

42

EVALUACIÓN DIAGNÓSTICA DE LA RESISTENCIA RESIDUAL DEL ENTREPISO EN LA EDIFICACIÓN PATRIMONIAL DE LA UNIDAD EDUCATIVA PEDRO VICENTE MALDONADO

DIAGNOSTIC EVALUATION OF THE RESIDUAL STRENGTH OF THE MEZANINE IN THE PEDRO VICENTE MALDONADO EDUCATIONAL UNIT HERITAGE BUILDING

Santiago David Gavilanes Fiallos¹

E-mail: santiago.gavilanes.60@est.ucacue.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4332-0453>

Juan Maldonado Noboa¹

E-mail: jmaldonadon@ucacue.edu.ec

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

Santiago Arturo Moscoso Bernal¹

E-mail: smoscoso@ucacue.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7647-1111>

*Autor para correspondencia

¹ Universidad Católica de Cuenca. Ecuador.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Gavilanes Fiallos, S. D., Maldonado Noboa, J., y Moscoso Bernal, S. A., (2024). Evaluación diagnóstica de la resistencia residual del entrepiso en la edificación patrimonial de la Unidad Educativa Pedro Vicente Maldonado. *Revista Conrado*, 20(99), 409-423.

RESUMEN

La evaluación mediante ensayos de vibración y refuerzo estructural en la Unidad Educativa Pedro Vicente Maldonado ha resultado en mejoras significativas de la respuesta dinámica del entrepiso. Originalmente, la estructura presentaba desplazamientos máximos considerables, con valores de hasta 12 cm bajo cargas de impacto como saltos. La aceleración máxima registrada fue de 20 m/s² en estas condiciones. Tras la implementación de un sistema de refuerzo que incluyó el uso de perfiles de acero en forma de caja, se observó una reducción en la aceleración a 5.6 m/s² y el desplazamiento a 1.4 cm, evidenciando un decremento del 72% y 88.3% respectivamente. Estos resultados no solo están en conformidad con los límites establecidos por las normativas actuales de la NEC, sino que también proporcionan una mejora notable en términos de seguridad y funcionalidad del entrepiso. El estudio enfatiza la eficacia de las intervenciones de refuerzo estructural, crucial para la preservación de edificaciones con valor histórico y cultural.

Palabras clave:

Acero, estado actual, vibración ambiental, restauración, análisis.

ABSTRACT

The vibration testing and structural reinforcement evaluation at the Pedro Vicente Maldonado Educational Unit resulted in significant improvements in the dynamic response of the intermediate floor. Initially, the structure exhibited considerable maximum displacements, with values up to 12 cm under impact loads such as jumps. The maximum acceleration recorded was 20 m/s² under these conditions. After implementing a reinforcement system that included the use of steel box profiles, a reduction in acceleration to 5.6 m/s² and displacement to 1.4 cm was observed, indicating a decrease of 72% and 88.3%, respectively. These results not only comply with the limits established by current NEC standards but also provide a notable improvement in terms of safety and functionality of the intermediate floor. The study emphasizes the effectiveness of structural reinforcement interventions, which are crucial for the preservation of buildings with historical and cultural value.

Keywords:

Steel, current state, environmental vibration, restoration, analysis.

INTRODUCCIÓN

La Unidad Educativa Pedro Vicente Maldonado, situada en el núcleo de nuestra comunidad, representa mucho más que un conjunto de aulas y pasillos. Este emblemático edificio es un símbolo de la educación y cultura que se ha transmitido a lo largo de generaciones. Su estructura, que ha resistido el paso del tiempo, es testigo de un legado que debemos proteger para el futuro.

Recientemente, observamos signos de desgaste en el edificio, lo que nos motivó a realizar una evaluación detallada de su condición estructural. Este análisis no se limitó a una inspección técnica; lo consideramos una misión crucial para preservar la seguridad y el legado del edificio.

Para este fin, empleamos métodos de ensayo no destructivos, respetando la integridad del edificio mientras identificamos posibles problemas. Una parte fundamental de nuestra investigación incluyó la fotografía detallada de la estructura, documentando visualmente las variadas irregularidades y daños. Estas imágenes no solo proporcionan un registro actual, sino que también servirán como referencia futura para monitorear los cambios en el edificio.

El auditorio de la unidad educativa merece una mención especial. Construido sobre cimientos históricos y simbólicos, incluye vigas fabricadas a partir de antiguos rieles de tren, que reflejan la era de la revolución industrial. El suelo de arena en el auditorio no es solo un detalle decorativo, sino que también conecta a las personas con la naturaleza y la historia del lugar. Este espacio no es solo un centro para eventos, sino una experiencia viva de arte y aprendizaje.

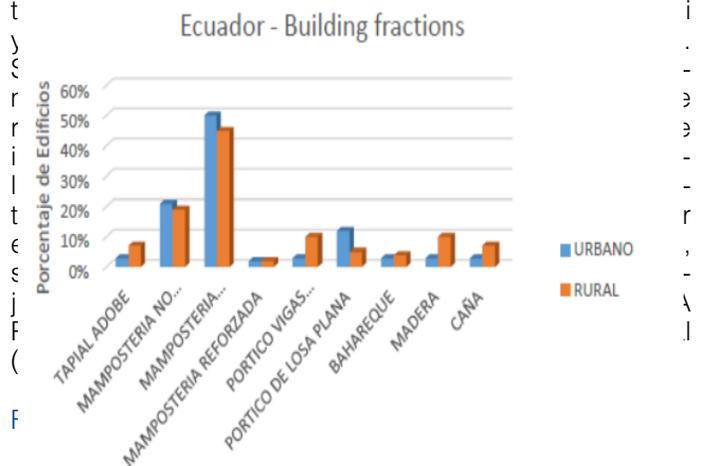
Con estos hallazgos, nuestro objetivo es claro: desarrollar un plan de refuerzo y restauración que respete el carácter histórico del edificio y garantice su funcionamiento seguro y eficiente en el futuro. Este informe es más que un diagnóstico; es un plan de acción para preservar la Unidad Educativa Pedro Vicente Maldonado como un pilar de cultura y educación en nuestra comunidad.

Para la justificación del análisis estructural de la Unidad Educativa Pedro Vicente Maldonado, es importante considerar varios aspectos:

Zona Sísmica y Vulnerabilidad de Estructuras Patrimoniales en Ecuador: Ecuador es una zona con alta actividad sísmica, lo que implica un riesgo significativo para las estructuras, especialmente las patrimoniales (Primicias, 2022). Muchas de estas estructuras están hechas de materiales frágiles como el adobe, lo que las hace particularmente vulnerables a los daños causados por sismos. Esto se ha visto reflejado en el deterioro de numerosas edificaciones patrimoniales tras eventos sísmicos recientes.

La investigación sobre vulnerabilidad sísmica es clave en la implementación de acciones de mitigación de riesgos. Ecuador, enfrentando alto riesgo sísmico, ha

avanzado en evaluar la vulnerabilidad de sus construcciones. Se exploran diversas metodologías en este campo, incluyendo el enfoque del proyecto Evaluación de



Fuente: Cunalata y Caiza (2022)

Estado Actual de la Estructura y Necesidad de Intervención: La unidad educativa ha mostrado signos de desgaste y deterioro estructural, incluyendo vibraciones excesivas en los entrepisos. Este tipo de hallazgos son indicativos de posibles deficiencias estructurales que requieren atención inmediata para garantizar la seguridad de los usuarios y la preservación del patrimonio (Quiroga, 2017).

