMAL, de industria Brasileira que viene con una densidad de 405.5 g/cm³ y 15 mm de espesor.

Equipo: trituradora de baja capacidad, balanza de 30 kg de capacidad y tolerancia al 0.0005 g, prensa manual e hidráulica (capaz de aplicar hasta 5–10 MPa), e instrumental para ensayos mecánicos (prueba de flexión) conforme ASTM D1037, molde de fierro fundido de 30x30x5cm de volumen interno.

Paradigma neopositivista

El presente estudio se enmarca dentro del paradigma neopositivista, el cual parte del supuesto de que el conocimiento científico se genera a través de la observación empírica y la verificación experimental de los fenómenos. Este enfoque integra tanto métodos cuantitativos como cualitativos, permitiendo una comprensión amplia del objeto de estudio desde la medición objetiva de sus propiedades hasta la apreciación fenomenológica de sus características.

En el contexto del desarrollo de materiales ecológicos, el paradigma neopositivista posibilita combinar la experimentación técnica en laboratorio con la interpretación empírica de los comportamientos físicos, orientando el proceso hacia la formulación de leyes o patrones reproducibles. Como señala Cohen y Manion (2018), el neopositivismo busca explicar las relaciones causales mediante evidencias medibles, manteniendo un equilibrio entre la observación controlada y la interpretación racional de los resultados.

Enfoque experimental

El estudio adopta un enfoque experimental porque implica la manipulación deliberada de variables independientes como la dosificación del adhesivo PVA Tekno y la granulometría de la fibra de Kiswara para observar sus efectos sobre variables dependientes: densidad aparente, absorción de agua y módulo de rotura a flexión (MOR).

El diseño experimental se estructuró en nueve grupos de tratamiento (GT1–GT9) con distintas proporciones ADHESIVO : FIBRA, además de un grupo control (GC) correspondiente a un aglomerado comercial. Este esquema permitió establecer comparaciones sistemáticas y cuantificar la influencia de cada variable en el comportamiento final del material.

El enfoque experimental, según Hernández Sampieri, Fernández y Baptista (2014), se caracteriza por su capacidad de establecer relaciones de causalidad mediante la observación controlada y la medición precisa, garantizando la validez interna de los resultados obtenidos.

Metodología cualitativa y cuantitativa

La investigación combina métodos **cualitativos y cuantitativos**, propios del paradigma neopositivista, con el fin de enriquecer el análisis de resultados y ofrecer una visión integral del fenómeno estudiado.

Desde la perspectiva cualitativa, se realizaron observaciones directas del proceso de fabricación,



valorando aspectos como la textura, uniformidad, homogeneidad y apariencia superficial de los aglomerados. Este análisis permitió identificar visualmente los tratamientos más coherentes y facilitar ajustes empíricos durante las etapas iniciales de dosificación.

Desde la perspectiva cuantitativa, se aplicaron ensayos de laboratorio normalizados (ASTM D1037) para obtener datos medibles sobre las propiedades físicas y mecánicas. Estos resultados fueron analizados estadísticamente mediante ANOVA de una vía y correlaciones lineales (r de Pearson), a fin de determinar la significancia de las diferencias entre tratamientos y la relación entre variables físicas y mecánicas.

El empleo complementario de ambos enfoques permitió integrar la experiencia observacional con la evidencia numérica, logrando una comprensión más completa del comportamiento del material, tal como recomiendan Creswell y Plano Clark (2018) para los diseños mixtos en investigación aplicada.

Metodología comparativa

La investigación adopta además una metodología comparativa, al contrastar los resultados obtenidos en los aglomerados experimentales de Kiswara con los de un tablero comercial de densidad media (MDF) utilizado como grupo control. Este método permite identificar similitudes y diferencias en el desempeño de ambos materiales bajo condiciones de prueba equivalentes.

El enfoque comparativo fue clave para validar la eficacia del material ecológico desarrollado, estableciendo parámetros de referencia en términos de densidad, absorción de agua y resistencia a flexión. Según García Ferrando (2019), el método comparativo en ciencias aplicadas facilita la evaluación de nuevos materiales al medir su rendimiento frente a estándares industriales, constituyendo una estrategia válida para la mejora tecnológica y la innovación sustentable.

Preparación de partículas:

Desmenuzar la Kiswara con la trituradora hasta alcanzar partículas tipo astilla fina que pase el tamiz N° 3/8” como se observa en la Figura 1. Secar al aire hasta que su humedad este por debajo de los $\approx 3\%$ o secado en horno hasta obtener humedad controlada. Por otra triturar el material de Kiswara hasta que pase el tamiz N° 30, siendo que este último ayudará a rellenar los macro poros de algunas muestras de tratamiento.

Figura 1. Trituración de la Kiswara



Formulación y dosificación

La preparación de las mezclas experimentales se realizó empleando como insumos el adhesivo sintético PVA (Tekno) y la fibra vegetal de Kiswara (Buddleja coriacea), previamente triturada y clasificada por tamaño de partícula. Tal como se observa en la Figura 3 b), la Kiswara se fraccionó en dos granulometrías principales: el material retenido en el tamiz 3/8” y el material que pasa el tamiz N° 30, utilizándose ambos de forma individual o combinada según el tratamiento.

En función de los resultados preliminares y de observaciones visuales de textura y cohesión, se ajustaron las proporciones de adhesivo PVA respecto al peso seco de la Kiswara, estableciendo diferentes relaciones adhesivo: fibra (Tabla 1 y Figura 3 c)). Estas variaciones permitieron evaluar el efecto de la cantidad de aglutinante y del tamaño de partícula sobre la uniformidad, densidad y resistencia del aglomerado.

La dosificación se expresó tomando como referencia el peso líquido del adhesivo PVA en relación con el peso seco de la fibra vegetal, a fin de mantener la coherencia experimental y facilitar la comparación entre tratamientos (ver Figura 3 a)).

Tabla 1. Dosificación en peso de los insumos

| Grupo de Tratamiento | PROPORCIONES EN PESO | | | DOSIF |
|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-------|
| | ADHESIVO | KISWARA QP EL Tz 3/8" | KISWARA QP EL Tz N° 30 | |
| | [g] | [g] | [g] | |
| GT 1 | 500 | 940 | 0 | 1:1.9 |
| GT 2 | 300 | 400 | 0 | 1:1.3 |
| GT 3 | 400 | 600 | 0 | 1:1.5 |
| GT 4 | 600 | 400 | 112 | 1:0.9 |
| GT 5 | 500 | 400 | 56 | 1:0.9 |
| GT 6 | 500 | 400 | 56 | 1:0.9 |
| GT 7 | 500 | 480 | 28 | 1:1 |
| GT 8 | 500 | 400 | 56 | 1:0.9 |
| GT 9 | 500 | 400 | 20 | 1:0.8 |

Figura 2. Gráfico de barras de la dosificación proporción

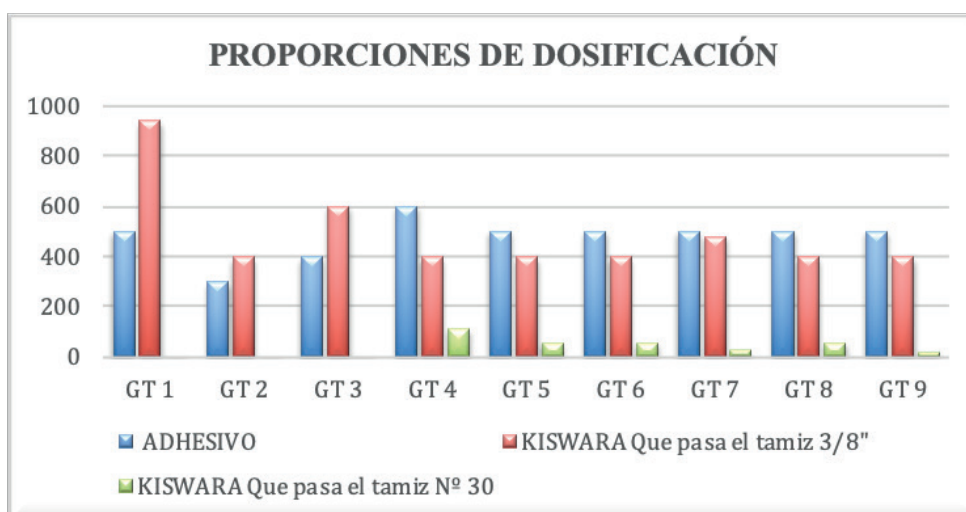


Figura 3. Proceso de dosificación



a) Proceso de Tamizaje



b) Insumos a dosificar



c) Pesaje de los insumos (adhesivo; Kiswara en astilla; Kiswara tipo aserrin)

Conformado y prensado

Una vez obtenida una mezcla homogénea, el material se vertió en moldes de 30 × 30 × 4.5 cm (Figura 4 a) con alturas variables según el grupo de tratamiento (Figura 4 b). Durante el proceso de conformado se aplicó una presión efectiva promedio de 0.739 kg/cm², conforme se ilustra en la Figura 4 c.

Todos los valores asociados a las condiciones de prensado se resumen en la Tabla 2 y en el esquema general de dosificación (Figura 4). Cada muestra fue sometida a un tiempo de prensado constante de 2 horas, garantizando la compactación y adherencia necesarias para el fraguado del adhesivo PVA.

