

Vibration Analysis in Heritage Wooden Mezzanines.
Análisis de vibración en entresijos patrimoniales de madera.

Autores:

Donoso-Gómez, Andrés
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Posgradista, de maestría de Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Sismorresistentes
Cuenca-Ecuador



andres.donoso.55@est.ucacue.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0002-0242-3205>

Maldonado-Noboa, Juan
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Docente Tutor del área
Cuenca-Ecuador



jmaldonado@ucacue.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0001-5329-2201>

Maldonado-Noboa, Cesar
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Docente Tutor del área
Cuenca-Ecuador



cmaldonadon@ucacue.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0003-0383-5460>

Citación/como citar este artículo: Donoso-Gómez, Andrés, Maldonado-Noboa, Juan, y Maldonado Noboa, Cesar. (2023).
Análisis de vibración en entresijos patrimoniales de madera.
MQRInvestigar, 7(3), 4106-4133.

<https://doi.org/10.56048/MQR20225.7.3.2023.4106-4133>

Fechas de recepción: 10-AGO-2023 aceptación: 15-SEP-2023 publicación: 15-SEP-2023



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>

<http://mqrinvestigar.com/>

Resumen

Este estudio riguroso se centró en el análisis de la salud estructural de la ex unidad educativa Febres Cordero de la ciudad de Cuenca, particularmente en el entrepiso de madera del auditorio situado en el bloque patrimonial. Se identificaron patologías significativas, incluyendo polillas, pudrición, y daños estructurales, subrayando una necesidad crítica de intervención. Se llevaron a cabo pruebas de compresión y flexión, revelando una disminución considerable en la capacidad de la madera patrimonial en comparación con una madera nueva: 39.394% en compresión, 2.74% en flexión, y 79.535% en los módulos de elasticidad. Además, un análisis vibratorio y de deflexiones demostró que la estructura estaba sometida a un desgaste considerable. Como respuesta a estos retos, se propuso un refuerzo integral utilizando elementos de acero de secciones C 150x50x4mm y tubos de 50x50x3mm. Esta estrategia de refuerzo tiene como objetivo reducir la vibración y la deflexión del entrepiso a un estándar recomendado de L/480, proteger y conservar la madera patrimonial, y mejorar la seguridad y durabilidad de la edificación. Se llevó a cabo un análisis de la interacción entre la madera y el acero, optimizando la distribución de esfuerzos para proteger la madera. Este estudio destaca la importancia de las intervenciones de conservación y rehabilitación en las estructuras patrimoniales, enfocándose no solo en la preservación de estos edificios para las generaciones futuras, sino también en asegurar su estabilidad y seguridad.

Palabras clave: Madera, Acero, Estado Actual, Vibración ambiental, Restauración, Análisis.

Abstract

This rigorous study focused on the structural health analysis of the former Febres Cordero educational unit, particularly the wooden mezzanine in the auditorium located in the heritage block. Significant pathologies were identified, including woodworm, rot, and structural damage, underlining a critical need for intervention. Compression and bending tests were carried out, revealing a substantial decrease in the capacity of the heritage wood compared to new wood: 39.394% in compression, 52.74% in bending, and 79.535% in elasticity modules. In addition, a vibratory and deflection analysis showed that the structure was undergoing considerable wear.

In response to these challenges, an integral reinforcement using steel elements of sections C 150x50x4mm and tubes of 50x50x3mm was proposed. This reinforcement strategy aims to reduce the vibration and deflection of the mezzanine to a recommended standard of L/480, protect and preserve the heritage wood, and improve the safety and durability of the building. An analysis of the interaction between the wood and steel was carried out, optimizing the distribution of stresses to protect the wood.

This study highlights the importance of conservation and rehabilitation interventions in heritage structures, focusing not only on the preservation of these buildings for future generations, but also on ensuring their stability and safety.

Keywords: Wood, Steel, Current State, Environmental Vibration, Restoration, Analysis.

Introducción

El presente trabajo enfoca su atención en la evaluación de la vibración del entrepiso de la ex unidad educativa Febres Cordero, un importante bloque patrimonial que alberga una rica historia educativa y cultural. Ante la evidencia de degradación y potenciales problemas estructurales, se llevó a cabo un exhaustivo análisis empleando técnicas de ensayos no destructivos, lo que permitió obtener un diagnóstico completo y preciso sin comprometer la integridad de la estructura.

Además, se realizó un levantamiento fotográfico de patologías, un método eficaz para documentar y analizar la evolución de las distintas anomalías y deterioros encontrados en el edificio. Este enfoque visual permitió identificar y documentar grietas, desprendimientos, humedades y otros signos de degradación, permitiendo un seguimiento detallado y un estudio comparativo a lo largo del tiempo.

También se llevaron a cabo pruebas específicas en la madera del entrepiso, dada su importancia estructural en el bloque C, que alberga el auditorio. Estas pruebas incluyeron la evaluación de la resistencia, la densidad, la humedad y otros parámetros físico-mecánicos, permitiendo evaluar la capacidad de carga y resistencia del material (Lara & Bustamante, 2022a).

Tras este meticuloso análisis, la intención es proponer un plan de refuerzo integral para la ex unidad educativa Febres Cordero. Este plan busca disminuir la vibración y la flecha del entrepiso del auditorio, mejorando su rendimiento y asegurando la seguridad de los usuarios. Este informe servirá como una valiosa guía en la toma de decisiones futuras sobre intervenciones de restauración y refuerzo, y en la conservación de este valioso bloque patrimonial.

Justificación

La justificación de este estudio radica en la necesidad imperante de intervenir la ex unidad educativa Febres Cordero, una estructura de significativa importancia patrimonial que, lamentablemente, ha estado largos períodos sin una adecuada intervención de mantenimiento y refuerzo. Esta situación ha llevado a la aparición y progresión de distintos problemas que amenazan tanto su integridad estructural como su valor histórico.

Un punto particularmente crítico es la condición de las maderas que conforman el entrepiso del auditorio. Los exámenes realizados han revelado la presencia de polillas, hongos y una acumulación general de suciedad. Estas condiciones son perjudiciales para la madera, dado que los insectos y los hongos pueden degradar el material, disminuyendo su resistencia y durabilidad, mientras que la acumulación de suciedad puede atraer más insectos y hongos, exacerbando aún más el problema (Broto, 2016).

Además, la falta de intervención ha dado lugar a la aparición de problemas estructurales como la vibración y la flecha del entrepiso, lo que podría llevar a fallos estructurales con el tiempo. Estos problemas no sólo plantean riesgos para la seguridad de los usuarios del edificio, sino que también pueden causar daños irreparables en la estructura, comprometiendo su valor y utilidad a largo plazo.



Ilustración 1 Estado actual de la viga de entrepiso

Por lo tanto, este trabajo es esencial no sólo para abordar los problemas existentes y evitar futuros daños, sino también para preservar el valor patrimonial de la ex unidad educativa Febres Cordero. La realización de este estudio proporcionará una base sólida para la implementación de medidas correctivas y preventivas, lo que permitirá asegurar la longevidad y la funcionalidad de este valioso edificio.