Métodos de Evaluación y Reforzamiento para Estructuras Patrimoniales: La evaluación estructural de edificios patrimoniales requiere un enfoque especializado que preserve su integridad histórica y arquitectónica. Esto implica el uso de técnicas de evaluación no destructivas y la implementación de estrategias de refuerzo que respeten la naturaleza patrimonial de la estructura.

En cuanto a los artículos relacionados, se han encontrado varios estudios que pueden proporcionar información valiosa para el proyecto:

Evaluación y Reforzamiento de una Estructura Patrimonial de Adobe

En Ecuador, muchas edificaciones patrimoniales están construidas con adobe, material vulnerable ante sismos. Recientes terremotos revelaron la debilidad de estas estructuras, dada su elevada masa y limitada capacidad para soportar movimientos sísmicos. Se analiza la resistencia sísmica del edificio del antiguo Colegio Simón Bolívar, aplicando diversas técnicas de refuerzo en sus muros portantes de adobe, los cuales presentan irregularidades estructurales y se ubican en el centro histórico de Quito. El estudio asume que las cargas sísmicas impactan principalmente en la dirección más robusta de los muros, los cuales ofrecen escasa resistencia a las fuerzas laterales. Utilizando análisis por elementos finitos a través

de software especializado, se realiza un estudio de sensibilidad que permite establecer correlaciones empíricas entre el tamaño de los elementos finitos y la longitud de los muros, para optimizar la respuesta estructural ante sismos (Chacón et al., 2021).

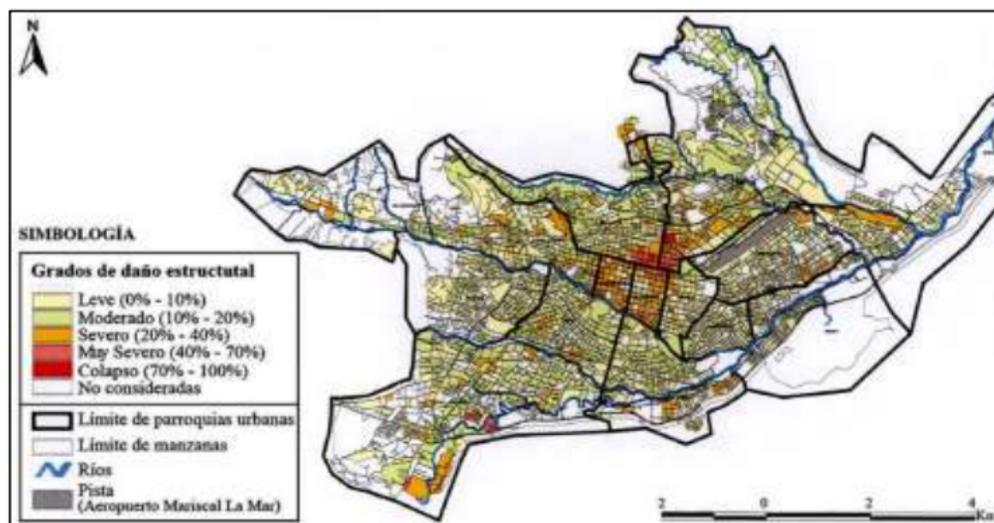
Caracterización del patrimonio edificado del centro histórico de Cuenca

Los análisis detallados de vulnerabilidad sísmica, que ofrecen evaluaciones más exactas, dependen de extensos conjuntos de datos que describan con precisión las construcciones de un área específica. Este estudio se enfoca en la caracterización geométrica de las edificaciones patrimoniales del Centro Histórico de Cuenca (CHC), Ecuador, que incluyen estructuras de adobe y ladrillo.

El propósito es definir los rangos de variabilidad de los parámetros geométricos y crear un catálogo representativo de las construcciones típicas de adobe y ladrillo para su posterior modelización numérica. Para ello, se emplearon tres métodos: análisis de la Base de Datos Catastral de la ciudad, revisión de tesis de grado en arquitectura, y examen de expedientes de intervenciones en edificaciones del CHC.

Como resultado, se elaboró una tabla con los rangos de variabilidad de los parámetros geométricos y un catálogo de seis edificaciones tradicionales representativas, divididas igualmente entre estructuras de adobe y ladrillo. A pesar de ciertos sesgos hacia edificaciones no modificadas y con geometrías regulares, el estudio concluye que es factible la modelización numérica de estas tipologías utilizando el software actual de análisis sísmico para edificios de mampostería (Quezada et al., 2021). Figura 2

Figura 2. Mapa de daño correspondiente a un terremoto leve, con aceleración máxima.



Fuente: Quezada et al. (2021).

Protocolos técnicos de conservación patrimonial desde el análisis de riesgos y vulnerabilidades

La arquitectura tradicional de Quingeo, una parroquia rural en Azuay, Ecuador, enfrenta desafíos significativos debido a la globalización, el abandono, y la falta de estrategias efectivas de gestión y preservación, lo que ha llevado a su deterioro. Este contexto subraya la necesidad de analizar, identificar y priorizar los riesgos y vulnerabilidades específicos de esta arquitectura, enfocándose en tres casos de estudio prioritarios.

Se emplearon métodos poco utilizados en el ámbito del patrimonio rural, como la estratigrafía muraria, la Matriz de análisis de riesgos, y los principios de conservación preventiva, los cuales son esenciales para comprender la evolución de estas estructuras y mejorar su conservación y valoración. Como resultado, se establecieron tres protocolos de actuación: seguimiento y control, mantenimiento periódico, y gestión estratégica. Estas herramientas no solo son aplicables a Quingeo sino que también pueden adaptarse como estrategias efectivas para la conservación del patrimonio en áreas similares (López y Aguirre, 2023).

Structural Health Monitoring of Architectural Heritage

La evaluación de daños en edificios históricos de mampostería es una de las tareas más difíciles de investigar en mecánica estructural, ya que este tipo de estructuras suelen ser heterogéneas, con geometrías complejas, irregularidades y ausencia de comportamiento en caja debido a las conexiones mal diseñadas entre los diferentes. Piezas estructurales, en particular paredes y suelos. En particular, el comportamiento dinámico es crucial para una evaluación confiable de la vulnerabilidad sísmica, lo que está adquiriendo una importancia fundamental después de los recientes terremotos catastróficos ocurridos en diferentes partes del mundo.

Esto es particularmente cierto en el caso de Italia, un país de alta sismicidad con el mayor número de sitios de la UNESCO y donde nuevamente la UNESCO estima que se encuentra más del 5% del patrimonio arquitectónico total.

En este contexto, la Vigilancia de la Salud Estructural es crucial para la predicción del comportamiento estructural y del estado de conservación de edificios de inestimable importancia histórica y artística (Clementi et al., 2021).

