

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE BIOMATERIALES LAMINADOS: MADERA ACACIA MANGIUM Y BAMBÚ GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH

Ana María Quiceno Rodríguez ^a; Jorge Esteban Cantor Bernal ^b; Juan David Oliveros
Salazar ^c; Maritzabel Molina Herrera ^d

^a Autor principal, Estudiante de ingeniería civil, Universidad Nacional de Colombia, aquiceno@unal.edu.co

^b Estudiante de ingeniería civil, Universidad Nacional de Colombia, jcantorb@unal.edu.co

^c Candidato a Doctor en Ingeniería – Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, jdzapatao@unal.edu.co

^d Profesora Titular, Universidad Nacional de Colombia, mmolinah@unal.edu.co

Palabras clave: Método de elementos finitos, SAP2000, madera laminada, *Guadua angustifolia* Kunth, *Acacia mangium*, calibración, bambú laminado, módulo de elasticidad.

RESUMEN

En esta investigación se analizó el comportamiento a flexión en el rango elástico en elementos de madera laminada *Acacia mangium* y en elementos de bambú laminado *Guadua angustifolia* Kunth, utilizando el método de los elementos finitos (FEM). La validación de los modelos numéricos se realizó mediante un proceso de calibración iterativa del módulo de elasticidad de cada material, ajustándolo hasta replicar el comportamiento elástico lineal observado experimentalmente. Este ajuste se basó en la correlación de la pendiente de la curva carga-deflexión en el centro de la luz, asegurando la consistencia entre la simulación y el promedio de los ensayos. Como resultado de este proceso, se estimaron los módulos de elasticidad tanto de la madera laminada como del bambú laminado. A su vez, después de validados los modelos numéricos, sus análisis complementan los resultados experimentales dado que permiten la evaluación del comportamiento mecánico interno de los especímenes, accediendo a detalles de los materiales laminados que la instrumentación física no logra capturar.

ABSTRACT

In this research, the linear elastic bending behavior of laminated *Acacia mangium* wood and laminated bamboo *Guadua angustifolia* Kunth elements was analyzed using the finite element method (FEM). The validation of the numerical models was carried out through an iterative process for the calibration of the elastic modulus of each material, adjusting it until the experimentally observed linear elastic behavior was replicated. This adjustment was based on the correlation of the slope of the load–mid span deflection curve, ensuring consistency between the simulation and the average

Organiza:

of the experimental tests. The laminated timber and bamboo elastic modulus were estimated as a result. Once the numerical models were validated, their analyses complemented the experimental results by enabling the evaluation of the internal mechanical behavior of the specimens, providing access to details of the laminated materials that cannot be easily captured by instrumentation.

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de la ingeniería estructural y la construcción, la necesidad de emplear materiales sostenibles con un adecuado desempeño en viviendas ha promovido la caracterización mecánica de biomateriales como la madera y el bambú para su uso estructural en edificaciones. Entre los diferentes materiales disponibles, destacan la madera y el bambú por (i) su disponibilidad en diferentes sectores del mundo, (ii) sus competitivas propiedades mecánicas respecto a materiales convencionales en la construcción, como el acero y el concreto, (iii) su baja relación peso-resistencia, y (iv) sus capacidades para absorber dióxido de carbono en sus etapas de crecimiento. Estas características son de interés en el marco de la construcción sostenible, lo que las convierte en alternativas ideales.

Así mismo, el comportamiento estructural de estos materiales puede ser optimizado al usarlos como base en lo que se denomina “productos de ingeniería de madera” (o EWP, pro sus siglas en inglés), las cuales modifican la geometría de los elementos de madera con el fin de mejorar las propiedades mecánicas. De esta forma, se define la *madera laminada encolada*, o *glulam*, donde se arman elementos de madera de grandes longitudes, mediante tablillas o lamelas unidas con pegamentos industriales bajo la aplicación de presión constante durante el curado del pegamento. Bajo este mismo procedimiento, se desarrolla el *bambú laminado prensado*, o *glubam*. Estos materiales se utilizan estructuralmente como vigas o columnas en las edificaciones.

