

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Análisis de vulnerabilidad sísmica y elaboración de modelo HBIM de la obra
patrimonial: Antigua Escuela San Jerónimo**

Trabajo Final de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Erick Ureña Villalobos

Director del proyecto de Graduación:

Ing. Robert Anglin, MSc

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Tribunal de Graduación

Ing. Robert Anglin Fonseca, MSc

Director

Ing. Julian Trejos Villalobos, MSc

Asesor

Ing. Allan Rojas Ramírez

Asesor

Erick Ureña Villalobos

Estudiante

Fecha: 2022, febrero, 23

El suscrito, **Erick Josué Ureña Villalobos**, cédula 1-1558-0785, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B47152, manifiesta que es el autor del Proyecto Final de Graduación **Análisis de vulnerabilidad sísmica y elaboración de modelo HBIM de la obra patrimonial: Antigua Escuela San Jerónimo**, bajo la dirección del **Ing. Robert Anglin Fonseca**, quien en consecuencia tiene derechos de autor compartidos sobre los resultados de esta investigación

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Dedicatoria

A la vida y a todas las personas que han formado parte de mi camino, y que, de una u otra forma han sido un peldaño para lograr concluir esta etapa y carrera.

A mi papá, que, con su ejemplo, apertura y apoyo, me ha permitido acompañarlo y aprender de él en su ejercicio profesional, ha sido parte fundamental de haber escogido esta carrera.

A mi mamá, que, con su apoyo y comprensión, ha hecho que pueda terminar esta carrera de la mejor manera.

A mis hermanos, que me han apoyado en todo momento y motivado a continuar en todos aquellos momentos difíciles y han sido ejemplo también de perseverancia, cada uno con sus carreras y sus dificultades.

Agradecimiento

A mis papás, que siempre me han apoyado en las diferentes etapas de la universidad, y que con su apoyo, me han permitido concluir satisfactoriamente este proyecto.

A mis hermanos, que me apoyaron de distintas maneras, con su tiempo y recursos materiales para que yo pudiera llevar a cabo el proyecto.

A mis amigos de carrera, los que ya concluyeron esta etapa y los que ya casi están por concluir. Gracias, porque sin su apoyo en los últimos años no estaría donde estoy el día de hoy. Gracias Pri, Dani, Gerald y Chris.

A don Robert, quien me permitió realizar este proyecto de graduación bajo su dirección. Gracias por el aporte que realiza desde la docencia, se nota su vocación. Y también por dirigir el Laboratorio de Diseño y Construcción Virtual, sin duda alguna siembra en muchos de sus estudiantes la intención de transformar la construcción actual hacia la construcción 4.0 en nuestro país.

Al Ing. Julian Trejos y al Al Ing. Allan Rojas, por todo el tiempo y experiencia que aportaron para lograr este proyecto.

Al Centro de Conservación de Patrimonio Cultural, a María Soledad Hernandez, quien me apoyó desde el inicio del proyecto, con todas las dificultades que presentó en un inició y sin su ayuda y compromiso, este proyecto no hubiera sido posible llevarlo a cabo. También al Arq. Gustavo Morera, quien acompañó y enriqueció el desarrollo de la investigación y propuestas de intervención.

A la comunidad de San Jerónimo de Moravia, con sus representantes don Luis y Francisco, así como a la dirección de la escuela, que ayudaron con todo lo que estuvo a su alcance, y ese amor a la comunidad y en especial a esta escuela, sin duda fue motivación para llevar a cabo el proyecto.

Al LanammeUCR, por la ayuda brindada mediante los laboratorios de Geotecnia, de Concreto y Construcción. Gracias a los ingenieros a cargo y a los técnicos que formaron parte, y que, aún en tiempos de pandemia, ayudaron y me enseñaron de la mejor manera.

Y a todos aquellos quienes fueron parte de este proceso y ayudaron para llevar a cabo de la mejor manera el proyecto.

ÍNDICE GENERAL

Índice general.....	ix
Índice de cuadros	xiii
Índice de figuras	xv
Resumen.....	xvii
1 Introducción.....	1
1.1 Justificación.....	1
1.1.1 Problema específico	1
1.1.2 Importancia	3
1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema	4
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivo General	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
1.3 Delimitación del problema.....	5
1.3.1 Alcances	5
1.3.2 Limitaciones.....	6
1.4 Metodología.....	7
1.4.1 Fase I. Investigación preliminar	7
1.4.2 Fase II. Elaboración del PEB.....	7
1.4.3 Fase III. Capacitación	7
1.4.4 Fase IV. Documentación de la edificación	9
1.4.5 Fase V. Análisis de vulnerabilidad sísmica	9
1.4.6 Fase VI. Entregables.....	9
2 Marco teórico	10
2.1 Historia de La Antigua Escuela de San Jerónimo de Moravia	10
2.2 Metodología BIM para edificios Patrimoniales.....	11
2.2.1 Plan de ejecución BIM (PEB)	14
2.2.2 Nivel de Precisión	14
2.3 Caracterización de materiales.....	16
2.3.1 Madera	16
2.3.2 Investigación de materiales	17
2.3.3 Estructuras de concreto	19
2.3.4 Exploración, muestreo y caracterización de suelos.....	21

2.4	Análisis estructural y de vulnerabilidad sísmica	28
3	desarrollo de MOdelo compuesto de: PEB, Escanéo, caracterización y modelado	30
3.1	Plan de Ejecución BIM (BEP)	30
3.2	Modelo HBIM	33
3.2.1	Levantamiento de la estructura	33
3.2.2	Levantamiento fotográfico	36
3.2.3	Caracterización de los materiales	42
3.2.4	Elaboración del modelo HBIM	54
4	Análisis estructural	63
4.1	Amenaza sísmica	63
4.1.1	Fuerza sísmica	65
4.1.2	Fuerza de viento	66
4.2	Deficiencias de estructuración y constructivas	67
4.3	Estado de la estructura	68
4.3.1	Patologías	69
4.4	Modelo de análisis	72
4.4.1	Cargas de diseño	72
4.4.2	Revisión de secciones de madera	74
4.5	Propuesta de intervención	79
4.5.1	Columnas perimetrales	79
4.5.2	Paredes	83
4.5.3	Techos	83
4.5.4	Caño perimetral	84
4.5.5	Piso externo	84
4.5.6	Piso interno	84
4.5.7	Instalación eléctrica	85
4.5.8	Protección contra incendios	86
4.5.9	Mantenimiento general	87
5	Conclusiones y recomendaciones	88
5.1	Conclusiones	88
5.2	Recomendaciones	89
6	Referencias	91
7	Anexos y apéndices	94

Anexo A	Plan de ejecución BIM	94
1	VISION GENERAL DEL PLAN DE EJECUCION BIM	95
2	INFORMACION DEL PROYECTO	96
2.1	Cronograma del proyecto/Fases/Hitos.....	96
2.2	CONTACTOS DEL PROYECTO	97
3	OBJETIVOS DEL PROYECTO/ USOS DEL BIM	98
3.1	Hoja de análisis del BIM	98
3.2	Usos del BIM	100
4	ROLES DE LOS PARTICIPANTES	101
4.1	Roles y responsabilidades BIM	101
4.2	Diseño del proceso BIM	102
5	CONTROL DE CALIDAD	103
6	NECESIDADES DE TECNOLOGÍA	104
7	ESTRUCTURA DEL MODELO	105
7.1	Estructura de carpetas.....	105
7.2	Nombres de las familias del modelo.....	106
7.3	Sistemas de medidas y coordenadas.....	107
7.4	Nivel de desarrollo de los distintos elementos.....	108
8	ENTREGABLES DEL PROYECTO.....	109
Anexo B	Familias de revit	110
Anexo C	memoria de cálculo estructural	113

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Nivel de Desarrollo para proyectos BIM	13
Cuadro 2. Niveles de precisión.....	15
Cuadro 3. Factores de corrección para prueba SPT para procedimiento en campo	24
Cuadro 4. Principales metas BIM/Objetivos.....	30
Cuadro 5. Usos BIM del proyecto.....	31
Cuadro 6. Nombres de las familias de Revit utilizadas.....	31
Cuadro 7. Niveles de desarrollo para las distintas familias de Revit utilizadas.....	32
Cuadro 8. Caracterización de la madera	44
Cuadro 9. Propiedades del concreto.....	48
Cuadro 10. Resistencia para basas muestreadas	50
Cuadro 11. Datos SPT P1.....	51
Cuadro 12. Datos SPT P2.....	52
Cuadro 13. Datos SPT P3.....	52
Cuadro 14. Parámetros obtenidos del laboratorio para perforación P1.....	53
Cuadro 15. Parámetros obtenidos del laboratorio para perforación P2.....	53
Cuadro 16. Parámetros obtenidos del laboratorio para perforación P3.....	53
Cuadro 17. Código de colores de intervenciones	62
Cuadro 18. Factores usados para el análisis estructural	63
Cuadro 19. Coeficientes calculados, primer modo de oscilación	65
Cuadro 20. Recalculo del primer modo de vibración	65
Cuadro 21. Revisión de derivas máximas por fuerzas sísmicas.....	66
Cuadro 22. Factores usados para análisis estructural por cargas de viento	66
Cuadro 23. Derivas permisibles por carga de viento	67
Cuadro 24. Cargas de diseño aplicadas	72
Cuadro 25. Fuerzas sísmicas aplicadas en eje X	73
Cuadro 26. Fuerzas sísmicas aplicadas en eje Y	73
Cuadro 27. Valores de esfuerzo básicos utilizados	74
Cuadro 28. Fuerzas en vigas de techo.....	76
Cuadro 29. Fuerzas en columnas	76
Cuadro 30. Fuerzas en elementos de cerchas	77
Cuadro 31 .Fuerzas en elementos diagonales de paredes (riostros)	78

Cuadro 32. Fuerzas en elementos de viguetas de piso	79
Cuadro 33. Maderas recomendadas para uso estructural	82
Cuadro A 1. Cronograma del proyecto.....	96
Cuadro A 2. Contactos del proyecto	97
Cuadro A 3. Principales metas BIM/Objetivos.....	98
Cuadro A 4. Usos BIM del proyecto.....	100
Cuadro A 5. Asignaciones de los distintos roles BIM	101
Cuadro A 6. Roles BIM y sus funciones	101
Cuadro A 7. Datos de control de calidad del proceso BIM	103
Cuadro A 8. Programas de cómputo necesarios para el desarrollo BIM del proyecto.....	104
Cuadro A 9. Nombres de los distintos entregables del proyecto.....	105
Cuadro A 10. Nombres de las distintas familias de Revit utilizadas.....	106
Cuadro A 11. Nivel de desarrollo para las distintas familias de Revit utilizadas.....	108
Cuadro A 12. Entregables del proyecto.....	109
Cuadro C 1. Factores de reducción según grado estructural para cada esfuerzo permisible	113
Cuadro C 2. Resistencia disponible correspondiente a varias inclinaciones del grano	113
Cuadro C 3. Ejemplo de diseño a flexión para viga de 54x100 mm	114
Cuadro C 4. Ejemplo de diseño a cortante para viga de 54x100 mm.....	115
Cuadro C 5. Ejemplo de diseño a compresión pura para sección de 60x130 mm	116
Cuadro C 6. Ejemplo de diseño a tensión para sección de 60x130 mm.....	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución arquitectónica de la edificación.....	2
Figura 2. Diagrama de flujo del proyecto.....	8
Figura 3. Fachada principal y lateral de la Antigua Escuela de San Jerónimo de Moravia.....	10
Figura 4. Representación gráfica de los niveles de precisión.....	15
Figura 5. Planos principales de la madera.....	17
Figura 6. Requisitos mínimos para la exploración de campo.....	22
Figura 7. Gráfica de Plasticidad.....	27
Figura 8. Estación de Escaneo P40.....	33
Figura 9. Escáner láser de imágenes Leica BLK360.....	34
Figura 10. Nube de puntos en programa Leica Cyclone.....	35
Figura 11. Nube de puntos procesada.....	36
Figura 12. Vista aérea de techos.....	37
Figura 13. Base de columna deteriorada.....	38
Figura 14. Piso de mosaico rojo y gris.....	39
Figura 15. Piso de mosaico negro y amarillo.....	39
Figura 16. Detalle de puerta.....	40
Figura 17. Detalle interno de ventana.....	41
Figura 18. Ubicación de medición de humedad en cerchas.....	43
Figura 19. Ubicación de la extracción de núcleos de concreto.....	47
Figura 20. Núcleos de concreto extraídos Especímenes E1 y E2.....	48
Figura 21. Muestra extraída del contrapiso.....	49
Figura 22. Ubicación de las basas muestreadas.....	50
Figura 23. Ubicación de las perforaciones SPT.....	51
Figura 24. Ubicación de riostras dentro de paredes de los ejes 2 y 5.....	54
Figura 25. Ubicación de riostras dentro de paredes de los ejes B y H.....	55
Figura 26. Familia de columnas.....	55
Figura 27. Familia de capiteles colocados en las columnas.....	56
Figura 28. Familia de ventanas principales.....	57
Figura 29. Ventila de entrada a cielorraso.....	58
Figura 30. Familia de puertas externas.....	59
Figura 31. Familia de techos.....	60

Figura 32. Detalle de pisos.....	61
Figura 33. Modelo de zonas que requieren intervención.....	61
Figura 34. Factor espectral dinámico.....	64
Figura 35. Sistemas estructurales	67
Figura 36. Distribución de vigas de corredor	68
Figura 37. Detalle de cercha.....	68
Figura 38. Columnas que formas rótulas	69
Figura 39. Columnas con problemas en la base.....	70
Figura 40. Pared con insectos xilófagos.....	71
Figura 41. Óxido en tapicheles y botaguas	71
Figura 42. Ubicación de diferentes elementos estructurales	75
Figura 43. Sistema de viguetas de piso	78
Figura 44. Ubicación de columnas a que requieren reparación.....	80
Figura 45. Detalle de anclaje con epóxico en base de columna.....	81
Figura 46. Detalle de unión de columnas.....	82
Figura 47. Instalación eléctrica actual	85
Figura 48. Detalle de salida a lámpara en cielorraso	86
Figura A 1. Flujo de trabajo BIM	102
Figura A 2. Ubicación del centro del eje de coordenadas.....	107
Figura B 1. AESJ-MURO_BASICO-LAMINA_HG.rfa	110
Figura B 2. AESJ-CUBIERTA-LAMINA_DE_TECHO_ONDULADA.rfa	111
Figura B 3. AESJ-ALEROS_CURVOS.rfa.....	111
Figura B 4. AESJ-CERCHA-CERCHA_PRINCIPAL.rfa.....	112
Figura B 5. AESJ-CLAVADORES-CLAVADORES_100x25mm.rfa.....	112

Ureña Villalobos, Erick Josué
Análisis de vulnerabilidad sísmica y elaboración de modelo HBIM de la obra patrimonial:
Antigua Escuela San Jerónimo
Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José, Costa Rica
E. Ureña V., 2022
xvii, 93, [24]h; ils. col – 35 refs.

RESUMEN

Este proyecto consistió en la elaboración de un modelo HBIM de la Antigua Escuela de San Jerónimo de Moravia, dotándolo de un modelo con información geométrica y de materiales. Posteriormente se realizó un análisis de vulnerabilidad sísmica de la estructura, con la intención de generar información importante para su conservación y restauración.

La ejecución del proyecto pasó por una etapa de investigación de los archivos históricos disponibles sobre de la edificación, así como de las leyes y reglamentos que afectaban el proyecto. Posterior a esto, se realizó el escaneo láser y la identificación de los materiales presentes, mediante caracterización de maderas y pruebas destructivas para los elementos de concreto que fue posible muestrear. Se realizó un estudio de suelo, ya que no se contaba con ninguno del sitio. Una vez caracterizados los materiales, se realizó el modelo HBIM, teniendo de insumo toda la información recolectada previamente. Siguiendo el flujo de trabajo BIM se realizó un análisis y modelo estructural. Para finalizar, teniendo en cuenta los resultados y estado de la estructura, se realizó una propuesta de intervención en las columnas, paredes, techos y pisos.

El modelo HBIM resultante es una herramienta para la preservación del edificio patrimonial, que debe nutrirse a lo largo de su vida, introduciendo información sobre las reparaciones realizadas a la estructura, para que de esta forma se tenga un mejor control de las zonas intervenidas y materiales utilizados.

ESCANEO LÁSER, HBIM, CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES, EDIFICACIÓN PATRIMONIAL, ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Ing. Robert Anglin Fonseca
Escuela de Ingeniería Civil

1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se desarrollan los aspectos básicos que ayudan a entender el proyecto. Se presenta un problema, en el cual se basa la investigación, que será desarrollado a lo largo del documento. Posteriormente, se presentan algunos antecedentes teóricos y prácticos que anteceden a este proyecto de gran importancia para su desarrollo. También, se plantean los objetivos, tanto generales como específicos, así como los alcances y limitaciones que se encontraron al desarrollarlo. Y, por último, se muestra un esquema metodológico que ilustra los procedimientos y métodos que se llevaron a cabo.

1.1 Justificación

Todo proyecto nace de un problema o una necesidad que se desea resolver, para esto, es necesario conocer a fondo el problema al que se enfrenta y el contexto en que se desenvuelve, en este caso, la edificación patrimonial. Por lo que, a continuación, se explican el problema específico y la importancia de este trabajo.

1.1.1 Problema específico

La Antigua Escuela de San Jerónimo de Moravia fue declarada edificación Patrimonio arquitectónico e histórico el 1 de noviembre de 1990 y se encuentra ubicada al costado oeste del parque de San Jerónimo de Moravia, en la provincia de San José. Actualmente, es una de las pocas estructuras de la época que quedan en el sitio, de ahí nace la importancia de su conservación, ya que es parte del legado de la zona.

Su valor histórico radica en que fue construida entre 1932 y 1936, durante la tercera administración de Ricardo Jiménez Oreamuno, sin embargo, la escuela como institución fue fundada en 1886 siendo Bernardo Soto presidente de la República. Al fundarse inició sus labores en una casa de habitación en un sitio diferente al que se encuentra actualmente.

La estructura fue diseñada por el señor Leonidas Retana, quien fue maestro de obras también, junto con el carpintero Manuel Poveda. La construcción consta de paredes de tablilla biselada, con una cubierta principal de láminas de hierro galvanizado ondulado a dos aguas con tapicheles en los costados norte y sur. Cuenta con un corredor volado el cual se cubre con una estructura de techo a cuatro aguas, el cual es soportado por columnas de madera talladas.

El salón principal cuenta con cuatro puertas que dan acceso dos al costado este y las otras dos al costado oeste. Además de cuatro ventanas de guillotina en cada costado este y oeste. La entrada principal cuenta con un pórtico de un techo a dos aguas que sobresale del corredor volado, el cual es soportado por dos columnas. El cielorraso de toda la edificación consta de tablilla biselada con el mismo diseño de las paredes, y en el corredor parte de este posee la misma pendiente de la estructura del techo hasta un alero al mismo nivel alrededor.

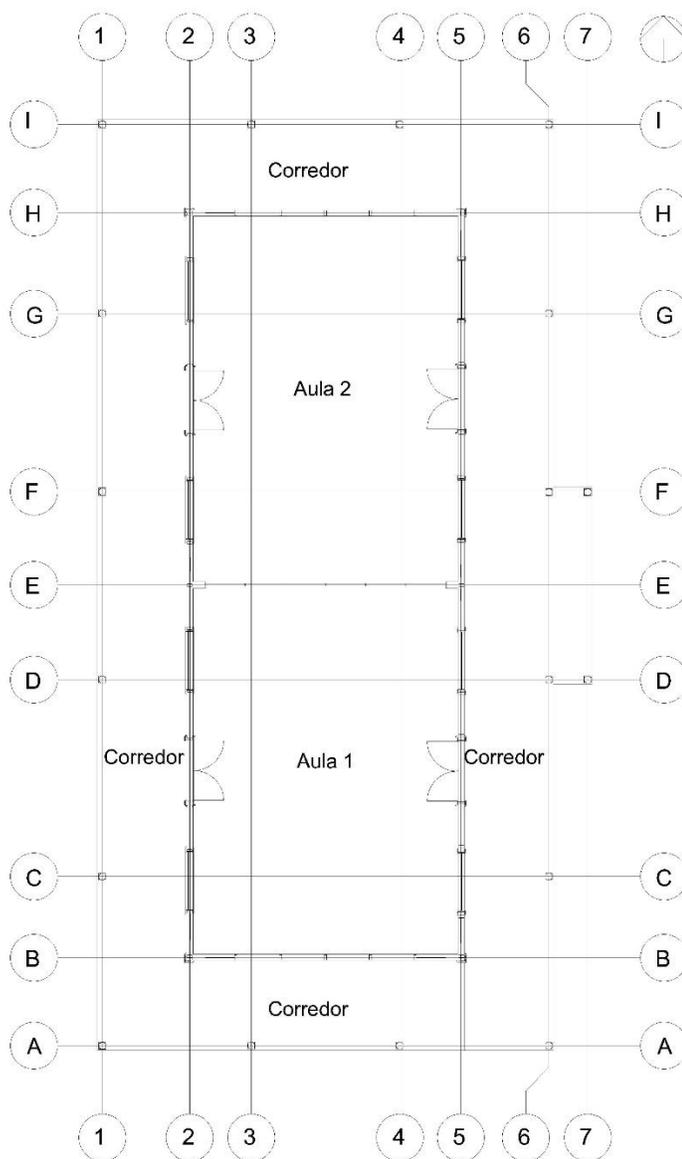


Figura 1. Distribución arquitectónica de la edificación

A partir de lo anterior, y con el fin de preservar la edificación como parte de la memoria histórica de nuestro país, se propuso realizar un levantamiento de la edificación mediante el uso de escáneres láser, la creación de un modelo de información BIM, así como la caracterización de los materiales utilizados y el análisis de vulnerabilidad sísmica.