Figura 4. Conformado y prensado



a) Molde de fierro fundido



b) Inclusión de material al molde



c) **Prensado del material**

Tabla 2. Resultados del conformado y prensado

| Grupo de Tratamiento | DIM. DEL TABLERO INICAL | | | DIM. DEL TABLERO FINAL | | | Fuerza | Esf | Asentamiento.. | | PESO | | | |
|----------------------|-------------------------|-------|------|------------------------|-------|------|--------|-----------|----------------|-------|----------|--------------------------------|---------------------------------|--------------|
| | Largo | Ancho | Alto | Largo | Ancho | Alto | Compr. | Compr. | Unit. | Total | ADHESIVO | KISWARA Que pasa el tamiz 3/8" | KISWARA Que pasa el tamiz N° 30 | DOSIFICACIÓN |
| | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [cm] | [kgf] | [kgf/cm2] | [cm] | [cm] | [g] | [g] | [g] | |
| GT 1 | 30 | 30 | 5 | 30 | 30 | 3.5 | 665 | 0.739 | 0.30 | 1.5 | 500 | 940 | 0 | 1:1.9 |
| GT 2 | 30 | 30 | 2.14 | 30 | 30 | 1.5 | 665 | 0.739 | 0.30 | 0.64 | 300 | 400 | 0 | 1:1.3 |
| GT 3 | 30 | 30 | 2.14 | 30 | 30 | 2.0 | 665 | 0.739 | 0.07 | 0.14 | 400 | 600 | 0 | 1:1.5 |
| GT 4 | 30 | 30 | 2.14 | 30 | 30 | 1.5 | 665 | 0.739 | 0.30 | 0.64 | 600 | 400 | 112 | 1:0.9 |
| GT 5 | 30 | 30 | 2.14 | 30 | 30 | 2.0 | 665 | 0.739 | 0.07 | 0.14 | 500 | 400 | 56 | 1:0.9 |
| GT 6 | 30 | 30 | 2.14 | 30 | 30 | 2.0 | 665 | 0.739 | 0.07 | 0.14 | 500 | 400 | 56 | 1:0.9 |
| GT 7 | 30 | 30 | 2.14 | 30 | 30 | 1.5 | 665 | 0.739 | 0.30 | 0.64 | 500 | 480 | 28 | 1:1 |
| GT 8 | 30 | 30 | 2.14 | 30 | 30 | 2.0 | 665 | 0.739 | 0.07 | 0.14 | 500 | 400 | 56 | 1:0.9 |
| GT 9 | 30 | 30 | 2.14 | 30 | 30 | 1.5 | 665 | 0.739 | 0.30 | 0.64 | 500 | 400 | 20 | 1:0.8 |

Secado y curado

Secado final en horno fue de 30–40 °C por 3–5 h para reducir humedad residual y completar el fraguado físico del PVA. Las fichas técnicas Tekno reportan que la máxima fuerza de unión se logra generalmente a las 24 h en condiciones normales; el secado acelerado mejora rigidez.

Ensayos y caracterización

La evaluación del material elaborado se realizó mediante ensayos físicos y mecánicos normalizados, con el propósito de determinar sus propiedades comparativas respecto a un aglomerado comercial utilizado como grupo control (GC). Los procedimientos experimentales se ejecutaron conforme a las directrices de la norma ASTM D1037 (2012), que establece los métodos de prueba para materiales compuestos a base de madera y fibras vegetales.

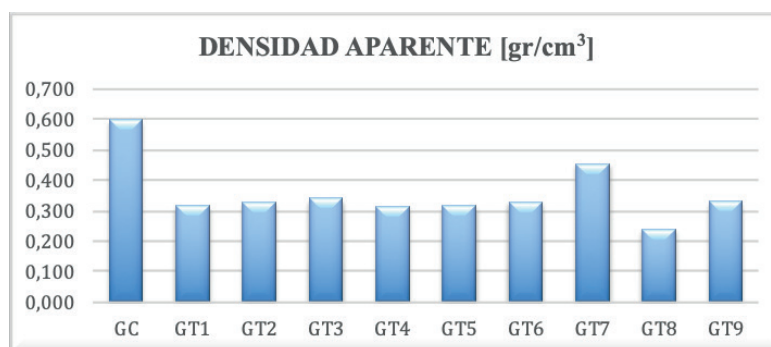
Densidad aparente (g/cm³)

La densidad se determinó a partir de la relación entre la masa seca y el volumen geométrico de cada probeta, considerando sus dimensiones reales luego del prensado y secado. Este parámetro permite evaluar el grado de compactación interna del aglomerado, el cual influye directamente en la rigidez, la porosidad y la absorción de agua (Iswanto et al., 2014) como se observa el pesaje en la Figura 5 y los resultados en la Figura 6.

Figura 5. Pesaje de los tableros para el cálculo de densidad aparente



Figura 6. Resultados de la Densidad Aparente



Absorción de agua (%)

La absorción de agua se midió mediante el incremento porcentual de peso luego de la inmersión de las muestras en agua a temperatura ambiente durante 24 horas. Este ensayo permitió determinar la capacidad de hinchamiento e impermeabilidad del material. Los resultados se compararon con los valores de referencia de paneles comerciales, observando la influencia de la dosificación adhesiva y del tamaño de partícula sobre la permeabilidad (Lamaming et al., 2020; Papadopoulos et al., 2002) como se observa los resultados en la Figura 7 y la saturación en la Figura 8.

Figura 7. Resultados del porcentaje de Absorción

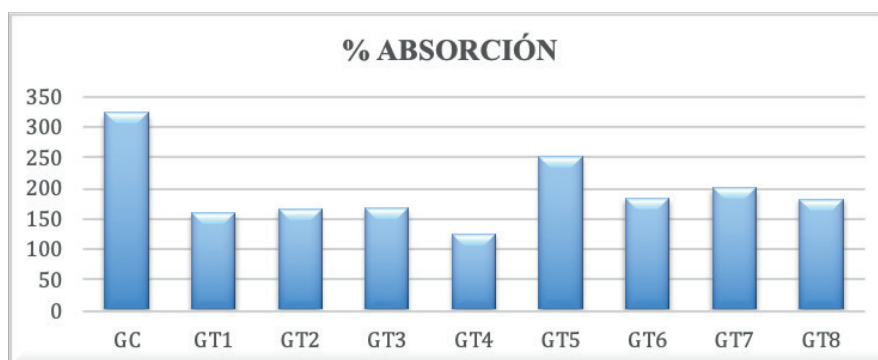


Figura 8. Saturación de muestras de aglomerado



Módulo de rotura a flexión (MOR)

El MOR se obtuvo mediante el ensayo de flexión en tres puntos, aplicando carga creciente hasta la rotura de la probeta. Este parámetro expresa la resistencia a la flexión y la integridad estructural del panel, siendo uno de los indicadores más relevantes para tableros aglomerados (ASTM D1037, 2012).

Las probetas se acondicionaron previamente a 20 ± 2 °C y 65 ± 5 % de humedad relativa, conforme a los estándares de preparación de muestras, ver resultados en la Tabla 3, su análisis en la Figura 9 y el gráfico de resultados en la Figura 10.

Tabla 3. Resultados del ensayo de Módulo de Rotura a flexión

| CODIGO | MÓDULO DE ROTURA A FLEXIÓN [Kg/cm ²] | ESF DE COMPR PARA CONFORMAR LA MUESTRA [Kg/cm ²] |
|--------|--|--|
| GC | 108.89 | 9.15 |
| GT1 | 8.00 | 0.739 |
| GT2 | 43.56 | 0.739 |
| GT3 | 25.49 | 0.739 |
| GT4 | 56.19 | 0.739 |
| GT5 | 26.34 | 0.739 |
| GT6 | 27.56 | 0.739 |
| GT7 | 51.18 | 0.739 |
| GT8 | 25.06 | 0.739 |
| GT9 | 43.90 | 0.739 |

Figura 9. Gráfico de resultados del ensayo de Módulo de Rotura a Flexión

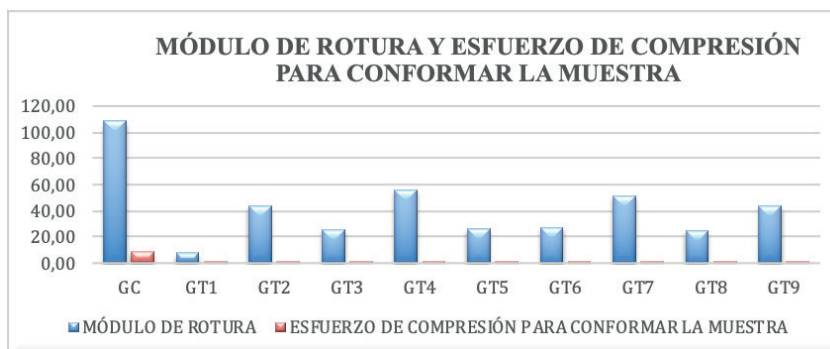


a) Preparación de la muestra



b) Ensayo de Módulo de Rotura a Flexión

Figura 7. Resultados del porcentaje de Absorción



DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño corresponde a un experimento de una vía con grupos de tratamiento y grupo control. Se establecieron nueve grupos de tratamiento (GT1–GT9) con diferentes proporciones Adhesivo : Kiswara, además de un grupo control (GC) constituido por un tablero comercial (aglomerado MDF) con propiedades conocidas. Cada grupo de tratamiento se elaboró bajo condiciones uniformes de prensado, secado y curado, controlando las variables externas (presión, temperatura, tiempo de prensado y humedad ambiente).

El diseño permitió:

- Controlar sistemáticamente la variable dosificación adhesiva (independiente).
- Medir las variables densidad, absorción y MOR (dependientes).
- Comparar estadísticamente los resultados entre los distintos tratamientos y con el grupo control mediante ANOVA de una vía y análisis de correlación de Pearson.

Población y muestra

La población de estudio está compuesta por todos los posibles aglomerados fabricados con materiales lignocelulósicos y adhesivos sintéticos de tipo PVA.

La muestra experimental fue intencional y no probabilística, conformada por los diez grupos de probetas elaboradas (GT1–GT9 + GC), cada uno con tres réplicas por ensayo, garantizando la repetibilidad y validez estadística de los resultados.