El análisis del comportamiento mecánico de estos EWP ([Engineering Wood products](#)), particularmente bajo solicitaciones de flexión, resulta fundamental para su adecuada implementación en proyectos de ingeniería civil y arquitectura al utilizarlos como vigas. De esta forma, se propone el uso de herramientas numéricas para la modelación del comportamiento mecánico de estos elementos, con el fin de analizar la respuesta mecánica de los materiales.

En el presente estudio se modelaron numéricamente probetas de productos EWP fabricados con las especies de madera *Acacia mangium* y de bambú *Guadua angustifolia* Kunth, los cuales destacan en Colombia por el gran potencial que tienen estos materiales para utilizarse en la construcción (Federación Nacional de Industriales de la Madera, 2023). Los modelos fueron calibrados mediante datos experimentales, luego, los modelos numéricos fueron analizados, corroborando la representación de los mecanismos evidenciados en los ensayos.

METODOLOGÍA

Para el análisis numérico realizado, utilizando el método de los elementos finitos (MEF), se utilizaron los resultados experimentales reportados por Cantor et al. (2025), en donde se realizaron ensayos de flexión en tres puntos sobre probetas de madera laminada encolada de la especie *Acacia mangium* (denominadas MLAM) y sobre probetas de bambú laminado prensado de la especie *Guadua angustifolia* Kunth (denominadas BLAM), con sección transversal promedio de 42.67 mm de base y 47.67 mm de altura, longitud total de 346 mm y una luz libre entre apoyos de 300 mm.

Así mismo, el módulo de elasticidad fue calculado según los procedimientos descritos en la norma ASTM D143-14 para ambos materiales. Se reportó que, para el material MLAM, el módulo de elasticidad promedio fue de 5345.15 MPa, mientras que para el material BLAM, el módulo de elasticidad promedio fue de 4521.59 MPa.

Para la simulación del comportamiento a flexión de los especímenes ensayados, se desarrollaron dos modelos numéricos utilizando el método de los elementos finitos (MEF) en el software SAP2000, replicando las condiciones de los ensayos de flexión a tres puntos realizados en laboratorio.

Inicialmente, se definió la geometría de las probetas de cada material, utilizando elementos tridimensionales. Con el fin de mejorar la precisión del análisis, el sólido fue discretizado en elementos finitos cúbicos, permitiendo una mayor cantidad de nodos, como se muestra en la Figura 1.

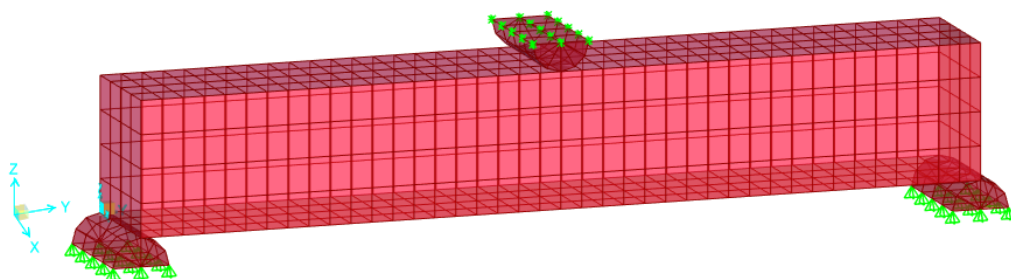


Figura 1. Modelo experimental en SAP.

Fuente: Elaboración propia

Para representar las condiciones de carga y apoyo, se modeló la mitad de tres cilindros, dos de estos representan la condición de apoyo de la probeta, ubicados en los extremos de la viga, mientras que el tercer elemento, ubicado en la zona central de la probeta, se utiliza para la aplicación de la carga. A los apoyos se les asignaron condiciones de restricción de primer orden en su base, mientras que sus propiedades de rigidez fueron incrementadas significativamente con el fin de evitar su influencia en los resultados del análisis.

La carga se aplicó mediante un desplazamiento controlado de 3 mm en el cilindro

central. Además, se le aplicaron resortes en los nodos de aplicación del desplazamiento con el fin de mantener la estabilidad del elemento, como se muestra en la Figura 2.