Con la información recolectada durante la fase de investigación y el análisis de los datos, se espera ampliar la información existente relacionada con la estructura, y que, en base a esta, se puedan tomar mejores decisiones en los futuros procesos de conservación que sufra la estructura, con el fin de preservarla muchos años más.

1.1.2 Importancia

En Costa Rica al año 2021, 392 edificaciones han sido declaradas Patrimonio, entre estas se encuentran distintas estructuras como escuelas, edificios de gobierno, parques de recreo, casas, puentes, entre otras (Centro de conservación Patrimonio Cultural, s.f.).

Todas ellas cuentan con algo en común, que es que reflejan la forma en que los costarricenses han logrado adaptarse al medio y han logrado organizar la vida social, económica y cultural (Centro de Conservación de Patrimonio Cultural, s.f.). Fruto de ellos son las diferentes construcciones a lo largo del país, de distintos tipos arquitectónicos que reflejan el fin para el que fueron creadas y que cumplen un rol importante en el entorno donde se encuentran.

A pesar del valor histórico y cultural que presentan para los costarricenses, muchas de estas edificaciones se encuentran en estado de abandono por sus propietarios, sobre los cuales cae la responsabilidad de mantener en pie la edificación y, por lo tanto, la historia detrás de ella. Muchas de estas, debido a su ubicación y el valor económico de los terrenos, estos factores ejercen una presión económica para que se les dé un uso distinto, donde se prioriza los intereses actuales.

A nivel mundial, existe una tendencia a realizar modelos digitales de aquellas estructuras consideradas patrimonio, con el fin de que las personas alrededor del mundo puedan conocer su historia y arquitectura, con el apoyo de diferentes organizaciones no gubernamentales como la Organización de la Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y el Arte (UNESCO), y el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS), que apoyan las diferentes iniciativas de conservación de estos sitios.

A nivel de ingeniería, es importante realizar modelos digitales por medio del flujo de trabajo BIM, ya que se puede documentar con mucha precisión la geometría las estructuras, así como los materiales con que está construido, un registro fotográfico ligado al modelo, y a partir de esto, el mantenimiento y la operación se puede realizar con una base de datos centralizada y en donde quedan documentadas intervenciones ejecutadas.

1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema

A la fecha de la elaboración del proyecto, en la Universidad de Costa Rica, específicamente en la Escuela de Ingeniería Civil, se realizan distintos trabajos finales de graduación en los cuales se elaboran modelos HBIM de distintas obras patrimoniales, en donde sobresale el Teatro Nacional, y otras con apoyo del Centro de Conservación de Patrimonio Cultural en estructuras como iglesias y puentes, entre otras.

A nivel mundial existen varias iniciativas de diferentes organizaciones y entidades educativas para trabajar los modelos tridimensionales de aquellas edificaciones patrimoniales, tanto a nivel espacial como modelos BIM donde se incluye información de sus materiales constructivos y otras características, llamados comúnmente HBIM (Heritage Building Information Modeling), en referencia a que son estructuras patrimonio (Heritage, según su traducción del inglés).

Diferentes universidades de Estados Unidos, como la Universidad de Pensilvania poseen una línea de investigación sobre edificaciones que han sido escaneadas y de las cuales se han elaborado modelos HBIM, con diferentes propósitos, como realizar un levantamiento de materiales y estado actual de la edificación, en otros casos para realizar trabajos de conservación de la estructura, así como análisis estructurales para conocer su estado según los códigos de diseño actuales y realizar mejoras estructurales para conservar su estado e integridad y asegurar la seguridad de los ocupantes, según el uso que se le dé. En el repositorio "Historic Preservation and Conservation Commons" se pueden encontrar los diferentes trabajos desarrollados.

En Europa, existe la asociación llamada Building SMART, cuyo objetivo es fomentar la eficacia en el sector construcción a través de estándares BIM (Building SMART Spain Chapter, 2018), y cuyos asociados forman parte de las distintas ramas de la ingenierías así como personas interesadas en el desarrollo constructivo. Debido a la gran cantidad de edificios históricos que existen en este continente, la asociación dentro de sus manuales

incluye un capítulo dedicado al HBIM, donde se exponen esquemas a seguir en el levantamiento de edificaciones patrimonio, tomando en cuenta que todas son diferentes y presentan diferentes retos. En su manual dedicado a este tema, exponen también casos de diferentes tipos de edificaciones y como ha sido la documentación, técnica de levantamiento usada, programas usados y los diferentes problemas o retos que se debieron solucionar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Crear un modelo mediante la metodología de trabajo HBIM de La Antigua Escuela de San Jerónimo de Moravia, que sirva para la preservación y mantenimiento de esta.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar un escaneo tridimensional de La Antigua Escuela de San Jerónimo de Moravia, para obtener la geometría de la edificación.
- Elaborar un Plan de Ejecución BIM (PEB), que sirva de guía para el desarrollo del proyecto y futuras intervenciones al modelo digital.
- Identificar los materiales presentes en La Antigua Escuela de San Jerónimo de Moravia y algunas de sus propiedades físico-mecánicas, mediante consulta bibliográfica y pruebas de laboratorio.
- Realizar un modelo digital bajo la metodología BIM de la edificación, a partir de la información obtenida.
- Determinar con el Código Sísmico de Costa Rica 2010-14, la vulnerabilidad sísmica de la estructura actual y realizar una propuesta de reforzamiento estructural, en caso que sea necesario.

1.3 Delimitación del problema

1.3.1 Alcances

El proyecto consistió en realizar un modelo tridimensional de La Antigua Escuela de San Jerónimo de Moravia, que contiene información de algunos de los materiales que fue posible caracterizar presentes en la edificación y un estado actual de los diferentes elementos estructurales y arquitectónicos de la edificación. El modelo HBIM elaborado no incluye la información sobre el estado de conservación actual de cada material o parte identificada ni el sistema electromecánico. Sin embargo, constituye la base para que pueda incorporarse este tipo de información en el futuro.

Con la información obtenida, se realizó un análisis estructural de la edificación con el fin de determinar la vulnerabilidad sísmica de esta, y se recomendaron de manera conceptual, las intervenciones de carácter estructural y algunas arquitectónicas que se deben realizar para mejorar el estado actual. En este análisis no se incluyó la revisión de conexiones entre los diferentes elementos estructurales.

1.3.2 Limitaciones

Al tratarse de una edificación declarada patrimonio, el trabajo de caracterización de materiales tuvo que realizarse dentro de las pautas dadas por el Centro de Conservación del Patrimonio Cultural. Para la extracción de las muestras de concreto, las ubicaciones de estas tuvieron que ser autorizadas por el arquitecto a cargo. Una vez obtenida las muestras para fallarlas por compresión simple (ASTM C39), el tamaño del agregado no cumplía con el tamaño mínimo para el diámetro de broca usado.

Para la caracterización de madera, debido a que no se pueden realizar ensayos con los materiales del sitio para obtener los parámetros estructurales de interés, estos se obtuvieron de la literatura existente. Una vez que se identificó la madera estructural como "Chiricano", no existe literatura con las propiedades de esta, por lo que se utilizaron las del "Pilón", una especie similar.

La ubicación de las vigas del techo del corredor y clavadores se obtuvieron al quitar las láminas de techo en tres puntos específicos, por lo que la ubicación y estado de los demás miembros puede cambiar con respecto a los revisados. También, el emplantillado de las paredes y riostras, se obtuvieron a partir de la ubicación de los clavos presentes en la superficie de la pared, por lo que su estado y dimensiones reales no se conocen. Para el piso de madera en el interior, la distribución de las viguetas y apoyos usadas en el análisis, se utilizó la dada en los planos existentes, por lo que se debe revisar posteriormente en la estructura.

Otra limitante es con respecto a las fundaciones de esta, ya que no existe información con respecto al nivel de desplante ni geometría final de la misma. El tema de excavación para descubrir alguna basa se descartó por temas de seguridad de la edificación y recursos disponibles. La información aportada se limita a lo que es visible.

Con respecto al programa de análisis estructural "Robot Structural Analysis", se tuvo que aprender a usar, por lo que el modelo estructural tuvo que realizarse varias veces hasta

obtener los resultados buscados. Con esto, puede que existan mejores formas de realizar el modelo y ligarlo al modelo arquitectónico.

1.4 Metodología

La metodología aplicada al proyecto, se dividió en 6 fases, como se muestra en la Figura 2. La primera consistió en una etapa de revisión de literatura de temas similares realizados, así como el primer contacto con las instituciones y personas involucradas. En las fases II hasta la V se realizaron las distintas actividades del proyecto, desde la elaboración del Plan BEP, capacitación para el uso de las herramientas, modelado BIM hasta el análisis de vulnerabilidad sísmica. Y en la fase IV, se realizaron los entregables del proyecto, tanto para el Centro de Patrimonio, la escuela de San Jerónimo y para la Escuela de Ingeniería Civil.

1.4.1 Fase I. Investigación preliminar

En esta primera etapa del proyecto, investigó acerca de la Antigua Escuela de San Jerónimo de Moravia. A nivel académico se indagó literatura relacionada con infraestructura patrimonial en otros países, donde la investigación, documentación e intervención se encuentra mejor documentada en el uso de herramientas BIM. A nivel de instituciones, se averiguaron cuales estaban involucrados durante el proceso de investigación, como el Centro de Conservación de Patrimonio y los propietarios del inmueble, en este caso, la junta de administradora, para la obtención de los permisos correspondientes.

1.4.2 Fase II. Elaboración del PEB

Posterior a recabar la información preliminar, como la historia del sitio, las instituciones involucradas y todas aquellas herramientas que faciliten el desarrollo del proyecto, se procedió a realizar el Plan de Ejecución BIM, que es un documento donde se definieron el alcance, las partes interesadas, los encargados de verificar distintas áreas, así como los potenciales usos del modelo. También se definió una nomenclatura para los distintos documentos generados, carpetas, programas a utilizar, con el fin de llevar a cabo el proyecto con orden.

1.4.3 Fase III. Capacitación

Una vez definido el BEP, se procedió con la capacitación del equipo a utilizar, como los escáneres láser y de los programas necesarios, como Revit, Cyclone Register, Robot Structural Analysis, entre otros programas necesarios.

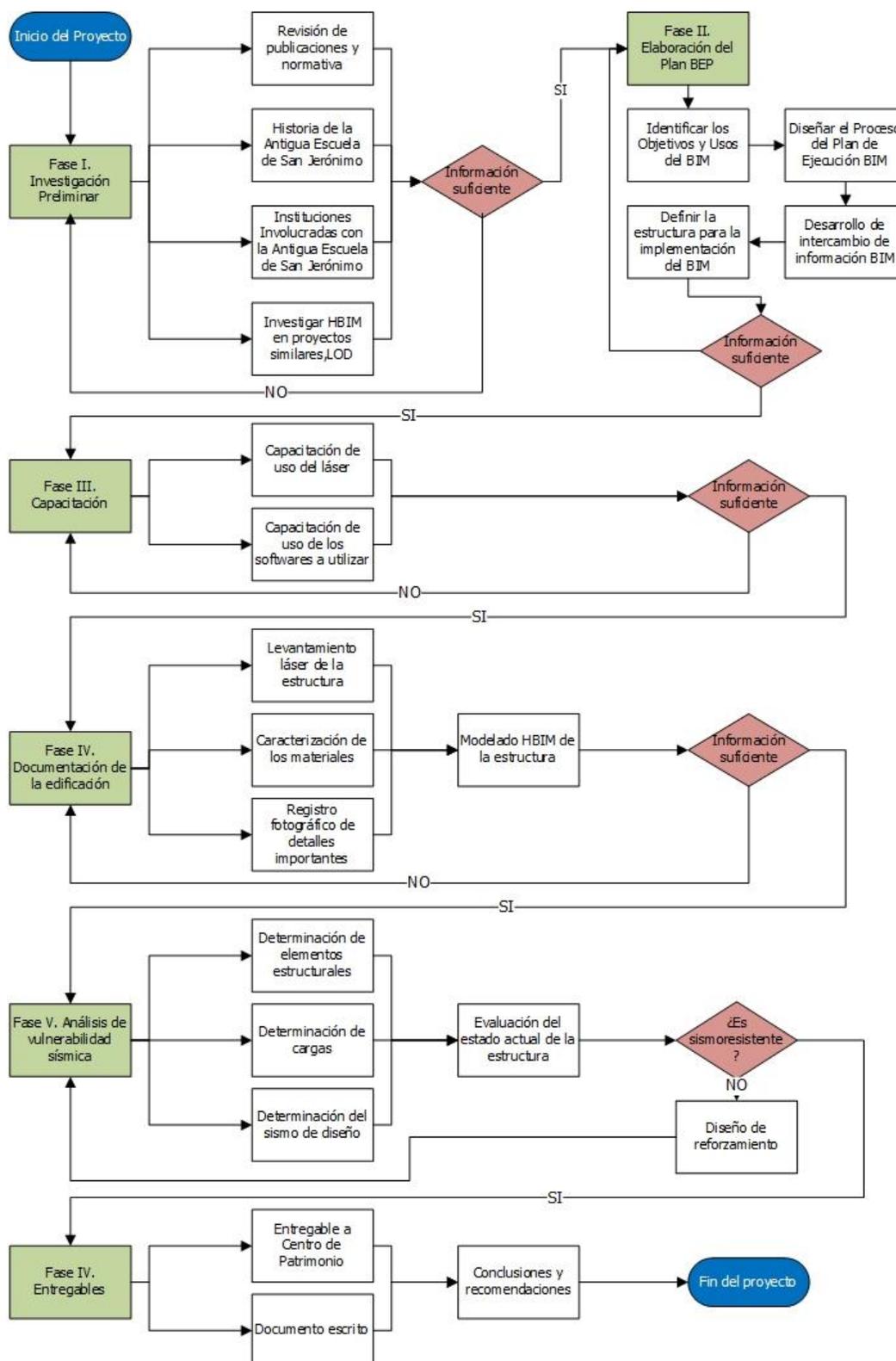


Figura 2. Diagrama de flujo del proyecto

1.4.4 Fase IV. Documentación de la edificación

Una vez que se obtuvieron los permisos correspondientes, y se investigó la metodología BIM y el equipo láser a usar, se realizaron visita al sitio, para realizar el levantamiento de la estructura. En estas visitas se hicieron también el levantamiento fotográfico de elementos que se consideraron importantes, como aquellos con muestras de deterioro, detalles de uniones entre materiales y entre otros. Luego de que se realizaron los escaneos y se contó con la nube de puntos, se inició con el modelado de la estructura en el programa Revit, elegido para realizar el modelo BIM.

En cada visita al sitio, se revisó que la información obtenida en cada visita pasada fuera suficiente. Para la caracterización de materiales, se planeó con anticipación cual era la información buscada y con base a esto, se eligieron los sitios de donde se podían obtener muestras. Para los materiales que se debía hacer uso del LanammeUCR, se gestionaron los permisos y visitas al sitio para realizar los ensayos. En el caso de la caracterización de madera, se coordinó con el ing. Juan Tuk como debían ser las muestras y las fechas de reunión. Una vez obtenida toda esta información, se pudo completar el modelo HBIM.

1.4.5 Fase V. Análisis de vulnerabilidad sísmica

Luego de realizar el modelo BIM e identificados los elementos son estructurales, se procedió a realizar el análisis estructural, donde se determinan las distintas cargas que pueden llegar a trabajar sobre la estructura. Luego, guiado por el "Código Sísmico de Costa Rica 2010-14" y los "Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica", se determinaron las fuerzas con que se comprobó la resistencia de la estructura. Posterior a esto, se elaboró la propuesta de reforzamiento de la edificación sea sismorresistente.

1.4.6 Fase VI. Entregables

Como última fase del proyecto, se prepararon los documentos a entregar a los diferentes interesados. Para el Centro de Patrimonio se exportó el modelo terminado al formato IFC, para que pueda ser abierto con cualquier programa de metodología BIM, así como los resultados del análisis estructural, además de la carpeta con todos los documentos que complementan el proyecto. Paralelamente se trabajó el documento escrito a entregar a la Escuela de Ingeniería Civil. Una vez listo lo anterior, se realizaron las conclusiones y recomendaciones, dirigidas a los interesados.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Historia de La Antigua Escuela de San Jerónimo de Moravia

La construcción de la Escuela actual se realizó entre 1932 y 1936, y cuyo diseño fue realizado por Leonidas Retana quien fue también el maestro de obras y como carpintero destacó Manuel Poveda. El edificio que se muestra en la Figura 3 está compuesto por tablillas de madera biselada, con cubierta de zinc a dos aguas y otro techo a cuatro aguas que cubre el corredor volado que rodea el inmueble. En la entrada principal del edificio sobresale un pórtico con techo a dos aguas y el techo del corredor se encuentra soportado por 13 columnas de madera, en su diseño original. El piso del corredor está compuesto por mosaicos de diferentes combinaciones: rojo con negro y rojo con amarillo. El piso del edificio está compuesto por tablonés de madera.



Figura 3. Fachada principal y lateral de la Antigua Escuela de San Jerónimo de Moravia

Desde el año 1990, que es declarado Patrimonio, es que se tiene registro de las intervenciones realizadas, como la eliminación de un escenario que estaba en el costado norte del edificio que no formaba parte de su diseño inicial, así como la pérdida de una baranda perimetral. Sin embargo, desde ese año, ha sido intervenido en varias ocasiones para evitar el deterioro mayor de la estructura y que pueda funcionar para uso como aulas.

2.2 Metodología BIM para edificios Patrimoniales

El acrónimo BIM (Building Information Modeling) es una herramienta para el diseño, planificación, construcción y mantenimiento de una estructura, donde mediante un flujo de trabajo, se tiene un modelo tridimensional que posee el modelo arquitectónico, estructural, cantidad de materiales, cronograma de construcción y programa de mantenimiento (Building SMART Spain Chapter, 2018) y no a un programa específico que sirve como herramienta para realizar un modelo tridimensional de una edificación a construir.

Debido a las ventajas que presenta trabajar con modelos tridimensionales que contienen información de sus elementos, es que existe una oportunidad para la preservación del patrimonio, ya que no sólo es estático como un modelo en 2 dimensiones, sino que se puede crear uno que al igual que la estructura cambia con el tiempo, por lo que se le debe dar mantenimiento, es decir, actualizarlo en caso de alguna intervención que se le realice, o deterioro significativo que presente a lo largo del tiempo (Pocobelli, Boehm, Bryan, Grau-Bové, & Still, 2018).

Para realizar modelos BIM de patrimonio existen diferentes técnicas para ejecutar el levantamiento, como lo son la fotogrametría, que consiste en hacer un levantamiento fotográfico de la estructura de interés, y conociendo algunas medidas reales, se asocian estas a su ubicación en la fotos, y con la ayuda de algún programa de computo especializado, se crea el modelo. Sin embargo, esta técnica es más usada para recrear sitios arqueológicos, ya que presenta la ventaja de fotografiar una superficie extensa en corto tiempo (Bedford, 2017).

Otra técnica disponible consisten en el uso de escáneres láser, la cual consiste en colocar el equipo de medición en el espacio que se desea levantar, con la ventaja de que es un proceso rápido y automático, donde el producto de salida es una nube de puntos que debe ser procesada por algún programa para realizar el archivo tridimensional (Boardman & Bryan, 2018).

Según el equipo utilizado, la nube de puntos se compone de ubicaciones en las diferentes coordenadas, y en equipos más avanzados, puede tener una cámara integrada, donde asocia las diferentes coordenadas con un color extraído de la fotografía, por lo cual el modelo puede poseer propiedades como el color de los diferentes elementos del inmueble (Leica Geosystems, 2022).