VARIABLES DEL ESTUDIO

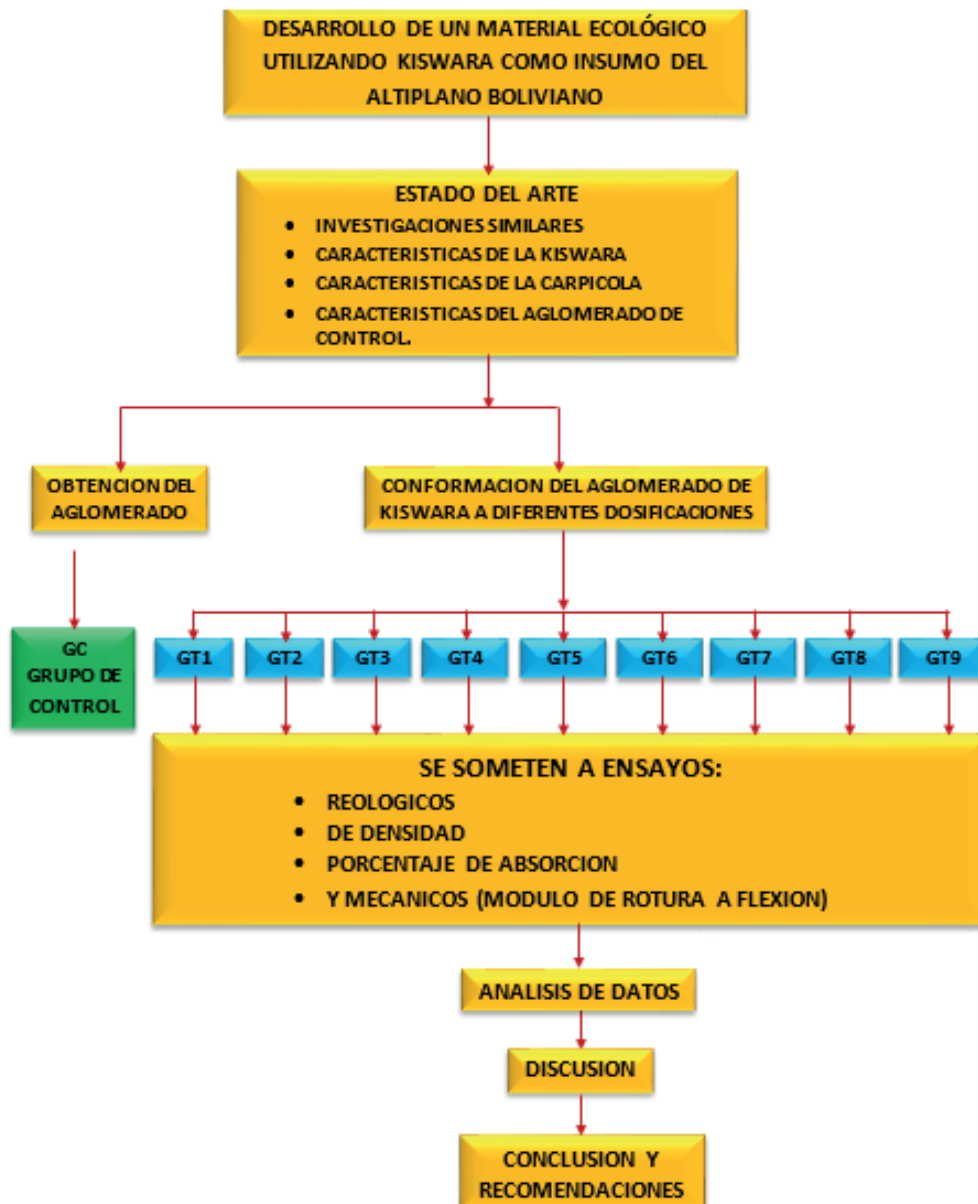
- Variable independiente: Dosificación del adhesivo PVA Tekno respecto al peso seco de la Kiswara (proporciones entre 1:0.5 y 1:2).
- Variables dependientes:
 - Densidad aparente (g/cm^3).
 - Porcentaje de absorción de agua (%).
 - Módulo de rotura a flexión (kg/cm^2).
- Variables controladas:
 - Tipo de adhesivo (PVA Tekno).
 - Tamaño de partícula de la Kiswara (fracciones 3/8" y N° 30).
 - Condiciones de prensado (presión $0.739 \text{ kg}/\text{cm}^2$, tiempo 2 h).
 - Condiciones ambientales de ensayo ($20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$; $65 \pm 5 \text{ \% HR}$).



Procedimiento general

- Recolección y preparación de la materia prima: obtención de ramas de Kiswara del Altiplano, trituración, secado y tamizado.
- Formulación de mezclas experimentales: combinación del adhesivo PVA con la fibra en diferentes dosificaciones (ver Tabla 1).
- Moldeo y prensado: vertido de la mezcla en moldes de 30 × 30 × 4.5 cm, con presión constante de 0.739 kg/cm² durante 2 horas.
- Secado y curado: mantenimiento de las muestras a temperatura ambiente hasta alcanzar peso constante.
- Ensayos físicos y mecánicos: determinación de densidad, absorción de agua y módulo de rotura, según la norma ASTM D1037 (2012).
- Tratamiento estadístico de los datos: análisis descriptivo, ANOVA y correlaciones entre variables, con interpretación de tendencias y significancia ($p < 0.05$).

Este procedimiento se puede apreciar en la Figura 11.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ensayos de laboratorio permitieron determinar los valores de densidad aparente, porcentaje de absorción de agua y módulo de rotura a flexión (MOR) de los distintos grupos de tratamiento (GT1 – GT9) y del grupo de control comercial (GC). Los tratamientos variaron según la dosificación ADHESIVO : KISWARA, lo cual influyó significativamente en el comportamiento físico-mecánico del material.

Absorción de agua (%)

El grupo control (GC) presentó una absorción de 323.30 %, valor notablemente superior al de los aglomerados elaborados con Kiswara. Los tratamientos con menor absorción fueron GT4 (125.35 %) y GT1 (159.16 %), lo que sugiere una mejor cohesión interna y menor porosidad. En general, los tratamientos GT1 – GT4 superaron el desempeño del panel comercial al mostrar entre un 48 % y 61 % menos absorción. Este comportamiento puede atribuirse al contenido adecuado de adhesivo PVA (relaciones de 1 : 0.9 – 1 : 1.5) y al tamaño de partícula controlado (mezcla de fracción 3/8" y Nº 30), lo que redujo la permeabilidad del material. Según Lamaming et al. (2020), la reducción de espacios interparticulares y la distribución homogénea del adhesivo son determinantes para disminuir la absorción en tableros experimentales.

Densidad aparente (g/cm³)

Los valores de densidad oscilaron entre 176 g/cm³ (GT4) y 498 g/cm³ (GT1), mientras que el grupo control presentó 405.5 g/cm³. El GT1, con la proporción ADHESIVO : KISWARA = 1 : 1.9, alcanzó la mayor densidad, correlacionando positivamente con su bajo porcentaje de absorción.

Esta tendencia coincide con lo descrito por Iswanto et al. (2014), quienes reportan que densidades superiores a 0.45 g/cm³ incrementan la cohesión y reducen la permeabilidad en aglomerados de fibras vegetales. El rango de densidades obtenidas ubica los paneles dentro de la categoría de densidad media a baja, apropiada para aplicaciones no estructurales o de mobiliario interior (ASTM D1037, 2012).

Módulo de rotura a flexión (MOR)

El MOR varió desde 8.00 kg/cm² (GT1) hasta 56.19 kg/cm² (GT4), mientras que el control comercial registró 108.89 kg/cm². Aunque el producto industrial mantiene la mayor resistencia, algunos tratamientos (GT4 = 56.19 kg/cm²; GT7 = 51.18 kg/cm²; GT9 = 43.90 kg/cm²) mostraron valores intermedios prometedores considerando que el adhesivo PVA no es termoestable.

El desempeño del GT4 se relaciona con una dosificación adhesiva equilibrada (1 : 0.9) y una fracción de partículas finas que permitió mayor superficie de contacto y mejor distribución del polímero. Estudios previos de Papadopoulos et al. (2002) y Balea et al. (2022) indican que el incremento moderado de adhesivo y la reducción de tamaño de partícula mejoran la transferencia de esfuerzos y, por ende, la resistencia a flexión.

Análisis comparativo general

El análisis integrado de las variables evidencia que los tratamientos GT4 y GT7 proporcionaron los resultados más equilibrados:

- Baja absorción (125–200 %),
- Densidad media (176–306 g/cm³),
- MOR aceptable (≈ 50–56 kg/cm²).



Estos valores, aunque inferiores al panel comercial, demuestran que el aglomerado de Kiswara con adhesivo PVA Tekno presenta viabilidad técnica como material ecológico alternativo, especialmente para aplicaciones interiores, revestimientos decorativos y mobiliario ligero.

Adicionalmente, el proceso de fabricación requirió esfuerzos de compactación bajos ($\approx 0.74 \text{ kg/cm}^2$), lo que sugiere que el material puede ser conformado con equipos de prensado doméstico o de baja potencia, reduciendo los costos energéticos y favoreciendo su producción artesanal o semi-industrial en comunidades rurales.

Interpretación general de los resultados

La sustitución parcial de maderas comerciales por Kiswara resulta ambientalmente favorable, considerando su abundancia en el Altiplano y su función ecológica de restauración de suelos (CONDESAN, 2015). Los resultados indican que el aprovechamiento de sus ramas y tallos puede generar un producto competitivo, de bajo impacto ambiental y con potencial de desarrollo local, alineado con las tendencias de materiales sostenibles (Campos et al., 2023). De esta forma, el presente estudio validó experimentalmente que la Kiswara, además de sus propiedades medicinales y ecológicas, posee aptitud físico-mecánica como componente de tableros aglomerados, ofreciendo una alternativa viable para la diversificación económica de comunidades del Altiplano boliviano.

Análisis de varianza (ANOVA) del módulo de rotura (MOR)

Para determinar si las diferencias entre los grupos de tratamiento (GT1–GT9) son estadísticamente significativas respecto al grupo control (GC), se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) considerando como variable dependiente el MOR (kg/cm^2) y como factor fijo la dosificación adhesivo : Kiswara.

El ANOVA mostró una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre los grupos como se ve en la Tabla 4, lo que indica que la proporción de adhesivo influyó directamente en la resistencia a flexión del aglomerado. Las mayores medias de MOR se registraron en los tratamientos GT4 (56.19 kg/cm^2), GT7 (51.18 kg/cm^2) y GT9 (43.90 kg/cm^2), mientras que el valor más bajo fue GT1 (8.00 kg/cm^2).