NIVEL LOCAL

Iglesia de la Compañía de Jesús (Quito): Este monumento barroco, que es una joya arquitectónica de Quito, ha experimentado una serie de restauraciones a lo largo de los años. Se puede especular que, dado su antiguo método de construcción, la estructura haya enfrentado problemas no solo en los entresijos, sino también en la mampostería y en las fachadas, que son intrincadamente diseñadas con detalles ornamentales y podrían haber sufrido desgaste y daño a lo largo del tiempo debido a factores ambientales y vibraciones inducidas por tráfico y otras actividades humanas. La conservación del patrimonio implica un examen cuidadoso de estos aspectos para mantener la estabilidad y la belleza de la estructura. (Aulestia, 2010)

Teatro Sucre (Quito): Este histórico teatro ha sido un centro vital de cultura y arte desde 1887. A lo largo de su extensa vida, no sería sorprendente que la estructura haya encontrado desafíos relacionados con la integridad de sus entresijos, la durabilidad de la mampostería y el estado de sus fachadas, las cuales están expuestas a los elementos y a la contaminación urbana. Los procesos de renovación habrían tenido que abordar cualquier deterioro para asegurar que el edificio no solo sea seguro para su uso, sino que también mantenga su estética histórica. (Vaca, 2020)

Las Casas del Centro Histórico de Cuenca: Las viviendas patrimoniales en el centro histórico de Cuenca se caracterizan por su antigüedad y su construcción tradicional. Esto podría significar que los entresijos de madera están en riesgo de desgaste y deterioro, así como las paredes de mampostería que podrían haber sufrido debido a la humedad y otros factores ambientales. Las fachadas de estas casas, algunas de las cuales datan de muchos siglos atrás, podrían mostrar signos de erosión y requerir restauración para preservar la rica historia que representan. (Cordero & Pauta, 2020)

El Palacio de Carondelet (Quito): La sede gubernamental de Ecuador ha estado de pie por siglos, y es plausible que a lo largo de este tiempo haya enfrentado problemas estructurales significativos, no solo en los entresijos sino también en la mampostería y las fachadas. El constante mantenimiento y renovación sería fundamental para preservar la dignidad y la funcionalidad de este importante edificio. Dada su importancia, sería vital asegurar que todas las partes del edificio estén en buen estado, desde los fundamentos hasta las fachadas más altas. (Díaz, 2021)

NIVEL REGIONAL

Palacio de los López (Paraguay): Este palacio, que sirve como la sede del gobierno paraguayo, es una estructura histórica que ha pasado por renovaciones significativas. Dada su antigüedad, no sería sorprendente que haya enfrentado problemas en los entresijos, especialmente en las áreas de madera, así como en la mampostería y las fachadas. Los trabajos de restauración habrían tenido que lidiar con estos problemas para mantener el

edificio tanto funcional como estéticamente agradable.(Luc, 2009)

Teatro Nacional de Costa Rica: Un icono de San José, este teatro ha sido un epicentro cultural desde el siglo XIX. Es plausible que las restauraciones anteriores hayan tenido que abordar problemas en los entresijos y la mampostería, además de la preservación de las fachadas ricamente detalladas, para asegurar la seguridad y la longevidad del edificio.(Alpizar & Valverde, 2022)

Palacio de las Aguas Corrientes (Argentina): Este palacio, que en realidad es un edificio de agua, es conocido por su arquitectura detallada. Dada su función utilitaria original, habría una necesidad constante de mantenimiento y restauración para preservar no solo su funcionalidad, sino también su belleza arquitectónica. Esto podría incluir trabajos en los entresijos, la mampostería y las fachadas para asegurar su estabilidad a largo plazo.(Mendez, 2021)

Palacio de San Francisco (Colombia): Como uno de los edificios históricos de Bogotá, el Palacio de San Francisco probablemente ha enfrentado desafíos relacionados con el envejecimiento de los materiales de construcción. Las restauraciones a lo largo de los años habrían abordado problemas potenciales en los entresijos, así como en la mampostería y las fachadas, para mantener la estructura segura y visualmente impresionante.(Ardila, 2013)

NIVEL GOLABAL

Palacio de Versalles (Francia): Este vasto complejo arquitectónico histórico, que data del siglo XVII, ha sido sometido a múltiples restauraciones y renovaciones a lo largo de los siglos. Dada su antigüedad y el hecho de que contiene numerosas obras de arte y detalles arquitectónicos finos, es muy probable que haya enfrentado, y potencialmente siga enfrentando, desafíos relacionados con el deterioro de los entresijos, así como problemas en la mampostería y las fachadas. La preservación de su estructura y la intrincada decoración artística requiere un monitoreo y mantenimiento continuos para abordar cualquier problema emergente en su estructura física.(Alarcón, 2009)

La Ciudad Prohibida (China): Situada en el corazón de Pekín, la Ciudad Prohibida es uno de los palacios más preservados de China, sirviendo como hogar para emperadores chinos durante casi 500 años. Dado que gran parte de la construcción se basa en madera, los entresijos de las diversas estructuras pueden estar sujetos a problemas relacionados con el envejecimiento, así como con la infestación de insectos. Además, las mamposterías y fachadas, que cuentan con detalles artísticos y culturales valiosos, pueden haber experimentado erosión y otros daños a lo largo del tiempo. Las restauraciones y mantenimientos regulares, centrados en preservar su rica historia y patrimonio, probablemente aborden los problemas estructurales y estéticos para garantizar su durabilidad y resistencia contra los elementos. (Yu, 2020)

Metodología de Investigación

Análisis del estado actual

El levantamiento fotográfico es una herramienta esencial en el análisis de patologías en las estructuras, y en el caso de la ex unidad educativa Febres Cordero, permitió la identificación de varios problemas relevantes. A continuación, se describen detalladamente las patologías identificadas:

- **Polilla:** Las polillas son insectos que pueden causar daños graves a la madera, alimentándose de ella y cavando túneles que debilitan la estructura interna del material. Los signos de infestación por polilla suelen incluir orificios visibles en la superficie de la madera, así como el polvo o las "pelusas" que dejan detrás. En el caso de esta estructura, la polilla se ha identificado como una de las principales amenazas para la integridad de las maderas del entrepiso (Vallejo, 2020)
- **Faltantes:** Esta patología se refiere a piezas de madera que están ausentes o que han sido gravemente dañadas. Los faltantes pueden ser el resultado de una variedad de factores, como el daño por insectos, la pudrición, el desgaste general con el tiempo o incluso daños físicos causados por impactos o alteraciones. Esta ausencia de partes estructurales puede afectar la capacidad de la madera para soportar cargas y mantener su forma (Vallejo, 2020).
- **Suciedad:** La acumulación de suciedad puede tener varios efectos negativos en la madera. No sólo puede atraer más insectos y contribuir a la degradación del material, sino que también puede retener humedad, lo que a su vez puede fomentar el crecimiento de hongos y aumentar el riesgo de pudrición (Vallejo, 2020).
- **Pudrición:** Esta patología se produce cuando la madera está expuesta a la humedad durante largos períodos de tiempo, lo que puede fomentar el crecimiento de hongos que se alimentan del material. La pudrición puede resultar en una madera blanda y descolorida que se descompone fácilmente, comprometiendo seriamente la resistencia estructural de la pieza afectada (Vallejo, 2020).

Cada una de estas patologías presenta su propio conjunto de desafíos y requiere diferentes estrategias de tratamiento. Al identificarlas y documentarlas en el levantamiento fotográfico, se puede planificar y llevar a cabo una intervención eficaz para preservar la estructura de la ex unidad educativa Febres Cordero.



Fotografía 1. En el entrepiso de madera del bloque C tiene una humedad en la base 6%, en humedad intermedio de 13.4%.

En el entrepiso de madera del bloque C de la ex unidad educativa Febres Cordero, se han observado variaciones en el contenido de humedad. En la base, se registró un contenido de humedad del 6%, lo cual es relativamente bajo y sugiere que la madera en esta área ha tenido la oportunidad de secarse adecuadamente. Este contenido de humedad reducido es favorable para la resistencia y durabilidad de la madera, ya que minimiza el riesgo de deterioro por hongos e insectos.

