

Analysis of Resistance to Efforts of Wooden Beams with Jupiter Ray Type Assemblies

Peggy Carvajal⁽¹⁾, Yordy Mieles Bravo⁽²⁾

- (1) Maestrante Académico con Trayectoria Profesional en Ingeniería Civil Mención Estructuras, Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí, pcarvajal4199@utm.edu.ec
(2) Profesor, Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Manabí, yordy.mieles@utm.edu.ec

Received: September 2024. Accepted: December 2024

Published: December 2024

ABSTRACT

This study primarily aims to determine the structural behavior of beams assembled using the Jupiter ray technique through bending tests. Comparative tests were conducted between beams with and without metallic reinforcements. The methodology employed was experimental-quantitative, utilizing Moral wood and specialized equipment such as the Universal Testing Machine (MEM) and photogrammetry methods to capture displacement and resistance data. Five wood beam samples were prepared, two of which were reinforced with metal screws and three without reinforcements, following traditional assembly techniques. The results showed that beams without metallic reinforcement exhibited quasi-linear behavior from small loads up to the failure point, with Beam 2 standing out with a MOR of 10.5 kN, indicating excellent stress distribution and high load capacity. In contrast, beams with metallic reinforcement showed greater displacements but lower MOR values (2.47 kN and 2.40 kN for Beams 4 and 5, respectively), suggesting that the reinforcements increase flexibility but introduce stress concentrations that reduce load capacity. In conclusion, although the Jupiter ray assembly allows for an efficient connection between beam segments, the addition of metallic reinforcements does not significantly increase the maximum load capacity due to the introduction of points of weakness.

Keywords: Jupiter Ray Assembly, Beam Bending, Metallic Reinforcement, Modulus of Rupture (MOR), Photogrammetry.

Análisis de Resistencia a Esfuerzos de Vigas de Madera con Ensamblés Tipo Rayo de Júpiter

RESUMEN

En este estudio se presenta el resultado experimental del comportamiento estructural del ensamble de madera conocido como "rayo de júpiter" para el uso en conexiones de vigas de madera. Se realizaron ensayos comparativos entre vigas sin la conexión, con la conexión y con refuerzos metálicos, técnicas empleadas en la construcción tradicional de casas de madera en Manabí – Ecuador. La metodología empleada fue experimental, utilizando especímenes de madera de moral y ensayados en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Técnica de Manabí, con métodos de fotogrametría para capturar datos de desplazamiento y resistencia. Se prepararon siete especímenes de vigas de madera, dos de ellas reforzadas con tornillos metálicos y tres sin refuerzos, siguiendo técnicas tradicionales de ensamblaje más dos vigas completas sin la conexión. Los resultados mostraron que las vigas sin refuerzo metálico exhibieron un comportamiento casi-lineal desde cargas pequeñas hasta el

punto de fallo, con la Viga 2 destacando un MOR de 10.5 kN, indicando una excelente distribución de tensiones y alta capacidad de carga. Al contrario, las vigas con refuerzo metálico presentaron mayores desplazamientos, pero menores valores de MOR (2.47 kN y 2.40 kN para las Vigas 4 y 5, respectivamente), sugiriendo que los refuerzos incrementan la flexibilidad, pero introducen concentraciones de tensiones que reducen la capacidad de carga. Se encontró que el ensamble tipo rayo de Júpiter permite una conexión eficiente entre los segmentos de la viga, la adición de refuerzos metálicos no incrementa significativamente la capacidad de carga máxima debido a la introducción de puntos de debilidad.

Palabras claves: Ensamble Rayo de Júpiter, Flexión de Vigas, Refuerzo Metálico, Fotogrametría.

1. INTRODUCCIÓN

La madera ha sido un material de gran interés en la construcción desde tiempos ancestrales debido a su fácil obtención, manipulación y relativa ligereza. Este material ha sido fundamental en la edificación de estructuras que perduran hasta hoy, reflejando tanto avances técnicos como las habilidades y tradiciones de los artesanos que las erigieron. En la provincia de Manabí, Ecuador, la construcción de casas conocidas como “mixtas” era ampliamente usada debido a los materiales disponibles antes del uso de hormigón armado. Las estructuras “mixtas” se pueden catalogar como *pórticos de madera con diagonales rigidizadoras rellenos de mampostería*, como se muestra en la Figura 1. Por las características de la madera, se requieren ensambles en los cuales se emplean diversas técnicas, entre ellas la conocida como “rayo de júpiter”.

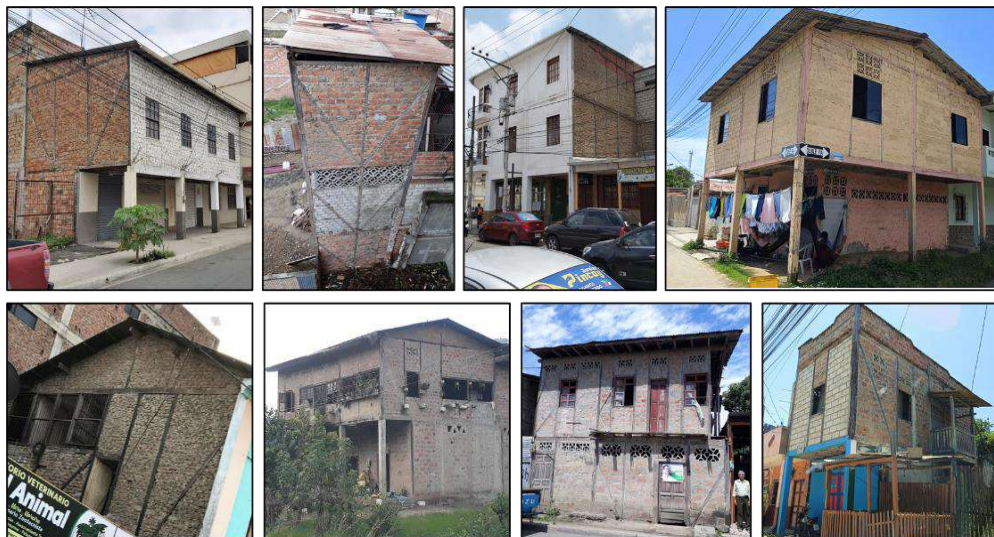


Figura 1. Ejemplos de estructuras mixtas en la provincia de Manabí, Ecuador:
Pórticos de madera diagonales

En la actualidad, el uso de la madera en la construcción ha aumentado significativamente debido a su sostenibilidad, excelentes propiedades y capacidad de renovación (Branco, 2019). Esta tendencia ha impulsado el desarrollo de nuevos materiales basados en madera y la innovación en la unión de elementos estructurales (Ordoñez y Lugo, 2018). La madera, además de ser económica en comparación con

otros materiales, permite un fácil procesamiento y fabricación de estructuras, favoreciendo su demanda en la industria de la construcción (Muñiz y Franca, 2020).

