

# Diseño, construcción y ensayo de celosías como parte de la formación estudiantil

## *Design, construction, and testing of trusses as part of student training*

Jonnathan Patricio Espinoza González <sup>1</sup>

Karen Andrea Suña Anguisaca <sup>2</sup>

Jaime Xavier Nieto Cárdenas <sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.26495/rbrc9g36>

### Resumen

El objetivo de la investigación fue diseñar una viga de forma y material libremente elegidos, capaz de soportar una carga de 2 kN en una prensa hidráulica universitaria, con dimensiones máximas de 80 cm de largo y 15 cm de alto. Cinco grupos de estudiantes de pregrado diseñaron y construyeron diferentes armaduras utilizando madera de pino, MDF, aluminio y acero galvanizado. Cada grupo desarrolló una armadura de tipo Pratt o Howe, y las estructuras fueron sometidas a ensayos de flexión de cuatro puntos para evaluar su rendimiento y resistencia. Los ensayos revelaron diversos modos de falla, principalmente relacionados con las conexiones y el pandeo de los elementos estructurales, destacando una relación directa entre la elección de materiales y el desempeño de las estructuras. Las gráficas de carga versus deformación mostraron comportamientos tanto elásticos como inelásticos, dependiendo del grupo y los materiales utilizados. Basándonos en los hallazgos obtenidos, podemos afirmar que los estudiantes adquieren conocimientos valiosos sobre análisis estructural y diseño de armaduras al enfrentarse a la realidad del análisis y diseño, prestando especial atención a la importancia crítica de las conexiones. La práctica experimental desempeña un papel fundamental en la formación de ingenieros, ya que proporciona una comprensión visual de los modos de falla y la relación entre peso y resistencia en las estructuras. Además, se ha concluido que el grupo que utiliza aluminio logra los mejores resultados en términos de resistencia, peso y energía disipada dentro del rango elástico.

**Palabras clave:** Ensayo en laboratorio, viga a flexión, ensayo monotónico, celosía.

### Abstract

The objective of the research was to design a beam with freely chosen shape and material, capable of withstanding a load of 2 kN in a university hydraulic press, with maximum dimensions of 80 cm in length and 15 cm in height. Five groups of undergraduate students designed and constructed different trusses using pine wood, MDF, aluminum, and galvanized steel. Each group developed a Pratt or Howe truss, and the structures were subjected to four-point bending tests to evaluate their performance and strength. The tests revealed various failure modes, mainly related to connections and buckling of the structural elements,

---

<sup>1</sup> Universidad Católica de Cuenca, Azogues, Ecuador, [jonnathan.espinoza.17@est.ucacue.edu.ec](mailto:jonnathan.espinoza.17@est.ucacue.edu.ec)

<sup>2</sup> Universidad Católica de Cuenca, Azogues, Ecuador, [karen.sunna.78@est.ucacue.edu.ec](mailto:karen.sunna.78@est.ucacue.edu.ec)

<sup>3</sup> Universidad Católica de Cuenca, Azogues, Ecuador, [jxnietoc@ucacue.edu.ec](mailto:jxnietoc@ucacue.edu.ec) / [jnietoc@umal.edu.co](mailto:jnietoc@umal.edu.co)

highlighting a direct relationship between material selection and structural performance. The load versus deformation graphs showed both elastic and inelastic behaviors, depending on the group and materials used. Based on the findings, we can assert that students gain valuable knowledge in structural analysis and truss design by facing the realities of analysis and design, with particular attention to the critical importance of connections. Experimental practice plays a fundamental role in the training of engineers, as it provides a visual understanding of failure modes and the relationship between weight and strength in structures. Additionally, it was concluded that the group using aluminum achieved the best results in terms of strength, weight, and energy dissipation within the elastic range.

**Keywords:** Laboratory testing, bending beam, monotonic testing, truss structure.

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo muestra una actividad académica desarrollada por alumnos de pregrado en la materia de estructuras. Mediante el enfoque de reto, los estudiantes determinaron diferentes tipologías de estructuras, tanto en materiales como en diseño, para cumplir con un objetivo planteado en clase.