Cabe resaltar que estas nubes de puntos, dependiendo de la dimensión del escaneo, representa millones de puntos, que consumen capacidad de la computadora tanto en espacio como en velocidad de procesamiento de datos, por lo cual, es necesario contar con hardware, con un mínimo de 16 Gb de memoria RAM con su respectiva tarjeta de video y software de gran capacidad, como los que provee la empresa Leica como Cyclone Register 360 y Leica 3DR.

Luego de trasladar los datos a la computadora, se debe realizar el modelo HBIM, que consiste en parametrizar los diferentes elementos de la estructura, que en Revit se llaman familias, como paredes, ventanas, puertas, columnas, entre otros, y asignarle diferentes propiedades a cada uno, como las dimensiones (que es lo básico que deben tener) así como el material en que está construido y características físico-mecánicas (si se cuenta con esta información). A los modelos HBIM, se le pueden asociar fotografías de los distintos elementos, con varios fines, ya sea caracterizar una textura, estado de deterioro, alguna falla o alguna característica que se considere importante incluir en este (Diara & Rinaudo, 2018).

Tomando en cuenta estos motivos, y con miras a estandarizar la información mínima que debe poseer un modelo, a nivel mundial varias instituciones y asociaciones relacionadas con el tema de arquitectura, ingeniería y construcción han definido diferentes Niveles de Desarrollo, más conocido como LoD (Level of Development) (Kreider & Messner, 2013), que se muestran en el Cuadro 1 La información que debe incluir cada LoD se actualiza constantemente.

Cuadro 1. Nivel de Desarrollo para proyectos BIM

Nivel de Desarrollo	Descripción
LOD 100	El elemento del modelo puede estar representado gráficamente en el modelo con un símbolo u otra representación genérica, sin ser información precisa del elemento o ubicación exacta.
LOD 200	El elemento del modelo se representa gráficamente como un sistema genérico, objeto o conjunto donde se determinan cantidades, tamaño, forma, ubicación y orientación aproximados. Información no grafica puede adjuntarse al modelo.
LOD 300	El elemento del modelo se representa gráficamente al modelo como un sistema u objeto específico en términos de cantidad, tamaño, forma, ubicación y orientación. Se puede agregar información no gráfica al modelo.
LOD 400	El elemento del modelo se representa gráficamente dentro del modelo como un sistema, objeto o ensamblaje específico en términos de tamaño, forma, ubicación, cantidad y orientación con información detallada de fabricación, ensamblaje e instalación. Información no gráfica se puede adjuntar al modelo, como fichas técnicas.
LOD 500	El elemento del modelo es una representación verificada en campo términos de tamaño, forma, ubicación, cantidad y orientación. La información no grafica se puede adjuntar al modelo.

Fuente: (Kreider & Messner, 2013)

El nivel de desarrollo debe establecerse al iniciar el diseño de la obra y se detalla en el Plan de Ejecución BIM, con el fin de que, si la información generada es para una licitación, todos los oferentes ofrezcan el mínimo de información que se solicita. Para elegir el nivel de desarrollo es importante conocer el objetivo que tiene el modelo o en la etapa en que se encuentra el proyecto, ya que, para cada etapa del proyecto, se necesitará información menos o más detallada (Building SMART Spanish Chapter, 2014).

2.2.1 Plan de ejecución BIM (PEB)

Para lograr un modelo BIM de calidad y que cumpla con los requerimientos de todos los participantes en el proyecto, se debe establecer un Plan de Ejecución BIM al inicio de este, ya que permite llevar a cabo una estrategia definida y planificada para lograr los objetivos en las distintas etapas.

El PEB dependerá de la etapa del proyecto, ya sea planificación, diseño, construcción u operación, pero en este se definen los usos apropiados BIM del proyecto, junto con el diseño detallado y la documentación establecida a lo largo del ciclo de vida BIM. Una vez definido esto, el equipo de trabajo se encargará de monitorear el desarrollo del plan para lograr los beneficios que conlleva desarrollar un proyecto bajo la esta metodología (Del Pezo Manyá, 2018).

Para facilitar el trabajo, varias instituciones, como la Universidad de Pennsylvania (UPENN) han creado guías para el desarrollo del BEP a partir de la colaboración e investigación con empresas que utilizan la metodología BIM, con la intención de que los desarrolladores de proyectos tengan una noción de la información mínima que debe considerarse, los participantes del proyecto tengan claras sus responsabilidades, los alcances del proyecto, la forma de comunicación entre colaboradores, la forma en que se va a documentar la información, entre otras metas. (Penn State, 2021).

Otros países, como Chile, ha desarrollado un programa llamado PlanBIM, que tiene como objetivo estandarizar la implementación BIM en los proyectos públicos, y en donde han desarrollado un manual y guías BEP para los distintos tipos de proyecto. (PlanBim, 2021)

2.2.2 Nivel de Precisión

El Nivel de Precisión o Level of Accuracy (LOA) se refiere al nivel de exactitud de los datos tomados a partir de un escaneo láser, el cual se divide en 5 rangos de tolerancia según se especifica en el Cuadro 2. La elección de la precisión de los datos se debe establecer al principio del proyecto y estos pueden depender de las necesidades del proyecto y del presupuesto disponible, así como de los equipos disponibles.

Cuadro 2. Niveles de precisión

Nivel	Rango superior	Rango Inferior
UDLOA	Definido por el usuario	Definido por el usuario
LOA10	15cm	5cm
LOA20	5cm	15mm
LOA30	15mm	5mm
LOA40	5mm	1mm
LOA50	1mm	0

Fuente: (US Institute of Building Documentation, 2019)

Para implementarlo en un proyecto se deben seguir los siguientes pasos, con el fin de lograr la calidad deseada:

1. Definir los objetivos del proyecto y los elementos a documentar
2. Determinar cómo se van a reportar los resultados
3. Definir el nivel de exactitud de los elementos
4. Formular un método de validación de los resultados

De manera gráfica, los distintos niveles se pueden representar de la forma en que se muestra la Figura 4.

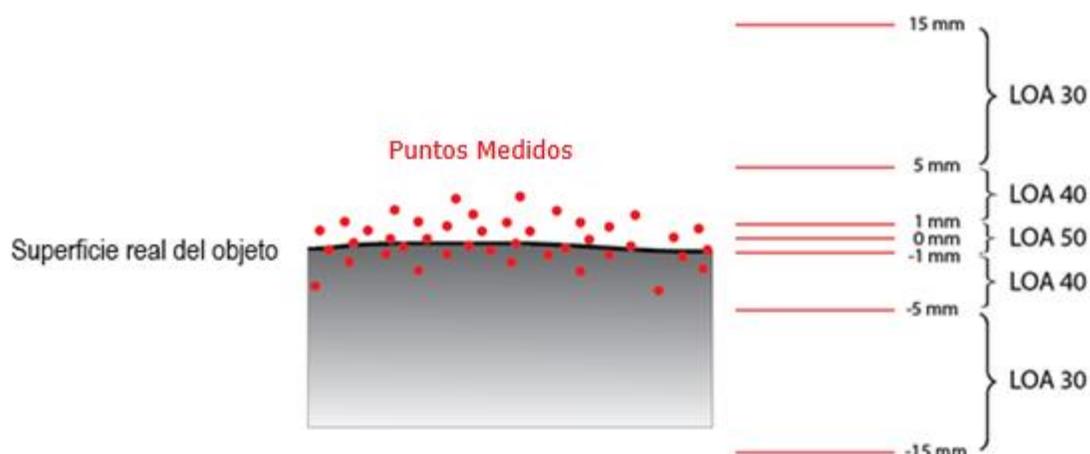


Figura 4. Representación gráfica de los niveles de precisión

Modificado de: (US Institute of Building Documentation, 2019)

2.3 Caracterización de materiales

2.3.1 Madera

Con la introducción de herramientas más sofisticadas en nuestro país, que permitieron un aprovechamiento del recurso maderero, se empieza a dar un uso más intensivo de esta para la construcción de edificaciones relacionadas con la industria bananera, sin embargo, la tecnología se extiende a edificaciones relacionadas con otras actividades (Centro de Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural, 2000).

La madera cuenta con propiedades físicas y mecánicas que son de interés para la ingeniería, ya que conociéndolas inicialmente y como se van a comportar durante su tiempo de uso, permiten una mejor escogencia del producto y su respectivo diseño.

El contenido de humedad es una característica física de la madera. Se define como la diferencia entre el peso de una muestra una vez expuesta a un horno a 103 °C hasta llegar a un peso constante y el peso inicial. Un contenido de humedad bajo es importante para la estabilidad del material, ya que altos valores de este, así como cambios de temperatura del ambiente, producen cambios volumétricos en esta, que inducen esfuerzos internos en el material. La madera es un material higroscópico, es decir que su contenido de humedad varía ya que depende de la humedad ambiental del sitio donde se encuentra. (Tuk, 2019)

A nivel estructural, la madera es un material anisotrópico, es decir presenta propiedades mecánicas en tres planos diferentes: transversal, radial y tangencial (Coto Portuguesez, 2015), como se muestra en la Figura 5 y según estos planos es que se realizan los cortes en la madera, tanto para el aprovechamiento comercial del material como aprovechamiento de sus propiedades mecánicas como lo son la resistencia a flexión, compresión y cortante.

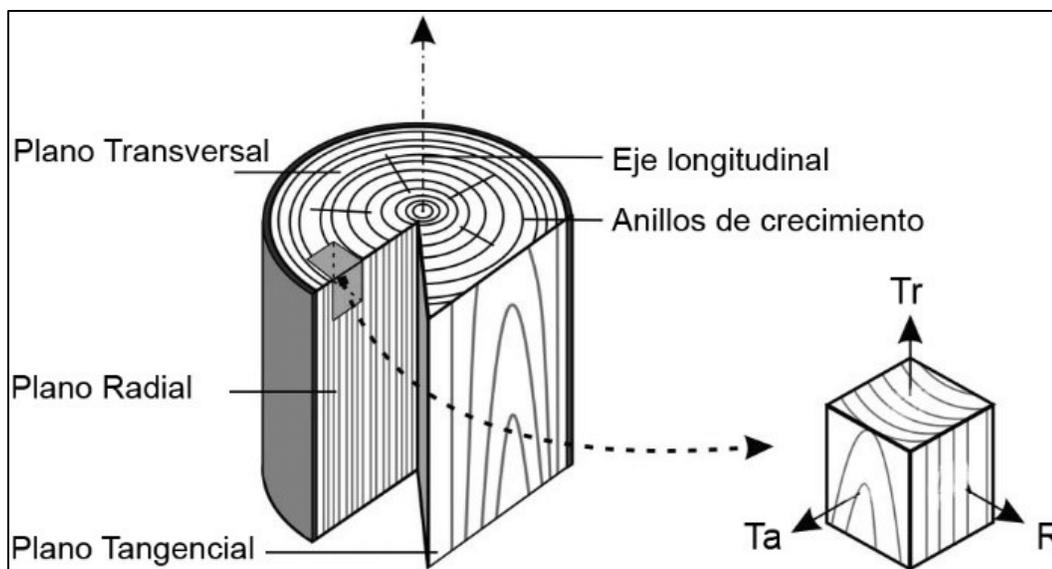


Figura 5. Planos principales de la madera

Fuente: (Feijo, Ramón , & Pucha, 2018)

2.3.2 Investigación de materiales

Para contar con un modelo útil en el campo de la ingeniería, no solo basta detallar su geometría, sino que es necesario caracterizar los materiales utilizados para la construcción, de tal modo que se pueda identificar cuales elementos son de uso estructural y cuales son meramente arquitectónicos.

Para este tipo de estructuras, es importante realizar una buena caracterización de materiales donde destacan 4 áreas de interés (Evans, 2015) que tienen como fin:

- Protección e identificación de estructuras históricas, con el fin de conocer el estado actual de estas.
- En caso de requerir alguna reparación, se puede realizar de una manera adecuada la intervención, con los materiales óptimos y la técnica menos invasiva para la edificación.
- Diseño de nuevas intervenciones, esto con el fin de darle un nuevo uso a la estructura, así como mantenimiento cada cierto periodo de tiempo.
- Manejo de costo/riesgo del estado actual, ya que, si se conoce la estructura, se puede estudiar mejor la intervención a realizar y el costo tanto económico como cultural que este conlleva, así como el riesgo que se asume en el momento de realizar intervenciones, tanto para el dueño como para el contratista.

Para elementos arquitectónicos en muchos casos bastará conocer el material con que es construido, por ejemplo, el tipo de madera, cantidad de humedad y dimensiones, con el fin de que, en caso de alguna reparación, se pueda conseguir un material lo más parecido posible al resto de la estructura y se altere lo menos posible la estructura original (Peña Mondragón & Lourenço, 2012).

Sobre el tema estructural, características como tipo de material, y sus propiedades físico-mecánicas son necesarias para realizar posteriores análisis, con el fin de determinar la seguridad de la estructura o evaluar posibles cambios en su uso. Para determinar estas características existen técnicas variadas, tanto en aplicación como complejidad y costo que se pueden aplicar para determinar o aproximar las propiedades buscadas (Evans, 2015).

Además, es importante recalcar que al trabajarse en edificios patrimoniales, es necesario realizar pruebas en la medida de lo posible no destructivas, ya que el objetivo de todo el estudio es preservar el patrimonio e historia. Dentro de las pruebas no destructivas se encuentran:

- Inspección visual: este paso es quizá el más importante, ya que, realizando un análisis visual de la estructura como primera actividad, se conoce el estado del edificio y con esto, se puede determinar cuál es el siguiente paso lógico a realizar, cual herramienta puede funcionar mejor según presupuesto disponible y la accesibilidad del sitio para el uso de esta. La inspección puede estar acompañada por un levantamiento fotográfico o con láser 3D, para poder estudiar de forma detallada la estructura (Evans, 2015).
- Pruebas acústicas o ultrasónicas: con el fin de estimar parámetros mecánicos en el material de estudio, como el módulo elástico, mediante la aplicación de ondas que viajan a través del material, que pueden ser producidas por un impacto o por ondas sonido. Luego con un sensor en el extremo contrario se recibe a señal, y por medio de la longitud de onda, se puede estimar el valor buscado, conociendo la longitud del elemento y el tiempo que dura en pasar por el elemento. La técnica y cantidad de sensores necesarios dependen del equipo utilizado (Ross, 2015)
- Prueba de resistividad eléctrica: son instrumentos usados para medir la humedad de la madera. Por medio de dos pines que se apoyan en la madera, estos forman un arco eléctrico, lo que permite medir la resistencia entre ambos electrodos. Esta medida se basa en la relación de la inversa logarítmica que existe entre el contenido

de humedad y la resistencia al paso de la corriente eléctrica. Dentro de las limitantes a este método se encuentra que a partir de un nivel de humedad, la relación deja de cumplirse, así como la presencia de metales, nudos o cambios en la densidad de la madera, las medidas dejan de ser precisas (Tuk, 2019).

2.3.3 Estructuras de concreto

Para caracterizar los elementos de concreto, es necesario realizar pruebas tanto destructivas como no destructivas en la estructura. A continuación, se mencionan los ensayos que permiten caracterizar los elementos deseados, cumpliendo un conjunto de normas, en este caso las ASTM, con el fin de que los resultados obtenidos tengan validez y respaldo. La norma más utilizada para conocer la resistencia del concreto es la compresión de cilindros, sin embargo, la prueba de esclerómetro y las pautas a seguir para extraerlos, son importantes para una correcta caracterización.

2.3.3.1 Método de ensayo. Determinación del número de rebote en concreto endurecido ASTM C805

Un esclerómetro es un instrumento que se emplea para la medición de la resistencia a la compresión del concreto. Utiliza el principio de medición de Schmidt, que mediante un golpe que se ejerce al concreto y según su dureza rebota menos o más. En el dispositivo se mide el rebote y se convierte en una resistencia a compresión (PCE Iberica S.L. Instrumentación, 2021).

Este instrumento es utilizado para medir concreto en obra, por lo que es portátil y de fácil uso. Además, no es una prueba destructiva al no dañar la superficie sobre la cual se aplican los golpes. Sin embargo, para la interpretación de los resultados, se debe tomar en cuenta si existen condiciones de humedad en el concreto, repellos, presencia de agregados gruesos, vacíos, entre otros factores.

Es importante calibrar el esclerómetro con la resistencia conocida de un elemento de concreto, ya que, dependiendo de los factores mencionados anteriormente, y del número de golpes obtenido, así puede variar precisión, así como de la marca del equipo. (Delibes, 1982)

El ensayo se ejecuta sosteniendo el esclerómetro de forma perpendicular a la superficie de prueba y se empuja el instrumento hasta que el martillo impacte. Posterior al impacto, se

sostiene el instrumento para tomar la medición. Se realizan 10 impactos a no menos de 25 mm entre puntos y se desecha la medición más alta y la más baja y luego se calcula el promedio de impactos. Este promedio se asocia a una resistencia, dada por una tabla o gráfica, según el equipo a utilizar.

2.3.3.2 Método de ensayo estándar para obtención y ensayo de núcleos taladrados y vigas aserradas de concreto ASTM C42

Este ensayo consiste en la extracción de núcleos de concreto, mediante el uso de un taladro con una broca hueca con punta de diamante, en estructuras de concreto que durante el proceso de construcción la resistencia se encontró por debajo de la esperada o para obtener información de resistencia de estructuras antiguas.

Lo primero que debe realizarse es identificar las zonas y cantidad de núcleos a extraer para que las muestras sean representativas, posterior a esto, se debe elegir la orientación del taladro, la cual puede ser vertical, horizontal o diagonal. Al existir varios diámetros de broca, esta elección debe realizarse dependiendo del tamaño máximo conocido del agregado o para que la relación de largo/diámetro sea cercana a 2:1. Si el fin es diferente a conocer la resistencia, se puede utilizar el diámetro según convenga para los fines y las características propias del proyecto o estructura (ASTM International, 2020).

2.3.3.3 Resistencia a la Compresión de cilindros de concreto ASTM C39

La prueba consiste en determinar la resistencia a la compresión de cilindros de concretos, ya sean remoldeados o extraídos de la estructura de interés.

Este ensayo consiste en introducir el cilindro en una prensa hidráulica hasta llevarlo a la falla, para conocer su resistencia y para esto, los cilindros deben cumplir varias condiciones que se señalan a continuación:

- La relación Longitud/Diámetro (L/D), debe rondar entre 2.1:1 a 1.95:1, pero si no se logra cumplir esta relación, se debe aplicar un factor de corrección, según lo menciona la norma.
- Las caras donde se aplica la carga, deben ser perpendiculares entre sí, para evitar excentricidades que alteren los resultados de la prueba.

- La superficie del cilindro no debe mostrar daños o pérdida de material, ya que puede arrojar valores de resistencia que no representen la realidad. También, las caras donde se aplica la carga debe estar limpia y ser lo plana posible.

Una vez alcanzada la falla, se debe anotar el valor de la carga y describir la forma de la falla, ya sea mediante un dibujo o una fotografía, ya que la falla del cilindro se puede relacionar con alguna imperfección en la estructura del concreto.

2.3.4 Exploración, muestreo y caracterización de suelos

Como parte de la caracterización de materiales, es importante conocer el medio soportante de la estructura, con el fin de realizar un modelo geotécnico. Para realizarlo, se debe tomar en cuenta el fin, que, en este caso corresponde a una obra de magnitud baja, y los recursos disponibles, tanto de tecnológicos como económicos con que cuenta el proyecto.

Conociendo el tipo de proyecto y los recursos con que se cuentan, el Código de Cimentaciones de Costa Rica, proporciona una guía de las perforaciones mínimas que se deben realizar como se muestra en la Figura 6, con el fin de tener información que represente las condiciones del suelo existente.

Luego de conocer la cantidad y profundidad de las perforaciones a realizar, se debe elegir el método con el cual se va a extraer las muestras. Por su facilidad y popularidad, en Costa Rica, el método de exploración más utilizado es la Prueba de Penetración Estándar (SPT) para extraer muestras que posteriormente serán analizadas en el laboratorio, y por medio de correlaciones se puede dar una idea de la resistencia del suelo. A continuación, se detalla en que consiste cada prueba y los análisis de laboratorio que se realizan con las muestras obtenidas.

Magnitud de la obra ^(A)	Complejidad Geotécnica ^(B)		
	Baja	Media	Alta
Baja	N mín: 2 E máx: 60 m P mín: $D_f + 2$ m	N mín: 3 E máx: 40 m P mín: $D_f + 3$ m	N mín: 4 E máx: 30 m P mín: $D_f + 4$ m
Media	N mín: 2 E máx: 50 m P mín: $D_f + 3$ m	N mín: 3 E máx: 35 m P mín: $D_f + 3$ m	N mín: 4 E máx: 25 m P mín: $D_f + 4$ m
Alta	N mín: 2 E máx: 40 m P mín: $D_f + 4$ m	N mín: 3 E máx: 30 m P mín: $D_f + 3$ m	N mín: 4 E máx: 20 m P mín: $D_f + 5$ m
Especial	La campaña de exploración de campo depende del proyecto y será definida por el ingeniero geotecnista.		