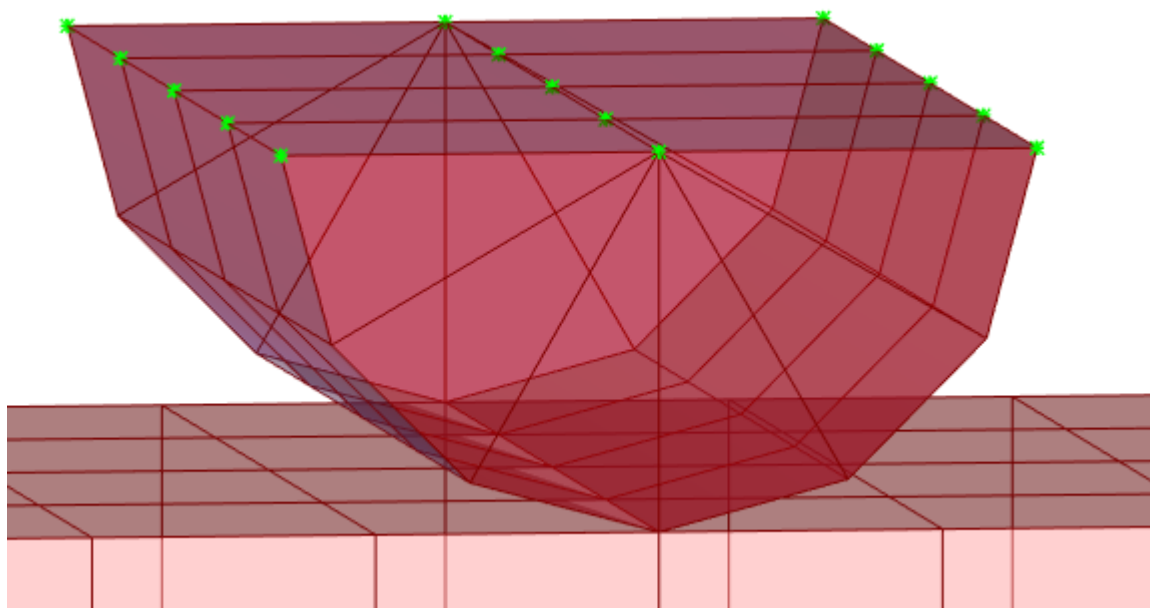


Figura 2. Detalle del sistema de carga del modelo numérico en SAP2000.

Fuente: Elaboración propia

Los materiales de las probetas de cada modelo numérico fueron definidos utilizando los módulos de elasticidad calculados por Cantor et al. (2025), donde cada modelo representa cada biomaterial por aparte.

Estos módulos de elasticidad fueron calibrados posteriormente, realizando gráficas de deflexión en el centro de la probeta contra la reacción calculada por el software SAP2000 en los apoyos, donde la pendiente de la gráfica representa la rigidez de la probeta. Estas gráficas fueron entonces comparadas con los datos promedios de los experimentos. En caso de que la gráfica generada por la modelación no coincidiera con los resultados de los ensayos en el rango lineal elástico de cada material, se procede a un proceso iterativo, modificando el módulo de elasticidad en el software hasta que las gráficas de la modelación y de los ensayos experimentales estén superpuestas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, en la Figura 3 y en la Figura 4, se evidencian las gráficas de la simulación de cada material (MLAM-SIM y BLAM-SIM) contra los promedios experimentales, luego del proceso iterativo de calibración. Se puede visualizar que, como se mencionó en la metodología, las gráficas generadas por el software SAP2000 corresponden de forma cercana al comportamiento promedio en el rango lineal elástico de cada material.