El objetivo principal fue diseñar una viga, con elección libre de forma y material, que pudiera soportar una carga de 2 kN en la prensa hidráulica de la universidad. Se establecieron medidas máximas de 80 cm de largo y 15 cm de alto, dejando libre la opción del ancho de la viga, para generar el montaje que se observa en la Figura 6. La práctica se realizó bajo un ensayo a flexión de 4 puntos, con el reto de soportar la resistencia con el menor peso posible.

En ingeniería civil, se prioriza la eficiencia, durabilidad y resistencia estructural de las construcciones (Farhadi et al., 2020). Las armaduras estructurales son fundamentales para mantener la integridad de las estructuras ante cargas y tensiones (Marmolejo, 2014). Las estructuras fabricadas con materiales como madera o barras metálicas ofrecen estabilidad a bajo peso. Es crucial considerar un adecuado diseño en la unión, ya que, al aplicar fuerzas, los nodos experimentan tensiones o compresiones significativas (Calderon & Ramirez, 2019).

Por ello, todos los estudiantes optaron por el uso de armaduras debido a su ventaja de resistencia versus peso. Existen diferentes tipos de armaduras, cada una con sus propias características y aplicaciones específicas. El diseño y construcción de armaduras es una tarea importante en la ingeniería civil y estructural, ya que requiere garantizar la estabilidad y seguridad de los proyectos en función de las cargas y fuerzas a las que estarán sometidas (Beer et al., 2010).

El presente artículo resume el trabajo desarrollado por los alumnos en esta actividad académica, presentando la etapa de diseño, análisis de diferentes armaduras, la experiencia en laboratorio y las conclusiones sobre el comportamiento de los especímenes ensayados. Se formaron cinco grupos de estudiantes de la cátedra de Estructuras como parte de la investigación. El propósito central fue impulsar en cada grupo el desarrollo de habilidades para crear y presentar diseños de cerchas. Estos diseños se destacaron por utilizar una variedad de materiales, configuraciones de armaduras y conexiones, buscando mejorar las competencias técnicas y creativas entre los grupos.

Cada una de las estructuras diseñadas por los grupos de trabajo fue sometida a un ensayo de flexión de 4 puntos para evaluar su desempeño y resistencia, como lo menciona Di Lorenzo (Di Lorenzo et al., 2023) en su estudio, siendo una de las metodologías para encontrar el comportamiento estructural de celosías en 3D. El ensayo de flexión de 4 puntos se empleó para evaluar el comportamiento y la capacidad de carga de la

armadura estructural. Los resultados obtenidos permitieron analizar la resistencia a la flexión, la rigidez y la capacidad de carga máxima de la armadura.

El trabajo destaca la importancia de considerar cuidadosamente los materiales y las conexiones en el diseño de estructuras, así como la relevancia de realizar análisis estructurales para comprender el comportamiento de las armaduras bajo carga. Además, resalta la importancia de la práctica experimental en la formación de ingenieros y la aplicación de conocimientos teóricos en situaciones del mundo real.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se describe el proceso constructivo propuesto por cada grupo, se analizan los diferentes componentes utilizados, como las vigas, los tirantes, los conectores y las uniones, así como los materiales empleados en su fabricación.

**Tabla 1. Tipo de material y forma.**

Grupo	Tipo de Material	Tipo de Forma
1	Madera de pino	Viga tipo Pratt
2	Madera de pino	Armadura tipo Pratt
3	Tablero de fibra de densidad media (MDF)	Armadura Pratt
4	Aluminio	Armadura tipo Howe
5	Acero galvanizado	Armadura tipo Pratt

Fuente: Elaboración propia.

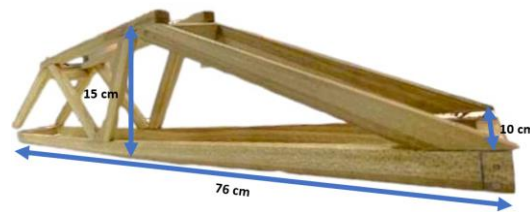
### 2.1. GRUPO 1

Se elige la madera de pino por sus propiedades, detalladas en la Tabla 2. La combinación de software como SW Truss y hojas de cálculo garantiza una representación precisa del comportamiento estructural ante cargas externas. Se ha desarrollado un prototipo de diseño simple de barras unidas sucesivamente, siguiendo la recomendación de R. Aroca (Aroca, 2002), utilizando pegamento blanco y clavos de acero sin cabeza (Tique, 2016).