N mín: Número mínimo de perforaciones o puntos de exploración.

E máx: Espaciamiento máximo entre puntos de sondeo o de exploración.

P mín: Profundidad mínima de los sondeos, en m.

D_f : Profundidad de desplante estimada de cimentaciones, en m.

^(A) Magnitud de la obra

Baja: Construcciones menores de 3 niveles; incluye residencias, bodegas y urbanizaciones, entre otras.

Media: Edificaciones de 4 a 10 niveles o cargas menores de 3000 kN por apoyo y naves industriales

Alta: Edificaciones mayores de 10 niveles o cargas mayores de 3000 kN por apoyo.

Especial: Construcciones que por su magnitud, complejidad estructural o de excavación, o condiciones especiales de proceso constructivo, requieren de estudios particulares. Casos especiales de cimentación como losas, pilotes, cajones de cimentación, entre otros.

^(B) Complejidad Geotécnica

A definir por el ingeniero geotecnista que estará a cargo del estudio correspondiente.

Figura 6. Requisitos mínimos para la exploración de campo
Fuente: Código de cimentaciones de Costa Rica, 2009

2.3.4.1 Prueba de Penetración Estándar (SPT)

Esta prueba fue desarrollada alrededor de 1927 (López Menardi, 2003), es la más popular para la exploración geotécnica, y está estandarizada bajo la norma ASTM 1586, donde se describe el método, equipo a utilizar y criterios para detener el ensayo.

La prueba consiste en introducir un muestreador partido, bajo los golpes de un martillo de 63.5 kg, contando la cantidad de golpes N cada 15 cm. El dispositivo de muestreo tiene una distancia de 45 cm, por lo que se divide en 3 segmentos de 15 cm y los golpes que se cuentan son los últimos 2, para obtener el número de golpes N.

Para detener la prueba se debe cumplir alguno de los siguientes criterios:

- 50 golpes para un avance de 15 cm
- 100 golpes para un avance de 30 cm
- 10 golpes sin avance.

Luego de obtener la cantidad de golpes, se debe realizar una corrección por pérdidas de energía, las cuales pueden ser causadas por la fricción entre el muestreador y el suelo, mala ejecución por parte de los técnicos, entre otras.

Para calcular la resistencia portante del suelo, se deben aplicar factores de corrección a los golpes obtenidos durante el ensayo. Los factores se muestran a continuación en el Cuadro 3 (Das, 2012)

Cuadro 3. Factores de corrección para prueba SPT para procedimiento en campo

Factor	Variables del equipo	Corrección	
		Término	Valor
Porcentaje de energía	Martillo de seguridad	C_{ER}	0.6
	Martillo de toroide		0.45
Diámetro del cilindro	65 a 115 mm	C_B	1.0
	150 mm		1.05
	200 mm		1.15
Método de muestreo	Muestreador estándar	C_S	1.0
	Muestreador con recubrimiento para arena y arcilla densas		0.8
	Muestreador con recubrimiento para arena suelta		0.9
Longitud de la barra	>10 m	C_R	1.0
	6 a 10 m		0.95
	4 a 6 m		0.85
	0 a 4 m		0.75

Modificado de: Variación de C_{ER} , C_B , C_S Y C_R (Das, 2012)

Para calcular realizar la corrección a la cantidad de golpes aplicados, se procede a aplicar la siguiente fórmula:

$$N_{60} = \frac{C_{ER} * C_B * C_S * C_R * N}{60} \quad [1]$$

Posterior a corregir el número de golpes, se puede calcular la resistencia al corte no drenada de arcilla (c_u) por medio de una correlación al N_{60} , por medio de la ecuación [2], propuesta por Hara y colaboradores

$$c_u = 0,29 * N_{60}^{0,72} * p_a \quad [2]$$

Donde p_a es la presión atmosférica (aproximadamente 100 kN/m²)

2.3.4.2 Humedad Natural ASTM D4959

Bajo esta norma se define el procedimiento para conocer la humedad natural de un suelo, roca o agregado, con el fin de definir el grado de saturación de agua del material. El método consiste en utilizar una porción de la muestra, de peso conocido y ponerla a secar en un horno a 110° C bajo un proceso de masa constante, cuyo tiempo aproximado es de 24 horas de secado para llegar a esta condición. Posteriormente, se pesa la masa resultante y se calcula la cantidad de agua que perdió la muestra y el resultado se proporciona como un porcentaje de masa.

La utilidad de conocer el porcentaje de humedad natural del suelo, es que la resistencia del suelo cambia con la cantidad de agua que posea, puede provocar cambios de volumen, de cohesión y, en suelos saturados, esta puede ejercer presiones negativas que afecten la estructura o en excavaciones que deban realizarse.

2.3.4.3 Material más fino que 0,075 mm (Malla N° 200) por lavado de material ASTM C117

En esta norma se define el proceso para determinar la cantidad de finos que posee un suelo o agregados. El proceso se realiza lavando el material en una malla N° 200 hasta que deje de pasar material por el tamiz.

La utilidad de este procedimiento está en que al conocer el porcentaje de finos que posee un material, ayuda a realizar la clasificación del suelo.

2.3.4.4 Gravedad específica de suelos ASTM D854

La gravedad específica de un suelo se define como la relación entre el peso específico de los sólidos y el peso específico del agua destilada a 4° C. Su utilidad se encuentra en que se utiliza para calcular relaciones de fases de suelos, como razón de vacíos o grado de saturación.

El procedimiento se realiza con material tamizado por la malla N° 40, el cual luego una masa conocida se introduce en un picnómetro de volumen conocido y se llena con agua destilada. Posteriormente se le saca el aire por un tiempo de 2 horas y una vez pasado este tiempo, se tempera a 30 °C. Se pesa la masa final del picnómetro y posterior a esto se seca al horno

en un proceso de masa constante. Conociendo la masa final de la muestra de suelo se calcula la gravedad específica.

2.3.4.5 Límites de Atterberg ASTM D4318

Los suelos, debido a que su comportamiento cambia según la cantidad de agua que retengan según su naturaleza mineral, para no tener que estudiar y clasificarlos a fondo cada uno, es que se propuso clasificarlos según la consistencia debido a los cambios en la humedad de estos. La importancia de este ensayo es identificar el tipo de suelo presente en el lugar, y a partir de esta, predecir su comportamiento asociado al tipo de suelo.

Para definir los límites de Atterberg, se debe identificar el límite líquido y el límite plástico por medio de ensayos, y posteriormente calcular el índice de plasticidad. Posteriormente, conociendo el índice de plasticidad y el límite líquido, se clasifica el suelo mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

El índice plástico se define como la humedad que necesita un suelo para cambiar de un estado plástico a uno semisólido. El ensayo consiste en realizar rollitos del suelo de 3,18 mm de diámetro aproximadamente, hasta que estos se agrieten. Luego se pesan los rollitos y se introducen al horno a 110 °C y cuando lleguen a una masa constante, o sea, que dejen de perder humedad, se pesan de nuevo y se calcula la humedad presente.

El índice líquido es la cantidad de humedad que debe tener un suelo para que fluya de un estado líquido a uno plástico. Este se determina usando la cuchara de Casagrande y se calcula el contenido de humedad que posee el suelo para cerrar una ranura de 12,7 mm mediante 25 golpes. En el ensayo se calculan varios puntos (cantidad de golpes vs porcentaje de humedad) y se encuentra este valor.

El índice de plasticidad es la resta del límite Líquido menos el límite plástico y es necesario para clasificar el tipo de suelo.

2.3.4.6 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos ASTM D2487

El sistema Unificado de Clasificación de Suelos, estandarizado bajo la norma ASTM D2487, fue propuesto por Albert Casagrande en 1942 y luego fue adoptado y revisado por entidades estadounidenses hasta su normalización.

Su importancia radica en que clasifica los suelos más allá de su apariencia física y se basa en sus propiedades físicas como índice de plasticidad (IP), límite líquido (LL) y granulometría. En la Figura 7 se muestra la Gráfica de Plasticidad, donde conociendo el límite líquido e índice de plasticidad se puede iniciar con la clasificación.

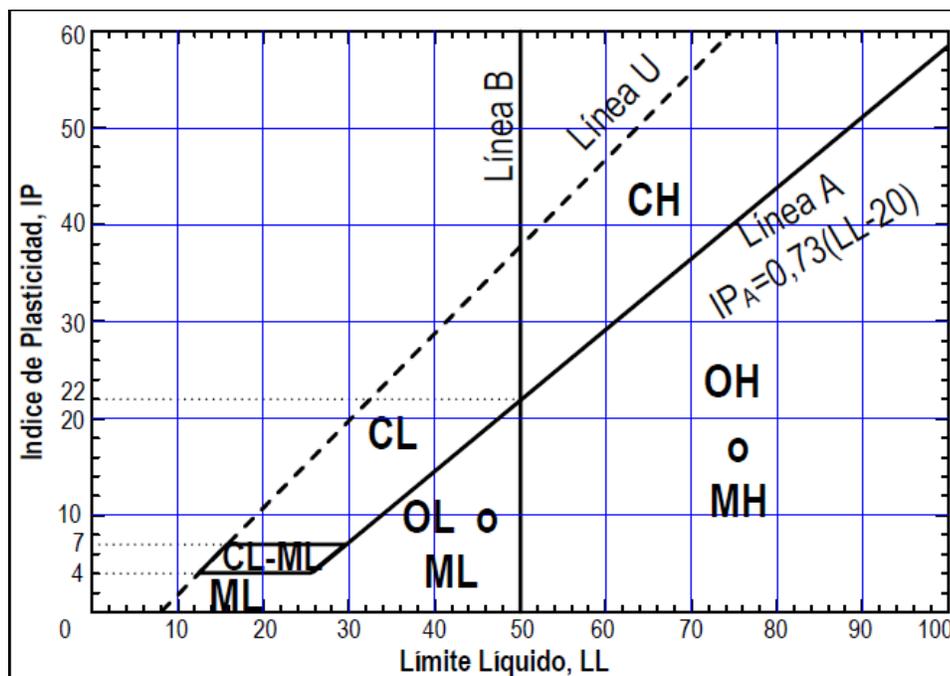


Figura 7. Gráfica de Plasticidad

Fuente: (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

Las abreviaturas que se encuentran en las diferentes áreas corresponden a distintos tipos de suelos en que se puede clasificar el suelo, dependiendo del límite líquido y del índice de plasticidad.

2.3.4.7 Compresión Inconfinada o Simple ASTM D2166

La prueba de compresión inconfinada es un tipo especial de prueba triaxial no consolidada no drenada, donde se aplica un esfuerzo axial a la muestra hasta ocasionar su falla. Se utiliza para suelos cohesivos.

La prueba consiste en aplicar carga axial a un cilindro de suelo, con una relación longitud/diámetro de 2:1 aproximadamente. La muestra puede ser inalterada, remoldeada o reconstruida a la cual se le aplica una carga a una velocidad de un 0.5% a 2%/min de deformación unitaria hasta llevar a la falla. El esfuerzo de compresión es el esfuerzo de falla

y el esfuerzo cortante no drenado se puede calcular como la mitad del esfuerzo de compresión.

2.4 Análisis estructural y de vulnerabilidad sísmica

La vulnerabilidad contemplada como primer caso es la sísmica, ya que en Costa Rica al ser un país altamente sísmico y debido a la antigüedad de la edificación, el sismo es el evento extraordinario que puede dañar la edificación. Esta es la predisposición de una estructura a sufrir daños ante la ocurrencia de sismos. Se asocia con las características físicas y estructurales de diseño, cuyo conjunto define el comportamiento propio de cada estructura ante el evento y el comportamiento con el medio en que se desenvuelve (Vargas Rosales, 2017). También se considera la vulnerabilidad de la estructura provocada por las cargas de viento.

El Código Sísmico de Costa Rica 2010/14, dedica la Sección 15 al diagnóstico y adecuación sísmica de estructuras existentes. En la Sección 15.2 define que “el objetivo de realizar un diagnóstico de la vulnerabilidad sísmica de una edificación es determinar técnicamente la posibilidad de que sufra daños durante un evento sísmico” (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2014).

Con respecto a la vulnerabilidad provocada por el viento, el reglamento vigente llamado “Lineamientos técnicos para el cálculo y aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica”, detalla los diferentes factores a tomar en cuenta para estimar la presión de viento según la zona del país, la altura de la edificación, la topografía del sitio, la geometría de la estructura y la recurrencia del evento.

Dentro de los aspectos importantes para el diagnóstico, debe realizarse un análisis cualitativo de la estructura donde se tomen en cuenta las características reales de la estructura, las irregularidades, problemas de estructuración y daños. Para el modelo de análisis se deben tomar en cuenta las dimensiones reales, así como las propiedades de los materiales, los detalles constructivos e influencias de los elementos y sus componentes no estructurales.

Por otra parte, ICOMOS da una serie de principios que deben regir cuando se realiza un análisis de una estructura patrimonial. Como primer criterio se tiene que la conservación y restauración de un patrimonio arquitectónico es un tratamiento multidisciplinar. Otro

aspecto importante, además de la mención de la investigación de las propiedades de los materiales para el posterior análisis, es que se debe apoyar en la investigación histórica para poder comprender mejor la estructura (Internacional Council on Monuments and Sites, 2003).

Por lo tanto, para el análisis de vulnerabilidad de una edificación patrimonial, debe entenderse dentro del ámbito de conservación de la estructura, ya que de este depende las futuras intervenciones que pueden darse a esta, por lo que una buena concepción del modelo y una correcta aplicación de los códigos actuales es primordial (ICOMOS, 2004).

3 DESARROLLO DE MODELO COMPUESTO DE: PEB, ESCANÉO, CARACTERIZACIÓN Y MODELADO

3.1 Plan de Ejecución BIM (BEP)

Para el desarrollo del modelo BEP se utilizó la guía de la Universidad Estatal de Pennsylvania y Plan BIM de Chile, para edificaciones existentes, y a partir estos, se realizaron las adaptaciones necesarias para este proyecto. En el Anexo A se encuentra el Plan de Ejecución BIM completo.

Para iniciar con el PEB, se debieron definir los objetivos por los cuales se elaboró el proyecto bajo la metodología BIM, ya que, en estos, se basaron el desarrollo del proyecto y sirven como guía para revisar mientras se realizó. En el **Cuadro 4** se muestran la prioridad y el uso potencial de cada uno.

Cuadro 4. Principales metas BIM/Objetivos

Prioridad (Alta/Media/Baja)	Descripción del objetivo	Uso potencial del BIM
Media	Realizar un escaneo tridimensional de la edificación	Estado actual del edificio, Documentación
Alta	Realizar un modelo HBIM arquitectónico de la edificación, con caracterización de materiales	Diseño, documentación
Media	Identificar en el modelo zonas con deterioro considerable	Comparación del modelo digital con la nube de puntos
Alta	Realizar un análisis de vulnerabilidad sísmica	Diseño estructural
Alta	Realizar modelo HBIM incluyendo las posibles mejoras a realizar	Modelo de intervención

Posterior a definir los objetivos BIM, se definieron los Usos BIM del Proyecto, los cuales, se delimitaron para las distintas etapas del ciclo de vida de la edificación. En el Cuadro 5 se muestra el resumen de los usos asignados.

Cuadro 5. Usos BIM del proyecto

Planificación	Diseño	Construcción	Operación
	Análisis estructural		
Modelo de condiciones existentes			

Una vez definidos los Usos BIM, se definieron las familias a modelar de la estructura, ya que, con esto, se pudo llevar un mejor control y orden de estas, evitando duplicar tipos, y a la vez, es más fácil de revisar el modelo. En el Cuadro 6 se muestran los distintos elementos y el nombre asignado

Cuadro 6. Nombres de las familias de Revit utilizadas

Elemento	Nombre
Muro Perimetral	AESJ-MURO-Muro básico 15cm.rfa
Caño	AESJ-CAÑO-01.rfa
Basas	AESJ-BASA-Basas.rfa
Piso	AESJ-SUELO-PISO_CORREDOR_3cm.rfa AESJ-SUELO-PISO_MADERA.rfa
Columnas	AESJ-COLUMNAS-Columnas.rfa
Paredes	AESJ-MURO_CORTINA-ESTRUCTURA_DE_MADERA.rfa AESJ-MURO_BASICO-PARED_TABLILLA.rfa AESJ-MURO_BASICO-LAMINA_HG.rfa
Puertas	AESJ-PUERTA-PUERTA.rfa
Ventanas	AESJ-VENTANA-VENTANA.rfa
Vigas	AESJ-VIGA-VIGA_54x104mm.rfa AESJ-VIGA-VIGA_54x100mm.rfa AESJ-VIGA-VIGA_100x100mm.rfa AESJ-VIGA-VIGA_46x104mm.rfa AESJ-VIGA-VIGA_50x150mm.rfa
Clavador	AESJ-CLAVADORES-CLAVADORES_75x25mm.rfa AESJ-CLAVADORES-CLAVADORES_100x25mm.rfa
Techo	AESJ-CUBIERTA-LAMINA_DE_Techo_ONDULADA.rfa
Cielorraso	AESJ-MURO-20cm.rfa AESJ-IMPOSTA-PRECINTA_13cm.rfa AESJ-IMPOSTA-PRECINTA_14cm.rfa
Cerchas	AESJ-CERCHA-CERCHA_PRINCIPAL.rfa

Complementario a los nombres, se asignó el nivel de desarrollo para cada familia, mostrando así que información contiene cada una. Esto es un paso importante, ya que se definió cada uno de acuerdo a la información disponible en el momento, y fue importante separarlo por familias, ya que de cada una se obtuvo una cantidad de datos diferente. También, se asignó un código estandarizado Uniformat, como se observa en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Niveles de desarrollo para las distintas familias de Revit utilizadas

Elemento	LOD	Descripción	Código Unifomat
Muro Perimetral	LOD 200	Tamaño y forma aproximada del elemento	A1010
Caño	LOD 200	Tamaño aproximado, pendiente y aparatos	G3030
Basas	LOD 200	Tamaño y forma aproximada de la fundación	A1010.10
Piso corredor	LOD 300	Geometría del elemento y espesor Resistencia del concreto encontrado	B1010.10
Piso madera	LOD 300	Perfiles de los miembros de la estructura, orientación, ubicación, espaciado y material.	B1010.20.10
Columnas	LOD 500	Dimensiones, forma, ubicación, cantidad, material y orientación verificadas en sitio. Información estructural de los elementos	
Paredes	LOD 350	Revestimiento de la pared modelado como elemento independiente. Las aberturas se modelan con las dimensiones reales. La estructura de la pared se modela como un elemento aparte	B2010.20
Puertas	LOD 350	Se definen los perfiles, geometría, ubicación y material de los elementos. Dimensiones reales	B2050.30
Ventanas	LOD 350	Se define la forma de los perfiles y la geometría. Material Dimensiones reales de los paneles de vidrio	B2020.30
Vigas y cerchas	LOD 300	Tamaño, profundidad y material de las armaduras con la pendiente Espaciado y elevaciones finales	B1010.10.80
Clavador	LOD 300	Tamaño, profundidad y material de las armaduras con la pendiente Espaciado y elevaciones finales	B1010.10.80
Techo	LOD 200	Representación genérica del material de techo	B3010
Cielorraso	LOD 300	Representación genérica del material de cielorraso, así como material y espesor del mismo	B3080

Una vez definidos el nivel de desarrollo para cada familia, se pudo comenzar a modelar, ya que se fueron creando las familias de acuerdo a la información preestablecida, y con esto, se pudo agilizar el trabajo.

3.2 Modelo HBIM

El modelo HBIM de la estructura está conformado por toda aquella información que se incluyó en el modelado. El primer tipo de información que se obtuvo, fue la de tipo espacial, compuesta por la nube de puntos y que a partir de esta se empezó a crear la edificación en Revit. El segundo tipo de información fueron las características de los tipos de materiales, complementada por literatura y ensayos aplicados a estos.

3.2.1 Levantamiento de la estructura

El levantamiento de la estructura se realizó utilizando la tecnología de escaneo tridimensional, mediante el uso dos escáneres según la necesidad. Se utilizó el escáner Leica P40 (Figura 8) para el levantamiento de los alrededores y de la edificación, ya que con este se pudo obtener una nube de puntos de mayo densidad y alcanzar objetos a más de 120 m de longitud. En este caso se utilizó una densidad de escaneo de 3 mm, además de la toma de imágenes.