Por otro lado, en las zonas intermedias del entrepiso, se encontró un contenido de humedad del 13.4%. Este nivel es más alto que el de la base, pero sigue estando por debajo del punto de saturación de las fibras. Aunque esta humedad es más alta, aún se encuentra dentro de un rango aceptable para la mayoría de las aplicaciones de construcción, y es poco probable que provoque problemas significativos de estabilidad o durabilidad si se mantiene controlado.

Sin embargo, es importante continuar monitorizando estos niveles de humedad para detectar cualquier aumento que pueda indicar un problema, como una filtración de agua. Los cambios en la humedad también pueden afectar las propiedades físicas y mecánicas de la madera, por lo que es crucial tener en cuenta estos factores al evaluar la vibración del entrepiso.

Módulo de elasticidad de la madera

Los elementos estructurales de madera de la ex unidad educativa Febres Cordero juegan un papel esencial en la estabilidad y resistencia de la edificación. Una de las principales propiedades a considerar en la evaluación de su estado estructural es el módulo de elasticidad. Este parámetro define la relación entre la tensión aplicada a un material y la deformación resultante, siendo un indicador clave de la rigidez de la sección de madera a analizar (NEC, 2015).

El módulo de elasticidad no sólo refleja la capacidad de la madera para resistir cargas sin deformarse excesivamente, sino también su capacidad para recuperar su forma original tras el cese de la carga. Por lo tanto, una comprensión detallada de este factor es crucial para evaluar la vibración de los componentes de madera de la edificación.

Para determinar el valor del módulo de elasticidad de las secciones de madera, nos basamos en la Tabla 6 de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-MD), que clasifica al eucalipto como una madera de tipo B. Esta elección se debe a varias razones. En primer lugar, las características físicas y mecánicas de los elementos estructurales de madera en cuestión muestran una gran similitud con las del eucalipto, tanto en términos de coloración como de la materialidad correspondiente a la época de construcción del edificio. Además, la manera en que la resistencia del eucalipto se deteriora con el tiempo guarda similitud con el comportamiento observado en las piezas estructurales de la ex unidad educativa Febres Cordero. Por tanto, el eucalipto se considera una referencia adecuada para evaluar el comportamiento estructural de estas piezas de madera.

Tabla 1. Módulo de elasticidad para la madera (MPa) (NEC-SE-MD, 2015)

MODULO DE ELASTICIDAD ⁵ (MPa)		
Grupo	$E_{\min} (E_{0.05})$	E_{promedio}
A	9500	13000
B	7500	10000
C	5500	9000

$E_{\text{Eucalipto}} := 10000 \text{ MPa}$

Esfuerzo admisible

Del mismo modo, en el análisis de los componentes de madera de la ex unidad educativa Febres Cordero, se consideró la propiedad de esfuerzo admisible a compresión en dirección paralela a las fibras. Este parámetro, fundamental en el estudio de la resistencia de los materiales, indica la máxima tensión que una sección de madera puede soportar antes de sufrir una deformación permanente o fallo (Lara & Bustamante, 2022b).

Este esfuerzo admisible a compresión se estableció basándose en la Tabla 5 de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-MD) para la madera de tipo B, asumiendo un valor máximo de 11 MPa. Este valor, adecuado para maderas como el eucalipto, proporciona un punto de referencia sólido para evaluar la capacidad de los componentes de madera de la estructura para resistir cargas de compresión sin incurrir en deformaciones perjudiciales.

Este análisis permitirá identificar las áreas de la estructura que pueden estar en riesgo debido a cargas excesivas y proponer intervenciones adecuadas para mejorar su resistencia y estabilidad. Al mantener el esfuerzo de compresión dentro de los límites admisibles, podemos garantizar la seguridad y durabilidad de la ex unidad educativa Febres Cordero.

Tabla 2. Esfuerzos admisibles para la madera (MPa) (NEC-SE-MD).

ESFUERZOS ADMISIBLES ⁴ (MPa)					
Grupo	Flexión	Tracción paralela	Compresión paralela	Compresión perpendicular	Corte paralelo
	f_m	f_t	f_c	$f_{c\perp}$	f_v
A	21	14.5	14.5	4	1.5
B	15	10.5	11	2.8	1.2
C	10	7.5	8	1.5	0.8

$$\sigma_{Compr} := 11 \text{ MPa}$$

Los cálculos y análisis descritos previamente se aplicaron exhaustivamente a todos los componentes de madera de la ex unidad educativa Febres Cordero, que incluyen elementos estructurales tanto del primer como del segundo piso, y las vigas presentes en la planta alta. La minuciosidad de este enfoque asegura que se capture un panorama completo del estado estructural del edificio, considerando cada componente de madera que juega un papel en su estabilidad y resistencia (Jácome & Mora, 2017).

Además, para determinar de manera precisa los parámetros mecánicos de la madera presente en el edificio patrimonial, fue necesario llevar a cabo un análisis comparativo. Este análisis contrastó la madera patrimonial, que ha estado expuesta a los rigores del tiempo y a diversas condiciones ambientales, con la madera nueva, que proporciona una línea base para entender cómo debería comportarse la madera en su estado ideal.

Esta comparativa es vital para entender el grado de deterioro que ha sufrido la madera patrimonial y para planificar las medidas necesarias para su rehabilitación. Por lo tanto, cada elemento de madera fue estudiado tanto individualmente como en el contexto de la estructura en general, permitiendo la creación de un plan de intervención integral que garantice la preservación de la ex unidad educativa Febres Cordero.

Propiedades físicas y mecánicas.

Para profundizar en el análisis de las patologías identificadas en la ex unidad educativa Febres Cordero, se llevó a cabo un levantamiento detallado de la duela, exponiendo el entrepiso que consta de vigas de madera de 14x16 cm con tramos de 8.42 metros de ancho. Este acceso directo a la estructura de madera permitió realizar ensayos a compresión y flexión, con el objetivo de determinar sus propiedades físicas y mecánicas.

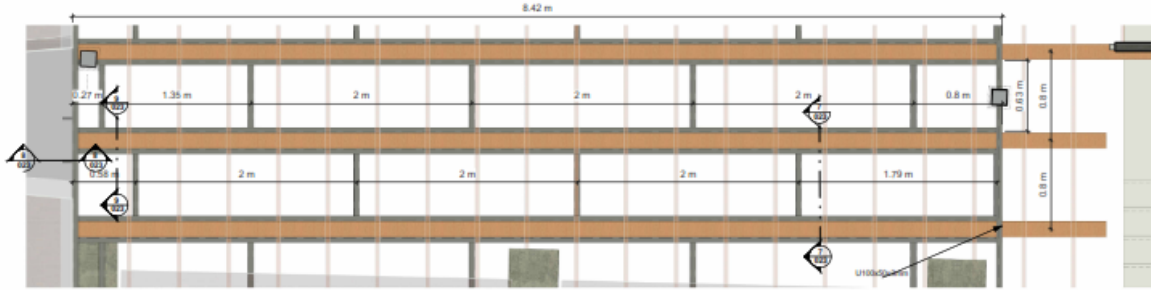


Ilustración 2 Detalle en planta del entrepiso

De los ensayos realizados, se obtuvieron los siguientes resultados: la densidad de la madera es de 686.355 kg/m^3 , su esfuerzo máximo a compresión es de 123.35 kg y su deformación unitaria máxima es de 0.008 . Estos valores son esenciales para entender el estado actual y la capacidad de resistencia de la madera (Lozano, 2022).

Para contextualizar estos resultados, se compararon las curvas obtenidas con las de ensayos realizados a una madera de la misma familia, pero en mejor estado.

La comparación reveló que la madera patrimonial ha sufrido una pérdida considerable de su capacidad original: su resistencia a la compresión ha disminuido en un 39.394% , su resistencia a la flexión en un 52.74% , y los módulos de elasticidad han evidenciado una pérdida del 79.535% .