**Tabla 2. Propiedades del pino.**

Propiedades del Pino.	
Módulo de elasticidad [kg/cm <sup>2</sup> ]	154 965.46
Módulo de rigidez cortante [kg/cm <sup>2</sup> ]	7 647.9
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	614.29
Esfuerzo a flexión [kg/cm <sup>2</sup> ]	305.9

Fuente: Propiedades físicas mecánica y físicas de la madera (Rodríguez & Vergara, 2008).

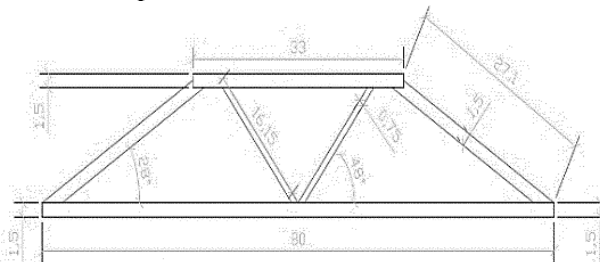


**Figura 1. Dimensionamiento.**

Fuente: Elaboración propia.

## 2.2. GRUPO 2

El uso específico de la madera de pino, reconocida por sus propiedades (Tabla 1), como lo menciona D. Enríquez (Enríquez, 2014) , ha permitido un control detallado de la estructura y su subsiguiente respuesta bajo carga. Las uniones, conformadas por adherencias y fijaciones con clavos de acero sin cabeza en la cercha, han sido determinantes en este proceso.



**Figura. 2. Dimensionamiento (cm)**

Fuente: Elaboración propia.

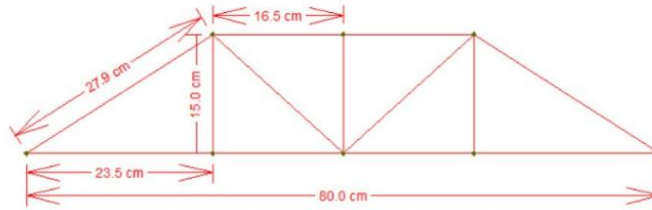
## 2.3. GRUPO 3

El diseño realizado en MDF (Medium Density Fiberboard) es reconocido por ser un material homogéneo y uniforme, caracterizado por su estabilidad y superficie plana y suave (Youngquist, 1986). Se eligió utilizar uniones pegadas para conectar los componentes de la armadura, basándose en consideraciones técnicas y estructurales.

**Tabla 3. Propiedades de la madera MDF.**

Propiedades de la madera MDF.	
Módulo de elasticidad [N/mm <sup>2</sup> ]	2700
Módulo de rigidez cortante [N/mm <sup>2</sup> ]	200
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	780
Esfuerzo a flexión [N/mm <sup>2</sup> ]	23

Fuente: Wood-based Composites and Panel Products (Youngquist, 1986).



**Figura. 3. Dimensionamiento.**  
Fuente: Elaboración propia.

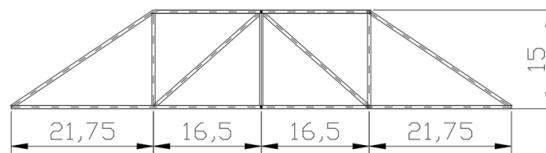
#### 2.4. GRUPO 4

Para cumplir con el objetivo, se elige una armadura tipo Howe, aprovechando sus características de peso según lo menciona D. Malagón (Malagón, 2018). Además, considerando los diseños propuestos por (Rico & Suaza, 2019) y (Muñoz et al., 2007) para la construcción de una viga de celosía tipo Howe, se aprecia una estructura sencilla con dobleces que facilitan las uniones. Se utilizan remaches como unión especial en aluminio, aprovechando su flexibilidad y bajo peso.