Figura 8. Estación de Escaneo P40

Para el escaneo del cielo raso y parte del techo se utilizó el escáner láser Leica BLK360, ya que este equipo es fácil de transportar y debido a su tamaño se pudo acceder con él a lugares de acceso limitado, como se puede observar en la Figura 9. Se debe resaltar que

este último escáner se puede controlar a través de una aplicación en una tableta, en este caso un iPad, con el fin de que el operador del equipo no interfiera con el proceso de escaneo y ahorrar tiempo en la limpieza de la nube de puntos. Con este equipo se obtuvo una densidad de puntos de 6 mm.



Figura 9. Escáner láser de imágenes Leica BLK360
Tomada por: Corrales, 2020

En total se realizaron 14 estacionamientos con el Leica P40, dividido en dos días, con una duración aproximada de 7 horas, contando el traslado y nivelación entre estaciones. El escaneo con el láser BLK360 se realizó en menos de 3 horas, con un total de 7 estacionamientos.

El procesamiento de la nube de puntos se realizó en dos etapas. Primero se alinearon los 21 estacionamientos para obtener una nube de puntos en el programa Leica Cyclone, como se muestra en la Figura 10. Dentro de cada alineamiento entre estacionamientos adyacentes, se obtuvo un error entre nubes de puntos entre 1 mm y 6 mm. Luego de unificar todos los enlaces y exportarlo en un formato “.rcp” se obtuvo un error global de 5 mm, según el informe obtenido.

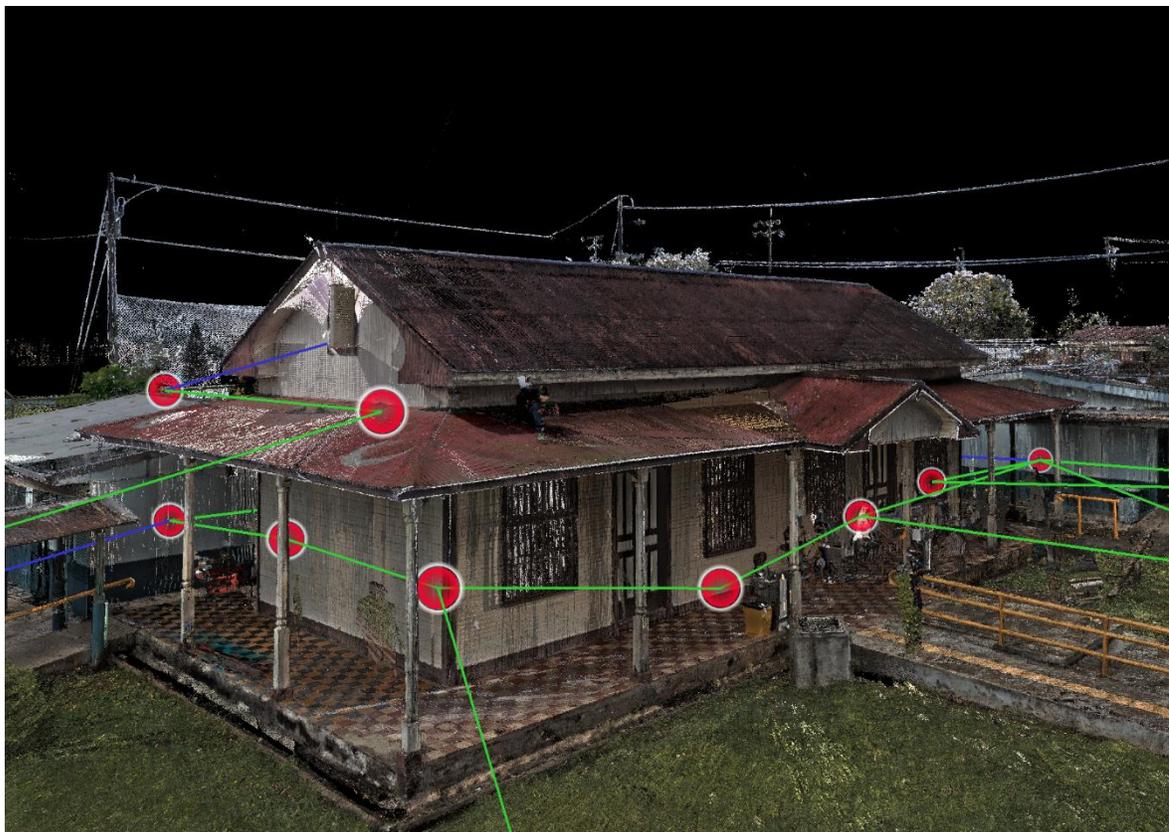


Figura 10. Nube de puntos en programa Leica Cyclone

Para realizar la limpieza se utilizó el programa Autodesk ReCap, con el que se eliminaron puntos que no son de interés, como los alrededores de la edificación, mobiliario, personas que pasaban por el sitio mientras se estaba realizando el escaneo, entre otros. En este programa también se ajustó el eje de coordenadas y el nivel de referencia a la base de la columna frontal izquierda, para que en su posterior uso se tenga un manejo más cómodo de la nube de puntos.

De la Figura 11 se puede ver parte de la nube de puntos procesada, de donde se puede obtener información como dimensiones, ubicación de las columnas, ventanas, y alineaciones de las paredes y columnas con respecto a su base, por ejemplo.

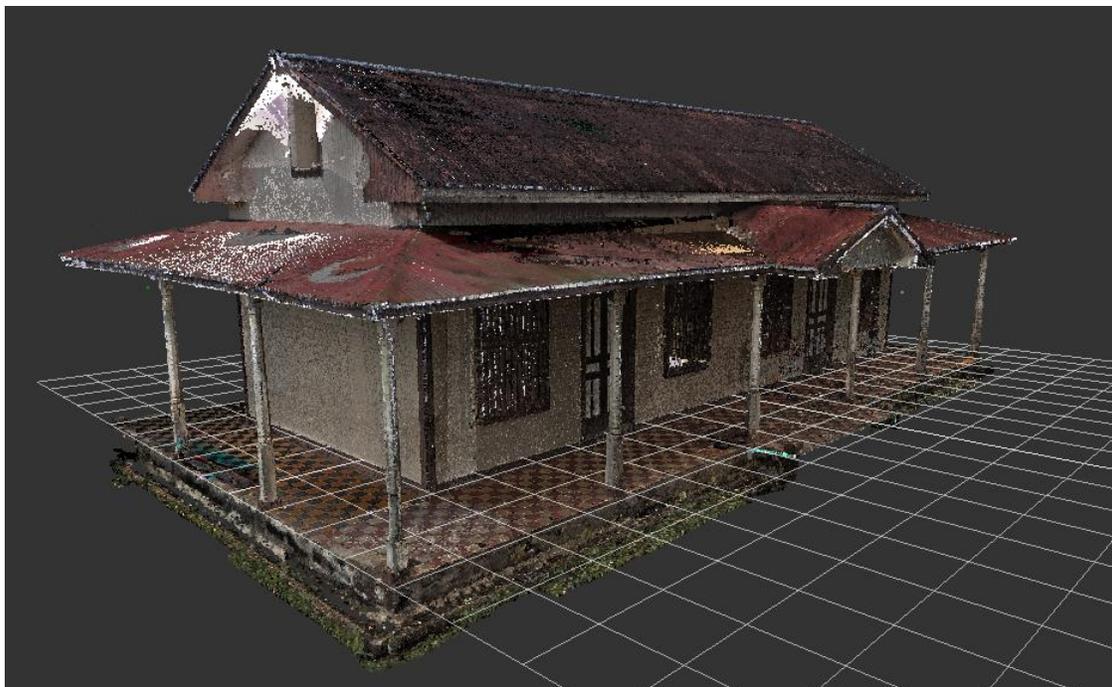


Figura 11. Nube de puntos procesada

Para finalizar el levantamiento de la estructura, se tomaron medidas de elementos como las cuerdas de las cerchas y del perfil de la tablilla de las paredes, debido a que extraer cierta información de la nube de puntos resultaba más complejo que realizar una medición de forma manual. Otra dimensión que se tomó de forma manual fue la separación entre clavos en las paredes, para obtener una distribución aproximada del emplantillado.

3.2.2 Levantamiento fotográfico

El levantamiento fotográfico se realizó con el fin de capturar, mediante imágenes, detalles como deterioro en elementos de madera, pisos y otros elementos, con el fin de contar con detalles presentes en algunos de los elementos. A continuación, de la Figura 12 a la Figura 17 se muestran algunas de las imágenes más significativas.

Mediante el uso de un dron, fue posible capturar una fotografía aérea de la escuela, como se muestra en la Figura 12, con el fin de conocer el estado general de la estructura de techos. En esta imagen se puede observar que existe deterioro en las láminas por pérdida de efectividad de la protección de la pintura aplicada, ya que se ve de un color diferente, además de acumulación de hojas provenientes de los árboles ubicados en el parque. Luego de una inspección cercana, se pudo constatar que el techo a dos aguas presenta un tipo de

hongo debido a las condiciones tan húmedas de la zona y que el techo sobre el corredor, las zonas encerradas en azul, tiene focos de oxidación.

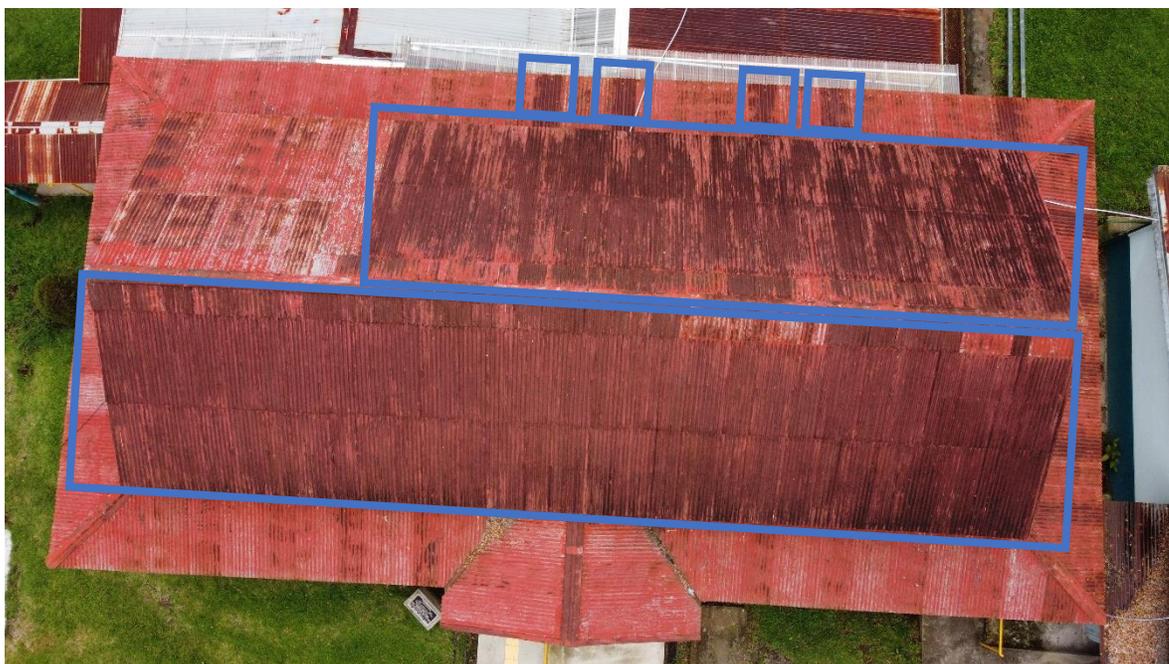


Figura 12. Vista aérea de techos

Con respecto a las columnas, como se muestra en la Figura 13, el estado de deterioro que presentan algunas de ellas se debe principalmente a la humedad, la cual en combinación con hongos han ido pudriendo la base, provocando que se pierda de forma parcial la capacidad de transmitir las cargas provenientes del techo. Otra situación encontrada en dos columnas, es la sustitución de la parte inferior de la columna por otra pieza de madera, en donde no se realizó la unión de forma adecuada entre la madera, generando una rótula, en donde existe una excentricidad en la unión entre la columna original y la madera nueva, con respecto a la base. Y la situación más grave es la falta de 3 columnas en su totalidad, una columna esquinera en el costado suroeste y las columnas de la entrada principal.



Figura 13. Base de columna deteriorada

Continuando con la Figura 14 y Figura 15, en el proceso de levantamiento se pudo observar los dos tipos de combinación de mosaicos presentes en el edificio: rojo con gris y negro con amarillo. Según el arquitecto del Centro de Patrimonio Gustavo Morera, en una de las visitas al sitio, esta situación se daba en muchas edificaciones antiguas, que, ante la falta de material de un tipo, en este caso mosaicos de cierto color, se utilizaban mosaicos de otro tono, manteniendo la combinación de tablero, para poder concluir la obra y dejarla funcional.

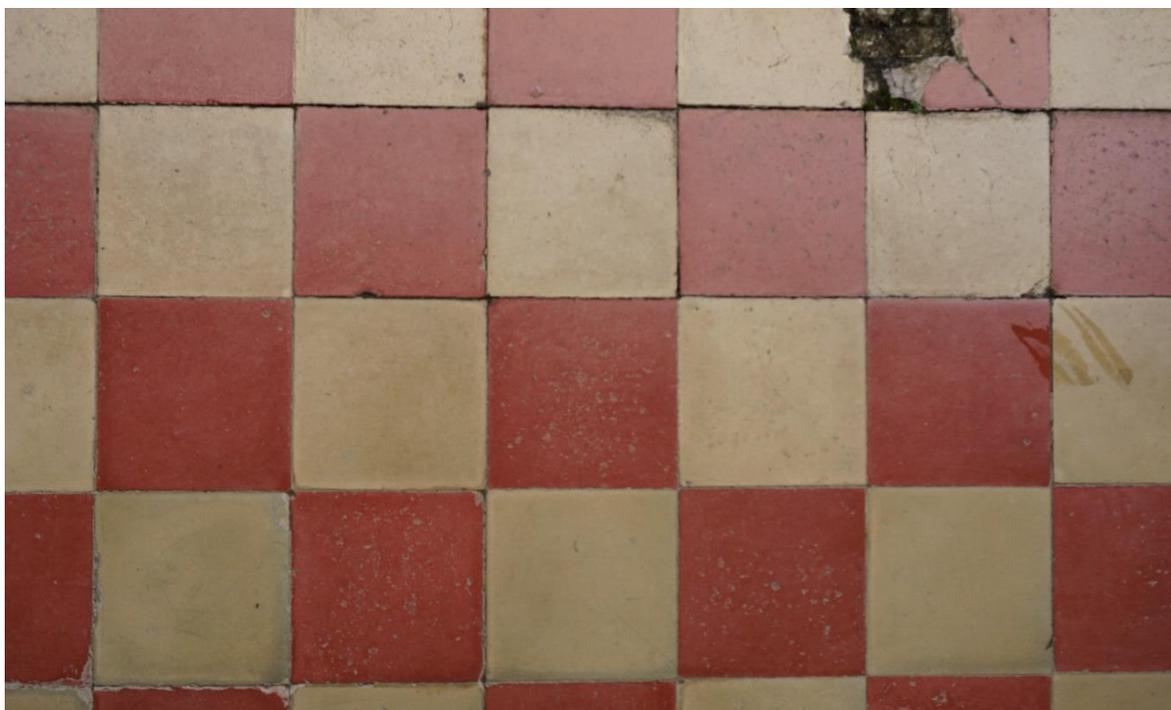


Figura 14. Piso de mosaico rojo y gris

Tomado por: Corrales, 2020



Figura 15. Piso de mosaico negro y amarillo

Tomado por: Corrales, 2020

La edificación cuenta con 4 puertas idénticas como se muestra en la Figura 16, en los costados este y oeste, las cuales constan de dos hojas abatibles hacia la parte interna. Cada paño cuenta con 4 paneles verticales y uno horizontal a la mitad y cierran entre ellos con una aldaba con candado. En la parte superior, se encuentran 3 cuadros de vidrio y todo el conjunto se encuentra rodeado por una moldura tanto en la parte interna como externa.



Figura 16. Detalle de puerta

Tomado por: Corrales, 2020

Las ventanas son tipo guillotina, con 6 paneles rectangulares de vidrio cada paño, como se puede observar en la Figura 17. Al igual que las puertas, estas poseen una moldura en su perímetro tanto interno como externo. En total la edificación cuenta con 8 ventanas ubicadas en los costados este y oeste.

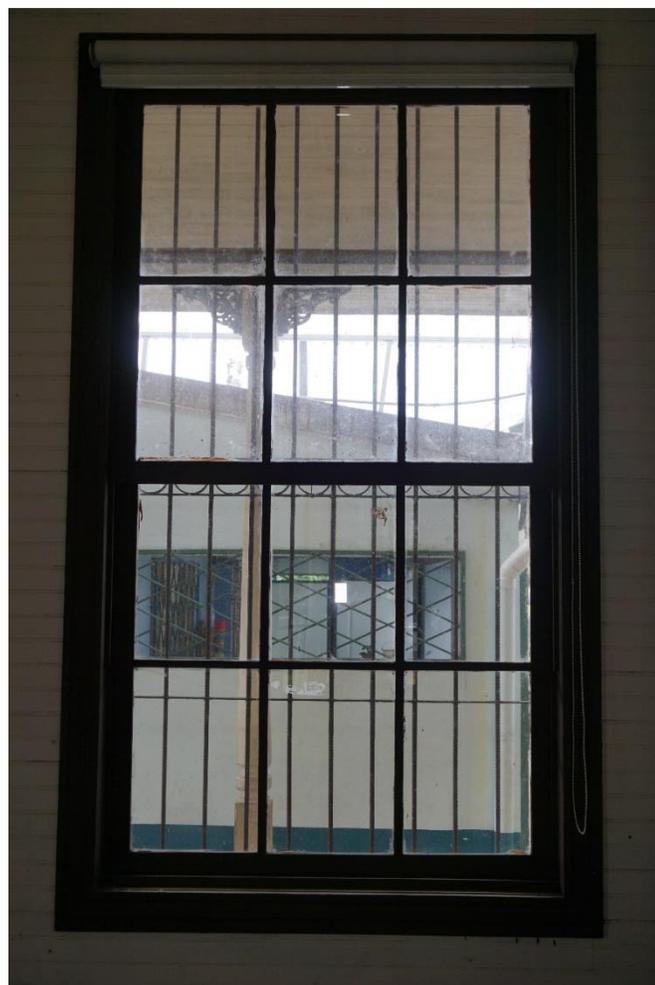


Figura 17. Detalle interno de ventana

Tomado por: Corrales, 2020

3.2.3 Caracterización de los materiales

Para la caracterización de materiales se eligieron aquellos que son de interés para realizar el análisis estructural, y estos son: columnas, vigas, cerchas, tablillas, basas y concreto del contrapiso.

3.2.3.1 Madera

Para la caracterización de los elementos de madera, mediante pequeñas muestras fue posible identificar elementos como las columnas, cerchas, forros de paredes y pisos. Para el caso de las columnas, se tomó un trozo de madera de la columna mostrada en la Figura 13, aprovechando el deterioro existente en esta. En la zona del techo, una de las cerchas tenía una astilla, la cual se extrajo para caracterizarla y, en las paredes, una zona de tablillas estaba deteriorada por comején por lo que se extrajo una muestra. Cabe resaltar que esta labor fue supervisada por el arquitecto designado por el Centro de Patrimonio, por ello fue que no se pudo extraer más muestras.

Otra forma que se intentó para caracterizar elementos sin extraer muestras, fue mediante fotografías con un microscopio digital, modelo "Wi-Fi Digital Microscope", provisto por el autor. Para esto, se procedió a eliminar la capa de la pintura hasta descubrir de forma clara el grano y luego tomar una fotografía. Con este método se intentó identificar los marcos de puertas y ventanas, pero no fue posible ya que la dirección de la madera no era la adecuada.

En el Cuadro 8 se muestran los elementos de interés, con su respectiva fotografía microscópica y el tipo de madera que corresponde. Para la caracterización de la madera se contó con la asesoría del ingeniero Juan Tuk, especialista en el tema y quien cuenta con una xiloteca para identificar especies de madera.

Para el porcentaje de humedad en cada tipo de madera, se tomaron mediciones con un medidor de humedad para madera, de la marca "General Tool", modelo "MMD4E", provisto por el estudiante. Para las columnas, se tomó la medición a un metro de altura con respecto al piso en la columna donde se extrajo la muestra. En las paredes, se tomó a un metro de altura a la mitad de la longitud de estas. Y, en el caso de las cerchas, se tomaron distintos puntos, lo cuales se marcan con un punto rojo en la Figura 18. El porcentaje de humedad reportado corresponde a un promedio de las mediciones realizadas en los elementos que realizan la misma función.