Las estructuras de madera se componen de piezas unidas en elementos nodales, cruciales para transmitir las solicitaciones entre los miembros de la estructura y garantizar su estabilidad (Song y Zhang, 2024). Por lo tanto, la integridad de las uniones es decisiva para la capacidad de carga, rigidez y durabilidad de las estructuras de madera (Lokaj y Varusova, 2020). Estas uniones pueden realizarse mediante sujetadores metálicos o dispositivos de conexión, conocidos como uniones metálicas, o mediante compresión entre superficies de contacto y esfuerzos cortantes, denominadas uniones tradicionales o de carpintería (Sergev y Lukin, 2021). Este trabajo explora mediante ensayos de laboratorio la eficacia de la conexión tradicional de Manabí – Ecuador.

2. ENSAMBLE RAYO DE JÚPITER

Las uniones en estructuras de madera se clasifican como empalmes, acoplamientos y ensamblajes basados principalmente en funciones de extensión uniaxial, aumento de la sección transversal e integración biaxial de elementos (Schelokova, 2020). Particularmente, los ensamblajes permiten formar conjuntos estructurales, donde su función complementaria es de aguantar cargas empleadas en su estructura y conseguir el cambio de dirección entre dichos elementos (Dominguez, 2015).

Entre las técnicas de ensamblaje, la conexión tipo Rayo de Júpiter ha sido utilizada desde de la antigüedad para unir dos piezas de madera de extremo a extremo, creando una pieza continua más larga (García y Lopez, 2019). Esta unión se realiza mediante cortes precisos en los extremos de las piezas, formando superficies anguladas que aumentan la fricción y resistencia, utilizadas comúnmente en armazones y vigas para brindar soporte y rigidez (Marín y Uribe, 2021). Según la especie de madera, los requisitos de carga y las necesidades de la estructura, los ángulos pueden variar entre 8 y 12 grados, aunque puede existir configuraciones con mecanizado en ángulo recto (Negrao, 2020).

La Figura 2 ilustra diferentes aplicaciones y detalles del ensamble tipo Rayo de Júpiter, destacando la adaptabilidad en la construcción de estructuras de madera. Este tipo de ensamble, como se observa en las imágenes, no es simplemente una técnica de conexión, sino una aplicación de la habilidad artesana y el conocimiento profundo de las propiedades de la madera.

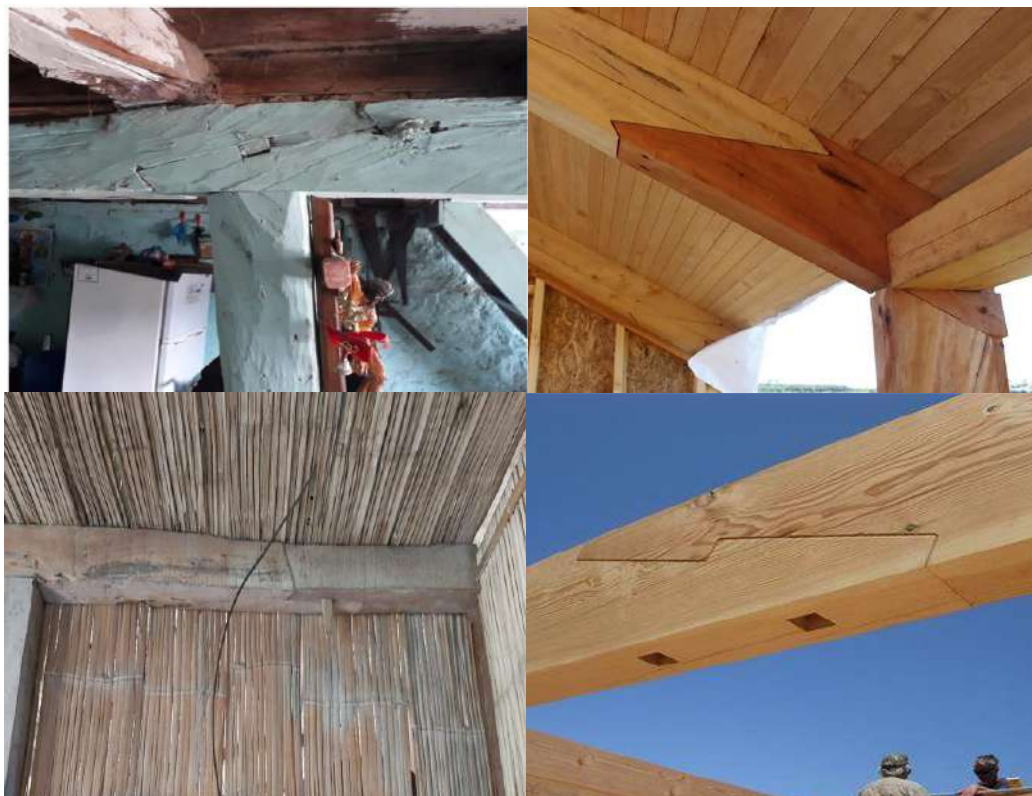


Figura 2. Ensamble Rayo de Júpiter: Conexiones utilizadas en la construcción de estructuras de madera

La configuración escalonada oblicua del empalme rayo tipo Júpiter incluye una cuña o llave que facilita el ensamblaje y el ajuste. Como resultado, estas uniones pueden resistir adecuadamente tanto esfuerzos de compresión como de tracción, mientras que su resistencia a la torsión es muy limitada (Ramos et al., 2022). Aunque el ensamble tipo rayo de Júpiter ha demostrado ser eficaz en diversas aplicaciones estructurales, su comportamiento bajo esfuerzos de flexión no ha sido suficientemente documentado en la literatura reciente.

Este estudio tiene como objetivo principal determinar mediante ensayos de flexión, el comportamiento estructural de vigas ensambladas con la técnica del rayo de Júpiter. Se obtendrá la resistencia a flexión y se analizará los efectos producidos en los ensambles con y sin refuerzos metálicos. Los resultados permitirán evaluar si este tipo ensamble cumple con los requisitos solicitados a flexión, proporcionando información para su aplicación en el diseño de estructuras de madera. Esta investigación no solo contribuirá al conocimiento técnico sobre los ensambles de madera, sino que también ofrecerá una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en la ingeniería civil.

La metodología empleada en esta investigación se basó en un enfoque experimental ya que se realizaron ensayos controlados y se cuantificaron los datos obtenidos de los ensambles de madera estructural. Este trabajo se centró en la realización de ensayos de flexión utilizando los equipos necesarios para determinar las propiedades de vigas de madera con ensambles tipo rayo Júpiter. La investigación tuvo un carácter exploratorio y descriptivo, ya que se buscó no solo describir el comportamiento estructural bajo diferentes condiciones de carga, sino también

explorar las diferencias entre ensambles con y sin refuerzos metálicos. Este enfoque permitió obtener una comprensión detallada y cuantificable del rendimiento mecánico de los ensambles, proporcionando datos precisos sobre la carga máxima soportada durante los ensayos y las propiedades resultantes de la madera utilizada.