**Tabla 4. Propiedades del Aluminio.**

Propiedades del Aluminio.	
Módulo de elasticidad [kg/cm <sup>2</sup> ]	700
Módulo de rigidez cortante [kg/cm <sup>2</sup> ]	280
Módulo de Poisson.	0.33
Peso [kg/cm <sup>3</sup> ]	0.0027
Esfuerzo del aluminio [N/mm <sup>2</sup> ]	250

Fuente: Comportamiento de aluminio como material de construcción, Manual de diseño de estructuras de aluminio [2], [17].



**Figura. 4. Dimensionamiento (cm).**  
Fuente: Elaboración propia.

#### 2.5. GRUPO 5

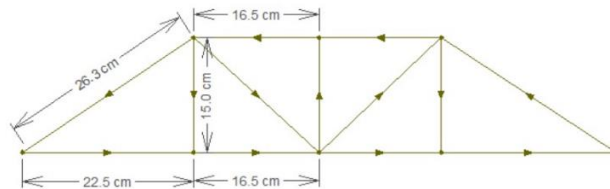
Se consideró la armadura, una relación peso-resistencia y un análisis de durabilidad al seleccionar el material adecuado. La unión se efectúa mediante tornillos.

**Tabla 5. Propiedades del Acero Galvanizado.**

Propiedades del Acero Galvanizado.	
Módulo de elasticidad [GPa]	210
Módulo de rigidez cortante [MPa]	260
Módulo de Poisson.	0.3
Peso [kg/cm <sup>3</sup> ]	7 850

Esfuerzo a flexión [N/mm <sup>2</sup> ]	400
---	-----

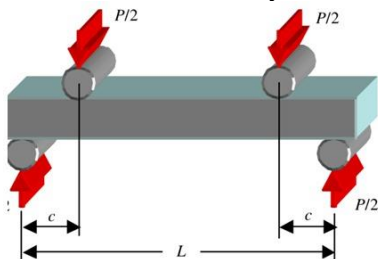
Fuente: Ficha técnica Acero recubierto galvanizado y pre pintado (Acesco, 2019).



**Figura. 5. Dimensionamiento.**

Fuente: Elaboración propia.

Cada grupo ajusta las dimensiones para resistir una carga de 2 kN en el laboratorio de la Universidad Católica de Cuenca. Se utiliza una prensa hidráulica para aplicar la carga en condiciones controladas. Las cerchas se colocan sobre soportes simples separados por 76.5 cm. Se implementan elementos de estabilización para mantener la orientación vertical y mitigar desplazamientos laterales. Cada grupo procedió a llevar a cabo el ensayo, obteniendo así los siguientes resultados.



**Figura. 6. Ensayo a 4 puntos.**

Fuente: Experimental investigation of four-point bending of thin-walled open section steel beam loaded and set in the shear center (Obst et al., 2022).



**Figura. 7. Fotografía general de las vigas previo al ensayo.**

Fuente: Elaboración propia.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1.PESOS

En la Tabla 6 se muestra los pesos y carga máxima registrada por cada grupo. Al evaluar los aspectos de resistencia, energía y peso, el grupo 4 es el de mejor desempeño, por eso se considera como base para relacionar su comportamiento con respecto a los otros grupos (C/C0 y P/P0):

**Tabla 6. Carga vs Peso.**

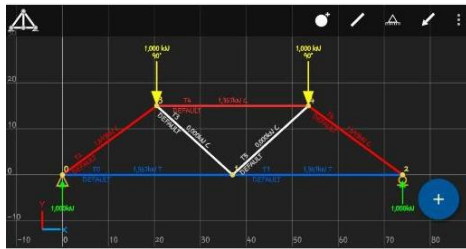
Grupo	Carga [kN]	C/C0	Peso [gr]	P/P0
1	3.90	1.72	492.22	1.16
2	1.69	0.74	354.68	0.83
3	3.92	1.72	854.20	2.01
4	2.27	1	423.80	1
5	1.98	0.87	746.07	1.76

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.MODO DE FALLA

#### Grupo 1

Por la sección de los elementos y el material en madera, no presentan falla por pandeo local o global, sin embargo, presenta una falla atribuible a defectos de fabricación, en la conexión, en el punto donde se transmiten los mayores vectores de carga, como son los apoyos inferiores, en este caso, la presencia de clavos metálicos, que inicialmente fueron utilizados para generar una conexión resistente, resulta que, por el uso de varios de ellos, generan un área efectiva de conexión que no soportó el estado límite de carga máxima. Esto llevó a la falla por una conexión insuficiente.