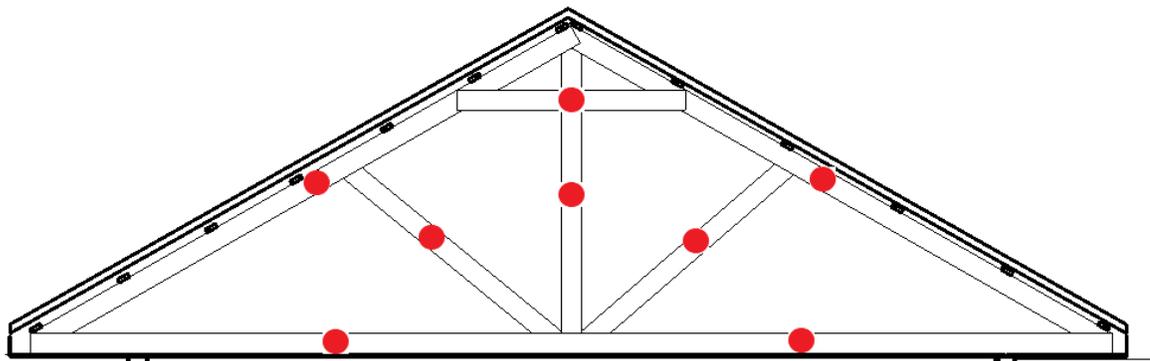


Figura 18. Ubicación de medición de humedad en cerchas

Cuadro 8. Caracterización de la madera

Foto	Uso	Nombre común/ Nombre científico	Propiedades físico-mecánicas
	Columnas	Chiricano/ Vantanea barbourii Standl.	% Humedad en sitio: 17,6% Densidad seca: 570 kg/m ³ Densidad en sitio: 670,3 kg/m ³ MOE: 152,4x10 ³ kg/cm ² Esfuerzo básico: 748,7 kg/cm ² Cortante: 119,3 kg/cm ² Compresión paralela al grano: 274 kg/cm ²
	Cerchas		Fuente: (Blanco Rojas, Carpio Malavassi, & Muñoz Umaña, 2005)

Foto	Uso	Nombre común/ Nombre científico	Propiedades físico-mecánicas
	<p>Tablilla de paredes y cieloraso</p>	<p>Cedro Macho o Caobilla/ Carapa guianensis Aubl.</p>	<p>% Humedad en sitio: 15% Densidad seca: 520 kg/m³ Densidad en sitio: 598 kg/m³ MOE: 116,6x10³ kg/cm² Esfuerzo básico: 578,5 kg/cm² Cortante: 95,4 kg/cm² Compresión paralela al grano: 237,2 kg/cm² Fuente: (Blanco Rojas, Carpio Malavassi, & Muñoz Umaña, 2005)</p>

Foto	Uso	Nombre común/ Nombre científico	Propiedades físico-mecánicas
	<p>Tablilla de paredes y cieloraso</p>	<p>Pino del sur</p>	<p>% Humedad en sitio: 17% Densidad seca: 510 kg/m³ Densidad en sitio: 597 kg/m³ MOE: 134x10³ kg/cm² Esfuerzo básico: 549,5 kg/cm² Cortante: 69,6 kg/cm² Compresión paralela al grano: 113 kg/cm² Fuente: (Tuk, 2019)</p>

3.2.3.2 Elementos de concreto

Los elementos de concreto presentes en la edificación son el muro perimetral que la rodea, el contrapiso del corredor y las basas. Para conocer las características del muro perimetral y el contrapiso, se extrajeron núcleos de concreto en las ubicaciones E1 y E2 para el muro, y la E3 para el contrapiso, con se muestra en la Figura 19. Cabe resaltar que la ubicación de la extracción de estas muestras fue definida por el arquitecto delegado por el Centro de Patrimonio Cultural

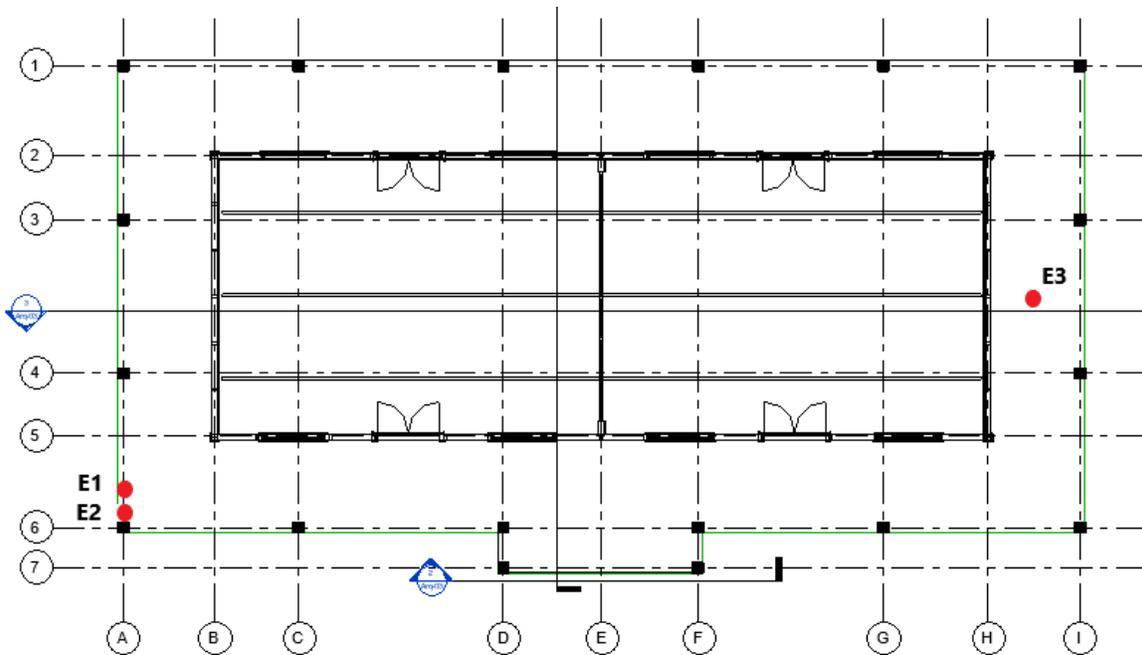


Figura 19. Ubicación de la extracción de núcleos de concreto

De las muestras E1 y E2, que se muestran a en la Figura 20, se puede observar que no hay una granulometría distribuida con distintos tamaños, sino que, hay elementos finos como la arena y también agregado muy grueso. Estas muestras fueron extraídas con broca de 76 mm o 3", ya que no se conocía el espesor del muro perimetral, por lo que el tamaño de la broca no fue el adecuado para el tamaño del agregado encontrado. El taladro utilizado fue

un Hilti DD 130, con su respectivo soporte para que la perforación fuera perpendicular al piso y bomba de agua.



Figura 20. Núcleos de concreto extraídos Especímenes E1 y E2

Del posterior análisis del laboratorio, las características más importantes se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Propiedades del concreto del muro perimetral

Espécimen	Densidad (kg/m ³)	Resistencia (kg/cm ²)	Tamaño máximo de agregado (mm)
E1	1849	19,0	112
E2	1971	29,7	160

La muestra E3 que se ubicaba en el contrapiso, se realizó debajo de un mosaico que se quitó y volvió a colocar para no afectar la estética de la escuela. Esto se efectuó con el fin de investigar el espesor del contrapiso. La muestra extraída de la Figura 21 tiene un espesor

de 30 mm. Por las dimensiones de este espécimen no fue posible realizar la prueba de compresión, ya que la norma lo impide.



Figura 21. Muestra extraída del contrapiso

Para el concreto de las basas, se utilizó el esclerómetro, siguiendo la norma ASTM C805. Se muestrearon 8 basas de un total de 18, la cuales se muestran en la Figura 22, para de esta forma obtener un valor más certero de la resistencia del concreto de estos elementos.

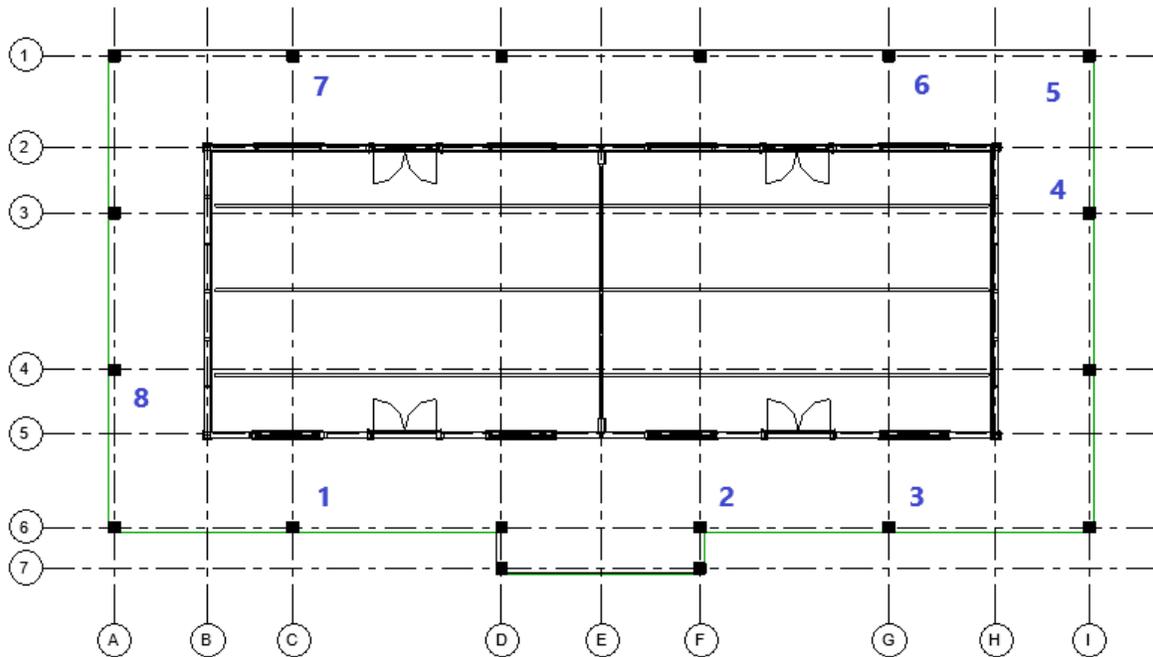


Figura 22. Ubicación de las basas muestradas

En el Cuadro 10, se muestra el resumen del número de golpes promedio obtenido para cada basa, así como la resistencia calculada según la gráfica de calibración del equipo y la precisión de cada punto. La precisión es dada por de la curva de calibración que tiene el equipo, dependiendo del número de golpes, la resistencia puede variar en ese rango dado. Para el caso del modelo de Revit se utilizó el valor menor obtenido, de forma conservadora, que es de 200 kg/cm^2 .

Cuadro 10. Resistencia para basas muestradas

Basa	Promedio Número de golpes	Resistencia (kg/cm^2)	Precisión (kg/cm^2)
1	36,1	420	± 70
2	36,0	350	± 65
3	36,9	360	± 65
4	31,4	260	± 60
5	32,0	270	± 60
6	40,0	420	± 70
7	35,6	360	± 65
8	36,5	360	± 65

3.2.3.3 Suelos

Para la caracterización del suelo se realizaron 3 perforaciones mediante SPT (Standard Penetration Test, por sus siglas en inglés), bajo la norma ASTM D1586, con las cuales se extrajeron muestras para su posterior clasificación y caracterización, cuyos resultados se muestran a continuación del Cuadro 11 al Cuadro 13. Las ubicaciones de las diferentes perforaciones se muestran en la Figura 23.

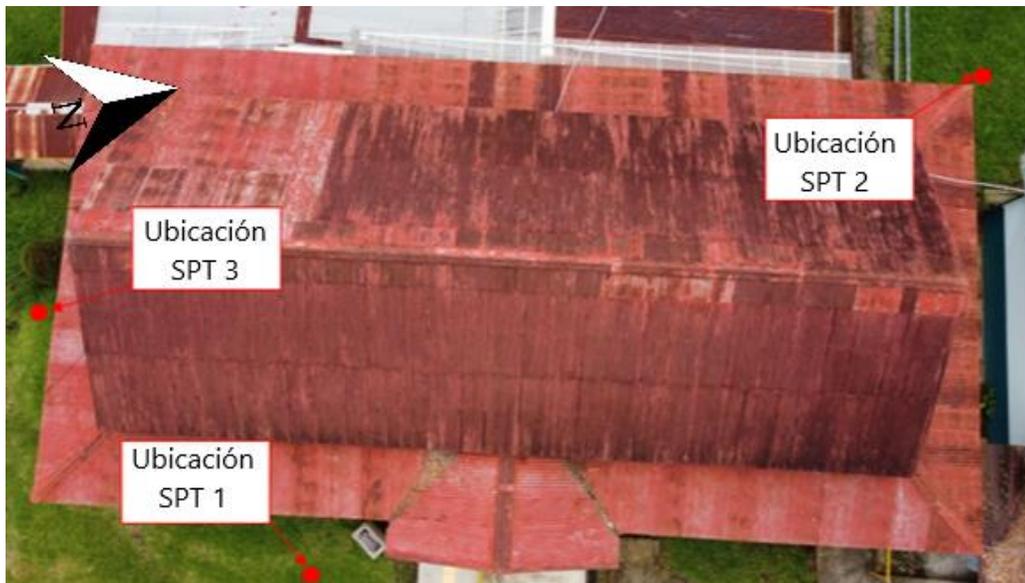


Figura 23. Ubicación de las perforaciones SPT

Cuadro 11. Datos SPT P1

Profundidad (cm)		Nº de golpes N	% Recuperación	Clasificación laboratorista
0	45,7	6	64%	Suelo limoso color café oscuro de material fino homogéneo. No presenta partículas de roca compacta. Posee pocas cantidades de material orgánico "raíces". Suelo de partículas finas pequeñas, no posee gruesos
45,7	91,4	9	71%	
91,4	137,1	7	78%	
137,1	182,8	6	73%	Suelo arcilloso color café claro de tamaño de partículas finas homogéneas combinado con vetas de suelo color negrusco (material en descomposición). No presenta partículas de roca compacta.
182,8	228,5	3	78%	
228,5	274,2	4	100%	Suelo arcilloso color café claro amarillento. De tamaño de partícula fina homogénea. Sin presencia de roca compacta
274,2	319,9	4	89%	
319,9	365,6	6	67%	
365,6	411,3	6	89%	
411,3	457	11	91%	
457	502,7	7	96%	

Cuadro 12. Datos SPT P2

Profundidad (cm)		Nº de golpes N	% Recuperación	Clasificación laboratorista
0	45,7	5	93%	Suelo limos color café oscuro (orgánico) con gran cantidad de raíces.
45,7	91,4	3	67%	
91,4	137,1	5	73%	Suelo arcilloso color café claro de tamaño de partículas finas y homogéneas pequeñas con poca presencia de material orgánico y combinado de una pequeña veta con pigmentos amarillentos y negruscos. No posee roca compacta
137,1	182,8	5	84%	
182,8	228,5	3	69%	
228,5	274,2	4	76%	Suelo limoso color café amarillento, combinado con partículas de suelo semi-compacto color negrusco, sin presencia de roca compacta ni material orgánico
274,2	319,9	4	78%	
319,9	365,6	4	69%	
365,6	411,3	23	93%	

Cuadro 13. Datos SPT P3

Profundidad (cm)		Nº de golpes N	% Recuperación	Clasificación laboratorista
0	45,7	4	82%	Suelo limoso color café oscuro de material fino homogéneo. No presenta partículas de roca compacta. Posee pocas cantidades de material orgánico "raíces". Suelo de partículas finas pequeñas, no posee gruesos
45,7	91,4	5	60%	
91,4	137,1	4	69%	
137,1	182,8	5	87%	Suelo arcilloso color café claro de tamaño de partículas finas homogéneas combinado con vetas de suelo color negrusco (material en descomposición). No presenta partículas de roca compacta.
182,8	228,5	5	82%	
228,5	274,2	5	78%	Suelo arcilloso color café claro amarillento. De tamaño de partícula fina homogénea. Sin presencia de roca compacta
274,2	319,9	7	78%	
319,9	365,6	6	78%	
365,6	411,3	6	76%	
411,3	457	6	69%	
457	502,7	17	67%	
502,7	548,4	12	89%	
548,4	594,1	17	67%	
594,1	639,8	24	40%	

De la clasificación por parte del técnico de laboratorio, se pudo identificar tres grandes estratos de suelos, todos de diferentes espesores en cada perforación. Posterior a haber identificado los estratos, se procedió a ejecutar los ensayos de laboratorio correspondientes

para conocer los parámetros de interés. Del Cuadro 14 al Cuadro 16 se muestran los resultados obtenidos, con la respectiva norma.

Cuadro 14. Parámetros obtenidos del laboratorio para perforación P1

Parámetro	Estrato 1 (0-1,37 m)	Estrato 2 (1,37- 2,74 m)	Estrato 3 (2,74-5,02 m)
Humedad Natural (ASTM D4959)	58,5%	73,8%	96,3%
Gravedad específica (ASTM D854)	2,56	2,67	2,54
% Pasando Malla #200 (ASTM C117)	58,6%	70,2%	61,5%
Límite Plástico (ASTM 4318)	35	33	45
Límite Líquido (ASTM 4318)	43	42	50
Índice de Plasticidad (ASTM 4318)	8	9	5
Clasificación (ASTM 2487)	ML o OL	OL o ML	OH o MH
Resistencia al corte no drenada (ton/m ²)	10,1	6,9	10,5

Cuadro 15. Parámetros obtenidos del laboratorio para perforación P2

Parámetro	Estrato 1 (0-0,91 m)	Estrato 2 (0,91-2,28 m)	Estrato 3 (2,28-4,11 m)
Humedad Natural (ASTM D4959)	60,7%	75,1%	93,4%
Gravedad específica (ASTM D854)	-	2,68	2,68
% Pasando Malla #200 (ASTM C117)	71,9%	88,5%	70,4%
Límite Plástico (ASTM 4318)	37	38	44
Límite Líquido (ASTM 4318)	44	46	51
Índice de Plasticidad (ASTM 4318)	7	8	7
Clasificación (ASTM 2487)	OL o ML	OL o ML	OH o MH
Resistencia al corte no drenada (ton/m ²)	8,2	9,3	16,7

Cuadro 16. Parámetros obtenidos del laboratorio para perforación P3

Parámetro	Estrato 1 (0-1,82 m)	Estrato 2 (1,82-2,74 m)	Estrato 3 (2,74-6,40 m)
Humedad Natural (ASTM D4959)	62,4%	75,7%	97,2%
Gravedad específica (ASTM D854)	2,53	-	2,64
% Pasando Malla #200 (ASTM C117)	69,0%	83,2%	55,5%
Límite Plástico (ASTM 4318)	37	36	46
Límite Líquido (ASTM 4318)	46	47	50
Índice de Plasticidad (ASTM 4318)	9	11	4
Clasificación (ASTM 2487)	OL o ML	OL o ML	OH o MH
Resistencia al corte no drenada (ton/m ²)	9,0	10,3	18,2

3.2.4 Elaboración del modelo HBIM

Para la elaboración del modelo HBIM se partió de la nube de puntos para obtener las dimensiones y ubicaciones de las paredes, ventanas, puertas y demás elementos de interés. Para los elementos modelados, se detalla a continuación los parámetros usados y la forma en que se creó cada elemento o familia dentro de Revit.

- Paredes

Para la representación de las paredes se utilizaron dos familias, una de tablilla, modelada a partir de los muros básicos, donde su interior es vacío y a cada cara de la pared se le asignó un grosor de 12 mm, según el levantamiento realizado. El interior de la pared se realizó a partir de una familia de tipo Muro cortina, en la cual se puede representar la distribución del "esqueleto" de las paredes, la cuerda inferior y la viga solera. Las dimensiones utilizadas para las reglas verticales son de 100 mm por 60 mm y para la viga solera es de 100mm por 100 mm La cuerda inferior se asumió igual que las reglas verticales, ya que no se pudo verificar sus dimensiones debido a que, para esto, se debía intervenir el elemento.

Las riostras están presentes en ambas direcciones de la estructura y tienen una dimensión de 100 mm por 54 mm. El ángulo con respecto al piso varía dependiendo del eje en que se ubican. Las paredes que se ubican en los ejes 2 y 5 poseen riostras en los extremos y en la mitad de la pared, como se muestra en la Figura 24 encerradas en amarillo.