Para el estudio experimental se utilizó madera tipo Moral, seleccionada por sus destacadas características físicas y mecánicas. Esta madera presenta una fibra recta y un grano que varía de fino a medio, con una densidad que oscila entre 690 y 720 kg/m³ al 12% de humedad, clasificándola como una madera semi-pesada. Este material tiene una dureza intermedia y una durabilidad notablemente alta, con una resistencia adecuada para usos a la intemperie. La estabilidad dimensional de la madera Moral contiene un coeficiente de contracción volumétrico de 0.48%, clasificándola como medianamente nerviosa. Aunque es poco impregnable, su trabajabilidad es excelente: no presenta problemas durante el aserrado, secado, cepillado, encolado, clavado, atornillado y acabado.

2.1. Característica del ensamble

Durante el proceso de investigación, se diseñaron vigas con el ensamble tipo Rayo de Júpiter, tal como se ilustra en la Figura 3, una técnica ampliamente empleada en estructuras sometidas a esfuerzos de tracción y compresión. Las vigas utilizadas en los ensayos se fabricaron con dimensiones específicas para garantizar un comportamiento estructural óptimo: 0.20 metros de altura, 0.20 metros de ancho y 2.00 metros de longitud.

Las conexiones de Rayo de Júpiter fueron diseñadas con un corte en ángulo recto, de 90 grados, y con un empalme de 0.40 metros de longitud, lo que corresponde al 20% de la longitud total de la viga (Figura 3). Este diseño garantiza una transferencia eficiente de las cargas a lo largo de la unión, manteniendo la integridad estructural. Las dimensiones del ensamble y los cortes precisos en los extremos de las piezas de madera aseguran un ajuste preciso, que es fundamental para la distribución homogénea de las tensiones a lo largo de la estructura.

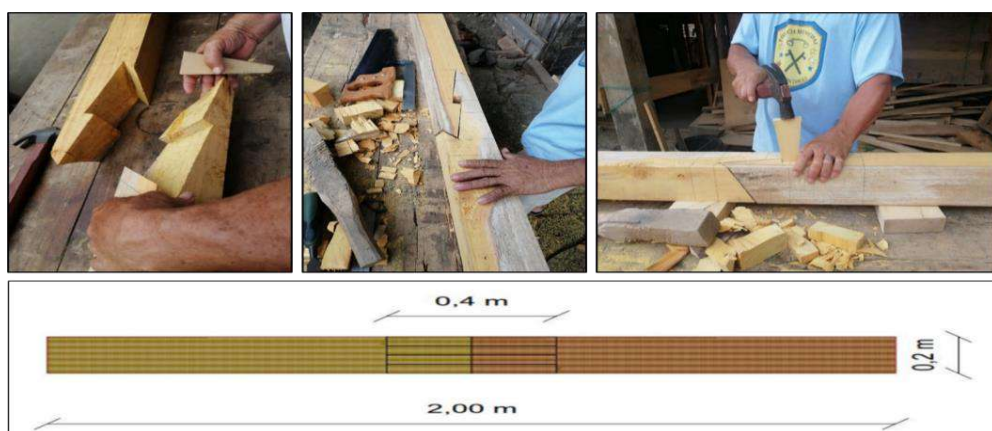


Figura 3. Proceso de fabricación y detalles del ensamble Rayo de Júpiter

El proceso de corte y ensamblaje de las piezas de madera se llevó a cabo utilizando una sierra de mesa para cortes precisos y un cepillo eléctrico para ajustar las superficies de contacto. Las piezas se cortaron a las dimensiones especificadas y se

ensamblaron siguiendo técnicas tradicionales (Figura 4), asegurando el ajuste perfecto en los ensambles tipo Rayo de Júpiter.



Figura 4. Proceso de fabricación y detalles del ensamble Rayo de Júpiter

Se prepararon un total de cinco muestras de vigas de madera, de las cuales se tomaron dos para ser reforzadas con tornillos metálicos, ubicados en el lado perpendicular a donde van las cuñas de madera (Figura 5), posicionados estratégicamente para evaluar su comportamiento estructural y la influencia de los refuerzos en la resistencia y la estabilidad de las uniones. Los tornillos se colocaron de manera que no interfieran con la integridad del ensamble tipo rayo de Júpiter, proporcionando un soporte adicional sin comprometer el diseño del ensamble.



Figura 5. Posición de los tornillos metálicos en las vigas

Las tres vigas restantes se ensamblaron sin refuerzos metálicos, siguiendo el mismo proceso de corte y ensamblaje, pero sin la adición de tornillos. Estas muestras sirvieron como referencia para comparar el comportamiento estructural entre vigas

con y sin refuerzos metálicos, permitiendo un análisis de la efectividad de los refuerzos en las uniones bajo condiciones de flexión.

2.2. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental consistió en realizar ensayos de flexión cuasi-estáticas, cuyo enfoque se basa en aplicar una carga de manera lenta y controlada, incrementándose de forma continua hasta alcanzar el punto de falla del material. En la configuración del ensayo, la carga se distribuyó en dos puntos de contacto sobre las muestras, separados por 50 cm, (Figura 6), para evitar interferir con la unión tipo Rayo de Júpiter, es decir que el ensamble se encuentra dentro de donde se aplica la carga.



Figura 6. Posición de la carga en la viga

Estos ensayos se llevaron a cabo siguiendo las normas ecuatorianas de la construcción (NEC-Estructuras de Madera), que proporcionan lineamientos para el diseño y evaluación de estas estructuras, asegurando que las pruebas cumplan con los estándares de seguridad, durabilidad y eficiencia.

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de la Universidad Técnica de Manabí, ubicado en Portoviejo. Se utilizó la Máquina de Ensayo Universal (MEM), un sistema electromecánico que aplica fuerzas de tracción a materiales hasta su rotura, lo que permite determinar con precisión la resistencia y el comportamiento estructural de las vigas de madera. El equipo incluyó un marco de reacción que asegura la correcta alineación de las fuerzas aplicadas, deformímetros lineales, que son sensores que miden la deformación de las vigas bajo carga, y un registrador de datos multipropósitos (Datalog).

El Datalog es un sistema de adquisición de información que recopila los datos de las deformaciones y las fuerzas aplicadas durante las pruebas a través de los deformímetros lineales. La información recopilada por el Datalog fue sistematizada por el programa Datacon, que consintió visualizar de manera continua y detallada los datos en tiempo real. Esto permitió la precisa recolección de datos, facilitando el análisis del comportamiento de las vigas durante los ensayos.

Adicionalmente, se implementó el método de fotogrametría, con una cámara para capturar imágenes a intervalos de dos segundos. Este proceso permitió crear un registro visual detallado del desplazamiento en puntos distribuidos en cada extremo de la unión tipo rayo de Júpiter, permitiendo identificar las áreas de mayor deformación y posibles puntos de falla en la estructura.