Es muy necesario apoyar la preservación y el fortalecimiento de las construcciones históricas a lo largo del tiempo debido a su valor cultural y patrimonial y a la potencial explotación económica relacionada con el turismo. Los edificios antiguos de mampostería están sujetos a lentos procesos de envejecimiento, que deben ser monitoreados para evitar el deterioro irreversible de los materiales y daños estructurales, así como reducir la vulnerabilidad a los peligros naturales, en particular los terremotos. Las exigencias de conservación se pueden resumir en el principio de "mínima intervención", que se basa en la idea de mantener, en la medida de lo posible, las características originales de los edificios, evitando el uso de técnicas de refuerzo invasivas que comprometerían su autenticidad.

Sin embargo, el uso diario de este parque edificable, muy importante para evitar su abandono, plantea el problema de cumplir no sólo con los principios de conservación del edificio sino también con los de seguridad. Dentro de este ámbito, la selección y el uso de herramientas de modelado estructural correctas para evaluar el estado actual y apoyar el diseño de las intervenciones de fortalecimiento necesarias es una cuestión desafiante. Así, este capítulo presenta, a través de estudios de caso, ejemplos de enfoques metodológicos para el diagnóstico y evaluación sísmica de estructuras históricas, así como para el diseño de obras de reforzamiento y refuerzo (Lagomarsino et al., 2018).

Mediante ACUERDO N° 0.35 de fecha 16 de abril del 2008 EL MINISTERIO DE CULTURA DECLARA mediante el Artículo Primero al Unidad Educativa Pedro Vicente Maldonado COMO BIEN PERTENECIENTE AL PATRIMONIO CULTURAL DEL ESTADO, mismo que se encuentra ubicado en la Primera Constituyente, España, Larrea y Veloz 24-36, registrado en el Inventario de Bines Inmuebles con código 4H4-07-150 y ficha de inventario de código IBI-06-01-03-000-000183, con clave catastral 41-003-01 (Figura 3).

Figura 3. Ubicación del lugar a estudiar.



Fuente: Elaboración de autores

AREAS POR PLANTA

Área de terreno: 4.801,09 m2, frente 69.41 ml.

Área construida: planta baja nivel +0,15, nivel +0,87= 3.410,94m2

Planta alta nivel +7,56 = 2.583,64m2

Planta alta nivel +12,67= 2.583,64 m2

Área total de construcción: 8.578,22m2

La tipología funcional es educativa alberga a 2.840 estudiantes y 136 docentes, se organiza a partir de dos patios interiores, alrededor de los cuales se implantan los diferentes espacios que comprenden la institución educativa. Posee desarrollo vertical en tres niveles, contando además con teatro, biblioteca, piscina, reloj, canchas de uso múltiple (patios) y demás espacios de uso complementario.

El estado de conservación de la edificación es **sólido**. Sin embargo, existen deterioros puntuales en cielo raso, entrepiso y mampostería.

Resistencia residual de estructuras de entrepiso

En la ingeniería estructural moderna, la evaluación de las vibraciones en los sistemas de entrepisos se ha convertido en un aspecto crítico, especialmente en edificaciones donde se utilizan materiales y diseños que resultan en estructuras más ligeras. Este enfoque ligero, si bien ofrece ventajas en términos de eficiencia y costos, puede aumentar la susceptibilidad de los entrepisos a las vibraciones indeseadas. Estas vibraciones no solo pueden causar incomodidad a los ocupantes, sino que también pueden ser indicativas de problemas estructurales subyacentes que requieren atención. En particular, las vibraciones generadas por actividades cotidianas, como el tránsito de personas, y aquellas originadas por eventos específicos, como actividades rítmicas en espacios públicos o privados, deben ser cuidadosamente evaluadas. Estas vibraciones se pueden clasificar en dos categorías principales: las inducidas por cargas estáticas y las causadas por cargas dinámicas, siendo estas últimas de particular interés en el análisis de la serviciabilidad vibratoria de los entrepisos.

El empleo de geófonos de 4Hz en el análisis de vibraciones de entrepisos ofrece una metodología efectiva para medir y evaluar los desplazamientos y vibraciones. Estos dispositivos, sensibles a las frecuencias bajas, son idóneos para captar las oscilaciones típicas en estructuras como los entrepisos. Al medir la respuesta vibracional del entrepiso a diferentes frecuencias, incluyendo aquellas provocadas por el movimiento y actividades humanas,

los geófonos proporcionan datos valiosos para la evaluación de la serviciabilidad y el confort estructural. Estas mediciones son cruciales para determinar si un entrepiso cumple con los estándares establecidos para la habitabilidad y seguridad. Además, el análisis de estos datos puede revelar deficiencias en la rigidez o en la capacidad amortiguadora del entrepiso, lo que podría indicar la necesidad de intervenciones de refuerzo o modificación en el diseño.

Además del uso de geófonos, un análisis detallado de entrepisos también incluye inspecciones visuales y pruebas estructurales para evaluar la integridad y el rendimiento del sistema. Estas inspecciones pueden revelar signos de desgaste, daño o degradación que no son detectables a través de métodos puramente instrumentales. En este contexto, la deflexión del entrepiso bajo cargas estáticas y dinámicas se convierte en un parámetro clave para evaluar. La deflexión excesiva puede ser un indicador de debilidad estructural o de una inadecuada distribución de carga. Por tanto, el análisis integral de entrepisos debe combinar métodos instrumentales avanzados, como el uso de geófonos, con técnicas de inspección tradicionales, para ofrecer una visión completa del estado y rendimiento de estos elementos estructurales. Este enfoque holístico garantiza que se identifiquen todos los aspectos críticos que afectan la seguridad, la serviciabilidad y la longevidad de los entrepisos en el contexto de la ingeniería estructural moderna.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar un análisis estructural detallado de la Unidad Educativa Pedro Vicente Maldonado, se puede seguir una metodología en cuatro etapas: análisis visual, ubicación de equipos de análisis de vibración (geófonos de 4Hz), análisis mediante modelos de elementos finitos, y propuesta de refuerzo estructural. A continuación, se etalla cada etapa:

Objetivo: Evaluar el estado actual de la estructura para identificar áreas críticas y determinar el lugar más adecuado para el análisis detallado.

Proceso: Inspeccionar visualmente el entrepiso, prestando atención a signos de deterioro como grietas, deformaciones, desplazamientos o cualquier otro indicio de daño estructural. Se debe prestar especial atención a áreas con cargas concentradas, uniones, apoyos y otros puntos críticos.

Registro: Documentar todas las observaciones con fotografías y notas detalladas para tener un registro claro del estado actual de la estructura.

Ubicación de Equipos de Análisis de Vibración:

Objetivo: Colocar geófonos de alta precisión de 4Hz en puntos estratégicos para medir las vibraciones y movimientos del entrepiso.

Proceso:

Cero del equipo: Antes de la colocación, asegurarse de que los geófonos estén calibrados y en estado de cero operativo (señal encendida).

Selección de ubicación: Instalar los geófonos en el lugar más crítico identificado durante el análisis visual, preferentemente en el centro o en puntos donde se sospecha mayor actividad vibracional.

Orientación: Alinear los geófonos con el norte en dirección longitudinal respecto a la losa, para garantizar la consistencia en las mediciones.