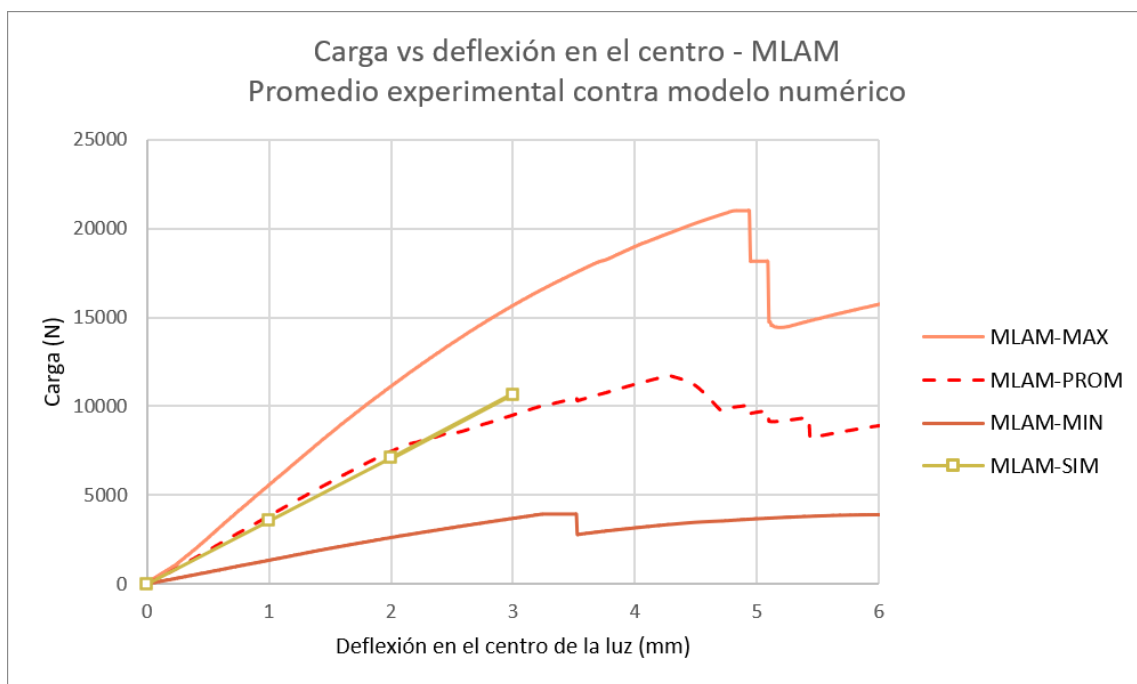


Figura 3. Comparación de resultados experimentales contra simulación de probetas MLAM
Fuente: Elaboración propia