2.3. Evaluación del comportamiento de las vigas de madera bajo flexión

La evaluación del rendimiento a la flexión de los especímenes de las vigas de madera se llevó a cabo mediante un análisis de dos parámetros fundamentales: el desplazamiento máximo (δ_{max}) y el índice de resistencia de flexión o Módulo de Ruptura (MOR). Estos parámetros proporcionan una comprensión integral del comportamiento estructural y la capacidad de carga de las vigas ensambladas con la técnica del rayo de Júpiter.

- **Desplazamiento Máximo (δ_{max}):** Es un indicador crítico de la deformación que experimenta una viga bajo carga antes de alcanzar su punto de falla, el desplazamiento máximo en las vigas ensayadas se produce cuando esta alcanza su ruptura, llegando a este punto, el desplazamiento comienza a disminuir.
- **Desplazamiento relativo $\delta_{relativo}$ (%):** Es el valor en porcentaje que produce en cada punto, en relación al desplazamiento máximo.
- **Módulo de Ruptura (MOR):** Es una medida de la resistencia máxima que puede soportar una viga antes de fallar bajo flexión. El módulo de ruptura (MOR) es un índice de resistencia a la flexión. La resistencia a la flexión se define por cómo se comporta una muestra de prueba (rectangular) con dimensiones definidas en una prueba de flexión de 3 puntos hasta la fractura en la tensión máxima.

La combinación de los datos obtenidos mediante el programa Datalog y el método de fotogrametría proporciona una visión comprensiva del rendimiento de las vigas de madera bajo flexión. Mientras que el Datalog ofrece una cuantificación del MOR y el desplazamiento máximo, la fotogrametría complementa este análisis con una evaluación visual detallada de los puntos de máxima deformación. Este enfoque integrado permite una evaluación robusta y precisa del comportamiento mecánico de las vigas, asegurando la validez y fiabilidad de los resultados obtenidos.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El comportamiento estructural de los elementos de madera está intrínsecamente ligado a las características físicas y biológicas de cada espécimen. Variables como la densidad, el contenido de humedad, la orientación de las fibras y la

presencia de nudos puede afectar de manera significativa las propiedades mecánicas de la madera. Asimismo, las técnicas de ensamblaje y el diseño de la unión tipo rayo de Júpiter, desempeñan un papel fundamental en la distribución de tensiones y en la capacidad de carga de las estructuras de madera.

Una vez conocido el desplazamiento máximo con el Datalog, se realiza el análisis con la fotogrametría, lo cual permite visualizar de manera gráfica la trayectoria y los desplazamientos sobre las zonas de máxima tensión (cercanos al ensamble), considerando que se pretende analizar un comportamiento inelástico, debido a que el cuerpo ensayado se romperá, ya que que es sometido a fuerzas que superan su capacidad de deformación.

3.1. Análisis de flexión de las vigas sin refuerzo metálico

La Figura 7 ilustra, a través del método de fotogrametría, el comportamiento de la Viga 1 sin refuerzo metálico durante la prueba de flexión. Es importante destacar que esta viga había sufrido una fisura durante el diseño del ensamble, lo que comprometió su integridad estructural antes de la prueba. La distribución del desplazamiento a lo largo de la viga es relativamente uniforme, con incrementos graduales hacia el centro, donde se aplicó la carga. La ruptura visible en el centro de la viga indica que las tensiones máximas se concentraron en esta zona, llevando al material a superar su límite elástico y entrar a una fase plástica antes de fallar. La grieta observada sugiere que la fisura preexistente impidió que la viga redistribuyera las tensiones de manera eficiente, resultando en una falla prematura.



Figura 7. Distribución de desplazamiento mediante fotogrametría en la Viga 1 sin refuerzo metálico

La Tabla 1 presenta los resultados de los desplazamientos medidos mediante fotogrametría de la Viga 1. Los valores muestran una ligera variación entre los diferentes puntos de medición. El punto 5 registra el mayor desplazamiento con un valor de 37.76 mm, indicando la ubicación de la máxima deformación de la viga. El desplazamiento relativo en estos puntos es muy cercano al 100%, lo que confirma que la viga experimentó una deformación uniforme antes de fallar.

Tabla 1. Desplazamientos medidos mediante Fotogrametría en la Viga 1 sin refuerzo metálico

Fotogrametría - Viga 1		
Puntos	δ (mm)	$\delta_{relativo}$ (%)
1	37.367	98.96
2	37.461	99.21
3	37.541	99.42
4	37.630	99.65
5	37.760	100
6	37.580	99.52
7	37.554	99.45
8	37.509	99.34

Por otra parte, la Tabla 2 muestra los resultados obtenidos de las mediciones del programa Datalog. El desplazamiento máximo registrado es de 37.885 mm, un valor muy cercano al medido mediante fotogrametría (37.760 mm), lo que valida la precisión de los métodos de medición. El MOR registrado es de 0.56 kN, significativamente bajo en comparación con lo que se esperaría de una viga de madera en óptimas condiciones. Esta reducción en la carga máxima puede atribuirse directamente al fallo inicial presente en la viga durante el diseño del ensamble tipo rayo de Júpiter. La fisura inicial habría actuado como un punto de concentración de tensiones, facilitando la propagación de grietas bajo carga y reduciendo la resistencia global de la viga.

Tabla 2. Resultados de desplazamiento máximo y MOR medidos por Datalog en la Viga 1 sin refuerzo metálicos

Datalog - Viga 1	
δ_{max} (mm)	MOR (kN)
37.885	0.56

En la Figura 8 se observa los puntos de desplazamientos de la Viga 2 sin refuerzo metálico durante la prueba de flexión, capturados mediante el método de fotogrametría. A diferencia de la Viga 1, la Viga 2 no presentaba defectos previos en su ensamble tipo rayo de Júpiter, lo que permitió una distribución uniforme de las tensiones a lo largo de su estructura. La imagen muestra una deflexión pronunciada de la viga, donde se aplicó la carga, con incremento de desplazamiento relativamente uniformes hacia el centro. Esta uniformidad indica una adecuada redistribución de tensiones y una integridad estructural robusta sin signos de fallos prematuros.