Monitoreo: Realizar mediciones continuas para capturar datos sobre las frecuencias y amplitudes de las vibraciones del entrepiso.

Análisis de Modelos Computacionales (FEM y SAP2000) (Tabla 1)

Tabla 1. Materiales para modelos.

Material	Característica de Resistencia
Hormigón	18 MPa
Arena (supuesto para hormigón)	30 MPa
Acero (tipo ferrocarril)	880 MPa
Parquet (eucalipto)	55 MPa (esfuerzo a la tracción)

Fuente: Elaboración de autores

Objetivo: Crear un modelo computarizado (SAP200 y FEM) del entrepiso para analizar su comportamiento bajo diferentes cargas y condiciones.

Proceso:

Modelado: Dibujar la geometría del entrepiso en un software de elementos finitos, incorporando las características materiales y las condiciones de apoyo reales de la estructura.

Análisis: Aplicar cargas y condiciones de borde representativas de las situaciones reales a las que está sometida la estructura y realizar simulaciones para evaluar la respuesta del entrepiso a estas condiciones.

Interpretación de resultados: Analizar los resultados del modelo en términos de desplazamientos, tensiones y otras respuestas estructurales para identificar posibles áreas de debilidad o preocupación.

Propuesta de Refuerzo Estructural (Análisis de Chi):

Objetivo: Establecer un método para calcular el valor de χ (chi), que representará un parámetro de eficiencia de los refuerzos estructurales basado en los desplazamientos medidos.

Proceso:

- a. Recopilación de Datos: Obtener mediciones de desplazamientos pre y post-refuerzo en los puntos críticos de la estructura.
- b. Definición de χ : Establecer χ como una función que relaciona los desplazamientos máximos observados antes y después del refuerzo
- c. Análisis Estadístico: Aplicar un análisis estadístico para determinar si la variación en los desplazamientos es significativa y puede atribuirse efectivamente a los refuerzos aplicados.
- d. Modelado Matemático: Utilizar el análisis de regresión para modelar la relación entre χ y los desplazamientos, ajustando los datos experimentales a la función propuesta.
- e. Validación del Modelo: Verificar la validez del modelo matemático comparando los valores de χ obtenidos con criterios de rendimiento establecidos y con los resultados de pruebas de carga posteriores al refuerzo.

Evaluación de impacto: Examinar la correlación entre los valores de σ obtenidos y la mejora en la capacidad de carga de la estructura reforzada, asegurando que se mantengan dentro de los límites seguros y aceptables.

Implementación: Crear un protocolo para la implementación rutinaria de este método de cálculo como parte del proceso de inspección y mantenimiento de la estructura, permitiendo actualizaciones periódicas en el plan de refuerzo estructural.

Propuesta de Refuerzo Estructural:

Objetivo: Desarrollar un plan para reforzar la estructura existente y mejorar su capacidad para soportar cargas y resistir movimientos.

Proceso:

Diseño de refuerzo: Proponer la construcción de un nuevo entrepiso debajo del existente. Este nuevo entrepiso deberá diseñarse para trabajar en conjunto con la estructura existente, distribuyendo las cargas de manera más eficiente y proporcionando rigidez adicional.

Evaluación de impacto: Considerar cómo el refuerzo propuesto afectará tanto la integridad estructural como el valor histórico y estético del edificio.

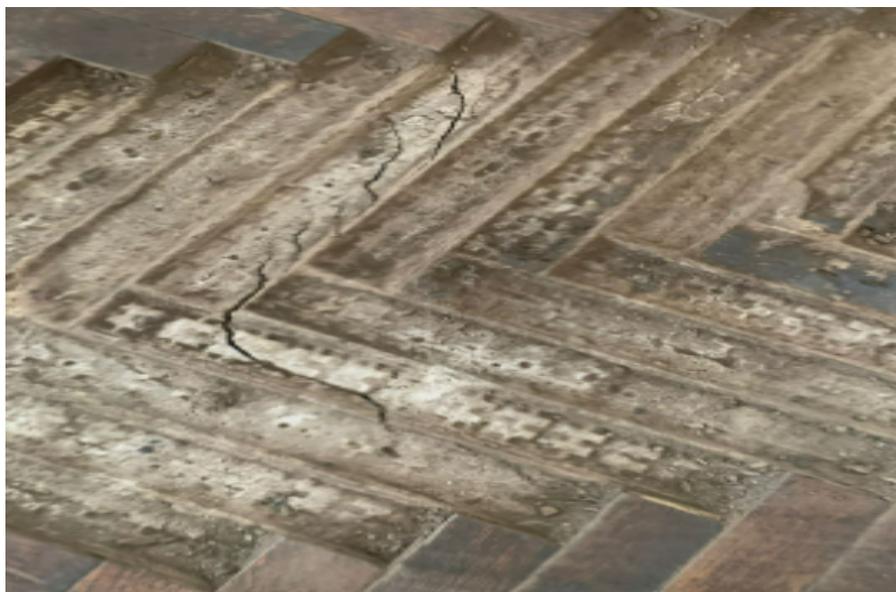
Implementación: Desarrollar un plan detallado para la construcción del refuerzo, asegurando que se minimice cualquier interrupción y se preserve la integridad del edificio.

Esta metodología integral permite una evaluación completa del entrepiso de la Unidad Educativa Pedro Vicente Maldonado, asegurando que cualquier intervención propuesta sea efectiva, respete la integridad histórica y mejore la seguridad estructural.

Estado actual del entrepiso

El reciente descubrimiento de una losa no tradicional en la Unidad Educativa Maldonado en Riobamba ha capturado la atención de expertos en ingeniería civil y arqueología estructural, especialmente aquellos que se especializan en el análisis de vibración ambiental. La singularidad de la estructura, que integra parquet con mortero, piedra, arena, hormigón, y sorprendentemente, vigas fabricadas a partir de rieles de ferrocarril, promete ofrecer información valiosa sobre las propiedades dinámicas de materiales antiguos y sus técnicas de construcción (Figura 4, 5 y 6).