Estos resultados indican un deterioro significativo de la madera y subrayan la necesidad de un plan de intervención para restaurar la ocupacionalidad del entrepiso de la zona estudiada. Este plan debería apuntar a recuperar la capacidad perdida de la madera a través de refuerzos y tratamientos adecuados, con el fin de garantizar la seguridad y la longevidad de la ex unidad educativa Febres Cordero.

DENSIDAD DE LA MADERA		
Madera del colegio		
$b := 13 \text{ cm}$		
$a := 14 \text{ cm}$		
$h := 30 \text{ cm}$		
$V := b \cdot a \cdot h = 0.005 \text{ m}^3$	$P := 3.7475 \text{ kgf}$	$d := \frac{P}{V} = 686.355 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$
Eucalipto nuevo		
$b := 13 \text{ cm}$	2 m	2.75 m
$a := 14 \text{ cm}$		
$h := 30 \text{ cm}$		
$V := b \cdot a \cdot h = 0.005 \text{ m}^3$	$P := 5.097 \text{ kgf}$	$d := \frac{P}{V} = 933.516 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$
$v := 0.45$	Coeficiente de Poisson	

Figura 1. Densidad de madera.

Ensayo a compresión



Ensayo a flexión



Fotografía 2: Secciones para análisis de propiedades físicas y mecánicas del eucalipto patrimonial y nuevo

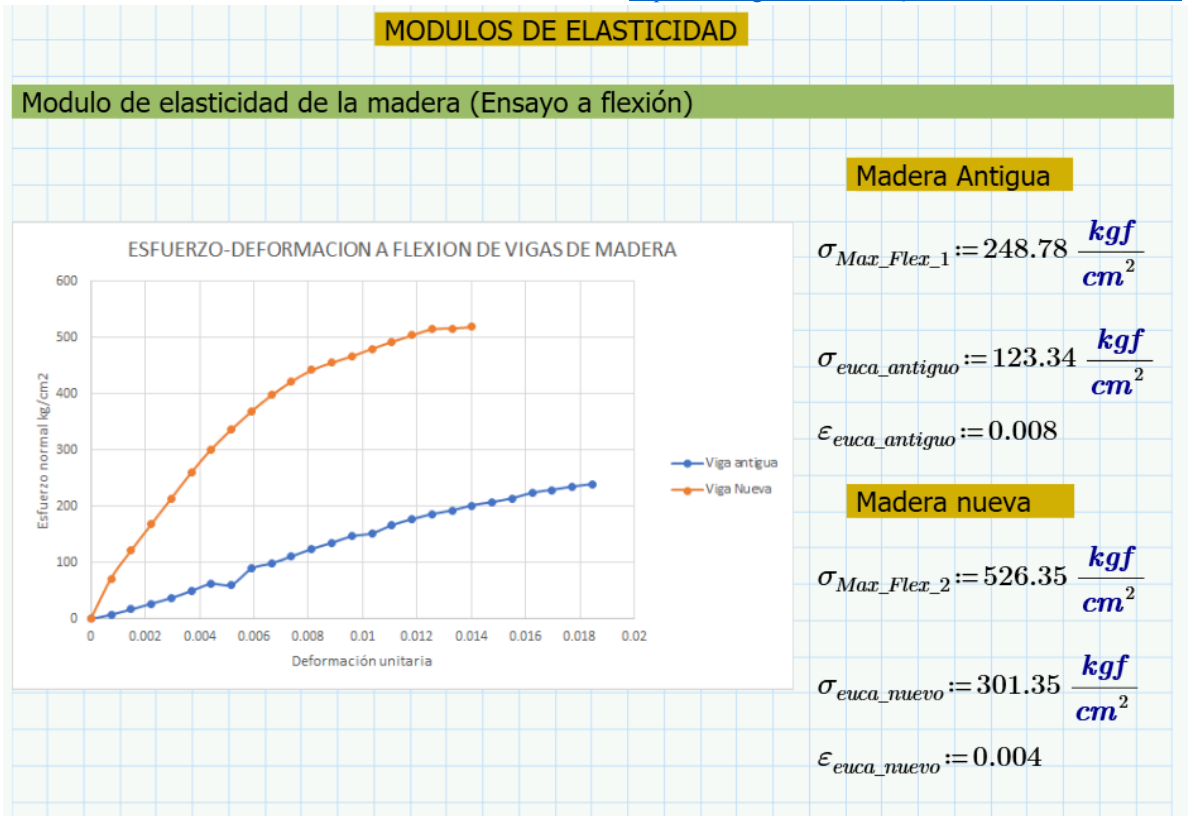


Figura 2. Calculo de módulo de elasticidad de la madera (Ensayo a flexión).

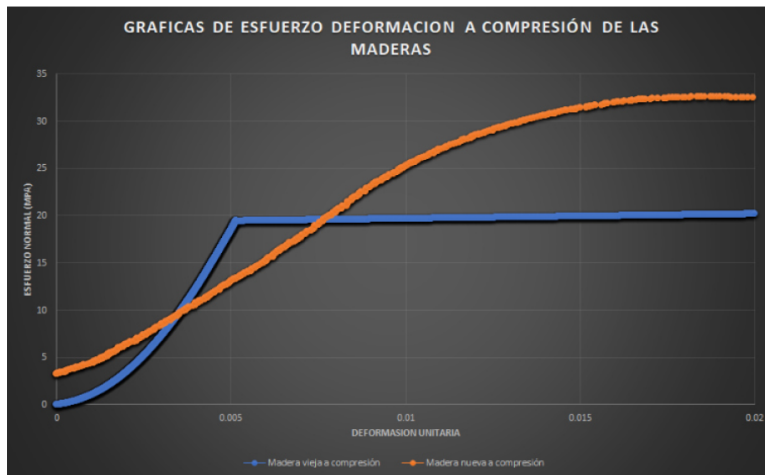


Figura 3. Grafica de esfuerzo-Deformación a compresión de la madera.

RELACIONES DE CAPACIDAD		
Esfuerzos		
$Capacidad_{COMPRESION} := 100 - \frac{\sigma_{Max_Compr_1} \cdot 100}{\sigma_{Max_Compr_2}} = 39.394$		<i>Disminución de capacidad porcentual</i>
$Capacidad_{FLEXION} := 100 - \frac{\sigma_{Max_Flex_1} \cdot 100}{\sigma_{Max_Flex_2}} = 52.735$		<i>Disminución de capacidad porcentual</i>
Módulos de elasticidad		
$Capacidad_{COMPRESION} := 100 - \frac{1728.4 \text{ MPa} \cdot 100}{2662.8 \text{ MPa}} = 35.091$		<i>Disminución de capacidad porcentual</i>
$Capacidad_{FLEXION} := 100 - \frac{15417.5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot 100}{75337.5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}} = 79.535$		<i>Disminución de capacidad porcentual</i>

Figura 4. Relaciones de capacidad de la madera.



Fotografía 3 Exploración 1 en el Auditorio Principal

En la fotografía adjunta, se puede observar con claridad la estructura del entrepiso del bloque C donde se ubica el auditorio del bien patrimonial de la ex unidad educativa Febres Cordero. Este entrepiso consta de robustas vigas de madera con las secciones previamente mencionadas, de 14x16 cm, que actúan como el soporte principal de la estructura.

Estas vigas están dispuestas con tramos de 8.42 metros de ancho, proporcionando una sólida base para el entrepiso. Sobre estas vigas, se colocan alfajías madera, también conocidas como duelas, de 3x5 cm. Las duelas están dispuestas de manera uniforme y unidas para formar la superficie del entrepiso.