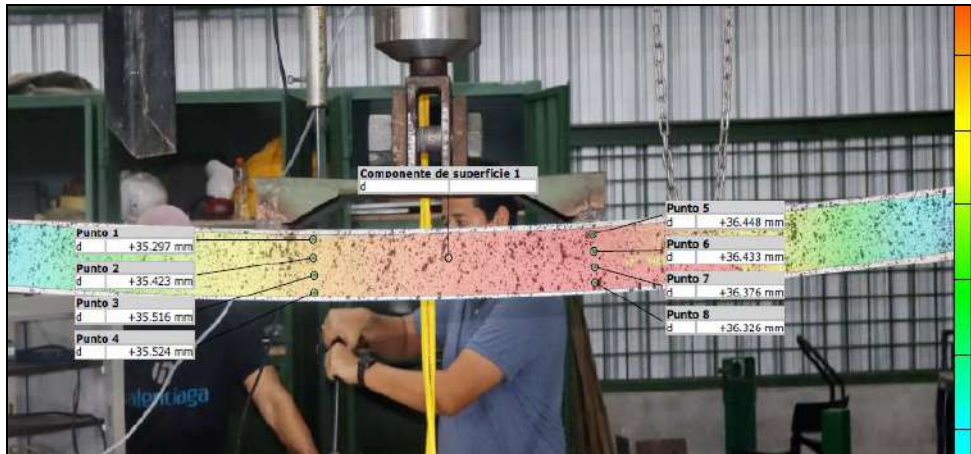


Figura 8. Distribución de desplazamiento mediante fotogrametría en la Viga 2 sin refuerzo metálico

Los valores de los desplazamientos medidos mediante fotogrametría de la Viga 2 se presentan en detalle en la Tabla 3. Los resultados muestran variaciones menores entre los diferentes puntos de medición, con el punto 5 registrando el desplazamiento máximo de 36.448 mm. Los desplazamientos relativos son consistentes, todos muy cercanos al 100%, lo que confirma que la viga se deformó de manera homogénea antes de alcanzar su límite de resistencia.

Tabla 3. Desplazamientos medidos mediante Fotogrametría en la Viga 2 sin refuerzo metálico

Fotogrametría - Viga 2				
	Puntos	δ (mm)	$\delta_{relativo}$ (%)	
En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos por el programa Datalog, donde se observa que el desplazamiento registrado es de 36.733 mm, un valor	1	35.297	96.84	
	2	35.423	97.19	visualizan los
	3	35.516	97.44	obtenidos por el
	4	35.524	97.46	Datalog, en
	5	36.448	100	observa que el
	6	36.433	99.96	máximo
	7	36.376	99.80	36.733 mm, un
	8	36.326	99.67	

aproximadamente cercano al medido a través del método de fotogrametría (36.448 mm). El MOR registrado es de 10.5 kN, valor que determina la excelente capacidad de carga de la Viga 2, soportando fuerzas significativas antes de alcanzar su punto de fallo.

Tabla 4. Resultados de desplazamiento máximo y MOR medidos por Datalog en la Viga 1 sin refuerzo metálicos

Datalog - Viga 2	
δ_{max} (mm)	MOR (kN)
36.733	10.50

La Figura 9 presenta la captura del comportamiento estructural de la Viga 3 sin refuerzo metálico durante la prueba de flexión. La imagen muestra un punto adicional en el centro del ensamble, donde se registra el mayor desplazamiento. Esta deflexión central es crítica para evaluar la respuesta máxima de la viga bajo carga, ya que representa la zona de máxima tensión y deformación.

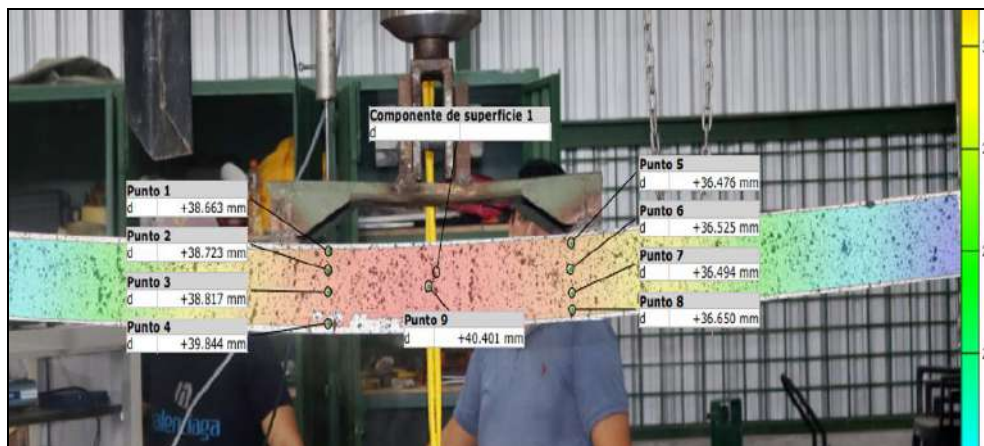


Figura 9. Distribución de desplazamiento mediante fotogrametría en la Viga 3 sin refuerzo metálico

La Tabla 5 detalla los valores de desplazamiento medidos de la fotogrametría de la Viga 3. Los resultados muestran una variación significativa, con el punto 9 registrando el desplazamiento máximo de 40.401 mm. A diferencia de las vigas anteriores, las variaciones de desplazamiento entre los puntos son más notables, sugiriendo una distribución de tensiones menos uniforme.

El análisis de los desplazamientos relativos indica una deformación homogénea en la mayoría de los puntos, pero con un incremento notable en el centro de la viga. La mayor deformabilidad observada sugiere que, bajo carga máxima, el ensamble tipo rayo de Júpiter permitió una redistribución eficiente de tensiones, aunque con una mayor flexibilidad estructural en el punto de máxima tensión.

Tabla 5. Desplazamientos medidos mediante Fotogrametría en la Viga 3 sin refuerzo metálico

Fotogrametría - Viga 3		
Puntos	δ (mm)	$\delta_{relativo}$ (%)
1	38.663	95.70
2	38.723	95.85
3	38.817	96.08
4	39.844	98.62
5	36.476	90.28
6	36.525	90.41
7	36.494	90.33
8	36.650	90.72
9	40.401	100

La Tabla 6 proporciona los resultados obtenidos del programa Datalog. El desplazamiento máximo registrado es de 41.7 mm, un valor ligeramente superior al medido mediante fotogrametría (40.401 mm). Además, el MOR registrado es de 7.22 kN, lo que representa una disminución en comparación con la Viga 2. A pesar de no presentar defectos en el diseño previo, este MOR reducido determina la influencia de otros factores, como la variabilidad en las propiedades del material o la precisión del ensamblaje, que pueden influir en la capacidad de carga de la viga.

Tabla 6. Resultados de desplazamiento máximo y MOR medidos por Datalog en la Viga 3 sin refuerzo metálicos

Datalog - Viga 3	
δ_{max} (mm)	MOR (kN)
41.7	7.22

3.2. Análisis de flexión de las vigas con refuerzo metálico

La Figura 10 permite visualizar el comportamiento de la Viga 4 con refuerzo metálico durante la prueba de flexión, capturado mediante el método de fotogrametría. Los desplazamientos registrados en los diversos puntos a lo largo de la viga revelan una deflexión significativa. La presencia de los refuerzos metálicos permitió una mayor

flexibilidad en la estructura, lo que resulto en desplazamientos notablemente mayores en comparación con las vigas sin refuerzo.