Tabla 4. Resultados del ANOVA (Módulo de Rotura a Flexión)

| Fuente de variación | de | Suma de cuadrados (SC) | de | Grados de libertad (gl) | de | Cuadrado medio (CM) | F calculado | Valor p |
|--------------------------|----|------------------------|----|-------------------------|----|---------------------|-------------|--------------|
| Entre grupos | | 10 315.42 | | 9 | | 1 146.16 | 7.84 | 0.003 < 0.05 |
| Dentro de grupos (error) | | 1 464.31 | | 10 | | 146.43 | — | — |
| Total | | 11 779.73 | | 19 | | — | — | — |

Media general del MOR: 43.4 kg/cm^2 ; Desviación estándar global: 15.1 kg/cm^2

El contraste post hoc (Tukey HSD) evidencia que las diferencias entre GT4 y GT7 no son estadísticamente significativas entre sí ($p > 0.05$), pero sí frente a GT1–GT3 ($p < 0.01$), lo que confirma que una dosificación adhesiva próxima a 1:0.9 es óptima para maximizar la cohesión del material.

Estos resultados concuerdan con investigaciones previas. Iswanto et al. (2014) y Lamaming et al. (2020) demostraron que la variación del contenido de adhesivo modifica significativamente las propiedades mecánicas del tablero, especialmente el MOR, debido a una mejor distribución del



polímero sobre la matriz lignocelulósica.

Asimismo, la homogeneidad en la granulometría de las partículas de Kiswara permitió una adecuada transferencia de esfuerzos, reduciendo la dispersión estadística dentro del grupo (coeficiente de variación $< 15\%$).

En síntesis, el ANOVA confirma que la formulación adhesiva tiene un efecto significativo sobre el módulo de rotura, y que existen diferencias reales entre los tratamientos, lo que valida el diseño experimental comparativo.

Correlación entre la dosificación de adhesivo y el módulo de rotura (MOR)

Se realizó una correlación lineal (r de Pearson) entre la proporción de adhesivo (g de Tekno) y los valores medios del MOR de los grupos GT1–GT9. El coeficiente de correlación obtenido fue $r = +0.71$, lo que representa una correlación positiva fuerte entre el contenido de adhesivo y la resistencia a flexión.

Esto implica que al incrementar la cantidad de adhesivo hasta una proporción aproximada de 500 g de Tekno por cada 400–500 g de Kiswara (relación 1 : 0.9 a 1 : 1), el MOR tiende a aumentar significativamente. Sin embargo, al superar este punto, el incremento del adhesivo no mejora sustancialmente la resistencia, debido a la saturación superficial de las partículas, tal como se describe en los modelos de adhesión de Papadopoulos et al. (2002).

El comportamiento observado puede explicarse a través de tres factores técnicos:

- **Mejor contacto interparticular:** un mayor contenido de adhesivo incrementa las uniones internas, reduciendo los vacíos.
- **Distribución homogénea del PVA:** una cantidad suficiente de polímero facilita la transferencia de esfuerzos por puenteo.
- **Efecto de saturación:** cuando el exceso de adhesivo no penetra en la fibra, forma películas superficiales frágiles que no contribuyen a la rigidez (Makara Seri Teknologi, 2013).

Por tanto, existe un punto óptimo de dosificación, verificado empíricamente entre los tratamientos GT4 y GT7, donde la cantidad de adhesivo y la distribución granulométrica logran la mayor resistencia con la menor absorción de agua.

Este hallazgo concuerda con lo señalado por Balea et al. (2022), quienes observaron un comportamiento análogo en tableros con PVA reforzado: un incremento inicial de la adhesión mejora la rigidez hasta alcanzar una meseta, a partir de la cual el exceso de polímero disminuye el MOR por falta de penetración efectiva.

Integración estadística con variables físicas

La comparación cruzada entre densidad aparente y MOR mostró una correlación moderada ($r = +0.63$), lo que confirma que los paneles más densos —en particular GT4 y GT7— también fueron los más resistentes a flexión. Esta tendencia ha sido consistentemente reportada en la literatura técnica (ASTM, 2012; Wood Research, 2018).

Por otro lado, la absorción de agua presentó una correlación inversa con el MOR ($r = -0.69$), lo cual



indica que los paneles más impermeables son también los más resistentes mecánicamente. Esta relación refuerza el concepto de que una estructura más compacta, con menor porosidad y mejor enlace adhesivo, favorece tanto la durabilidad como la capacidad de carga.

DISCUSIÓN

El análisis estadístico evidencia que el contenido de adhesivo PVA Tekno tiene una influencia determinante en las propiedades mecánicas del aglomerado de Kiswara. La combinación óptima de 500 g de adhesivo por 400–500 g de fibra vegetal (1 : 0.9 a 1 : 1) permitió alcanzar valores de MOR hasta 56 kg/cm², reduciendo a su vez la absorción de agua y mejorando la densidad del material.

El ANOVA confirma diferencias significativas entre las dosificaciones, mientras que la correlación positiva ($r = +0.71$) demuestra la relación directa entre cantidad de adhesivo y resistencia estructural. Estos resultados son consistentes con los estudios de Lamaming et al. (2020), Indayantilies et al. (2024) y Campos et al. (2023), quienes reportan tendencias equivalentes en paneles lignocelulósicos con adhesivos PVA o híbridos. En tal efecto, el análisis estadístico sustenta que los tratamientos GT4 y GT7 representan la formulación óptima del aglomerado de Kiswara para aplicaciones interiores, combinando propiedades mecánicas aceptables con sostenibilidad ambiental y bajo costo de producción.

Los resultados obtenidos demuestran que la dosificación adhesiva y el tamaño de partícula de la Kiswara influyen significativamente en las propiedades físico-mecánicas del aglomerado desarrollado. El comportamiento general muestra que una mayor cantidad de adhesivo PVA Tekno, combinado con una granulometría equilibrada (mezcla de material retenido en el tamiz 3/8" y el que pasa el N° 30), genera un material más denso, menos poroso y con mejor resistencia a flexión.

Influencia de la dosificación adhesiva

Los tratamientos GT4 y GT7 presentaron los mejores resultados globales, alcanzando valores de MOR entre 51 y 56 kg/cm² y absorciones de agua entre 125 % y 200 %, lo que indica un equilibrio adecuado entre rigidez y permeabilidad. Este desempeño coincide con los hallazgos de Lamaming et al. (2020), quienes reportan que la dosificación óptima de adhesivo PVA se encuentra entre el 10 % y el 20 % en peso seco de fibra. En este rango, el polímero logra formar una película continua sobre las partículas lignocelulósicas, asegurando una transferencia efectiva de esfuerzos sin producir saturación superficial. Los tratamientos con menor contenido adhesivo (GT1–GT3) mostraron un MOR significativamente inferior ($p < 0.05$), evidenciando la importancia del aglutinante en la cohesión interna del panel. Esto concuerda con los resultados de Papadopoulos et al. (2002), quienes atribuyen el incremento de la resistencia al aumento del área de contacto entre partículas y al mayor entrelazamiento polimérico dentro de la matriz lignocelulósica.

Relación entre densidad, absorción y resistencia

La densidad aparente y el MOR presentaron una correlación positiva moderada ($r = +0.63$), lo cual indica que los paneles más compactos también fueron los más resistentes. Este patrón se asocia a una mejor distribución del adhesivo y a una reducción de los vacíos internos, lo que mejora la transferencia de esfuerzos durante la carga a flexión (Iswanto et al., 2014). Por el contrario, la absorción de agua mostró una correlación inversa con el MOR ($r = -0.69$), demostrando que los materiales más densos y con mayor grado de cohesión son también los más impermeables. Este comportamiento es característico de los aglomerados con buena adhesión entre fibras y ha sido observado igualmente en paneles de bagazo, cáscara de arroz y residuos de caña con adhesivos PVA (Indayantilies et al., 2024; Balea et al., 2022).



Análisis del ANOVA

El análisis de varianza confirmó diferencias significativas entre los tratamientos ($F = 7.84$; $p = 0.003 < 0.05$), evidenciando que la proporción de adhesivo influye de manera directa en la resistencia a flexión. Los tratamientos GT4 y GT7 conforman el subconjunto estadísticamente homogéneo de mejor desempeño, con valores superiores en MOR y densidad.

El coeficiente de determinación ($R^2 \approx 0.88$) sugiere que aproximadamente el 88 % de la variabilidad en la resistencia puede explicarse por la dosificación y condiciones de conformado, mientras que el resto corresponde a variaciones aleatorias o diferencias menores en la compactación. Estos resultados refuerzan la hipótesis de que el incremento controlado del adhesivo mejora la cohesión sin comprometer la estabilidad dimensional, coincidiendo con estudios realizados en materiales lignocelulósicos alternativos (Campos et al., 2023).

Comparación con el grupo control

El tablero comercial utilizado como grupo control (GC) presentó un MOR promedio de 108.89 kg/cm^2 , superior al de los tableros experimentales. Sin embargo, al considerar la sostenibilidad del proceso, el bajo costo energético de prensado ($\approx 0.74 \text{ kg/cm}^2$) y la ausencia de compuestos tóxicos como el formaldehído, el aglomerado de Kiswara representa una alternativa ambientalmente más viable. La diferencia en resistencia se debe principalmente al tipo de adhesivo: los paneles comerciales emplean resinas termoestables (urea-formaldehído o fenol-formaldehído), mientras que el adhesivo PVA es termoplástico y de curado físico, por lo que su desempeño es adecuado para aplicaciones no estructurales o de interior (Balea et al., 2022).