El análisis visual de la fotografía permite apreciar la composición y organización de estos elementos estructurales. También brinda una imagen clara del estado actual de la madera,

evidenciando las áreas donde es visible el envejecimiento y los signos de deterioro.

El estudio de estas fotografías, junto con los ensayos físicos y mecánicos realizados, forma una parte integral del diagnóstico de la salud estructural de la ex unidad educativa Febres Cordero y orienta las decisiones sobre las intervenciones necesarias para su restauración.

Análisis de vibración ambiental de la estructura

El análisis de vibraciones y deflexiones es una técnica crucial en la evaluación de la salud estructural de un edificio, y en el caso de la ex unidad educativa Febres Cordero, se realizó utilizando un equipo Raspberry Shake. Este equipo, conocido por su capacidad para detectar y registrar movimientos sutiles, fue instalado en la ubicación estratégica de la mitad del auditorio, en el bloque C.



Fotografía 4 Instalación del equipo Raspberry Shake

Para simular el estado de servicio de la estructura, se llevó a cabo un ensayo con una persona caminando a través del auditorio. Esta actividad replicó las condiciones de carga dinámica típicas que se experimentan durante el uso regular del edificio. Los pasos de la persona generaron vibraciones y deflexiones en la estructura, que fueron registradas por el equipo Raspberry Shake.

El análisis de estos datos proporciona una visión valiosa del comportamiento estructural del edificio bajo condiciones de servicio normales. El equipo Raspberry Shake registró con precisión las vibraciones y deflexiones, permitiendo una evaluación detallada de la respuesta de la estructura a las cargas dinámicas.

Este tipo de ensayos son esenciales para entender el comportamiento de la estructura en condiciones de uso normal y para planificar las intervenciones adecuadas. Al entender cómo reacciona la estructura a estas cargas, se pueden identificar posibles problemas y planificar soluciones eficaces para asegurar la integridad estructural y la seguridad del edificio.

Modelos matemáticos computacionales para determinar la mejor solución de refuerzo

Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de la estructura actual utilizando modelos

computacionales. Este análisis fue clave para entender cómo se podría mejorar la integridad estructural de la ex unidad educativa Febres Cordero.

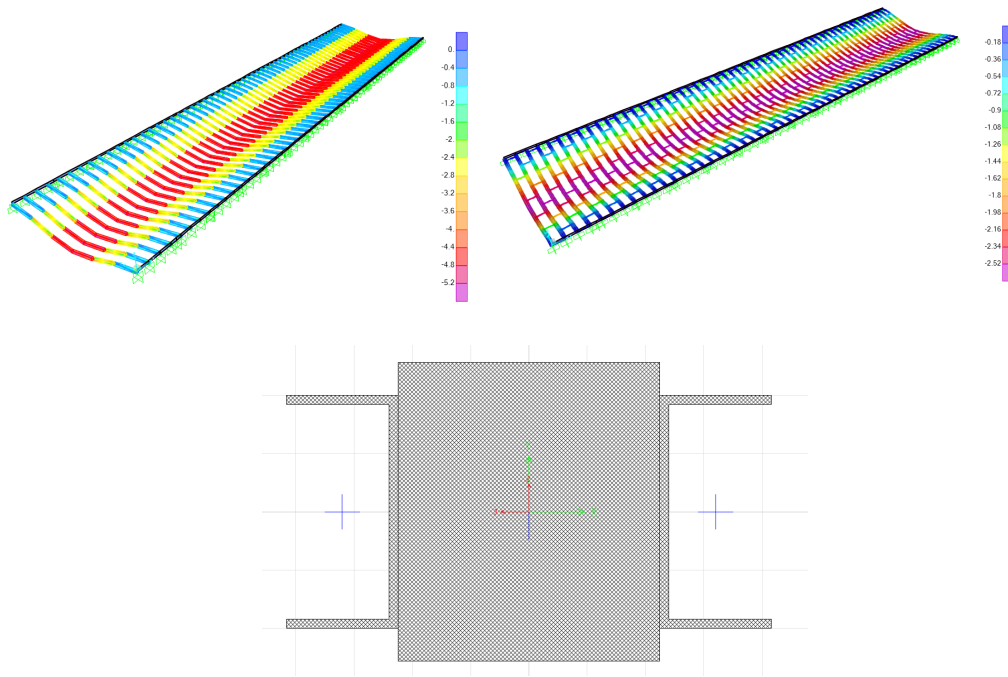


Ilustración 3 modelo actual y propuesta de reforzamiento

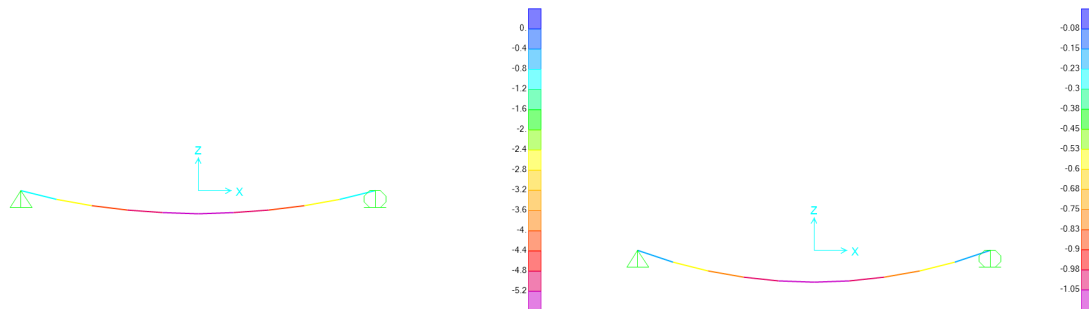


Ilustración 4 Viga más desfavorable de la estructura sin refuerzo y con refuerzo

En el software de análisis estructural SAP2000, se modeló la estructura del entrepiso con elementos de acero C (150x50x4mm) conformados en frío, de grado A36. Se realizó un proceso iterativo para ajustar el modelo hasta que la deflexión y vibración del entrepiso cumplieran con la recomendación estándar de $L/480$, que es un criterio aceptado en la ingeniería estructural para garantizar la comodidad y seguridad de los ocupantes.

Además de esto, se introdujeron rigidizadores laterales de acero en el modelo. Estos elementos añaden rigidez a la estructura y permiten que todas las vigas de madera trabajen en conjunto, distribuyendo eficazmente las cargas a lo largo de la estructura.

Para el análisis de la interacción entre las vigas de madera y los refuerzos de acero, se utilizó el programa Abaqus. Este software de simulación por elementos finitos permitió modelar con precisión esta interacción y optimizar las secciones de acero para el refuerzo.