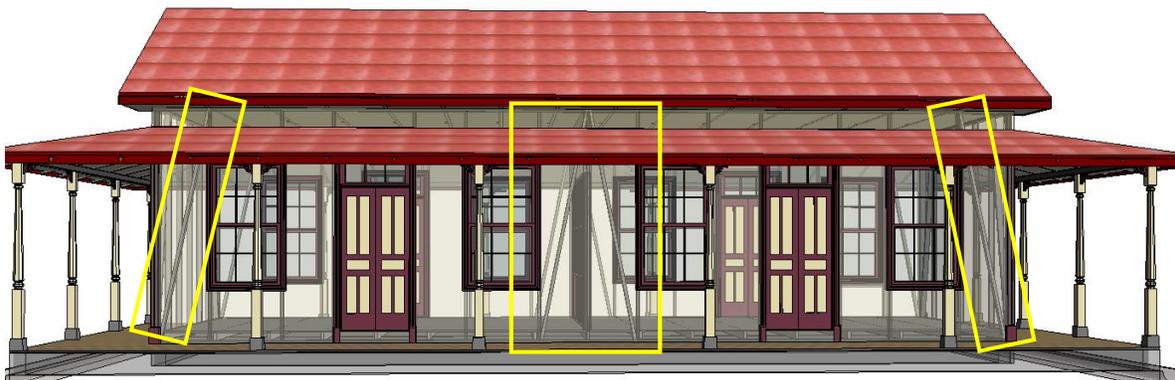


Figura 24. Ubicación de riostras dentro de paredes de los ejes 2 y 5

Mientras que las paredes que se ubican en los ejes B y H, poseen riostras en los extremos de los ejes como se observa en la Figura 25 de las mismas dimensiones que las anteriores,

y estas se identificaron mediante el patrón de clavos que se podía observar en la superficie de la pared.

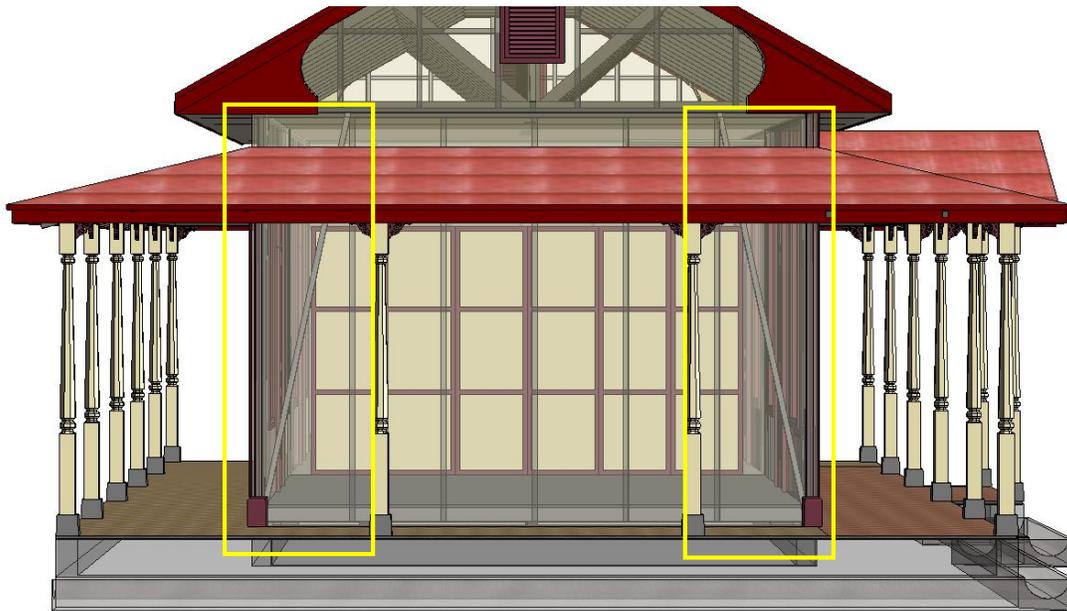


Figura 25. Ubicación de riostras dentro de paredes de los ejes B y H

- Columnas

La elaboración de las columnas se realizó a partir de los planos existentes de la escuela, de donde se extrajo la geometría del tallado a lo largo de la columna, y posteriormente se comparó con una de las columnas extraída de la nube de puntos, con la cual se ajustó la altura principalmente. En la Figura 26 se muestra la familia de columnas creada.



Figura 26. Familia de columnas

- Capitel

El capitel de las columnas fue otro elemento que se modeló a partir de los planos, ya que de la nube de puntos no fue posible extraerlo, debido a la complejidad de la forma y sus detalles, por ser un trabajo artesanal, existen ligeras diferencias entre ellas. Esta es una familia genérica que su anfitrión es una superficie, por lo que se podía colocar sobre las caras correspondientes de cada columna para lograr la distribución según se muestra en la Figura 27.



Figura 27. Familia de capiteles colocados en las columnas

- Ventanas

Las ventanas del edificio principal son de tipo guillotina de dos hojas, donde cada una posee seis paneles de vidrio, con marcos de madera, como se observa en la Figura 28. En la cara exterior de la ventana se puede observar un marco con una moldura que se encuentra también en los marcos de las puertas.

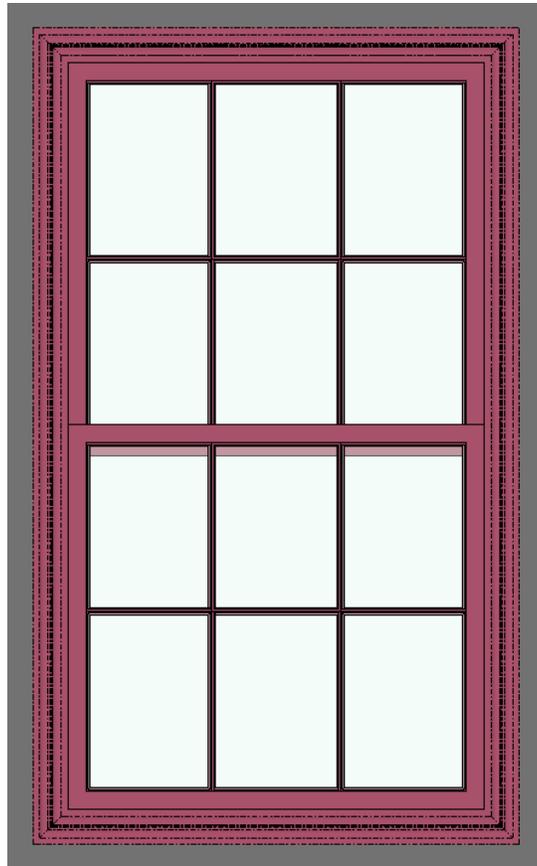


Figura 28. Familia de ventanas principales

Dentro de la familia de ventanas, se creó también la ventila del cielorraso, donde una de ellas funciona como acceso a este. Las ventilas están compuestas por un marco de madera y celosías de madera también, espaciadas aproximadamente a 2 centímetros entre ellas, con una inclinación cercana a los 45° , como se observa en la Figura 29.



Figura 29. Ventila de entrada a cielorraso

- Puertas

El edificio contiene dos tipos de puertas: las internas y las externas. Las externas corresponden a aquellas que son utilizadas como acceso al inmueble y son originales del edificio, y las internas funcionan para dividir el área en dos salones, y corresponden a una intervención posterior, de la que no se tiene registro de la fecha en que se realizó.

Las puertas externas se muestran en la Figura 30, son cuatro en total y poseen las mismas dimensiones y diseño. Están compuestas por dos hojas con un giro de 180° hacia adentro, y en la parte superior cuentan con tres paneles de vidrio fijo. En la parte externa tienen una guarnición con una moldura que se puede encontrar en los marcos de las ventanas.

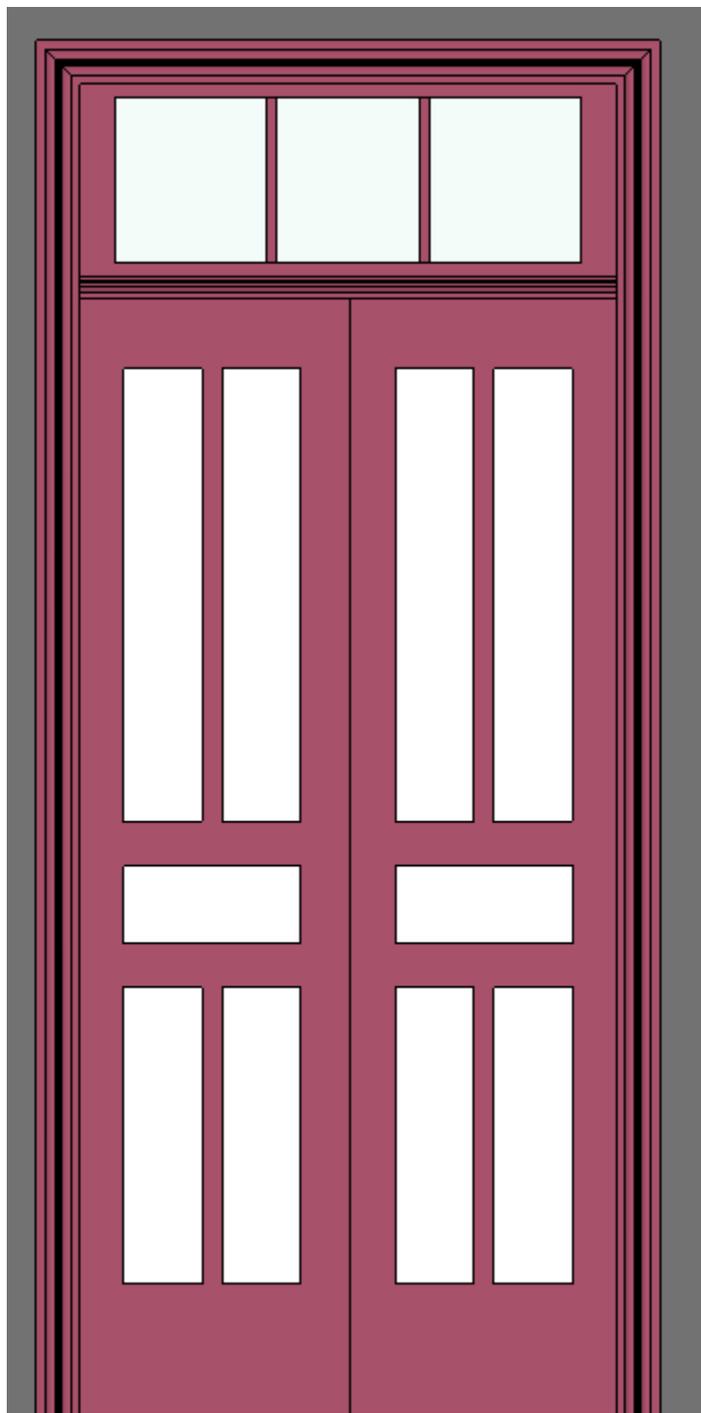


Figura 30. Familia de puertas externas

Por otra parte, las puertas internas, están constituidas por marcos de tubo cuadrado de 50 mm, espesor desconocido y un panel divisorio, tienen una configuración en acordeón, sostenidas en un riel en la parte superior.

- Techos

La familia de techos está conformada por las cubiertas, cielorrasos, aleros y precintas. Para las cubiertas no se distingue la longitud de la lámina ni calibre, ya que existen distintas a lo largo del techo, por lo cual, solo se le da la textura a partir de fotografías, como se puede mirar en la Figura 31. En el caso de las precintas, muchas son elaboradas a partir de un modelo realizado en sitio, debido a las distintas formas que tienen, con curvas y pendientes.

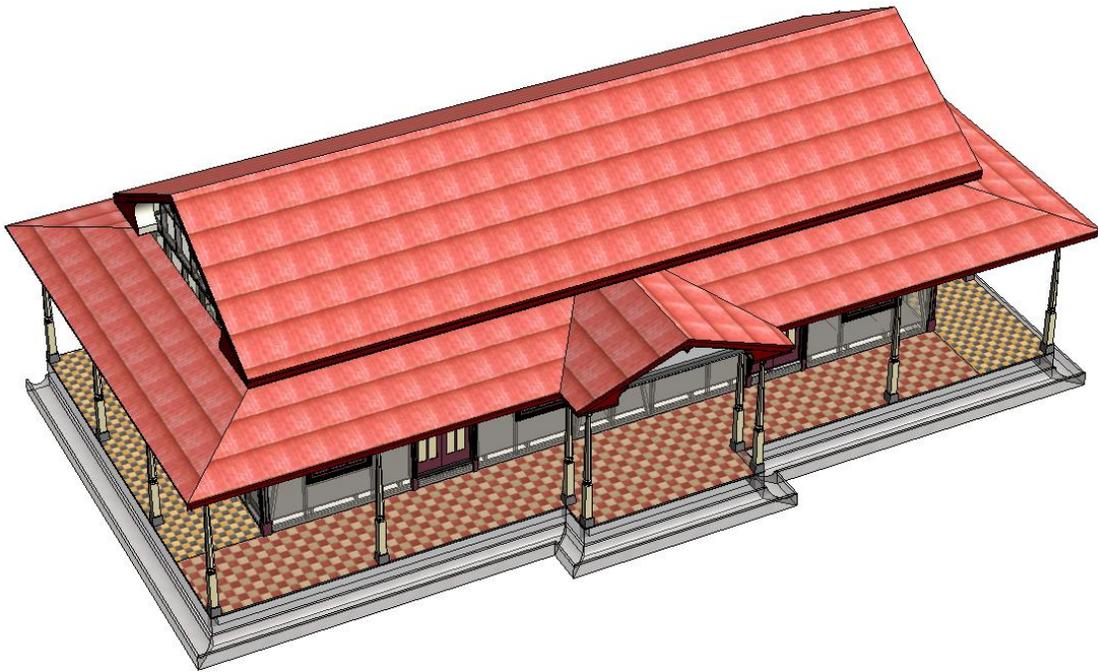


Figura 31. Familia de techos

- Pisos

Se encuentran dos tipos de pisos presentes: el corredor perimetral, cuyo contrapiso tiene un espesor de 3 cm en la ubicación donde se muestreó, con mosaicos de concreto de 20 cm x 20 cm y un espesor de 1,5 cm.

Para el piso interno, este está formado por tablonces de madera de aproximadamente 1,7 cm de espesor, con 10 cm de ancho, con un machimbrado entre ellos. Está soportado sobre viguetas distribuidas a cada metro. En la Figura 32 se puede observar el detalle del piso del corredor, así como el piso de madera interno y la distribución de las viguetas.

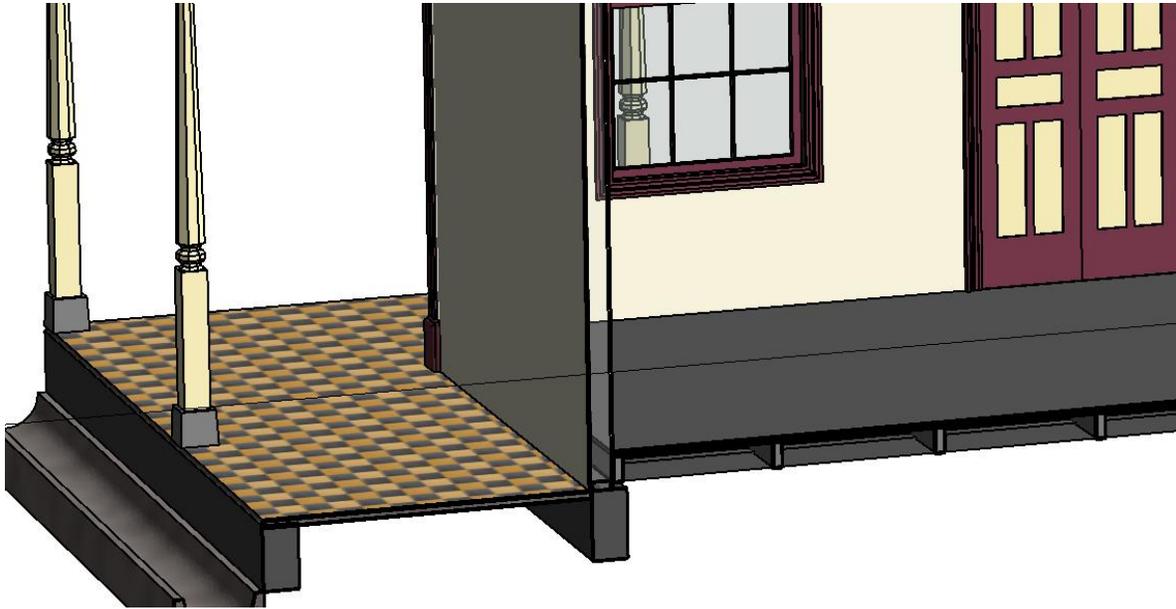


Figura 32. Detalle de pisos

3.2.4.1 Modelo HBIM con patologías

Para identificar los elementos que requieren intervención, en un modelo aparte, por medio de un código de colores, se asignaron las zonas que necesitan algún tipo de reparación o construcción nueva, según se muestra en la Figura 33.

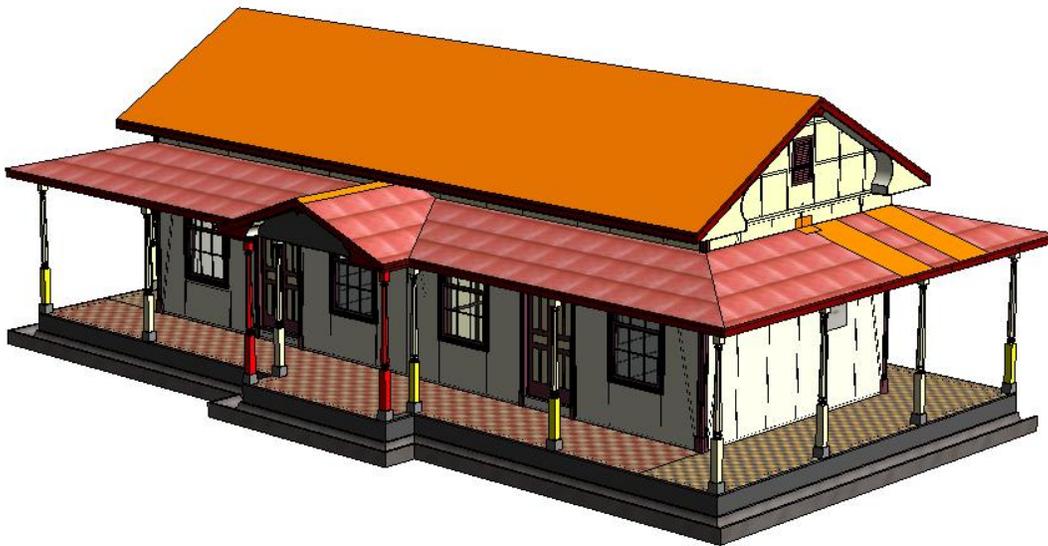


Figura 33. Modelo de zonas que requieren intervención

Los tipos de intervenciones se clasificaron en 3 tipos. El primero son los elementos faltantes, en color rojo, los cuales existe evidencia por medio de fotografías que alguna vez formaron parte del edificio. Los elementos a reparar, en amarillo, son todos aquellos elementos que requieren una reparación parcial. Y en anaranjado, son zonas de techos que tienen óxido, donde es necesario la intervención. En el Cuadro 17 se muestran los colores utilizados.

Cuadro 17. Código de colores de intervenciones

Color	Descripción
Rojo	Elementos faltantes
Amarillo	Elementos a reparar
Anaranjado	Presencia de óxido

4 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Para verificar el estado de la estructura, se realizó un análisis estructural de esta. Se utilizó el programa Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2022, bajo el flujo de trabajo BIM, ya que, conociendo de la compatibilidad de este con Revit, en el modelo arquitectónico, se le asignó la categoría de "uso estructural" a aquellos elementos de interés y, posteriormente se realizó la exportación hacia el otro programa.

El análisis se basó en el Código Sísmico de Costa Rica 2010-14 (CSCR 10-14), a partir del cual se definieron las cargas de diseño, los diferentes factores de diseño sísmico a utilizar, el tipo de estructura, entre otros parámetros, que se definieron y se explican a lo largo de este capítulo.

4.1 Amenaza sísmica

La amenaza sísmica se definió a partir de la ubicación de la edificación, así como del tipo de estructura. Para ello, se definió cada uno de los distintos factores a tomar en cuenta para el análisis estructural que se muestran en el Cuadro 18, a partir del capítulo 2 del CSCR 10-14.