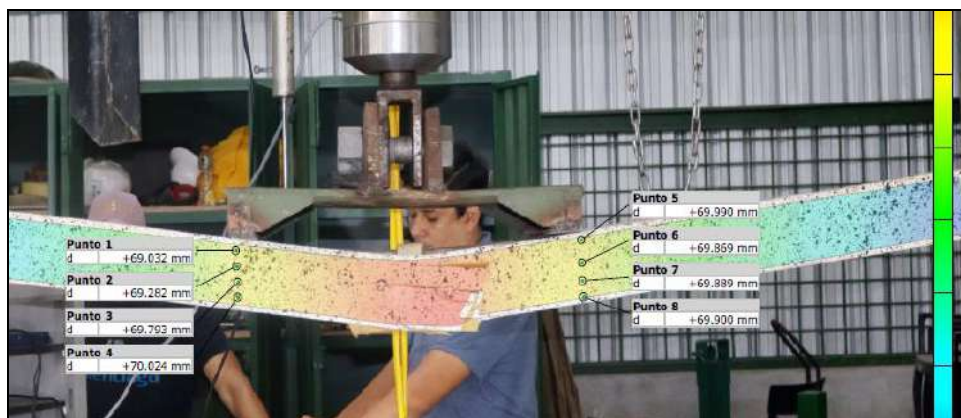


Figura 10. Distribución de desplazamiento mediante fotogrametría en la Viga 4 con refuerzo metálico

En la Tabla 7 se detalla los desplazamientos medidos mediante fotogrametría para la Viga 4. Los valores muestran una variación mínima, con el desplazamiento máximo en el punto 4 de 70.024 mm. La uniformidad de los desplazamientos, con valores relativos muy cercanos al 100%, indican que los refuerzos metálicos ayudaron a distribuir las tensiones de manera más homogéneas a lo largo de la viga. Sin embargo, la mayor capacidad de deformación puede ser atribuida a la interacción entre la madera y los pernos metálicos, que permiten un mayor grado de flexión antes de alcanzar el punto de fallo.

Tabla 7. Desplazamientos medidos mediante Fotogrametría en la Viga 4 con refuerzo metálico

Fotogrametría - Viga 4		
Puntos	δ (mm)	$\delta_{relativo}$ (%)
1	69.032	98.58
2	69.282	98.94
3	69.793	99.67
4	70.024	100
5	69.990	99.95
6	69.869	99.78
7	69.889	99.81
8	69.900	99.82

Por otra parte, la Tabla 8 presenta los resultados obtenidos del Datalog. El desplazamiento máximo registrado es de 69.248 mm, un valor que está en consonancia con el medido mediante fotogrametría. El módulo de ruptura (MOR) obtenido es de 2.47 kN, considerablemente menor que en las vigas 2 y 3 sin refuerzo metálico. Este MOR reducido sugiere que, a pesar de la mayor capacidad de deformación, la viga reforzada con pernos no pudo soportar cargas tan altas como las vigas sin refuerzo. Por consiguiente, la presencia de pernos metálicos en la madera, podría haber introducido puntos de debilidad o concentraciones de tensiones que llevaron a una reducción a la capacidad de carga máxima.

Tabla 8. Resultados de desplazamiento máximo y MOR medidos por Datalog en la Viga 4 con refuerzo metálicos

Datalog - Viga 4	
δ_{max} (mm)	MOR (kN)
69.248	2.47

En la Figura 11 se observa los desplazamientos medidos de la Viga 5 con refuerzo metálico a través del método de fotogrametría. La imagen muestra una deflexión notable a lo largo de la longitud de la viga. Comparada con la Viga 4, los desplazamientos registrados son ligeramente menores, lo que indica diferencias en la respuesta estructural bajo carga.

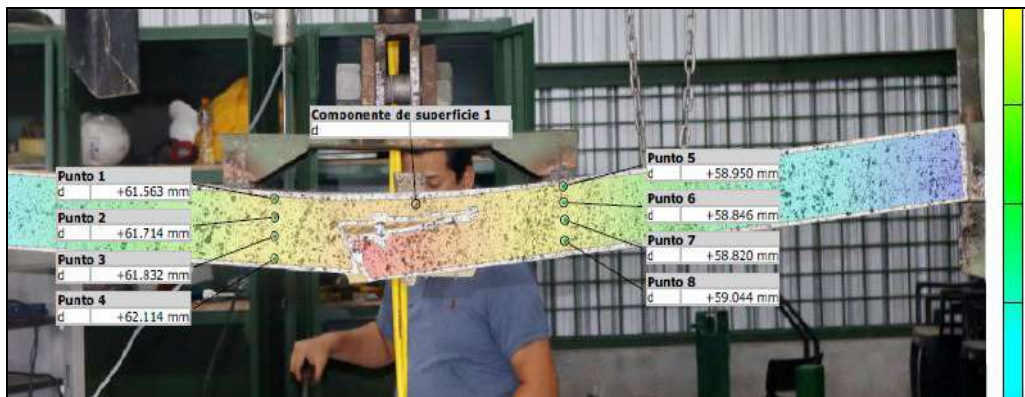


Figura 11. Distribución de desplazamiento mediante fotogrametría en la Viga 5 con refuerzo metálico

La Tabla 9 presenta los desplazamientos medidos que se visualizan en la fotogrametría de la Viga 5. Los resultados muestran una mayor variabilidad en comparación con la Viga 4, con desplazamientos que oscilan entre 58.820 mm y 62.114 mm. El desplazamiento máximo de 62.114 mm se observa en el punto 4, destacando la zona central como la de mayor deformación. Aunque los desplazamientos relativos son cercanos al 100%, la diferencia entre ellos indica que la viga experimentó una distribución de tensiones más variables. Esto podría ser consecuencia de la interacción entre los pernos y la madera, permitiendo variaciones en la respuesta estructural.

Tabla 9. Desplazamientos medidos mediante Fotogrametría en la Viga 5 con refuerzo metálico

Fotogrametría - Viga 5		
Puntos	δ (mm)	$\delta_{relativo}$ (%)
1	61.563	99.11
2	61.714	99.36
3	61.832	99.55
4	62.114	100
5	58.950	94.91
6	58.846	94.74
7	58.820	94.70
8	59.044	95.06

Por consiguiente, la Tabla 10 proporciona los resultados obtenidos en las mediciones del programa Datalog. El desplazamiento máximo registrado es de 62.765 mm, un valor que coincide con las mediciones de fotogrametría. El MOR es de 2.40 kN, similar al de la Viga 4. Esta similitud en el MOR, a pesar de la mayor capacidad de deformación de la Viga 5, sugiere que la introducción de pernos metálicos mejora la flexibilidad, pero no aumenta significativamente la capacidad de carga.

Tabla 10. Resultados de desplazamiento máximo y MOR medidos por Datalog en la Viga 3 con refuerzo metálicos

Datalog - Viga 5	
δ_{max} (mm)	MOR (kN)
62.765	2.40

3.3. Curvas de desplazamiento de las Vigas con y sin refuerzo metálico

A pesar de que la madera es generalmente clasificada como un material inelástico y no lineal, las vigas sometidas a prueba exhibieron un comportamiento casi-lineal desde cargas pequeñas hasta el punto de fallo. Esto indica que, inicialmente, las vigas respondieron de manera proporcional a las cargas aplicadas,

manteniendo una relación directa entre la carga y la deflexión, antes de llegar a su límite de resistencia.