Figura 4. Entrepiso de la entidad Patrimonial



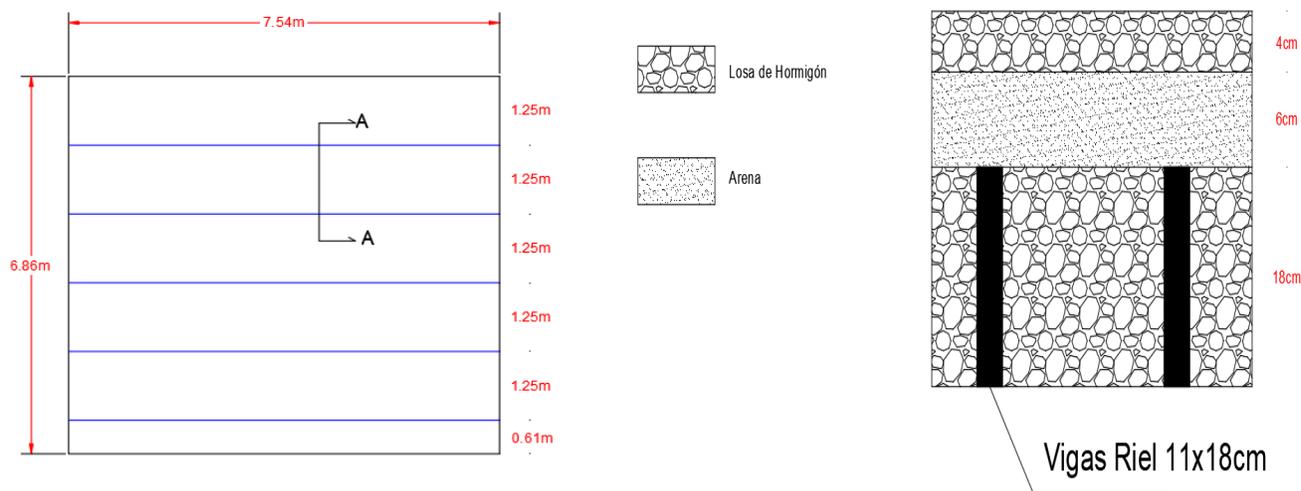
Fuente: Elaboración de autores

Figura 5. Exploraciones de la estructura



Fuente: Elaboración de autores

Figura 6. Detalle de conformación actual del entrepiso.



Fuente: Elaboración de autores

En el transcurso del estudio detallado de la losa no tradicional ubicada en la Unidad Educativa Maldonado en Riobamba, se detectó un nivel alarmante de vibraciones en un tramo específico de la estructura. Estas vibraciones, significativamente más altas que las típicas vibraciones ambientales, sugerían una posible comprometida integridad estructural. Debido a la gravedad potencial de este hallazgo, se tomó la decisión inmediata de realizar una inspección física más profunda.

Al retirar cuidadosamente el revestimiento de parquet que cubría la superficie de este segmento de la losa, el equipo de investigación descubrió lo que se había temido: la presencia de fisuras transversales evidentes. Estas grietas, que se extendían a lo largo de la losa, eran una clara indicación del desgaste de los materiales y posiblemente del impacto constante de las vibraciones a lo largo del tiempo. Esta evidencia confirmó la necesidad de una intervención urgente, ya que tales fisuras podrían comprometer la seguridad y la longevidad de la estructura en su conjunto (Figura 7).

Figura 7. Ancho de grieta en la exploración



Fuente: Elaboración de autores

Ante la gravedad de los hallazgos, se ha decidido implementar un estudio de vibración ambiental para obtener una comprensión más clara del estado actual de servicio de la losa. Utilizando un geófono, un sensor especializado con una frecuencia de 4Hz, se capturarán las vibraciones del entorno para analizar la respuesta estructural de la losa en condiciones reales. Durante el estudio, se ha planificado que una persona transite cerca del equipo para simular las cargas dinámicas generadas por el tráfico peatonal y evaluar cómo afectan directamente la estructura. La información obtenida de este experimento será vital para determinar la seguridad de la losa y las posibles intervenciones necesarias para garantizar su integridad en el futuro. Es imperativo comprender hasta qué punto las vibraciones ambientales, agravadas por cargas dinámicas, pueden haber contribuido al deterioro observado, y el geófono será una herramienta esencial para este propósito.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Unidad Educativa Pedro Vicente Maldonado, se realizaron tres ensayos ambientales distintos para evaluar la respuesta vibratoria del entrepiso. Estos ensayos fueron diseñados para simular diferentes tipos de cargas y actividades que podrían afectar la estructura. El equipo de medición, consistente en geófonos de alta precisión, se ubicó siempre en el centro del vano, identificado como el punto de mayor vibración.

Primer Ensayo: Caminata en la Esquina del Cuarto

Objetivo: Evaluar la respuesta vibratoria del entrepiso cuando una persona camina en la esquina del cuarto.

Procedimiento: Se realizó una serie de caminatas regulares en una esquina del cuarto, a una distancia considerable del equipo de medición.

Resultados: El geófono registró una aceleración máxima de 10 m/s² y un desplazamiento máximo de 2 cm. Este resultado indica una respuesta moderada del entrepiso a una carga dinámica localizada en el extremo (Figura 8).

Figura 8. Caminata en la Esquina del Cuarto.





Fuente: Elaboración de autores

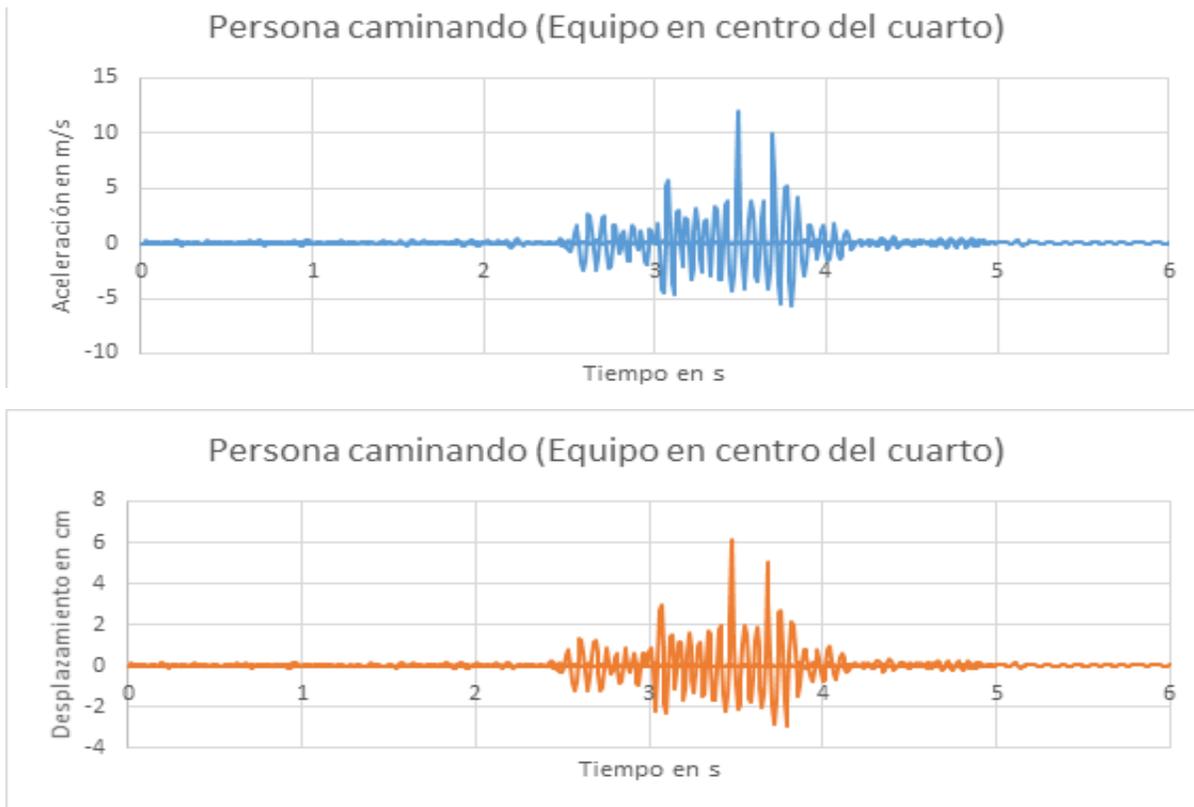
Segundo Ensayo: Caminata al Lado del Equipo

Objetivo: Observar las variaciones en la respuesta vibratoria del entrepiso cuando la carga dinámica se aproxima al equipo.