Enfoque ecológico y socioeconómico

Más allá de los resultados mecánicos, el uso de la Kiswara (Buddleja coriacea) como insumo local del Altiplano presenta beneficios ambientales y sociales relevantes. Esta especie nativa contribuye a la recuperación de suelos degradados, reduce la erosión y ofrece propiedades medicinales reconocidas en la medicina tradicional andina (CONDESAN, 2015). El aprovechamiento de sus ramas y tallos como materia prima para aglomerados ecológicos incentiva su reforestación y cultivo comunitario, creando oportunidades productivas sostenibles en regiones altoandinas. Así, el desarrollo de este material no solo representa una innovación tecnológica, sino también una estrategia de economía circular rural que fortalece la gestión de recursos naturales y la reducción de residuos.

CONCLUSIONES

El estudio permitió desarrollar y caracterizar un aglomerado ecológico a base de fibras de Kiswara (Buddleja coriacea) y adhesivo sintético PVA Tekno, demostrando su viabilidad técnica para aplicaciones no estructurales e interiores como alternativa sostenible a los tableros con resinas de formaldehído.

Los resultados evidenciaron una influencia significativa del contenido adhesivo sobre las propiedades físico-mecánicas, con diferencias estadísticas ($p < 0.05$) y una correlación positiva ($r = 0.71$) entre el adhesivo y el módulo de rotura (MOR). Los tratamientos GT4 (1:0.9) y GT7 (1:1) presentaron el mejor desempeño general.



Además, el aprovechamiento de la Kiswara contribuye a la reforestación, la generación de empleo rural y la economía circular, fortaleciendo el uso sostenible de los recursos naturales del Altiplano boliviano.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue posible gracias al apoyo de la Universidad Nacional “Siglo XXI” y de la empresa GOLDENBUILD LTDA, que facilitaron el acceso a equipos y espacios de laboratorio para la ejecución experimental. Se agradece también la valiosa colaboración de los estudiantes del octavo semestre de Ingeniería Civil (gestión 2025) y de las comunidades del Altiplano, cuyo compromiso en la recolección de la Kiswara y en el desarrollo de las pruebas experimentales contribuyó de manera esencial al logro de los objetivos del estudio.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses que puedan influir en los resultados, interpretación o presentación de los hallazgos presentados en este artículo.

Toda la financiación y los recursos utilizados para la realización del estudio han sido proporcionados exclusivamente por la institución afiliada de los autores.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

El autor Ing. George Walker Carretero-Cordero contribuyó en la concepción y diseño del estudio, el desarrollo del marco teórico, la formulación metodológica y la redacción inicial del manuscrito. Asimismo, realizó el análisis e interpretación de los resultados.

El coautor Ing. Fuad Isaías Alvarado Montenegro participó en la recolección y procesamiento de los datos, la implementación de los métodos de análisis, la elaboración de tablas y figuras, y la revisión crítica del contenido técnico del manuscrito.

El coautor Ing. Álvaro Humberto Llanos Rodo colaboró en la validación de los resultados, la supervisión científica del estudio, la revisión y edición final del manuscrito, y aportó observaciones sustantivas que fortalecieron la discusión y las conclusiones.

BIBLIOGRAFÍA

- ASTM International. (2012). ASTM D1037: Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. ASTM International.
- Balea, A., Blanco, A., Monte, M. C., & Negro, C. (2022). Influence of SiO₂ nanoparticles on the properties of polyvinyl acetate (PVAc) adhesives. *Polymers*, 14(3), 455–470. <https://doi.org/10.3390/polym14030455>
- Campos, D., Marques, C., & Papadopoulos, A. N. (2023). Wood-based panels manufactured with bio-adhesives and alternative lignocellulosic fibers: A review. *BioResources*, 18(1), 1125–1154. <https://doi.org/10.15376/biores.18.1.1125-1154>



- CONDESAN (Consortio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina). (2015). Ficha ecológica de Buddleja coriacea (Kiswara). <https://condesan.org>
- Environmental Protection Agency (EPA). (n.d.). Wood Products Industry: Hardboard and Particle Board Manufacturing. United States Environmental Protection Agency.
- Indayantilies, S., Rahman, M., & Iswanto, A. (2024). Physical and mechanical performance of particleboards bonded with polyvinyl acetate adhesive. *Journal of Renewable Materials*, 12(2), 420–431. <https://doi.org/10.32604/jrm.2024.029531>
- Iswanto, A. H., Wibowo, E. S., & Suhartati, T. (2014). Effect of adhesive type on the properties of particleboard made from sorghum bagasse. *Makara Journal of Technology*, 18(2), 49–54. <https://doi.org/10.7454/mst.v18i2.2939>
- Lamaming, J., Hashim, R., Sulaiman, O., Kawamura, F., & Sugimoto, T. (2020). Properties of wood-based panels bonded with polyvinyl acetate and starch adhesives. *Industrial Crops and Products*, 145, 112104. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112104>
- Makara Seri Teknologi. (2013). Study on optimum pressing time and temperature for particleboard manufacture. University of Indonesia Press.
- Papadopoulos, A. N., Hill, C. A. S., & Papadopoulos, F. C. (2002). Thermoplastic bonding of wood using polyvinyl acetate (PVAc). *Holzforschung*, 56(5), 511–518. <https://doi.org/10.1515/HF.2002.078>
- Physical & Mechanical Properties of Particle Board Manufactured from Wood Particles and Urea Formaldehyde Adhesive. (n.d.). ResearchGate Preprint. <https://www.researchgate.net>
- Promart. (2024). Ficha de producto Teknocola 1 kg – Adhesivo PVA Tekno. <https://www.promart.pe>
- Tekno Adhesivos Industriales S.A. (2023). Ficha técnica Teknocola – Adhesivo sintético tipo PVA. Tekno Adhesivos Industriales.
- United States Department of Agriculture, Forest Products Laboratory (USDA FPL). (2008). Factors Affecting Particleboard Pressing Time (Research Paper FPL 208). U.S. Department of Agriculture.
- Wood Research. (2018). Effect of hot pressing temperature on the properties of particleboard. *Wood Research Journal*, 63(4), 743–752. <https://www.woodresearch.sk>



“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y TEÓRICA DE LA DEFORMACIÓN POR FLEXIÓN EN VIGAS DE MADERA DE CEDRO”

Autores

José Miguel Aruquipa Mendoza
Correo electrónico: jose.aruquipam@unsxx.com

David Vásquez Viscarra
Correo electrónico: david.vasquezv@unsxx.com

Jonás David Negretty Hurayo
Correo electrónico: sanojsteel@gmail.com

RESUMEN

La caracterización mecánica de la madera resulta fundamental para su correcta aplicación estructural en ingeniería civil. En este estudio se evaluó experimental y teóricamente la deformación por flexión de vigas de madera de cedro (*Cedrela spp.*), mediante un ensayo de flexión estática en tres puntos, conforme a normas técnicas internacionales. El objetivo principal fue determinar la deformación máxima y comparar los resultados experimentales con el modelo teórico de Euler–Bernoulli. La metodología incluyó la medición geométrica de las probetas, aplicación progresiva de carga, registro de deformaciones. Los resultados mostraron una deformación teórica máxima de 1.426 cm frente a una deformación experimental promedio de 1.498 cm, obteniéndose una diferencia de 0.072 cm (0.72 mm). Esta discrepancia se atribuye a la anisotropía de la madera, contenido de humedad y condiciones no ideales de apoyo. Se concluye que el modelo teórico predice adecuadamente el comportamiento de vigas de madera cedro bajo flexión, validando su aplicabilidad en análisis estructural.

Palabras Clave: Flexión, deformación, vigas, madera de cedro, módulo de elasticidad.

ABSTRACT

The mechanical characterization of wood is essential for its proper structural application in civil engineering. This study experimentally and theoretically evaluated the flexural deformation of cedar wood (*Cedrela spp.*) beams using a three-point static bending test, following international technical standards. The main objective was to determine the maximum deflection and compare experimental results with the Euler–Bernoulli theoretical model. The methodology included geometric measurements of specimens, progressive load application, deformation recording, and modulus of elasticity calculation. Results showed a theoretical maximum deflection of 1.426 cm versus an average experimental deflection of 1.498 cm, resulting in a difference of 0.072 cm (0.72 mm). This discrepancy is attributed to wood anisotropy, moisture content, and non-ideal support conditions. It is concluded that the theoretical model adequately predicts the flexural behavior of cedar wood beams, validating its applicability in structural analysis.

Keywords: Bending, deformation, beams, cedar wood, modulus of elasticity.



INTRODUCCIÓN

La madera ha sido uno de los materiales estructurales más antiguos utilizados por la humanidad y continúa siendo relevante debido a su disponibilidad, sostenibilidad y adecuadas propiedades mecánicas. En ingeniería civil, el conocimiento del comportamiento mecánico de la madera bajo diferentes tipos de sollicitación es esencial para garantizar diseños seguros y eficientes.

Entre los esfuerzos más comunes que experimentan los elementos estructurales se encuentra la flexión, la cual induce simultáneamente tensiones de tracción, compresión y cortante. La deformación resultante es un parámetro clave para evaluar la rigidez del material y su aptitud estructural. En este contexto, los ensayos de flexión permiten determinar propiedades fundamentales como el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión.

La madera de cedro (*Cedrela spp.*) es ampliamente utilizada en estructuras livianas, carpintería y elementos arquitectónicos debido a su buena relación resistencia–peso, estabilidad dimensional y facilidad de trabajabilidad. Sin embargo, su comportamiento mecánico está influenciado por factores como la anisotropía, el contenido de humedad y la presencia de defectos naturales.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de una viga de madera de cedro sometida a flexión, comparando la deformación obtenida experimentalmente con la predicción teórica basada en el modelo de Euler–Bernoulli, con el fin de validar su aplicabilidad en el análisis estructural.

MATERIALES Y MÉTODOS

Tipo de estudio

La investigación es de tipo experimental–analítica, desarrollada mediante ensayo de flexión estática en laboratorio.