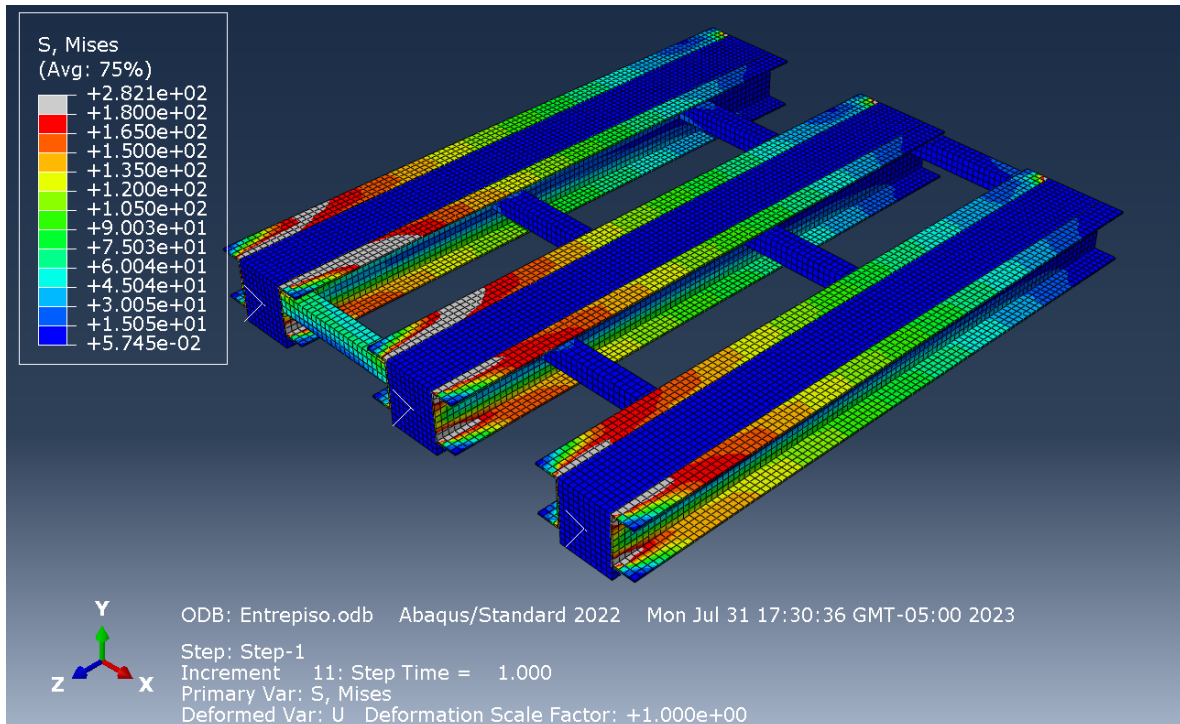


Ilustración 5 Modelo Abaqus interacción entre las secciones de acero y madera

La utilización de estas herramientas computacionales permitió una evaluación detallada de las posibles soluciones para reforzar la estructura de la ex unidad educativa Febres Cordero, proporcionando la información necesaria para seleccionar la opción más eficiente y efectiva. Estos análisis basados en modelos computacionales representan un paso crucial en la propuesta de un plan de refuerzo integral para la estructura de la ex unidad educativa Febres Cordero.

Resultados

Vibración ambiental

Al analizar los datos de aceleración obtenidos del bien patrimonial utilizando un geófono de 4 Hz, se ha registrado una aceleración máxima de 15.21 m/s². Estos hallazgos son de suma importancia para evaluar la respuesta estructural y la seguridad de las infraestructuras de madera frente a eventos sísmicos. Al comprender la aceleración máxima experimentada por el entrepiso, es posible mejorar el diseño, la construcción y las medidas de mitigación sísmica, asegurando así la integridad y resistencia de estas estructuras ante terremotos y vibraciones sísmicas. El monitoreo sísmico con la ayuda de tecnologías como el geófono de 4 Hz proporciona información valiosa para avanzar en la ingeniería sísmica y garantizar la protección de las infraestructuras críticas.

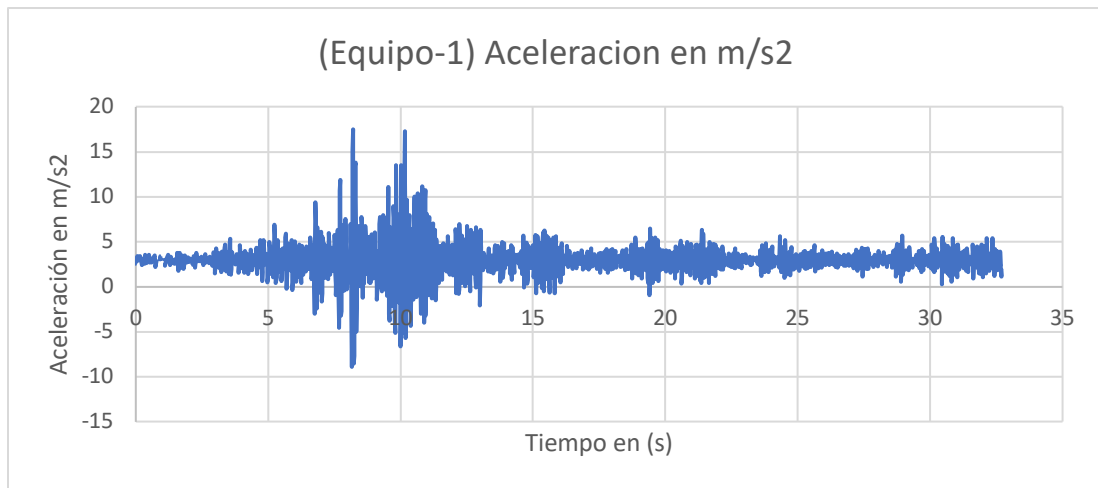


Ilustración 6 Gráficas aceleración desplazamiento

La aplicación del programa para análisis de señales para analizar los datos de aceleración aportó resultados de gran relevancia para nuestra investigación. A través de esta herramienta, se registró una aceleración máxima de 15.21 m/s^2 , lo que nos da una idea clara de la intensidad de las fuerzas sísmicas experimentadas en la ubicación específica del estudio, en este caso, el auditorio del bloque C de la ex unidad educativa Febres Cordero.

Adicionalmente, se identificó un desplazamiento máximo de 8.2 cm. Este valor refleja la magnitud de los movimientos del entrepiso que se produjeron durante la simulación de una persona caminando en el vano más desfavorable. Tal información es vital para entender cómo la estructura puede responder en el caso de un estado de servicio recomendado por las diferentes normativas.

El uso de SeismoSignal para el análisis de datos de aceleración es un componente fundamental en el proceso de evaluación de la resistencia sísmica de las estructuras. Los hallazgos obtenidos nos permiten entender mejor las vulnerabilidades estructurales existentes y así tomar decisiones informadas sobre los requerimientos de refuerzo necesarios para garantizar la seguridad y la integridad de la estructura en caso de un evento sísmico.

Modelos matemáticos computacionales

Tras la realización de los análisis con modelos computacionales, se logró un diseño de refuerzo eficaz que cumplió con las expectativas y parámetros establecidos. Este diseño implicó el uso de elementos de acero conformados en frío de sección C, con dimensiones de $120 \times 60 \times 4 \text{ mm}$, y tubos de acero de $50 \times 50 \times 3 \text{ mm}$.

El refuerzo propuesto logró reducir la deflexión a 1.32 cm, cumpliendo así con los criterios de desempeño requeridos. Esta deflexión se encuentra dentro del rango aceptable de $L/480$, que es un criterio estándar en la ingeniería estructural para garantizar la comodidad y seguridad de los ocupantes del edificio.

Además de la reducción en deflexión, el refuerzo también condujo a una disminución significativa de las vibraciones en la estructura. Este resultado es fundamental, ya que las vibraciones excesivas pueden comprometer la integridad estructural del edificio y afectar la comodidad de sus ocupantes.

Estos hallazgos respaldan la eficacia de las soluciones de refuerzo propuestas. El uso de elementos de acero en las dimensiones especificadas, junto con la adecuada implementación de estas medidas de refuerzo, promete mejorar considerablemente la salud estructural y la seguridad de la ex unidad educativa Febres Cordero.