Procedimiento: Se llevó a cabo una caminata paralela y cerca del equipo de medición.

Resultados: En esta configuración, el equipo registró una aceleración aumentada a 12 m/s^2 y un desplazamiento de 6 cm. Este incremento en los valores, en comparación con el primer ensayo, sugiere una mayor sensibilidad del entrepiso a las cargas dinámicas cercanas al punto de medición (Figuran 9).

Figura 9. Caminata al lado del equipo.



Fuente: Elaboración de autores

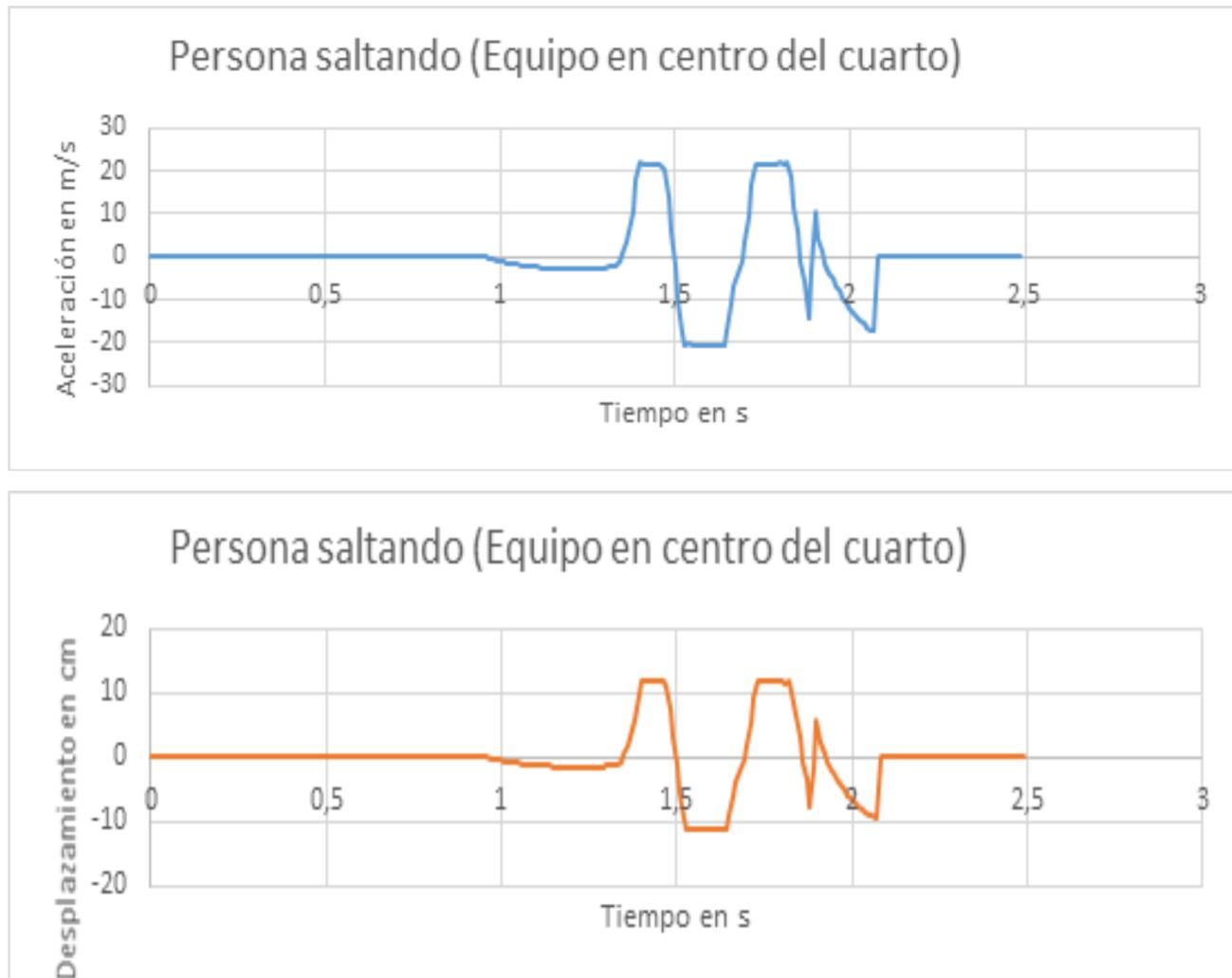
Tercer Ensayo: Salto Cerca del Equipo

Objetivo: Determinar la respuesta del entrepiso ante cargas dinámicas más intensas y concentradas.

Procedimiento: Una persona realizó una serie de saltos a corta distancia del equipo.

Resultados: Los saltos generaron la mayor respuesta vibratoria registrada, con una aceleración de 20 m/s² y un desplazamiento de 12 cm. Este notable aumento refleja la alta sensibilidad del entrepiso a actividades con impactos más significativos (Figura 10).

Figura 10. Salto cerca del equipo.

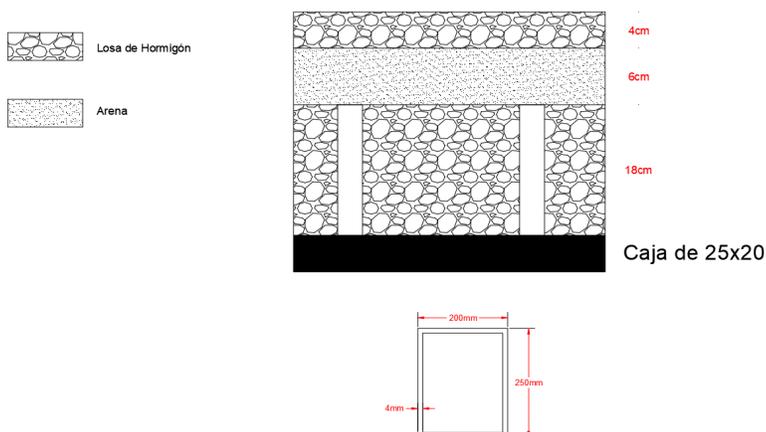


Fuente: Elaboración de autores

Las gráficas de aceleración y desplazamiento obtenidas de estos ensayos proporcionan una visión detallada de cómo diferentes actividades y posiciones de carga afectan la respuesta vibratoria del entrepiso. Los resultados indican que la estructura es particularmente sensible a las cargas dinámicas, especialmente aquellas que generan impactos más intensos y están ubicadas cerca del centro del vano. Estos hallazgos son fundamentales para comprender el comportamiento del entrepiso bajo cargas reales y pueden informar las decisiones sobre refuerzos estructurales o modificaciones en el uso del edificio para garantizar la seguridad y el confort de los ocupantes (Figura 11).

Modelos matemáticos computacionales

Figura 11. Sección principal de refuerzo.