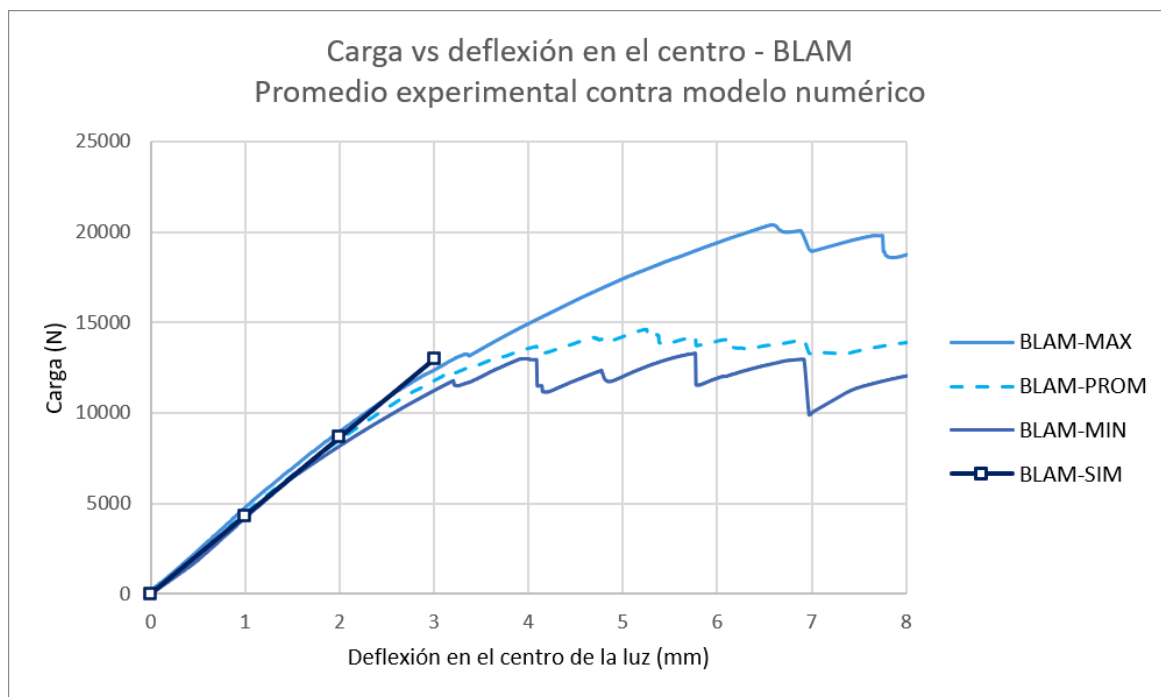


Figura 4. Comparación de resultados experimentales contra simulación de probetas BLAM.
Fuente: Elaboración propia.

Comparación entre módulos de elasticidad

Para lograr el comportamiento descrito anteriormente, los módulos de elasticidad utilizados en la modelación fueron de 2900 MPa y de 2850 MPa en la probeta de MLAM y de BLAM, respectivamente. En la Tabla 1 se muestra una comparación entre los módulos de elasticidad experimentales y numéricos resultantes por cada material.

Material	Módulo de elasticidad (MPa)		Diferencia (MPa)
	Experimental	Simulación	
MLAM	5345.15	2900	2445.15
BLAM	4521.59	2850	1671.59

Tabla 1. Comparación entre módulos de elasticidad.

Fuente: Elaboración propia.

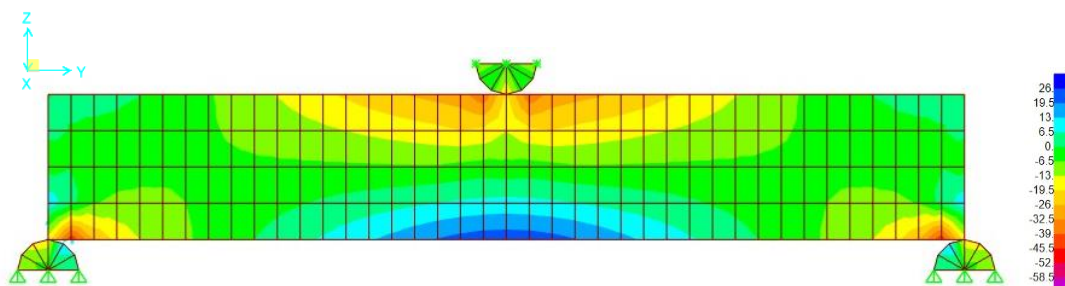
Al comparar los resultados numéricos con los experimentales, se observa que los valores calibrados son inferiores en ambos materiales. En el caso de la madera laminada, la diferencia absoluta fue de 2445.15 MPa. Para el bambú laminado, la diferencia fue de 1671.59 MPa.

Estas discrepancias pueden deberse a varios factores tanto en el proceso experimental como en la modelación numérica. En primer lugar, los modelos desarrollados en SAP2000 consideran un comportamiento lineal elástico, homogéneo e isotrópico, lo cual simplifica la compleja naturaleza anisotrópica y heterogénea de la madera y del bambú, pues ambos presentan variaciones en sus propiedades mecánicas por su condición de biomateriales.

Así mismo, la relación de luz libre de la probeta sobre la base de esta es de 6.4, donde, según la norma ASTM D143-14, que define este tipo de probetas como “Luz corta”, aquí los efectos debidos a los esfuerzos cortantes juegan un papel importante en el comportamiento de la probeta. De esta forma, un componente de la rigidez del material esta asociado a los esfuerzos axiales mientras que otro componente será asociado a los esfuerzos cortantes dentro de la probeta, y al módulo de elasticidad cortante.