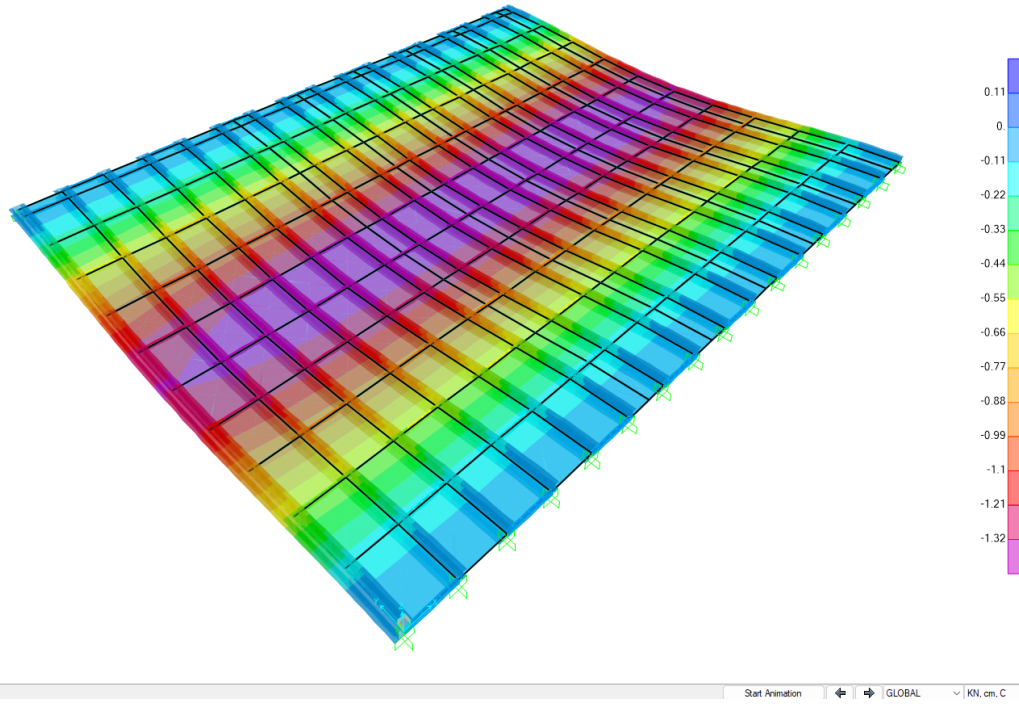


Ilustración 7 Deflexión iterada con la esbeltes de los aceros

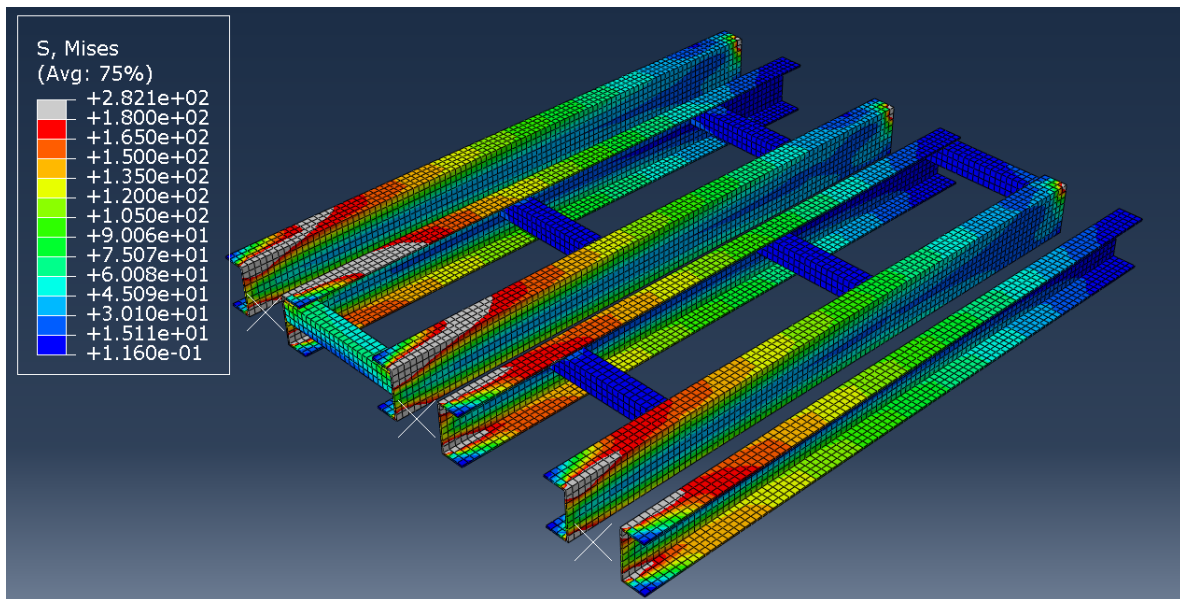


Ilustración 8 Esfuerzos del acero

La imagen presentada ilustra de manera efectiva cómo la interacción entre el acero y la madera en la estructura reforzada funciona de manera óptima. Podemos apreciar que la mayoría de los esfuerzos se concentran en las secciones de acero, dejando a la madera relativamente libre de cargas adicionales. Esta distribución de esfuerzos es precisamente lo que se busca en un diseño de refuerzo como este.

El objetivo es utilizar las propiedades de resistencia del acero para soportar la mayor parte de las cargas, protegiendo así a la madera patrimonial de esfuerzos adicionales que podrían deteriorarla aún más. Al hacer esto, se preserva la integridad de la estructura original mientras se mejora su resistencia y durabilidad.

En esta solución, el acero no solo proporciona un refuerzo estructural, sino que también juega un papel clave en la preservación del patrimonio. Al absorber la mayor parte de los esfuerzos, el acero permite que la madera original de la estructura continúe desempeñando su función sin estar sometida a tensiones perjudiciales. Así, la estructura reforzada mejora la seguridad y durabilidad del edificio, al tiempo que preserva la autenticidad de su diseño original.

Recomendaciones

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente expuesto, se recomienda seguir los siguientes pasos para la intervención de la ex unidad educativa Febres Cordero:

- **Limpieza Profunda:** La suciedad acumulada puede ocultar daños y contribuir a la degradación de los materiales, por lo tanto, es importante llevar a cabo una limpieza profunda de la estructura antes de cualquier otro procedimiento. Esta limpieza deberá ser realizada por profesionales para evitar dañar los elementos históricos de la estructura.
- **Tratamiento de la Madera:** Es fundamental tratar todas las áreas de la estructura de madera que presentan signos de pudrición, polilla y hongos. Para ello, se deben aplicar fungicidas, insecticidas y otros productos químicos diseñados para detener y prevenir estos problemas. Una vez tratada la madera, se deben realizar trabajos de reparación y restauración según sea necesario.
- **Implementación del Refuerzo:** Los resultados de los análisis estructurales indican la necesidad de un refuerzo integral de la estructura con elementos de acero conformados en frío. Según los modelos computacionales, se deben utilizar elementos de sección C de 120x60x4 mm y tubos de 50x50x3 mm. La implementación de este refuerzo deberá ser llevada a cabo por profesionales experimentados para garantizar la correcta instalación y eficacia del refuerzo.
- **Seguimiento y Mantenimiento:** Tras la intervención, es crucial mantener un seguimiento regular de la estructura para detectar cualquier posible problema futuro a tiempo. Asimismo, se deben llevar a cabo tareas de mantenimiento preventivo para preservar la ocupación de la estructura.
- **Documentación y Comunicación:** Todo el proceso de intervención y las decisiones tomadas durante este deben ser documentados con precisión. Esta información será invaluable para futuras intervenciones y para el patrimonio histórico de la ex unidad educativa Febres Cordero.

Al seguir estas recomendaciones, se asegurará que la intervención de la estructura se realice de manera efectiva, salvaguardando la integridad de la edificación y su valor histórico.

Discusión

La intervención de la ex unidad educativa Febres Cordero en su auditorio ubicado en el bloque C ha sido un proyecto exhaustivo y significativo. La estructura, que ha permanecido durante mucho tiempo sin intervención, presentó una serie de desafíos que requirieron un análisis minucioso y cuidadoso.