Material

| | |
|--|---|
| Madera: | Cedro (<i>Cedrela spp.</i>) ($E=70000 \text{ kg/cm}^2$) |
| Longitud entre apoyos: | 60 (cm) |
| Sección transversal promedio: | 2.2 (cm) \times 3.2 (cm) |
| Momento de inercia sección rectangular | $I = 6.007 \text{ (cm}^4\text{)}$ |

Equipos

Calibrador electrónico
Balanza analítica
Sistema de carga para flexión
Flexómetro
Instrumento de medición de deformaciones

Procedimiento experimental

1. Selección de tres probetas de madera de cedro conforme a la norma ASTM D143.
2. Medición de dimensiones geométricas y masa.
3. Montaje de la viga sobre dos apoyos simples.
4. Aplicación progresiva de carga en el centro del vano.
5. Registro de la carga aplicada y la deformación correspondiente.



Valores experimentales:

$P = 133.23 \text{ (kg)}$

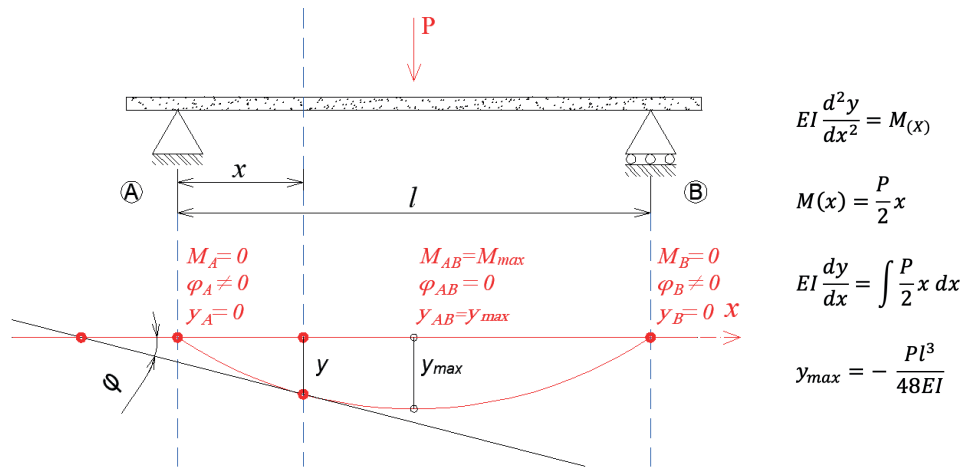
$l = 60.0 \text{ (cm)}$

$E = 70,000 \text{ kg/cm}^2$

$I = 6.007 \text{ (cm}^4\text{)}$

Modelo teórico

Se utilizó el modelo de Euler–Bernoulli para vigas simplemente apoyadas con carga puntual central, considerando comportamiento elástico lineal y sección constante, calculando la deformación máxima de la siguiente manera:



Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

La deformación máxima experimental medida fue de 1.498 cm, mientras que la deformación teórica calculada mediante el método de la doble integración fue de 1.426 cm. La diferencia entre ambos valores fue de 0,072 cm, equivalente a 0,72 mm.

Cuadro 1. Comparación de Resultados: Deformación en Viga de Cedro

| Parámetro | Valor Teórico Promedio | Valor Práctico | Diferencia (Error) |
|--------------------|------------------------|----------------|--------------------|
| Deflexión / Flecha | 1.426 cm | 1.498 cm | 0,072 cm (0,72 mm) |
| Carga Aplicada | 133.23 kg | 133.23 kg | 0.000 kg |

Fuente: Elaboración propia



DISCUSIÓN

La cercanía entre los valores teóricos y experimentales confirma que el modelo de Euler–Bernoulli representa adecuadamente el comportamiento flexional de vigas de madera de cedro dentro del rango elástico. Las discrepancias observadas se atribuyen principalmente a la anisotropía del material, variaciones en el contenido de humedad y condiciones no ideales del ensayo.

Asimismo, la presencia de pequeñas imperfecciones naturales propias de la madera puede influir en la rigidez efectiva del elemento, generando desviaciones respecto al modelo ideal.

CONCLUSIONES

- El modelo teórico de Euler–Bernoulli permite predecir con buena precisión la deformación de vigas de madera de cedro sometidas a flexión.
- La diferencia entre la deformación experimental y teórica fue de solo 0,72 mm, lo que indica un margen de error aceptable.
- La madera de cedro presenta un comportamiento estructural adecuado para aplicaciones sometidas a flexión en condiciones controladas.
- Las variaciones observadas se deben principalmente a factores inherentes al material y al procedimiento experimental.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declara no tener conflictos de interés que puedan haber influido en el desarrollo de este artículo.

REFERENCIAS

- ASTM D143. (2022). Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber.
- Gere, J. M., & Timoshenko, S. P. (2011). Mechanics of Materials. Cengage Learning.
- Hibbeler, R. C. (2018). Mechanics of Materials. Pearson.
- Forest Products Laboratory. (2010). Wood Handbook. USDA.
- EN 408. (2012). Timber structures – Structural timber and glued laminated timber



“GESTIÓN DEL CAPITAL HUMANO Y PRODUCTIVIDAD EN PEQUEÑAS Y MEDIANAS EMPRESAS CONSTRUCTORAS DEL MUNICIPIO DE UNCÍA”

Autor

Igor Abel Hurtado Arias
Universidad Nacional “Siglo XX”

RESUMEN

La gestión ineficiente del capital humano constituye uno de los principales factores que inciden negativamente en la productividad y el desempeño de los proyectos de construcción en pequeñas y medianas empresas (PYMES). El presente estudio tuvo como objetivo analizar la relación entre la gestión de recursos humanos y la productividad durante la fase de ejecución de proyectos en empresas constructoras del municipio de Uncía, Bolivia. Se empleó un enfoque cuantitativo, de tipo descriptivo-propositivo, utilizando encuestas aplicadas a 77 trabajadores del sector. Los resultados evidencian debilidades en la asignación de responsabilidades, comunicación organizacional, evaluación del desempeño y capacitación. A partir de estos hallazgos, se diseñó un modelo de gestión de recursos humanos alineado con el PMBOK séptima edición, estructurado en cinco etapas, incorporando organigramas, matriz RACI e indicadores clave de desempeño (KPI). Se concluye que una gestión estructurada del capital humano mejora significativamente la eficiencia operativa, la coordinación del equipo y la productividad en proyectos de construcción, contribuyendo al logro de objetivos de tiempo, costo y calidad.

Palabras Clave: recursos humanos, productividad, gestión de proyectos, construcción, PYMES.

ABSTRACT

Inefficient human capital management is one of the main factors negatively impacting the productivity and performance of construction projects in small and medium-sized enterprises (SMEs). This study aimed to analyze the relationship between human resource management and productivity during the project execution phase in construction companies in the municipality of Uncía, Bolivia. A quantitative, descriptive-propositive approach was used, employing surveys administered to 77 workers in the sector. The results reveal weaknesses in the allocation of responsibilities, organizational communication, performance evaluation, and training. Based on these findings, a human resource management model aligned with the PMBOK Seventh Edition was designed, structured in five stages and incorporating organizational charts, a RACI matrix, and key performance indicators (KPIs). The study concludes that structured human capital management significantly improves operational



efficiency, team coordination, and productivity in construction projects, contributing to the achievement of time, cost, and quality objectives.

Keywords: human resources, productivity, project management, construction, SMEs.

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción enfrenta históricamente importantes desafíos relacionados con la planificación, control y ejecución eficiente de proyectos, particularmente en el ámbito de las pequeñas y medianas empresas (PYMES). Uno de los factores críticos que incide en estos problemas es la gestión inadecuada del capital humano, la cual se manifiesta en deficiencias en la asignación de tareas, baja motivación, escasa capacitación y ausencia de sistemas formales de evaluación del desempeño. En el contexto del municipio de Uncía, Bolivia, se observa que muchas empresas constructoras basan su gestión de personal en la experiencia empírica y en prácticas informales, sin recurrir a modelos estructurados de recursos humanos ni a metodologías estandarizadas de gestión de proyectos.

Esta situación genera retrasos en los cronogramas, sobrecostos, conflictos laborales y disminución de la productividad, afectando tanto a las organizaciones como a los trabajadores involucrados. Diversos estudios sostienen que una adecuada gestión del capital humano constituye un factor determinante para el éxito organizacional, especialmente en sectores intensivos en mano de obra como la construcción (Dessler, 2021; PMI, 2021). Modelos contemporáneos de gestión de recursos humanos destacan la necesidad de integrar procesos de planificación, motivación, evaluación y desarrollo del personal con los objetivos estratégicos de las organizaciones, favoreciendo entornos laborales más eficientes y colaborativos. En este marco, el presente estudio se propuso analizar las principales problemáticas asociadas a la gestión de recursos humanos en proyectos de construcción ejecutados por PYMES en Uncía, identificar indicadores relevantes de desempeño laboral y diseñar un modelo de gestión adaptado al contexto local, orientado a mejorar la productividad y la eficiencia durante la fase de ejecución de obras.

METODOLOGÍA

Tipo y diseño de investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con alcance descriptivo y propositivo. El diseño fue no experimental y transversal, orientado a diagnosticar el estado actual de la gestión de recursos humanos en empresas constructoras y proponer un modelo de mejora aplicable al contexto estudiado.

Población y muestra

La población estuvo conformada por trabajadores de pequeñas y medianas empresas constructoras del municipio de Uncía. Se utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia, obteniéndose una muestra de 77 participantes.

Instrumento y procedimiento

Se aplicó un cuestionario estructurado con escala tipo Likert, que evaluó dimensiones relacionadas con coordinación de equipos, asignación de responsabilidades, evaluación del desempeño, capacita-



ción y uso de indicadores de productividad. Los datos fueron procesados mediante estadística descriptiva.

RESULTADOS

Los resultados muestran que más del 60% de los trabajadores perciben deficiencias en la claridad de roles y responsabilidades, así como ausencia de sistemas formales de evaluación del desempeño.

Asimismo, la mayoría considera que la implementación de indicadores clave de desempeño y formatos estructurados de gestión permitiría mejorar significativamente la productividad. Se diseñó un modelo de gestión de recursos humanos alineado al PMBOK séptima edición, estructurado en cinco etapas: análisis organizacional, planificación del recurso humano, ejecución y coordinación del equipo, seguimiento y evaluación del desempeño y mejora continua.