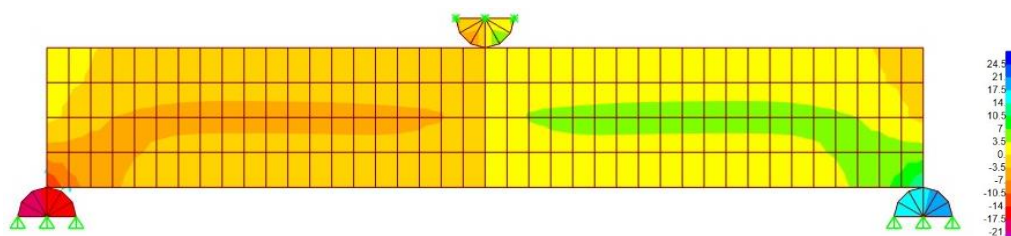
Análisis de la distribución de esfuerzos

A continuación, en la Figura 5 y en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los estados de esfuerzos axiales a lo largo del eje Y y los esfuerzos cortantes en el plano XY, respectivamente, en la en la probeta de MLAM para el modelo calibrado, mientras que en la Figura 6 y en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los esfuerzos axiales en el eje Y y los esfuerzos cortantes en el plano XY, respectivamente, para la probeta BLAM del modelo calibrado.



(a) S22 (MPa)

En lo que concierne a los esfuerzos cortantes, se observa una distribución similar con magnitudes de ± 7 MPa y una tendencia horizontal donde los picos de esfuerzo se localizan a la mitad de la altura de la probeta, en lugar de formar una línea recta inclinada. La particularidad de este modelo es que el comportamiento de ambos tipos de esfuerzos, tanto axiales como cortantes, muestra una clara correlación numérica con el mecanismo de falla real observado experimentalmente en la probeta, tal como se ilustra en la Figura 10.



(b) S23 (MPa)

Por su parte, el modelo MLAM también analiza la probeta bajo la misma carga controlada por un desplazamiento de 3 mm, registrando igualmente sus esfuerzos axiales máximos a tensión en la cara inferior, directamente debajo de la aplicación de la carga. No obstante, debido al módulo de elasticidad configurado para esta simulación específica, este modelo evidencia esfuerzos axiales máximos que son 0.5 MPa mayores respecto a los obtenidos en el modelo BLAM.



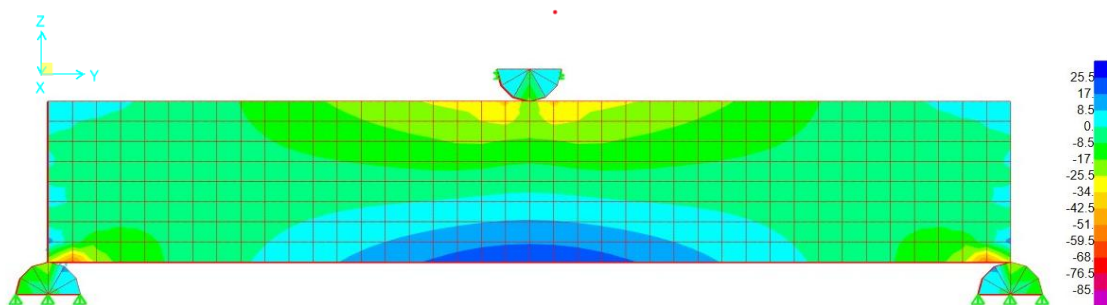
(c) Mecanismo de falla

Figura 5. Resultados de modelación numérica y mecanismo de falla experimental de MLAM.
Fuente: Elaboración propia.

En primera instancia, la probeta MLAM muestra una separación de las lamelas de la madera en el extremo izquierdo, cercano al apoyo de la probeta, en la línea de pega

entre ellas. Debido a la longitud de esta separación, se evidencia que esta falla se presentó principalmente a los esfuerzos cortantes presentes en la viga. Así mismo, la separación de las lamelas es mayor en la línea de pega inferior, la cual está más cerca a la mitad de la altura de la probeta respecto a la línea de pega superior. Revisando la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde la mayor concentración de esfuerzo cortante se presentó en el centro, se confirma que este comportamiento se debió principalmente a esfuerzos cortantes, donde las lamelas empezaron a deslizarse entre ellas en la línea de pegamento. Cabe resaltar que, en la modelación, no se tuvo en cuenta las líneas de pega de las probetas, asumiendo que todo el elemento corresponde a un único material uniforme.