En la Figura 12 se observan las curvas de desplazamientos de las Vigas 1, 2 y 3 sin refuerzo metálico. La imagen detalla que la Viga 1 muestra una distribución homogénea de tensiones con pequeñas variaciones entre los puntos, sugiriendo una integridad estructural consistente bajo carga. En cambio, la Viga 2 presenta una mayor dispersión en los desplazamientos, especialmente en el punto 5, indicando concentraciones de tensiones que conducen a una falla más localizada. La Viga 3, por su parte, muestra una distribución homogénea de tensiones a lo largo de la viga, donde cada punto sigue una trayectoria similar, y los incrementos en desplazamientos son casi paralelos.

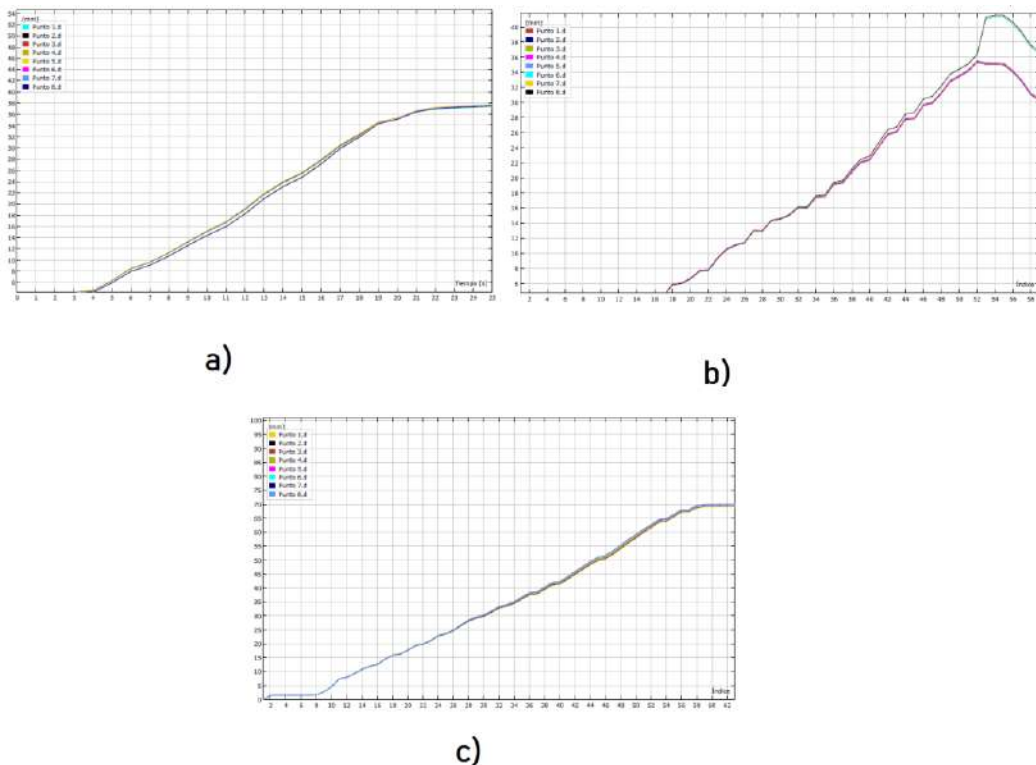


Figura 12. Curvas de desplazamiento de las Vigas sin refuerzo metálico: a) Viga 1; b) Viga 2; c) Viga 3.

En otro aspecto, la Figura 13 detalla las curvas de desplazamiento de las Vigas 4 y 5 con refuerzo metálico. La Viga 4 presenta una respuesta casi-lineal con pequeñas variaciones entre los puntos medidos, lo que sugiere una distribución homogénea de tensiones a lo largo de la viga. Sin embargo, los desplazamientos registrados son mayores en comparación con las vigas sin refuerzo metálico, indicando que los refuerzos permiten una mayor deformación, pero también puede introducir concentraciones de tensiones que afectan la capacidad de carga máxima. Por otro lado, la Viga 5 muestra desplazamientos uniformes entre los distintos puntos medidos, con incrementos casi paralelos. Los puntos siguen trayectorias similares, destacando la capacidad de la viga para soportar cargas de manera uniforme sin concentraciones significativas de tensiones que podrían provocar fallas prematuras.

Sin embargo, se observó que la capacidad de carga no solo no aumenta con los refuerzos metálicos, sino que puede incluso disminuir debido a las interacciones desfavorables en la estructura reforzada.

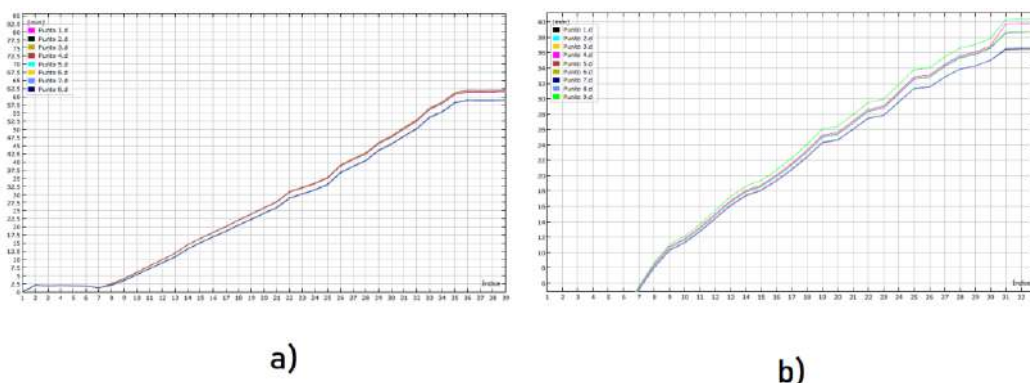


Figura 13. Curvas de desplazamiento de las Vigas con refuerzo metálico: a) Viga 4; b) Viga 5.

3.4. Comparación del Módulo de Ruptura (MOR) en vigas con y sin refuerzo metálico

La Figura 14 del Módulo de Ruptura (MOR) revela las diferencias significativas en la capacidad de carga máxima entre las vigas con y sin refuerzo metálico, influenciadas por la calidad del ensamble tipo rayo de Júpiter. Las vigas sin refuerzo metálico muestran variaciones notables en sus valores de MOR. La Viga 1 presenta un MOR de 0.56 kN, considerablemente menor debido a defectos y concentraciones de tensiones. La Viga 2 obtuvo un MOR de 10.5 kN, indicando una excelente distribución de tensiones y alta capacidad de carga, mientras que la Viga 3, con un MOR de 7.22 kN, muestra una buena capacidad de carga, aunque inferior a la de la Viga 2, sugiriendo una ligera variabilidad en la homogeneidad del material o en la ejecución del ensamble.