**Figura. 8 Modelo en el software.**

Fuente: Elaboración propia.

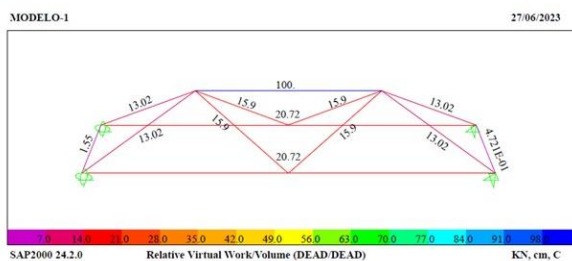


**Figura. 9. Falla por construcción.**

Fuente: Elaboración propia.

#### Grupo 2

En el análisis experimental de laboratorio se identificó una falla crítica en la estructura que resultó en su colapso, atribuida a una sobrecarga a cortante cercana a la unión, donde se encuentra el apoyo inferior. A pesar de que las dimensiones evitan el pandeo de los elementos, la resultante del apoyo transmitida al cordón inferior sobrepasó el límite de cortante de la sección de madera. Este tipo de estructuras se consideran articuladas en el diseño, con transmisión de cargas solo de compresión y tracción. La cortante producida se atribuye a una imperfección del apoyo en el ensayo, que quedó ligeramente fuera del nodo, generando excentricidad y provocando el daño, como se observa en la Figura 11.



**Figura. 10. Modelo en el software.**

Fuente: Elaboración propia.



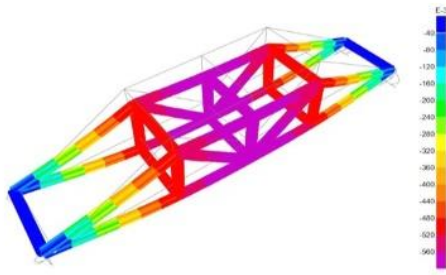
**Figura. 11. Falla**

Fuente: Elaboración propia.

#### Grupo 3

Se detectaron múltiples fallas, una falla en la estructura, específicamente en la parte superior de una de sus diagonales, similar a los otros grupos, por transmisión de esfuerzos del apoyo.

Por la tipología constructiva, los elementos inferiores de unión de ambas cerchas, generando que empiecen a trabajar por separado con diferencia de desplazamiento fuera del plano, llevando a toda la viga a una falla por pandeo global, generando una inestabilidad total de la viga a carga máxima. Ver Figura 13.



**Figura. 12. Modelo en el software.**

Fuente: Elaboración propia.

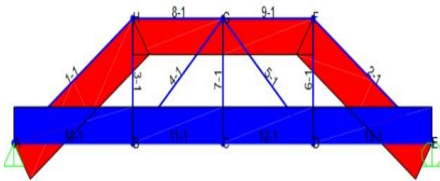


**Figura. 13. Falla.**

Fuente: Elaboración propia.

#### Grupo 4

Se observó el fallo por corte en uno de los remaches ubicado en el extremo de la estructura de aluminio, en la parte inferior. Punto que se encontraba cercano al apoyo de la cercha. La diagonal paralela posterior sufrió un pandeo local, por presencia de compresión que superó su estado límite de resistencia máxima. Como se observa en la Figura 15.



**Figura. 14. Modelo en el software.**

Fuente: Elaboración propia.

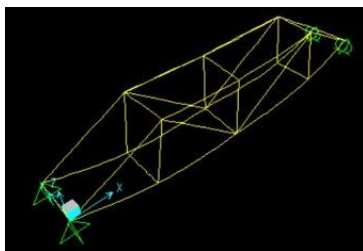


**Figura. 15. Falla.**

Fuente: Elaboración propia.

#### Grupo 5

Esta estructura no presenta una alta rigidez, se mantiene estable en el rango elástico. Se observó un leve fenómeno de pandeo global torsional de la estructura, su bloque a compresión, es decir, su cordón superior tiende a rotar por falta de rigidez entre las cerchas, pero ningún elemento presentó problemas por exceso de carga. Como se observa en la Figura 17.