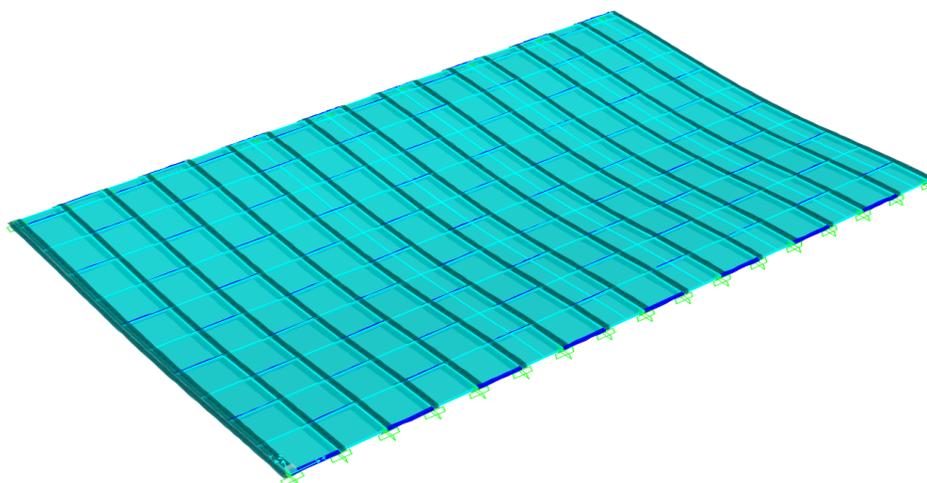
Fuente: Elaboración de autores

Avanzaremos en el análisis de la Unidad Educativa Pedro Vicente Maldonado generando un modelo matemático mediante el software SAP2000, una herramienta altamente reconocida en el dominio de la ingeniería estructural. Este modelo pretende examinar potenciales métodos de refuerzo para el sistema estructural actual.

Una técnica propuesta para el refuerzo es realizar un nuevo sistema de entrepiso con acero. En este escenario, Se colocará un nuevo sistema de entrepiso de cajas cada 1.5m para así asegurar los parámetros mínimos de servicio como lo es la deformación actual que excede el $L/480$ (1.6cm)

Además del sistema de vigas de acero con cajas de 250x200x4mm, estamos contemplando el uso de un refuerzo que comprenderá una sección compuesta con el entrepiso. Esto significará integrar el entrepiso con las vigas de acero reforzadas, creando un sistema de sección compuesta que opera en conjunto para resistir las cargas. Este enfoque podría brindar beneficios adicionales en términos de resistencia y rigidez, así como mayor eficacia en la distribución de las cargas (Figura 12).

Figura 12. Sistema de entrepiso analizado.

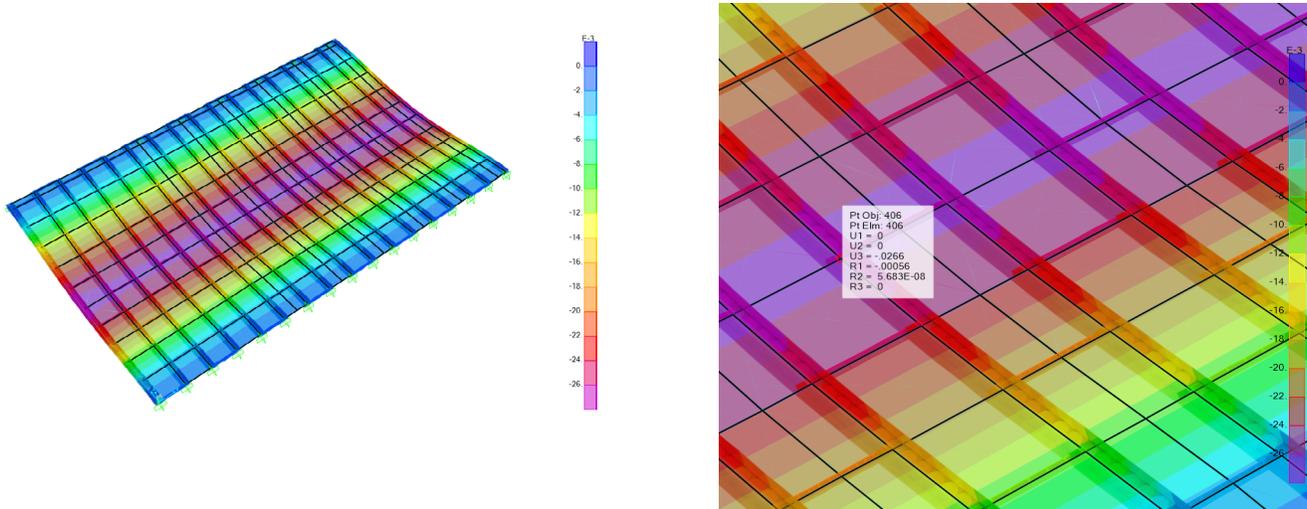


Fuente: Elaboración de autores

El modelo matemático en SAP2000 nos permitirá analizar detalladamente estas opciones de refuerzo, evaluando su eficacia y su influencia en la estructura preexistente. También nos habilitará para optimizar el diseño del refuerzo, asegurando que se maximicen los beneficios con el impacto mínimo sobre la estructura original y el valor patrimonial del edificio. Esta evaluación exhaustiva es un paso esencial para la implementación exitosa de cualquier plan de refuerzo.

La situación actual en la Unidad Educativa Pedro Vicente Maldonado presenta una deflexión notable en las vigas del entrecimso, medida en 6 cm. Este valor supera el límite permitido para la deflexión en servicio según la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 (NEC 2015), lo que indica un problema estructural significativo que debe ser abordado para asegurar la seguridad y funcionalidad del edificio (Figura 13).

Figura 13. Deflexión analizada con la propuesta.



Fuente: Elaboración de autores

Nuestro estudio propone un plan de refuerzo que, según los análisis realizados con el modelo matemático en SAP2000, reduciría considerablemente esta deflexión. Con la implementación del encamisado con perfiles Caja de acero y la creación de una sección compuesta con el entrecimso, se espera que la deflexión se reduzca hasta llegar a un valor de 1.4 cm. Este valor no sólo se encuentra muy por debajo del límite actual, sino que también cumple con los requerimientos mínimos de servicio establecidos por la NEC 2015. Este resultado demostraría una mejora sustancial en la estabilidad y rendimiento de la estructura, lo que es esencial para garantizar la seguridad de los usuarios y la preservación del edificio (Tabla 2).

Tabla 2. Comparación de resultados.

Ensayo	Descripción	Aceleración Máxima (m/s ²)	Desplazamiento Máximo (cm)
Caminata en la Esquina	Una persona camina en la esquina del cuarto.	10	2
Caminata al Lado del Equipo	Caminata cerca del equipo de medición.		6
Salto Cerca del Equipo	Una persona salta cerca del equipo de medición.	20	12
Análisis de Refuerzo Estructural	Aplicación de refuerzos estructurales al entrecimso. Cajas de 250x200mm cada 1.2m	5.6	1.4

Fuente: Elaboración de autores

Tabla 3. Factor de Chi.