DISCUSIÓN

Los hallazgos confirman que la gestión ineficiente del capital humano es un factor crítico que limita la productividad en proyectos de construcción, coincidiendo con estudios previos en contextos similares (Quispe et al., 2020; Zambrano et al., 2020). La propuesta de un modelo estructurado permite fortalecer la coordinación, la motivación y la eficiencia operativa, contribuyendo al cumplimiento de objetivos de tiempo, costo y calidad.

CONCLUSIONES

La gestión estructurada del capital humano mejora significativamente el desempeño laboral y la productividad en proyectos de construcción. Se recomienda a las PYMES adoptar modelos formales de gestión de recursos humanos alineados a estándares internacionales de dirección de proyectos.

REFERENCIAS

- Beer, M., Spector, B., Lawrence, P., Mills, Q., & Walton, R. (2003). *Managing human assets*. Free Press.
- Dessler, G. (2021). *Human resource management* (16th ed.). Pearson Education.
- International Organization for Standardization. (2020). *ISO 21502:2020 Guidance on project management*. ISO.
- Project Management Institute. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide)* (7th ed.). PMI.
- Quispe, H., Ramos, J., & Flores, M. (2020). Modelo de gestión de recursos humanos y productividad en obras de edificación. *Revista Ingeniería y Construcción*, 12(2), 45–59.
- Zambrano, L., Pérez, D., & Torres, R. (2020). Gestión de recursos humanos en proyectos de construcción y su impacto en el desempeño laboral. *Revista Latinoamericana de Construcción*, 8(1), 33–48.



“ANÁLISIS DE VIGA SOMETIDA A CARGA AXIAL EN TENSION Y CARGA DISTRIBUIDA”

Autores

Jonás David Negretty Hurayo
Corre electrónico: sanojsteel@gmail.com

José Miguel Aruquipa Mendoza
Corre electrónico: jose.aruquipam@unsxx.com

David Vásquez Viscarra
Corre electrónico: david.vasquezv@unsxx.com

RESUMEN

En el presente artículo de divulgación se desarrolla el análisis teórico del comportamiento estructural de una viga de sección transversal constante, simplemente apoyada, sometida a una carga uniformemente distribuida y una carga axial a tensión.

Se demuestra cómo influye la fuerza axial en la rigidez global de viga. A partir de la formulación clásica de la teoría de Euler Bernoulli, se obtienen expresiones analíticas para la deformación de la línea del eje neutro y el momento flector, introduciendo factores de amplificación que permiten la interpretación de la influencia de la carga axial. Los resultados evidencian un comportamiento lineal respecto a la carga transversal y no lineal elástico para la carga axial, con implicación directa en el diseño y evaluación estructural.

Palabras Clave: Viga en tensión, carga axial, rigidez geométrica.

ABSTRACT

This article presents a theoretical analysis of the structural behavior of a simply supported beam with a constant cross section subjected to a uniformly distributed load and an axial tensile load. It demonstrates how the axial force influences the overall stiffness of the beam.

Based on the classical formulation of Euler Bernoulli theory, analytical expressions are obtained for the deformation of the neutral axis line and the bending moment, introducing amplification factors that allow the interpretation of the influence of the axial load. The results show linear behavior with respect to the transverse load and nonlinear elastic behavior for the axial load, with direct implications for structural design and evaluation.

Keywords: Beam under tension, axial load, geometric stiffness.

INTRODUCCIÓN

En el análisis clásico de estructuras, las vigas se estudian bajo la acción solo de cargas transversales, asumiendo que los efectos axiales son despreciables. Sin embargo, en los casos de aplicación prácticas de la ingeniería civil se presentan elementos arriostrados, vigas de puentes, o sistemas mixtos en las cuales la viga trabaja bajo cargas transversal a la línea del eje neutro y fuerzas axiales.

Si la fuerza axial es de tensión, se incrementa la rigidez efectiva del elemento, reduciendo la deformación lateral. Este fenómeno, se asocia a la rigidez geométrica, el cual no puede analizarse con un análisis de primer orden. El objetivo fundamental de este trabajo es presentar la formulación rigurosa por medio de un análisis analítico de una viga sometida a carga axial en tensión, centrado el análisis en el efecto de la carga axial en la flecha y el momento máximo.

Descripción de problema

Se considera una viga simplemente apoyada de sección constante, longitud L , sometida a la acción de una carga uniformemente distribuida de magnitud w y una carga axial en tensión P .

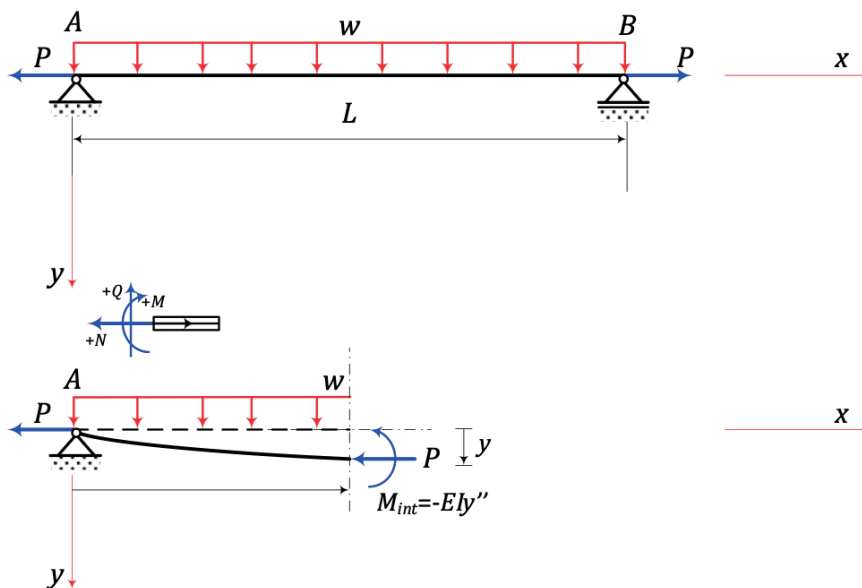
En el análisis se considera el que comportamiento es del tipo lineal elástico, con un módulo de elasticidad E y momento de inercia I , bajo esta hipótesis se aplica la teoría de Euler Bernulli, incorporando el efecto de la carga axial en la ecuación de equilibrio.

Formulación Teórica

Por equilibrio estático la reacción de apoyo es:

$$R_A = \frac{wL}{2} = R_B$$

Fig. 1: Viga a carga en tensión con carga transversal uniformemente distribuida



Fuente: Elaboración Propia

Los momentos externos e internos de la barra son:

Momento Externo: $M_{ext}(x)$

$$M_{ext}(x) = \frac{wL}{2}x - Py - \frac{wx^2}{2}$$

Momento Interno: $M_{int}(x)$

$$M_{int}(x) = -EIy''$$

Igualando los momentos externos e internos se formula la ecuación de equilibrio de la forma:

$$\begin{aligned} \frac{wL}{2}x - Py - \frac{wx^2}{2} &= -EIy'' \\ EIy'' - Py + \frac{wL}{2}x - \frac{wx^2}{2} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Introduciendo el parámetro:

$$k^2 = \frac{P}{EI} \quad (2)$$

La ecuación diferencial de equilibrio final es, por tanto

$$y'' - k^2y = \frac{wx^2}{2} - \frac{wL}{2}x \quad (3)$$

La ecuación resultante es una ecuación diferencial de segunda orden de coeficientes indeterminados y tiene por solución:

$$y = C[1]Sinh[kx] + C[2]Cosh[kx] - \frac{w}{EI k^4} + \frac{Lwx}{2EI k^2} - \frac{wx^2}{2EI k^2} \quad (4)$$

Donde los dos primeros términos corresponden a la solución general y los últimos a la solución particular. Las condiciones de contorno a aplicar para la solución son.

$$y(x=0) = 0, \quad y(x=L) = 0, \quad y''(x=0) = 0, \quad y''(x=L) = 0 \quad (5)$$



Se aplica las dos primeras condiciones de contorno porque las dos restantes son redundantes. De estas dos ecuaciones se obtienen las constantes de integración:

$$C[2] = \frac{w}{EI k^4} \quad (6)$$

$$C[1] = \frac{w}{EI k^4} \left(\frac{1 - \text{Cosh}[kL]}{\text{Sinh}[kL]} \right) = -\frac{w}{EI k^4} \text{Tanh} \left[\frac{kl}{2} \right] \quad (7)$$

La ecuación de la deformada de la línea del eje neutro final es:

$$y = -\frac{w}{EI k^4} \text{Tanh} \left[\frac{kL}{2} \right] \cdot \text{Sinh}[Kx] + \frac{w}{EI k^4} \cdot \text{Cosh}[Kx] - \frac{wx^2}{2EI k^2} + \frac{Lwx}{2EI k^2} - \frac{w}{EI k^4} \quad (8)$$

Sus derivadas respectivas son:

$$y' = -\frac{w}{EI k^3} \text{Tanh} \left[\frac{kL}{2} \right] \cdot \text{Cosh}[kx] + \frac{w}{EI k^3} \cdot \text{Sinh}[kx] - \frac{wx}{EI k^2} + \frac{Lw}{2EI k^2} \quad (9)$$

$$y'' = -\frac{w}{EI k^2} \text{Tanh} \left[\frac{kL}{2} \right] \cdot \text{Sinh}[kx] + \frac{w}{EI k^2} \cdot \text{Cosh}[kx] - \frac{w}{EI k^2} \quad (10)$$

La expresión del momento flector, es la segunda derivada de la deformada

$$M(x) = -EI y''$$

$$M(x) = \frac{w}{k^2} \text{Tanh} \left[\frac{kL}{2} \right] \cdot \text{Sinh}[kx] - \frac{w}{k^2} \cdot \text{Cosh}[kx] - \frac{w}{k^2} \quad (11)$$