**Figura. 16. Modelo en el software.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura. 17. Falla.**

Fuente: Elaboración propia.

El estudio realizado por Farhadi (Farhadi et al., 2020) y su equipo en 2020 se enfocó en la eficacia de distintos materiales en estructuras, resaltando el rendimiento positivo del aluminio. Identificaron problemas de fatiga en los remaches de aluminio, similares a las fallas observadas en el grupo 4 de nuestro estudio. A



pesar de esto, valoraron la ligereza y capacidad de carga del aluminio como ventajas notables, coincidiendo con los resultados favorables obtenidos por nuestro grupo 4, que también empleó aluminio y demostró un buen desempeño en términos de resistencia y peso.

Por otro lado, Marmolejo (Marmolejo, 2014) examinó estructuras de madera y señaló las dificultades en las uniones debido a la naturaleza anisotrópica de la madera. Nuestro estudio reveló fallos en las conexiones de madera de pino en los grupos 1 y 2, en línea con las observaciones de Marmolejo sobre la importancia crítica de las uniones en estructuras de madera.

Además, (Calderon & Ramirez, 2019) resaltaron en su investigación que los nodos de conexión en las armaduras deben ser diseñados de manera que eviten concentraciones de tensiones que puedan provocar fallos prematuros, aspecto que se reflejó en nuestras observaciones donde las conexiones deficientes resultaron en fallos estructurales, subrayando la necesidad de un diseño minucioso en las uniones.

### 3.3. Gráfica Carga vs. Deformación.

La figura 18 muestra la gráfica de respuesta estructural de carga – desplazamiento de cada ensayo, se observa los grupos con vigas que presentan solo comportamiento elástico (G3, G4 y G5), donde llegan a su límite máximo de resistencia y de deformación al mismo tiempo, mientras que otros 2 grupos registran una carga máxima y posterior un punto de desplazamiento máximo, evidenciando su comportamiento inelástico (G1 y G2).

Se determina de las curvas de respuesta estructural la cantidad de energía a carga máxima que registra cada grupo, basado en la figura 19. Adicionalmente, se encuentra la energía máxima disipada a deformación máxima (rango inelástico).

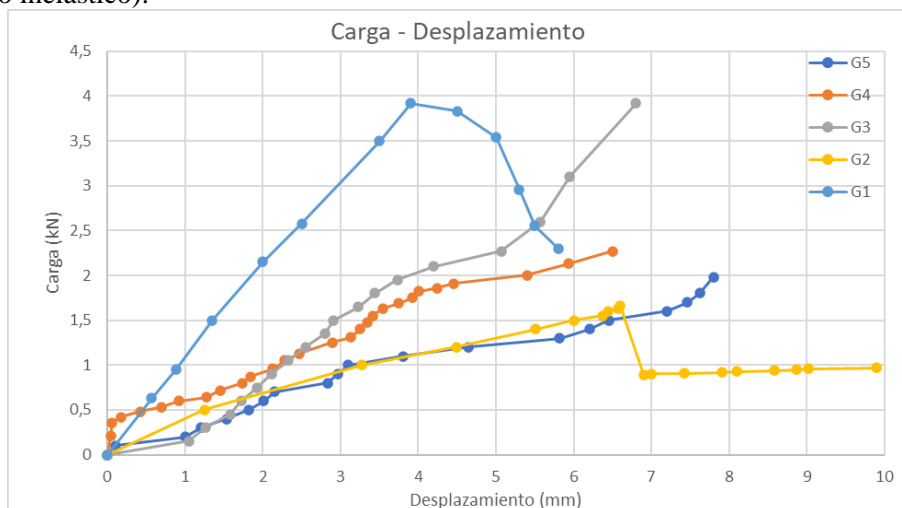


Figura 18. Gráfica Carga - Desplazamiento producto del ensayo.

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica de carga (Y) frente al desplazamiento (X), la rigidez corresponde a la pendiente de la curva en dicha representación visual. La rigidez se utiliza como una indicación de la capacidad de un material o estructura para mantener su forma ante una carga externa (Hibbeler, 2010).

Tabla 7. Rigidez elástica analizada al 40 % de carga máxima.