Estado	Punto de Medición	Desplazamiento Máximo Antes del Refuerzo (Δ antes)	Desplazamiento Máximo Después del Refuerzo (Δ después)	Valor de χ (%)
Pre-refuerzo	Punto 1	12 cm	-	3.68%
Post-refuerzo	Punto 2	-	1.4 cm	5.36%

Fuente: Elaboración de autores

El incremento en el valor de χ de 3.68% a 5.36% post-refuerzo (Tabla 3) refleja la efectividad de las intervenciones estructurales realizadas, indicando una mejora significativa en la rigidez y resistencia de la estructura frente a cargas dinámicas. Esta variación sugiere que los refuerzos aplicados han optimizado la distribución de cargas y han incrementado la interacción efectiva entre los componentes estructurales, resultando en una reducción más pronunciada de los desplazamientos observados. Tal mejora no solo asegura una mayor estabilidad y seguridad estructural, sino que también resalta la importancia de adaptar las estrategias de refuerzo a las condiciones específicas de cada edificación, demostrando un enfoque proactivo hacia la preservación y fortalecimiento de estructuras existentes (Avilés et al., 2009).

A partir del presente análisis detallado, se ha determinado una serie de hallazgos esenciales que señalan tanto la necesidad urgente de una intervención estructural en la Unidad Educativa Pedro Vicente Maldonado como la viabilidad y eficacia de las estrategias de refuerzo propuestas.

En primer lugar, la evaluación inicial de la infraestructura reveló múltiples desafíos críticos que ameritan atención urgente. Es notable que la deflexión de las vigas del entrepiso, alcanzando un valor pico de 6 cm, supera ampliamente los estándares máximos permitidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 (NEC 2015). Esta circunstancia plantea serios riesgos para la seguridad y la funcionalidad del edificio, estableciendo así la imperiosa necesidad de una intervención estructural.

En segundo lugar, los diagnósticos detallados de las condiciones actuales resaltan de manera enfática la urgencia de un refuerzo estructural robusto. La presencia de agentes destructores como polillas y la acumulación de suciedad, junto con la carencia de algunos elementos estructurales, constituyen problemas acuciantes que requieren una solución pronta para salvaguardar tanto la integridad física como el valioso legado histórico del edificio.

En una tercera instancia, mediante el uso del software especializado SAP2000, hemos generado modelos matemáticos que avalan el potencial éxito de las estrategias de refuerzo propuestas. Destacamos en particular la implementación del encamisado mediante el empleo de cajas antes mencionadas y la configuración de una sección

compuesta en armonía con el entrepiso actual, una intervención que podría reducir la deflexión a un margen aceptable de 1.4 cm. Este resultado no solo se alinea con los requisitos de la NEC 2015, sino que manifiesta una notable mejoría respecto al estado estructural preexistente.

Para concluir, es importante subrayar que, si bien los resultados preliminares son alentadores, cualquier plan de refuerzo debe ser llevado a cabo con una profunda consciencia de la necesidad de preservar el riquísimo valor patrimonial que encierra la Unidad Educativa Pedro Vicente Maldonado. Cada intervención debe ser minuciosamente planificada para respetar y honrar la historia y el singular diseño arquitectónico del edificio, y debería realizarse en estrecha colaboración con expertos en conservación patrimonial y restauración.

CONCLUSIONES

La aceleración máxima se redujo de 20 m/s², observada durante el salto cerca del equipo de medición, a 5.6 m/s² tras la implementación de refuerzos estructurales. Esto representa una disminución del 72% en la aceleración máxima, lo cual es significativo en términos de mejorar la respuesta del entrepiso a cargas dinámicas.

El desplazamiento máximo experimentó una reducción de 12 cm a 1.4 cm, lo que indica una mejora del 88.3%. Esta disminución en el desplazamiento máximo no solo mejora la estabilidad estructural del entrepiso, sino que también asegura que el desplazamiento permanezca muy por debajo del límite de servicio establecido por la normativa vigente (NEC 2015), el cual es de 1.6 cm para la deformación que excede el L/480.

El análisis propuesto y la implementación de un sistema de refuerzo mediante encamisado con perfiles de acero y la creación de una sección compuesta con el entrepiso han demostrado ser efectivos para asegurar que la estructura cumpla con los parámetros mínimos de servicio. La deflexión reducida a 1.4 cm demuestra una mejora sustancial en la estabilidad y rendimiento de la estructura.

La técnica de refuerzo que implica la integración de un nuevo sistema de entrepiso con cajas de acero cada 1.5 m, junto con el uso de un refuerzo que comprenderá una sección compuesta con el entrepiso, indica un enfoque bien considerado para mejorar la resistencia y rigidez de

la estructura. Este sistema no solo proporciona una solución para resistir las cargas dinámicas de manera más efectiva, sino que también mejora la distribución de cargas a través del entrepiso.

El aumento de χ de 3.68% a 5.36% tras el refuerzo demuestra una notable mejora estructural, reflejando una disminución sustancial en los desplazamientos debido a la mayor rigidez y resistencia. Este cambio subraya la eficacia de las técnicas de refuerzo en la optimización de la capacidad de carga y durabilidad de la estructura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avilés, J., Ordaz, M., & Vilar, J. I. (2009). Updated seismic design guidelines for model building code of Mexico. *Earthquake Spectra*, 25(4), 869–898. <https://doi.org/10.1193/1.3240413>
- Chacón, J., Suquillo, B., Sosa, D., y Celi, C. (2021). Evaluación y Reforzamiento de una Estructura Patrimonial de Adobe con Irregularidad en Planta. *Revista Politécnica*, 47(1), 43–56. <https://doi.org/10.33333/RP.VOL47N1.05>
- Clementi, F., Formisano, A., Milani, G., y Ubertini, F. (2021). Structural Health Monitoring of Architectural Heritage: From the past to the Future Advances. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(1), 1–4. <https://doi.org/10.1080/15583058.2021.1879499>
- Cunalata, F. y Caiza, P. (2022). Estado del Arte de Estudios de Vulnerabilidad Sísmica en Ecuador. *Revista Politécnica*, 50(1), 55–64. <https://doi.org/10.33333/RP.VOL50N1.06>
- Lagomarsino, S., Ferreira, T. M., Cattari, S., & Mendes da Silva, J. A (2018). Cultural Heritage Monuments and Historical Buildings: Conservation Works and Structural Retrofitting, 25–57. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5858-5_2
- López, P. y Aguirre, M. (2023). Vista de Protocolos técnicos de conservación patrimonial desde el análisis de riesgos y vulnerabilidades. El caso de la arquitectura vernácula de Quingeo (Azuay, Ecuador). *Arqueología de la Arquitectura*, 20. <https://arqarqt.revistas.csic.es/index.php/arqarqt/article/view/302/602>
- Primicias. (2022). 70.000 sismos han sacudido a Ecuador en los últimos 10 años. <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/sismos-ecuador-ultimos-anos-instituto-geofisico/>
- Quezada, R., Jiménez, J., & García, H. (2021). Caracterización del patrimonio edificado del centro histórico de Cuenca-Ecuador. *CienciAmérica*, 10(3). <https://doi.org/10.33210/ca.v10i3.376>
- Quiroga, P. (2017). *Vibraciones en entresijos*. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/2477/Vibraciones%20en%20entresijos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>