En primer lugar, el levantamiento fotográfico y los ensayos no destructivos, junto con el análisis físico y mecánico de la madera, permitieron identificar una serie de patologías y condiciones de deterioro. La existencia de polilla, faltantes, suciedad, y pudrición reflejan el grado de deterioro de la estructura de madera, y reiteran la necesidad de una intervención inmediata y cuidadosa.

El análisis de la madera mostró una significativa disminución en las propiedades físicas y mecánicas de la madera patrimonial, con un 39.394% de capacidad a compresión perdida, un 52.74% a flexión, y una disminución del 79.535% en los módulos de elasticidad. Esto refleja el impacto del tiempo y la falta de mantenimiento en la madera.

Además, el análisis de vibraciones y deflexiones realizado con el equipo Raspberry Shake mostró que la estructura está sujeta a movimientos y vibraciones significativas con una deflexión de 8.2cm, lo cual también puede contribuir a su deterioro a largo plazo.

Los modelos computacionales fueron vitales para proponer soluciones de refuerzo eficaces. A través de varias iteraciones, se llegó a una solución que involucra el uso de elementos de acero conformados en frío. Este refuerzo logró una deflexión de 1.32 cm y una reducción significativa de las vibraciones.

Finalmente, el análisis de interacción entre la madera y el acero mostró que el refuerzo propuesto puede proteger de manera efectiva la estructura de madera original al absorber la mayor parte de los esfuerzos.

Conclusiones

- El estudio realizado sobre entrepisos patrimoniales de madera ha llevado a varias conclusiones críticas y útiles para la preservación y renovación de estos elementos estructurales. El análisis detallado reveló un deterioro significativo de la estructura de madera, con una pérdida substancial en la capacidad a compresión y a flexión, así como en los módulos de elasticidad. Este desgaste considerable enfatiza la necesidad de una intervención urgente y bien fundamentada.
- Además, la evaluación de la vibración y la deflexión de la estructura subrayó la importancia de llevar a cabo refuerzos significativos para asegurar la estabilidad y la seguridad de la construcción. Estas conclusiones fueron respaldadas por el uso de modelado computacional que validó la eficacia de los refuerzos propuestos. Se demostró que los elementos de acero conformados en frío, junto con la adición de rigidez lateral, pueden reducir considerablemente la deflexión y las vibraciones.
- Significativamente, la interacción entre la madera y el acero fue analizada en profundidad, resultando en un diseño de refuerzo que protege de manera efectiva la madera patrimonial. El refuerzo de acero propuesto absorbe la mayor parte de los esfuerzos, evitando así tensiones adicionales en la estructura de madera ya debilitada.
- El análisis detallado también nos lleva a considerar la interacción entre la deflexión de la estructura, los esfuerzos admisibles y las capacidades de los elementos de madera. La pérdida de capacidad es una señal clara del grado de deterioro experimentado por los elementos de madera. La significativa pérdida de peso en la madera patrimonial, evidenciada por la disminución de 247.16kg por metro cúbico, apunta a una reducción considerable en su capacidad estructural.
- Además, las deflexiones registradas en la estructura sobrepasan los límites permisibles recomendados (1.75cm máximo), lo que sugiere una debilidad estructural inherente que debe ser abordada. Las simulaciones realizadas indican que las propuestas de refuerzo son capaces de reducir estas deflexiones a 1.32 cm, dentro del límite recomendado de $L/480$, garantizando así la seguridad y la durabilidad de la estructura.
- En cuanto a los esfuerzos admisibles, los resultados del análisis de la madera patrimonial sugieren una disminución considerable en comparación con una madera nueva de la misma familia. Sin embargo, los modelos computacionales demuestran que la adición de elementos de acero puede transferir la mayoría de estos esfuerzos a las secciones de acero, protegiendo la madera de tensiones adicionales.
- El estudio de entrepisos patrimoniales de madera afectados por las patologías descritas como polillas, pudrición, suciedad, y elementos faltantes ha demostrado una

disminución considerable en la capacidad de la madera patrimonial en comparación con la madera nueva de la misma familia. Con una pérdida de hasta un 39.394% en capacidad de compresión, un 52.74% en flexión, y un impresionante 79.535% en módulos de elasticidad, la estructura existente ha sufrido una reducción significativa en su resistencia y durabilidad.

Referencias bibliográficas

- Alarcón, C. A. (2009). El Proyecto Francés : la Francia del siglo XVII y el surgimiento del análisis económico. *Atenea*, 6, 81–93.
<http://publicaciones.udemm.edu.ar/index.php/atenea/article/view/196>
- Alpízar, M. D., & Valverde, D. (2022). Análisis de la gestión estratégica del Teatro Nacional de Costa Rica, 2019. <https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/24054>
- Ardila, Y. (2013). Estudios, diseños y rehabilitación parcial del Palacio de San Francisco Departamento de Cundinamarca. Instname:Universidad Piloto de Colombia.
<http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/8548>
- Aulestia, C. A. (2010). Estudio del estado acústico de dos iglesias patrimoniales de Quito (La Catedral y la Compañía de Jesús). <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/2668>
- Broto. (2016). Enciclopedia Broto de Patologías de la Construcción.
https://higieneyseguridadlaboralcv.s.files.wordpress.com/2012/07/enciclopedia_broto_de_patologias_de_la_construccion.pdf
- Cordero, F., & Pauta, F. (2020). Un problema habitacional en Cuenca: Una reflexión sobre el centro histórico. <http://repositorio.flacsoandes.edu.ec/handle/10469/9976>
- Díaz, C. (2021). reapropiación del espacio público en la comunicación política de Rafael Correa. La Plaza de la Independencia y el Palacio de Carondelet (2007-2016). Tesis Dialnet.Unirioja.Es, 19–118.
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7298363.pdf>
- Jácome, P., & Mora, M. (2017). Determinación de las técnicas de reforzamiento para mejorar el desempeño estructural de un edificio mixto.
<https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/20275>
- Lara, L., & Bustamante, R. (2022a). Characterization and Pathology of Earthen Building Walls in the Ecuadorian Andean Area. *Revista Politecnica*, 49(2), 37–46.
<https://doi.org/10.33333/rp.vol49n2.04>
- Lara, L., & Bustamante, R. (2022b). Characterization and Pathology of Earthen Building Walls in the Ecuadorian Andean Area. *Revista Politecnica*, 49(2), 37–46.
<https://doi.org/10.33333/RP.VOL49N2.04>
- Lozano, D. M. (2022). Propuesta de rehabilitación estructural de una edificación patrimonial de madera, ubicada en la parroquia Esmeraldas, cantón Esmeraldas, provincia Esmeraldas, en el año 2021.
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22190>

- Luc, C. (2009). « El recuerdo de la Guerra de la Triple Alianza como sustrato de la identidad paraguaya », dans. <http://nuevomundo.revues.org/index48902.html>.
- Mendez, P. (2021). EL PALACIO DE LAS AGUAS: DE TANQUE A MUSEO.
- NEC. (2015). Guía práctica para el diseño de de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/04/GUIA-4-MADERA.pdf>
- Vaca, D. (2020). Análisis y evaluación de patologías presentes en la estructura del Teatro Nacional Sucre del DM de Quito.
<http://repositorio.puce.edu.ec:80/handle/22000/18053>
- Vallejo, G. G. (2020). Rehabilitación interior de la casa patrimonial del Vicariato Apostólico del Napo como museo Teológico.
<https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/31420>
- Yu, D. (2020). Análisis y estrategia de marca de La Ciudad Prohibida.
<https://uvadoc.uva.es/handle/10324/42176>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.