Grupo	G1	G2	G3	G4	G5	
Rigidez inicial	Y	3.92	1.66	2.27	1.64	1.98
	40%	1.36	0.67	1.56	0.91	0.79

	X	1.11	2.21	3.06	1.82	2.27
	Ke [kN/mm]	1.23	0.31	0.51	0.50	0.35
	Ke/Ke0	2.45	0.61	1.02	1	0.69
Rigidez final	Y	2.3	0.97	3.92	2.27	1.98
	X	5.8	9.9	6.8	6.05	7.8
	Ku [kN/mm]	0.4	0.1	0.94	0.35	0.25
	Ku/Ku0	1.14	0.28	2.68	1	0.71

Fuente: Elaboración propia.

Cuanto más pronunciada sea la pendiente de la curva (que representa la relación entre la carga aplicada y la cantidad de desplazamiento resultante), mayor será la rigidez del material o la estructura (Hibbeler, 2010).

La rigidez elástica de las celosías de madera y aluminio se relaciona con su capacidad para resistir deformaciones reversibles bajo carga. El aluminio, con un módulo de elasticidad superior, puede soportar deformaciones mayores antes de alcanzar su límite de deformación máxima. La rigidez última indica el punto en el que la estructura colapsa debido a cargas excesivas. El aluminio, al ser más resistente a la tracción y compresión que la madera, ofrece una mayor resistencia antes del colapso.

### 3.4. Energía.

En el contexto de la mecánica e ingeniería, la energía representa una propiedad fundamental intrínseca a la capacidad de un sistema para realizar trabajo. Esta energía existe en múltiples manifestaciones, tales como la energía potencial, asociada con la posición y deformación, y la energía cinética, relacionada con el movimiento (Hibbeler, 2010).

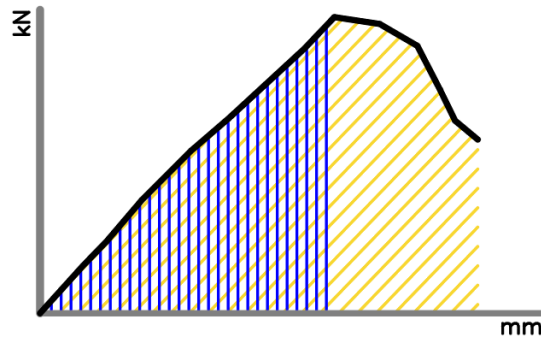
En el marco del ensayo con la prensa hidráulica, se pone de manifiesto la presencia de energía, la cual alude al almacenamiento de energía en los materiales a raíz de su deformación bajo la influencia de una carga.

**Tabla 8. Energía por cada grupo.**

Energía a carga máxima		Energía a deformación máxima	
Grupo	Área [J]	Área [J]	Área Total [J]
G1	7.90	14.32	22.22
G2	6.14	9.33	15.47
G3	7.71	-	7.71
G4	7.57	-	7.57
G5	7.65	-	7.65

Fuente: Elaboración propia.

Para los datos de energía a carga máxima se toma el área de color azul representado en la figura 19, el área en amarillo corresponde a la energía disipada en rango elástico e inelástico, siendo la energía total de la estructura ensayada. Como ejemplo se tiene al grupo G1, en donde su carga máxima representada con azul es el área en donde la estructura pudo soportar las cargas máximas, mientras que la energía total disipada representada por el color amarillo.



**Figura. 19. Gráfica carga - desplazamiento (G1).**  
Fuente: Elaboración propia.

En nuestro estudio, al evaluar la rigidez elástica y última, y al calcular la energía disipada por cada estructura, se encontró que las armaduras de aluminio y madera exhibieron rigideces iniciales y comportamientos de disipación de energía coherentes con los principios teóricos expuestos por Hibbeler (Hibbeler, 2010). En particular, la armadura de aluminio (grupo 4) demostró una mayor rigidez inicial y capacidad para disipar energía sin sufrir fallas catastróficas, coincidiendo con lo establecido en Hibbeler sobre la ventaja de materiales con altos módulos de elasticidad.

#### 4. CONCLUSIONES

Considerando este trabajo académico basado en el desafío puesta a prueba los conocimientos y habilidades de los estudiantes de pregrado, es grato concluir que:

Los estudiantes adquirieron conocimiento de herramientas de análisis estructural, sumaron a la teoría impartida en clases.