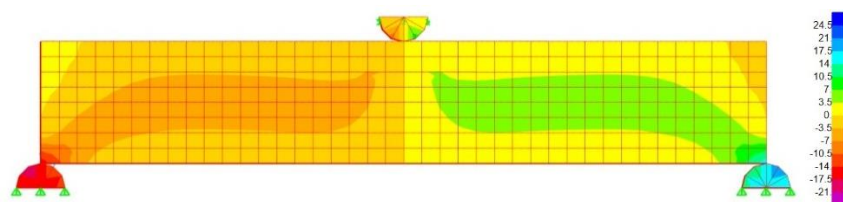
Por otro lado, en la parte inferior de la probeta se presentó otra falla, la cual empieza como una fisura inclinada de la lamela inferior a la mitad de la longitud de la viga, y a medida que esta fue penetrando la altura de la probeta, tiende a volverse horizontal. Comparando esta falla con la Figura 5 observa que esta falla sucede debido a los esfuerzos axiales en la probeta experimental, gracias a la alta concentración que experimenta la viga. Así mismo, se asume que la fisura tiende a avanzar horizontalmente por el sentido de las fibras de la madera, presentando la falla por rotura de la matriz que une las fibras de la *Acacia*, evidenciando el comportamiento ortótropo de la probeta MLAM.



(a) S_{22} (MPa)

Respecto a los esfuerzos cortantes, este modelo presenta una distribución con magnitudes de aproximadamente ± 7 MPa. El patrón de dicha distribución no sigue una línea recta inclinada, sino que exhibe una marcada tendencia horizontal en la probeta, lo que provoca que las mayores magnitudes de estos esfuerzos se concentren aproximadamente a la mitad de la altura de la simulación.

(b) S_{23} (MPa)



En esta simulación, los esfuerzos axiales máximos a tensión se localizan específicamente en la cara inferior, justo debajo del punto de aplicación de la carga; cabe destacar que estas magnitudes resultan ser 0.5 MPa menores en comparación con el modelo MLAM, una diferencia que es plenamente consistente con el módulo de elasticidad empleado para este análisis particular



(c) Mecanismo de falla experimental

Figura 6. Resultados de modelación numérica y mecanismo de falla experimental de BLAM, en MPa.

Fuente: Elaboración propia.

El principal mecanismo de falla ocurre debido a la separación de las fibras del bambú en el costado izquierdo de esta, donde la grieta de mayor tamaño se presenta a la mitad de la altura, seguida de una grieta de menor tamaño en la parte inferior. A diferencia de la probeta de MLAM, donde las fisuras se presentaron en las líneas de pega de la madera laminada encolada, el mecanismo de falla de la probeta MLAM sucedió en medio de una tablilla de bambú. Esto sucede porque la orientación de las fibras en el bambú es prácticamente unidireccional, debido a su proceso de crecimiento, diferente a la madera, donde el tronco no solo crece longitudinal sino también radialmente. Esto genera que el material tenga menor resistencia bajo cargas aplicadas en direcciones perpendiculares a la fibra respecto a la dirección paralela a la fibra, conduciendo a una falla en la matriz que cubre las fibras del bambú.

Por otro lado, la posición en la altura de la probeta de la fisura más grande es correspondiente a la distribución de esfuerzos cortantes evidenciada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, mostrando que el modelo numérico y su distribución de esfuerzos representa el comportamiento del material.

Igualmente, en la parte inferior de la probeta BLAM se evidencia una pequeña fisura

que empieza justo en la zona de la tablilla con un color más oscuro, y luego, como sucedió con la probeta MLAM, la grieta tiende a tener una dirección horizontal. Esta zona de color oscuro es un nudo del bambú, donde la dirección de las fibras cambia abruptamente, representando una discontinuidad de las fibras unidireccionales, y generando una zona débil en el material. El mecanismo de falla asociado a esfuerzos axiales comenzó en esta zona de la probeta cercana a la mitad de la longitud de la misma, donde se presentan los mayores esfuerzos axiales.