En contraste, las Vigas 4 y 5 con refuerzo metálico presentan valores de MOR de 2.47 kN y 2.49 kN respectivamente, siendo estos valores inferiores a los de las vigas sin refuerzo. Esto determina que, aunque los refuerzos incrementan la flexibilidad, también introducen concentraciones de tensiones que pueden debilitar la estructura y reducir la capacidad de carga máxima.

El ensamble tipo rayo de Júpiter permite una conexión fuerte y eficiente entre los segmentos de la viga, distribuyendo las tensiones de manera uniforme, pero la interacción con los refuerzos metálicos puede generar concentraciones adicionales de tensiones que afectan negativamente el MOR.

Si escogemos la viga con el MOR más alto (10,5 Kn), es decir la viga 2, se puede indicar que este ensamble podría soportar hasta 1.05 Toneladas, lo cual es una resistencia satisfactoria para ser considerada en las estructuras, considerando lo citado en la Norma Ecuatoriana de la Construcción-ESTRUCTURAS DE MADERA.

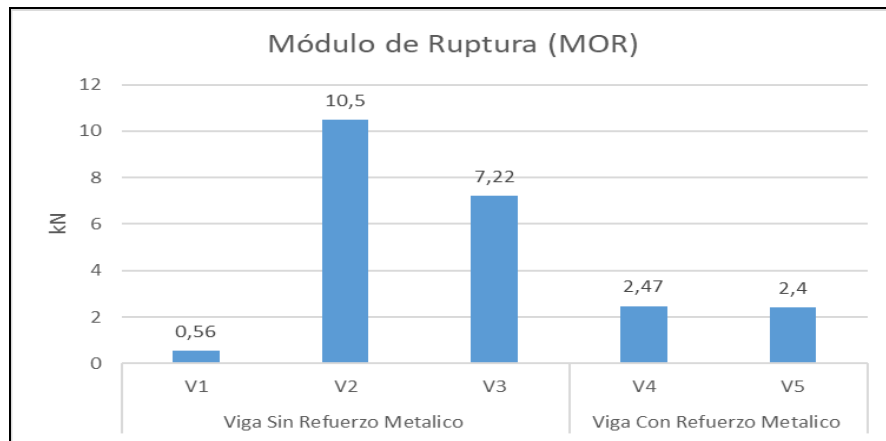


Figura 14. Módulo de Ruptura (MOR) de vigas con y sin refuerzo metálico

4. CONCLUSIONES

- Las vigas ensambladas utilizando la técnica del "Rayo de Júpiter" demostraron ser una solución eficiente para la unión de segmentos de madera en estructuras sujetas a cargas de flexión. Las pruebas experimentales mostraron que las vigas sin refuerzos metálicos presentan un comportamiento cuasi lineal bajo carga, con una distribución uniforme de tensiones a lo largo de la viga.
- El resultado del Módulo de Ruptura en las vigas, indica una notable resistencia estructural y capacidad de carga. Estos resultados destacan la efectividad del ensamble tipo Rayo de Júpiter para distribuir tensiones de manera eficiente, siempre que el diseño sea preciso y la madera utilizada esté en condiciones óptimas.
- Las vigas con refuerzo metálicos exhibieron mayores desplazamientos bajo carga, lo que sugiere que los refuerzos introducen un mayor grado de flexibilidad en la estructura. Sin embargo, este aumento en la deformabilidad no se tradujo en una mejora en la capacidad de carga máxima. Los valores de MOR para las vigas reforzadas (2,47 kN y 2,40 kN) fueron significativamente menores que los de las vigas sin refuerzo, lo que indica que los refuerzos metálicos pueden introducir puntos de concentración de tensiones que actúan como focos de debilidad, reduciendo la resistencia global de la estructura.
- La presencia de fisuras o defectos en las vigas, como se observó en la Viga 1, tuvo un impacto negativo considerable en el rendimiento estructural. A pesar de una deformación relativamente uniforme, el MOR de esta viga fue de apenas 0,56 kN, lo que subraya la importancia de la integridad del material para mantener la capacidad de carga.
- En síntesis, la técnica de ensamble tipo "Rayo de Júpiter" sin refuerzos metálicos se muestra como la opción más adecuada para aplicaciones estructurales donde la capacidad de carga y la distribución uniforme de tensiones son críticas. Los refuerzos metálicos, aunque pueden ser beneficiosos en términos de flexibilidad, no contribuyen de manera significativa a la capacidad de carga máxima y pueden incluso comprometer la resistencia de la estructura debido a la introducción de puntos de concentración de tensiones.

5. REFERENCIAS

- Branco, J. (2019). Analysis and strengthening of carpentry joints. *Construction and Building Materials*, 97(3), 34-47. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.089>
- Dominguez, M. (2015). *Estudio de uniones en estructuras de madera con uso de elementos clavija*. Universidad de Salamanca.
- Garcia, J., & Lopez, P. (2019). Analysis of the stress state at the double-step joint in heavy timber structures. *Materiales de Construcción*, 69(3), 12-28. doi:<https://doi.org/10.3989/mc.2019.00319>
- Lokaj, A., & Varusova, K. (2020). Analysis of Longitudinal Timber Beam Joints Loaded with Simple Bending. *Sustainability*, 21(12), 24-30. doi:<https://doi.org/10.3390/su12219288>
- Marin, C., & Uribe, C. (2021). Flexural strength characterisation of oblique radiata pine splice joints. *Wood Material Science & Engineering*, 17(6), 1010-1019. doi:<https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1990405>
- Muñiz, G., & Franca, R. (2020). Análisis de la estructura anatómica de la madera y del carbón de dos especies de Sapotaceae. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 15(3), 25-32. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000024>
- Negrao, J. (2020). Rehabilitation of the Roof Timber Trusses of a Multiuse Pavilion. *Civil Engineering*, 6(12), 2437-2445. doi:[10.28991/cej-2020-03091628](https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091628)
- Ordoñez, P., & Lugo, Y. (2018). *Estructuras de madera aplicadas al sector de la construcción en el Perú*. PUCP. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/6834>
- Ramos, G., Vanegas, A., & Romo, X. (2022). *Autoconstrucción sostenible para vivienda rural en la costa ecuatoriana*. Universidad Católica de Cuenca. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9042795>
- Schelokova, T. (2020). Stress-strain condition of reinforced timber structures with artificially created weakenings. *INTERAGROMASH*, 175(56), 16-26. doi:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017511003>
- Sergev, M., & Lukin, M. (2021). Mathematical modeling of stress-strain state of the nodal joint of wooden beams. *IOP*, 2131(15), 12-22. doi:<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032088>
- Song, X., & Zhang, Y. (2024). Sequentially coupled thermal-stress analysis of traditional timber mortise-tenon joints with damage. *Building Engineering*, 86(24), 225-237. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108781>
- Normas ecuatorianas de la construcción (NEC-Estructuras de Madera)