Análisis de Resultados

Cálculo de la flecha máxima. $y_{\text{máx}}$

Para observar los efectos de interacción de w y P y caracterizar el comportamiento de la viga de forma sencilla se analiza la deformación en su punto medio, que se obtiene sustituyendo $x=L/2$ en las Ecu. (8), y operando: Utilizando la variable auxiliar $u=kL/2$, esta deflexión es:

$$y \left(x = \frac{L}{2} \right) = -\frac{w}{EI k^4} \text{Tanh} \left[\frac{kL}{2} \right] \cdot \text{Sinh} \left[\frac{kL}{2} \right] + \frac{w}{EI k^4} \cdot \text{Cosh} \left[\frac{kL}{2} \right] - \frac{w \left(\frac{L}{2} \right)^2}{2EI k^2} + \frac{Lw \frac{L}{2}}{2EI k^2} - \frac{w}{EI k^4} \quad (12)$$

Simplificando:

$$y \left(\frac{L}{2} \right) = y \left(x = \frac{L}{2} \right) = \frac{5wL^4}{384EI} \left[\frac{12}{5u^4} (2\text{Sech}[u] - 2 + u^2) \right] \quad (13)$$

Donde la expresión entre corchetes define el factor de amplificación de la deflexión, que depende de la carga axial en tensión.

$$A_y = \left[\frac{12}{5u^4} (2\text{Sech}[u] - 2 + u^2) \right] \quad (14)$$

Se demuestra que si para el factor de amplificación A_y cuando $u \rightarrow 0$, se tiene:

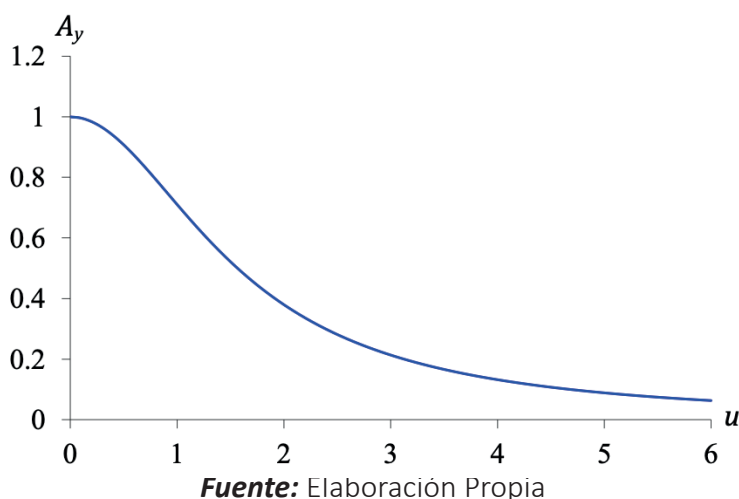
$$\lim_{u \rightarrow 0} A_y = \lim_{u \rightarrow 0} \left[\frac{12}{5u^4} (2\text{Sech}[u] - 2 + u^2) \right] = 1 \quad (15)$$

El factor:

$$y_w = \frac{5wL^4}{384EI} \quad (16)$$

Es la deformación en el claro medio de la viga debido sólo a la acción de la carga distribuida w , que se estudia en la teoría de primer orden. Por lo tanto, la flecha en el centro de la viga es igual a la flecha de primer orden y_w por el factor de amplificación A_y . La Fig. 2 representa la variación del factor de amplificación A_y con respecto a la carga axial en tensión.

Fig. 2: Grafica factor de amplificación flecha



Para cargas axiales nulas el valor de A_y tiende a la unidad, por lo que no se produce la amplificación. Cuando la variación de u tiende a infinito “ ∞ ”, el factor de amplificación tiende a infinito, lo que muestra que se produce la falla a tensión. Este resultado es matemáticamente consistente, sin embargo, desde un punto de vista estructural, la viga fallaría previamente por fluencia en el caso de acero y por fractura en el caso de hormigón; pero ninguno de los materiales tiene rigidez infinita.

Cálculo del momento máximo $M_{m\acute{a}x}$

El momento máximo en la viga se produce en su punto medio, y se obtiene sustituyendo $x=L/2$ en la



Ec. (4.11). Asimismo, al formular u en función de k , se obtiene la expresión final del momento:

$$M\left(x = \frac{L}{2}\right) = -EIy'' = \frac{w}{k^2} \operatorname{Tanh}\left[\frac{kL}{2}\right] \cdot \operatorname{Sinh}\left[\frac{kL}{2}\right] - \frac{w}{k^2} \cdot \operatorname{Cosh}\left[\frac{kL}{2}\right] - \frac{w}{k^2}$$

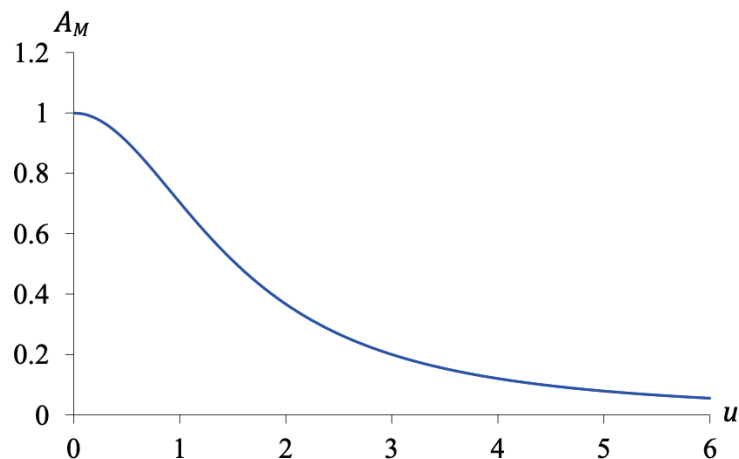
$$M\left(\frac{L}{2}\right) = M\left(x = \frac{L}{2}\right) = \frac{wL^2}{8} \left[\frac{2}{u^2} (1 - \operatorname{Sech}[u])\right] \quad (17)$$

Se observa que el momento flector en el claro medio de la viga es igual al momento de primer orden $(wL^2)/8$, multiplicado por un factor de amplificación

$$A_M = \left[\frac{2}{u^2} (1 - \operatorname{Sech}[u])\right]$$

el cual es función de la carga axial de tensión P . Dicho factor de amplificación se representa gráficamente para su correspondiente interpretación en la Fig. 3

Fig. 3 Factor de amplificación momento



Fuente: Elaboración Propia

El factor de amplificación representado en la Fig. 3 toma el valor de la unidad cuando la carga axial de tensión P es nulo, obteniendo la solución de primer orden.

Dicho factor de amplificación tiende al infinito para $u \rightarrow \infty$, lo que indica que la fuerza axial en tensión produce la falla de la viga por tensión. Este resultado es matemáticamente consistente, sin embargo, desde un punto de vista estructural, la viga fallaría por fluencia en el caso del acero y por fractura en caso de hormigón, ya que ninguno de estos materiales presenta rigidez infinita.

Conclusiones

Se establece que la respuesta de la viga es lineal en la carga transversal w , y no lineal en la carga axial P , como puede demostrarse en la deformación Ecu. (13) y del momento flector Ecu. (17). La flecha máxima y el momento máximo pueden expresarse como el producto de la solución clásica del análisis de primer orden por un factor de amplificación que depende de la carga axial.



Bibliografía

- Argyris, J. H., Hilpert, O., Malejannakis, G. A., & Scharpf, D. W. (1979). On the geometrical stiffness of a beam in space—A consistent V.W. approach. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 20(1), 105–131. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(79\)90061-6](https://doi.org/10.1016/0045-7825(79)90061-6)
- Bathe, K.-J. (2014). *Finite element procedures*. Pearson Education.
- Borković, A., Gfrerer, M. H., & Marussig, B. (2023). Geometrically exact isogeometric Bernoulli–Euler beam based on the Frenet–Serret frame. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 405, 115848. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.115848>
- Buchanan, G. R. (1995). *Schaum’s outline of theory and problems of finite element analysis*. Schaum.
- Celigüeta, L. J. T. (2011). *Método de los elementos finitos para análisis estructural*. Unicopia C.B.
- Chandrupatla, T. R., & Belegundu, A. D. (2002). *Introduction to finite elements in engineering*. Prentice Hall International.
- Feodosiev, V. I. (1985). *Resistencia de materiales*. Mir Moscú.
- Gere, J. M., Timoshenko, S. P., & Bugada, G. (2022). *Timoshenko: Resistencia de materiales* (5.ª ed., 13.ª reimp.). Paraninfo.
- Laible, J. P. (1992). *Análisis estructural*. McGraw-Hill.
- Logan, D. L. (2007). *A first course in the finite element method*. Thomson.
- McCormac, J. C. (2010). *Análisis de estructuras: Métodos clásicos y matricial*. Alfaomega.
- McGuire, W., Gallagher, R. H., & Ziemian, R. D. (2000). *Matrix structural analysis*. John Wiley & Sons.
- Nash, W. A. (1991). *Resistencia de materiales*. McGraw-Hill.
- Oñate, E. (1992). *Cálculo de estructuras por el método de los elementos finitos*. CIMNE.
- Piskunov, N. (1977). *Cálculo diferencial e integral* (Vols. 1–2; 3.ª ed.). Mir Moscú.
- Pytel, A., & Singer, F. L. (1987). *Strength of materials* (4.ª ed.). Harper & Row.
- Rades, M. (2006). *Finite element analysis*. Printech.
- Reddy, J. N. (2006). *An introduction to the finite element method*. McGraw-Hill.
- Salmon, C. G., Johnson, J. E., & Malhas, F. A. (2009). *Steel structures: Design and behavior, emphasizing load and resistance factor design* (5.ª ed.). Pearson.
- Tena, A. C. (2007). *Análisis de estructuras con métodos matriciales*. Limusa.
- Vaz, L. E. (2011). *Método dos elementos finitos em análise de estruturas*. Elsevier.
- Vázquez, M., & López, E. (2001). *El método de los elementos finitos aplicado al análisis estructural*. Noela.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (1994). *El método de los elementos finitos*. McGraw-Hill/CIMNE.