Se enfrentaron con la realidad del análisis y diseño de armaduras, que no solo requiere el diseño de los elementos, sino también de sus conexiones, tema que a veces en la vida profesional es olvidado.

Se fomentó la imaginación y la necesidad de mejorar los sistemas para obtener el menor peso posible, investigando materiales, formas de celosías, procesos y detalles constructivos.

Se motivaron por el uso del laboratorio y de llevar al colapso las vigas, entendiendo de mejor manera que significa un rango elástico e inelástico en una estructura.

Con los resultados de los ensayos, aprendieron visualmente sobre modos de falla, principalmente relacionados con problemas en las conexiones y el pandeo de los elementos estructurales. Se observó que la elección de materiales influyó en el rendimiento de las estructuras, con algunos grupos se logró una mejor relación peso-resistencia que otros.

Considerando resistencia, peso y energía, el grupo 4 es el que mejor desempeño tiene, por resistir la carga de diseño, ser el segundo grupo en menor peso y por ser el segundo en energía disipada en rango elástico.

En general, el trabajo destaca la importancia de considerar la práctica experimental en la formación de ingenieros y la aplicación de conocimientos teóricos en situaciones del mundo real.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los estudiantes del sexto ciclo de la Universidad Católica de Cuenca campus Azogues (2023-I) por su colaboración con los datos y resultados de los ensayos de laboratorio. De igual forma al staff del laboratorio de suelos de la Universidad.

## REFERENCIAS

- Acesco. (2019). *Ficha técnica Acero recubierto galvanizado y pre pintado*.
- Aroca, R. (2002). *Vigas trianguladas y cerchas*. Instituto Juan de Herrera.
- Beer, F. P., Johnston, R., Mazurek, D. F., & Eisenberg, E. R. (2010). *Mecánica Vectorial para ingenieros, Estática* (9th ed., Vol. 1). Mcgraw-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.A Subsidiary of the mcgraw-hillcompanies, Inc.
- Calderon, C., & Ramirez, E. (2019). *Prototipo de modelo estructural de armadura tipo Warren para el laboratorio de estructuras* [Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero civil]. Universidad Antonio Nariño.
- Di Lorenzo, G., Terracciano, G., Formisano, A., & Landolfo, R. (2023). Experimental investigations on innovative built-up lattice steel beams. *Thin-Walled Structures*, 188, 110780. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110780>
- Enríquez, D. (2014). *Reforzamiento estructural para forjados de madera en edificaciones patrimoniales y contemporáneas*. Universidad de Cuenca.
- Farhadi, S., Kafiki, D., & Ziandloo, S. (2020). Review of Aluminum Foam Applications in Architecture. *European Journal of Engineering Science and Technology*, 1.
- Hibbeler, R. C. (2010). *Ingeniería Mecánica, Estática* (12th ed.). Pearson Educación.
- Malagón, D. (2018). *Cerchas y celosías razón de ser y desarrollo de software* [Trabajo de fin de grado]. Universidad de Granada.
- Marmolejo, C. (2014). *Manual de diseño de estructuras de aluminio*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Muñoz, E., Núñez, F., & Otalora, C. (2007). Prototipo didáctico para la enseñanza de la Ingeniería estructural. *Ingeniería. Revista de La Universidad de Costa Rica*, 17(1409–2441), 99–111.
- Obst, M., Wasilewicz, P., & Adamiec, J. (2022). Experimental investigation of four-point bending of thin-walled open section steel beam loaded and set in the shear center. *Scientific Reports*, 12(1), 7275. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10035-z>

- Rico, A., & Suaza, M. (2019). *Implementación de modelo estructural de un puente a escala para ensayos no destructivos en el laboratorio* [Trabajo de grado para obtener el título de ingeniero civil]. Universidad Piloto de Colombia.
- Rodríguez, C., & Vergara, E. (2008). Propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus canariensis* crecido en el secano de la Región del Maule, Chile. *Bosque*, 29.
- Tique, D. (2016). Diseño de estructuras en madera según la NSR10. *Universidad Santo Tomas*.
- Youngquist, J. A. (1986). *Wood-based Composites and Panel Products*.