CONCLUSIONES

La metodología de calibración numérica implementada en SAP2000 permitió reproducir satisfactoriamente la respuesta elástica lineal observada experimentalmente en los ensayos de flexión a tres puntos, así como estimar la concentración de esfuerzos que deriva a los mecanismos de falla de las probetas, validando así la capacidad del modelo para representar el comportamiento global de los elementos laminados dentro del rango elástico.

Los módulos de elasticidad calibrados obtenidos en la modelación numérica fueron inferiores a los módulos calculados experimentalmente. Las discrepancias observadas entre los resultados numéricos y experimentales se atribuyen principalmente al aporte que tiene el módulo de elasticidad a cortante en las deflexiones de la probeta en el ensayo experimental, esto sucede como consecuencia de que el cálculo analítico de la deflexión con la normativa usada tiene en cuenta únicamente el aporte de la flexión. Adicionalmente, estas variaciones obtenidas suceden debido a la delaminación presentada en las probetas. En los modelos numéricos realizados se supone una adherencia total entre las capas, entre otras simplificaciones, por lo tanto, este efecto no fue considerado.

A pesar de las diferencias observadas, la calibración realizada permitió reproducir adecuadamente la tendencia elástica lineal de la curva carga-deflexión, lo que valida la capacidad del modelo numérico para representar el comportamiento global de los especímenes dentro del rango elástico.

Similarmente, mediante el análisis de esfuerzos, se logró explicar con mayor profundidad los mecanismos de falla de ambas probetas MLAM y BLAM, donde, acorde con la conclusión anterior, el comportamiento de la probeta está directamente ligada a la resistencia a cortante que tienen los materiales. Esto sucede principalmente por la configuración de carga, la cual corresponde a un ensayo de flexión en 3 puntos, y a la relación luz libre/altura de la probeta, la cual, al ser cercana a 10, las propiedades a cortante de los materiales rigen el comportamiento global de la probeta.

En consecuencia, el modelo constituye una herramienta útil para complementar los ensayos experimentales, permitiendo analizar variables internas, como la distribución de esfuerzos axiales y cortantes en las probetas. Este tipo de análisis aporta

información sobre cómo se comportan internamente los materiales laminados, y qué limitaciones tienen los aparatos de medición en laboratorio con la estimación de los esfuerzos en las probetas, así como las limitaciones que poseen los modelos numéricos con las simplificaciones que fueron aplicadas en el análisis de las probetas, como el desarrollo de los esfuerzos en un material ortótropo compuesto de fibras embebidas en una matriz.

COLABORADORES

- Ing. CAORI PATRICIA TAKEUCHI TAN, Docente titular adscrita al Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola.

Brindó asesoría en la interpretación de los modelos numéricos de biomateriales.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional de Colombia por brindarnos el asesoramiento de los docentes e investigadores de la institución.
- De igual manera agradecer al Semillero de Vivienda SUE-VIS por el acompañamiento y colaboración durante el desarrollo del proyecto de investigación.
- Por último, agradecemos al proyecto "Aportes hacia un hábitat sostenible mediante el uso de paneles contrachapados de madera reforestada y bambú guadua" por el financiamiento de la presente investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Moya Álvarez, M. E., Quiceno Rodríguez, A. M., Cantor Bernal, J. E., Celis Bermeo, J. P., Oliveros Salazar, J. D., & Molina Herrera, M. (2025). Elastic stiffness of Acacia mangium wood and Guadua angustifolia Kunth bamboo in three-point bending tests [Paper presentation].
- ASTM International. (2014). *ASTM D143-14: Standard test methods for small clear specimens of timber*.
- Federación Nacional de Industriales de la Madera. (2023, enero 12). Acacia mangium, árbol con alto potencial para usar en construcciones – Federación Nacional de Industriales de la Madera [FEDEMADERAS]. Bosques para todos siempre. <https://fedemaderas.org.co/acacia-mangium-arbol-con-alto-potencial-para-usar-enconstrucciones/>