Cuadro 18. Factores usados para el análisis estructural

Factor	Asignación	Sección CSCR 10-14
Zona	III (San Jerónimo, Moravia)	2.1
Tipo de Sitio	S ₃ (N 15-35)	2.2
Velocidad de onda cortante	V _s 180-350 m/s	2.2
Resistencia al corte no drenada (C _u)	0,50-0,75 kg/cm ²	2.2
Aceleración pico efectiva de diseño (a _{ef})	0,36	2.4
Clasificación según importancia (I)	1,00	4.1.1
Ductilidad local	Moderada	4.1.2
Sistema estructural	Tipo Dual	4.2.2
Regularidad	Regular en altura	4.3.1
	Regular en planta	4.3.2
Ductilidad global	1,0 (dual b)	4.4.3
Periodo	0,6 s	7.4.5
FED	2,50	Figura 5.7

Debido a las características de la estructura, que es de madera y de un piso, sin presencia de un diafragma rígido, el tipo de análisis adecuado es uno de tipo elástico. Debido a que

la ductilidad máxima es de 1.0, de forma conservadora se elige el valor más alto de Factor Espectral Dinámico (FED) para la revisión de la estructura, como se muestra en la Figura 34, y obteniendo este valor se realiza la primera iteración del modelo para un periodo de 0.6 s. Una vez que se obtuvieron estos valores, se calculó el Coeficiente sísmico.

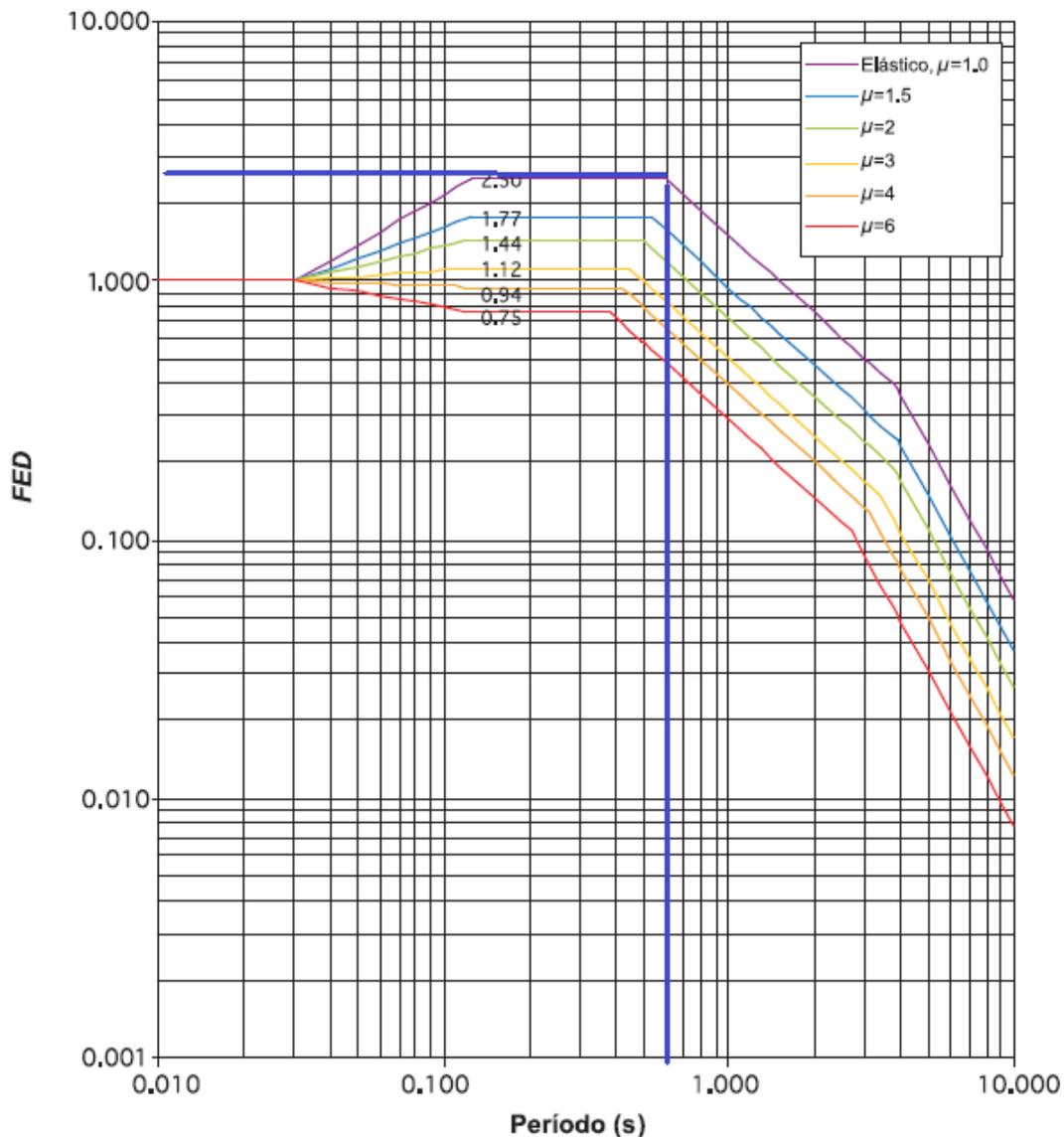


FIGURA 5.7. Factor espectral dinámico, FED , para sitios de cimentación tipo S_3 en zona sísmica III (amortiguamiento $\zeta = 5\%$; ductilidades $\mu = 1, 1.5, 2, 3, 4, 6$).

Figura 34. Factor espectral dinámico

Fuente: (Código Sísmico de Costa Rica 2010, 2014)

4.1.1 Fuerza sísmica

Para conocer cuáles son las cargas sísmicas que se debían aplicar al modelo, primero se calculó el peso de la estructura (W) que participa en la acción sísmica que se toma como el peso del techo más la mitad del peso total de las paredes y columnas. El coeficiente sísmico se calculó para una ductilidad de 1, para el periodo mayor de la zona de la "meseta" del FED, según la Figura 34. Conociendo el periodo del primer modo de oscilación, se calculó el coeficiente sísmico y el cortante basal (V_b) total de la estructura. A manera de resumen, se muestran los valores en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Coeficientes calculados, primer modo de oscilación

Peso de la estructura (W) (kg)	9100
Periodo primer modo de oscilación T (s)	0,06
FED	2,50
Coeficiente sísmico	0,108
Cortante basal (V_b) (kg)	982,8

Una vez conocido el coeficiente sísmico y las cargas aplicadas a cada nodo, se procedió a realizar una primera corrida del modelo. De este, se extrajeron los desplazamientos de la estructura, para volver a calcular el periodo de oscilación según la ecuación 7-3 del CSCR 10-14, presentados en el Cuadro 20. Ya que la estructura tiene una distribución diferente en cada eje de su planta, se calculó el para cada uno.

Cuadro 20. Recalculo del primer modo de vibración

Desplazamiento eje X (cm)	0,5
Recálculo primer modo de oscilación T (s) eje X	0,136
Desplazamiento eje Y (cm)	0,3
Recálculo primer modo de oscilación T (s) eje X	0,106

Debido a que el periodo calculado de primero y el recalculado para el eje X el valor de FED es el mismo, no se cambió, y para el eje Y, como el FED para un periodo de 0,106 s es aproximadamente de 2,20, se utilizó el valor inicial de FED ya que es mayor, para realizar los cálculos de manera conservadora.

Posterior al recalculo de los periodos de vibración y volver a ejecutar el modelo con el coeficiente sísmico actualizado, se revisaron las derivas permisibles en cada eje. Como se muestra en el Cuadro 21, las derivas inelásticas para cada dirección ortogonal cumple con el límite dado

Cuadro 21. Revisión de derivas máximas por fuerzas sísmicas

Eje	Deformación máxima (cm)	Deriva inelástica	Límite permisible CSCR10-10	Cumplimiento
X	0,5	0,0002	0,018	Cumple
Y	0,3	0,0001	0,018	Cumple

4.1.2 Fuerza de viento

La fuerza de viento se calculó siguiendo los “Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica”, publicado en el año 2021. En el Cuadro 22, se muestran los diferentes factores elegidos y calculados para definir la carga de viento

Cuadro 22. Factores usados para análisis estructural por cargas de viento

Factor	Asignación	Sección
Importancia de la edificación	III Normal	2.2
Nivel de desempeño de la edificación	NDU-1	2.5
Velocidad básica del viento	115 km/h	3.1.2
Coefficiente de exposición (C_e)	0.674	3.3.1
Rugosidad del terreno	Rugosidad tipo B	3.3.1.2
Coefficiente de recurrencia (C_r)	1.6	3.3.2
Coefficiente topográfico (C_t)	1.0	3.3.3
Coefficiente de direccionalidad (C_d)	0.85	3.3.4

Para la revisión de cumplimiento por viento, se deben revisar los límites de deriva dados por el reglamento. Las deformaciones se revisan con las cargas de servicio, con la siguiente ecuación.

$$R_r = CP + 0.5 CT \pm CV_s \quad [3]$$

Conociendo los desplazamientos que ocurren con esta combinación de cargas, se deben revisar con las derivas máximas dadas en la sección 6.1, en la tabla 2 del reglamento en uso. La altura a la que se revisa, es el punto más alto, que en este caso es de 7 m en la cumbre del techo. Los resultados para las diferentes condiciones se presentan en el Cuadro 23.

Cuadro 23. Derivas permisibles por carga de viento

Eje	Deformación máxima (cm)	Deriva inelástica	Caso	Límite de deriva	Cumplimiento
X	0,9	0,001	1	0,0025	Cumple
Y	2,1	0,003	1	0,0025	No cumple
X	0,9	0,001	2.A.iii	0,005	Cumple
Y	2,1	0,003	2.A.iii	0,005	No cumple

4.2 Deficiencias de estructuración y constructivas

La estructura está conformada por dos sistemas estructurales: el núcleo central, en donde se encuentran las aulas, de marcos arriostrados y el otro por marcos, que sostienen el techo del corredor. El marco arriostrado conforma el sistema sísmico. Debido a que es de un solo piso y por su sistema constructivo, no presenta ningún diafragma horizontal rígido. Para mayor claridad se presenta en color azul el sistema arriostrado y en verde el de marcos en la Figura 35.

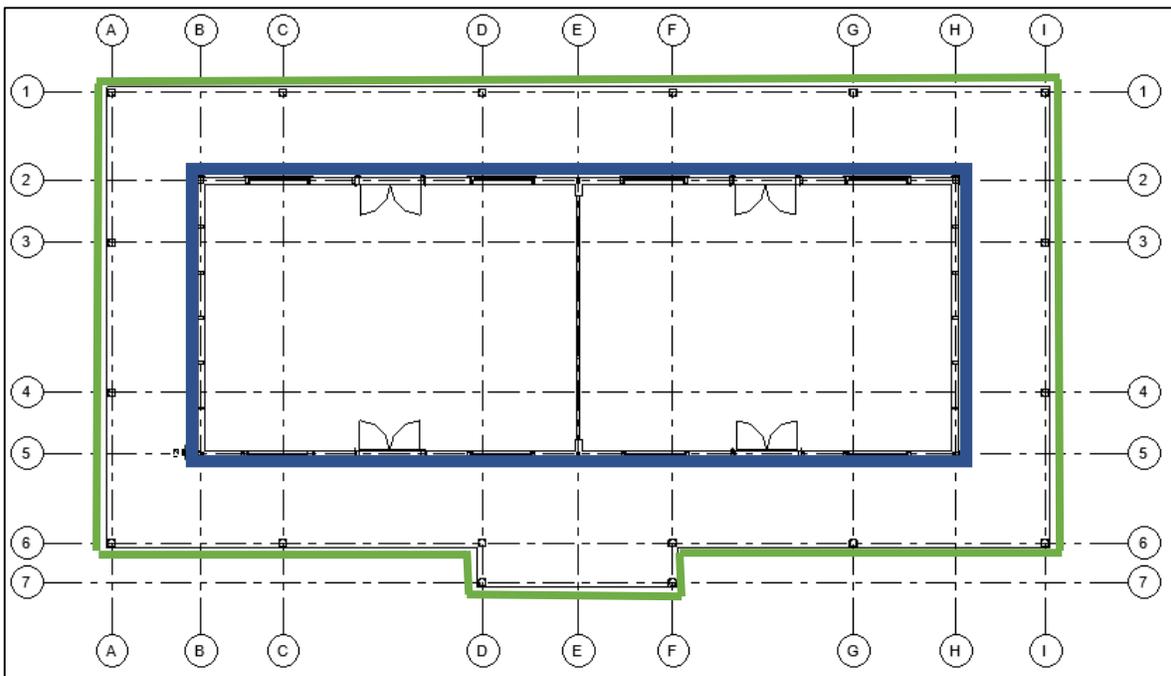


Figura 35. Sistemas estructurales

Conociendo la estructura descrita en los capítulos anteriores, a continuación, se describen las deficiencias de estructuración, tomadas en cuenta en el análisis estructural. Una deficiencia que presenta la edificación, es el sistema de vigas que tiene el corredor, las cuales se apoyan en una viga conectora entre columnas de los ejes A, I, 1 y 6, por lo que

no existe una continuidad ideal de las cargas que provienen del techo hacia las columnas, como se muestra en la Figura 36. La distancia entre vigas es de 1,00 m y el motivo por el cual se encuentra de esta manera, es para que los clavadores puedan resistir la distancia entre apoyos.

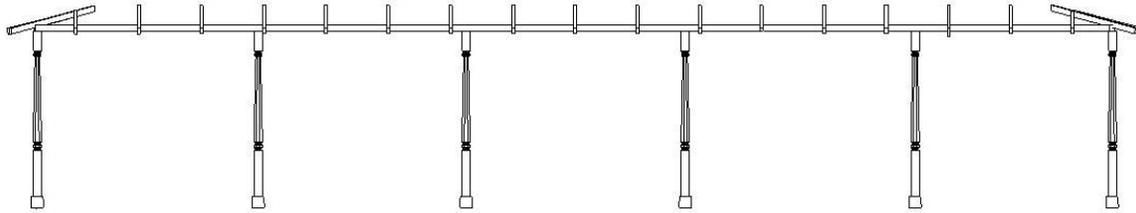


Figura 36. Distribución de vigas de corredor

Otro problema de estructuración se presenta en las cerchas, ya que presentan un elemento horizontal, que se encierra en azul en la Figura 37, provoca flexión en las cuerdas superiores las cuales su funcionamiento debería ser por cargas axiales, no llega a ningún nodo que transmitan fuerzas a los demás elementos, y de primera impresión, puede que no realice ninguna función estructural.

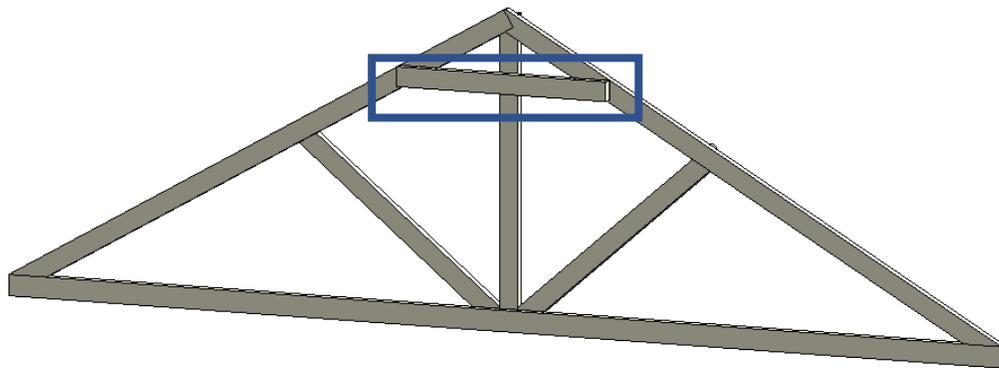


Figura 37. Detalle de cercha

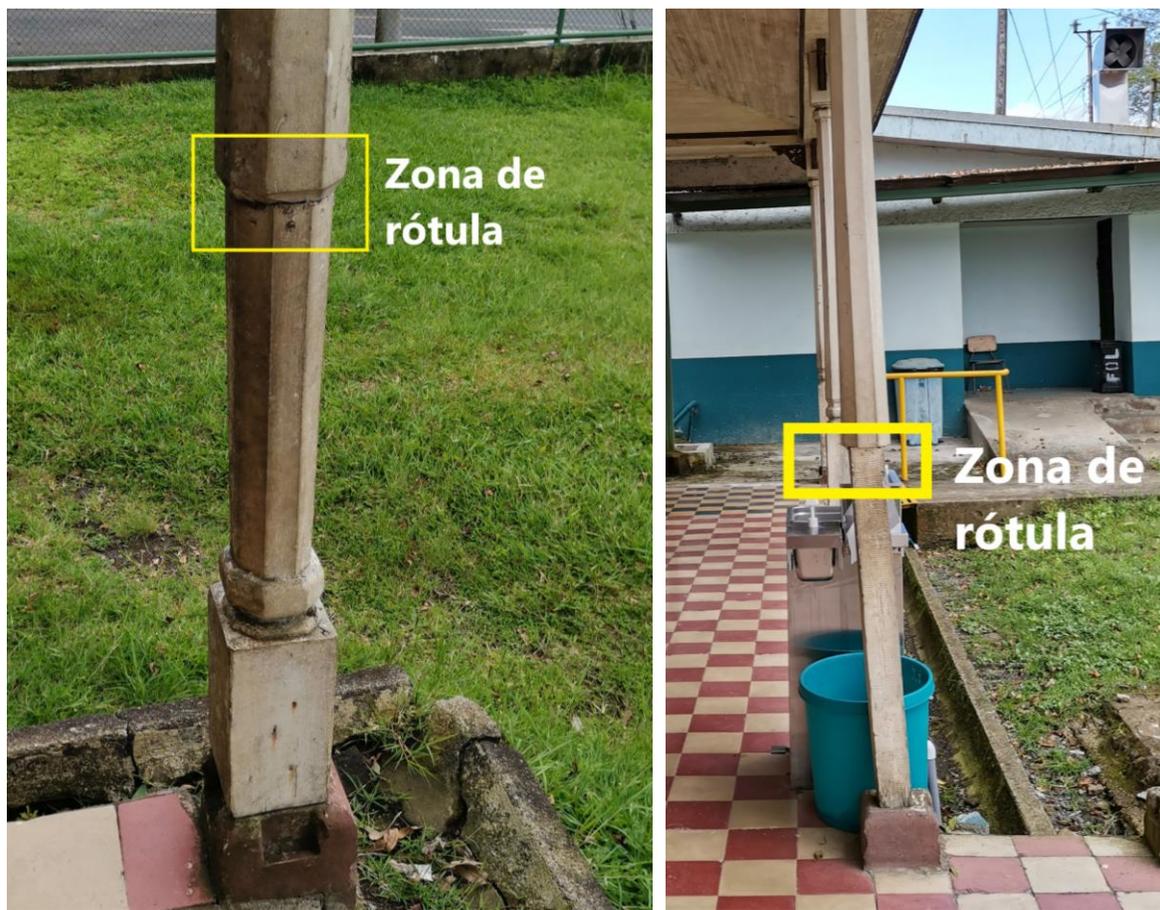
4.3 Estado de la estructura

A partir de una inspección visual de la estructura, la edificación se encuentra en buen estado, ya que luego de la revisión de los elementos estructurales a los que se pudo tener acceso, la mayoría de ellos no presentan problemas de humedad ni de plagas. Algunas tablillas de las paredes presentan problemas de plagas, pero no representan ningún riesgo a nivel estructural.

4.3.1 Patologías

El principal problema que presenta la estructura, es la ausencia de tres columnas, ubicadas en la intersección de los ejes (A,1), (D,7) y (F,7), las cuales fueron removidas por los encargados de la institución, ya que la parte inferior de estas, debido a la humedad y hongos se pudrieron y representaban un problema de seguridad para los estudiantes y demás usuarios de las instalaciones.

Continuando con las columnas, las ubicadas entre los ejes (A,6) y (F,6), que se muestran en la Figura 38 fueron reparadas en algún momento por los problemas de humedad, y la junta que se realizó fue hecha con tornillos en distintas direcciones, provocando así un tipo de rótula y tampoco se tiene certeza del tipo de unión realizada con la basa.



Intersección ejes (A,6)

Intersección ejes (F,6)

Figura 38. Columnas que forman rótulas

Otro problema presente, es el deterioro de las bases de algunas de las columnas, debido a la humedad y contacto directo con el agua. En la Figura 39 se puede observar cómo estas

han ido perdiendo área efectiva en su base, lo que disminuye la carga que pueden transmitir a las basas.



Intersección ejes (G,6)



Intersección ejes (F,1)

Figura 39. Columnas con problemas en la base

En la cara externa de la pared del eje H, se puede ver en la Figura 40 como la presencia de insectos xilófagos han ido destruyendo la tablilla que recubre. A pesar de que el forro de las paredes no se tomó en cuenta para el cálculo estructural, esa presencia de la plaga se puede extender a otros elementos estructurales, por lo que es importante resaltarlo.



Figura 40. Pared con insectos xilófagos

Otra situación que puede provocar el daño en elementos estructurales, es la pérdida del acero de los tapicheles y botaguas, como se puede observar en la Figura 41, ya que esta puede ser una vía de ingreso de agua y el riesgo asociado a esto, es que el daño puede hacerse notorio en etapas avanzadas del deterioro de los elementos internos.

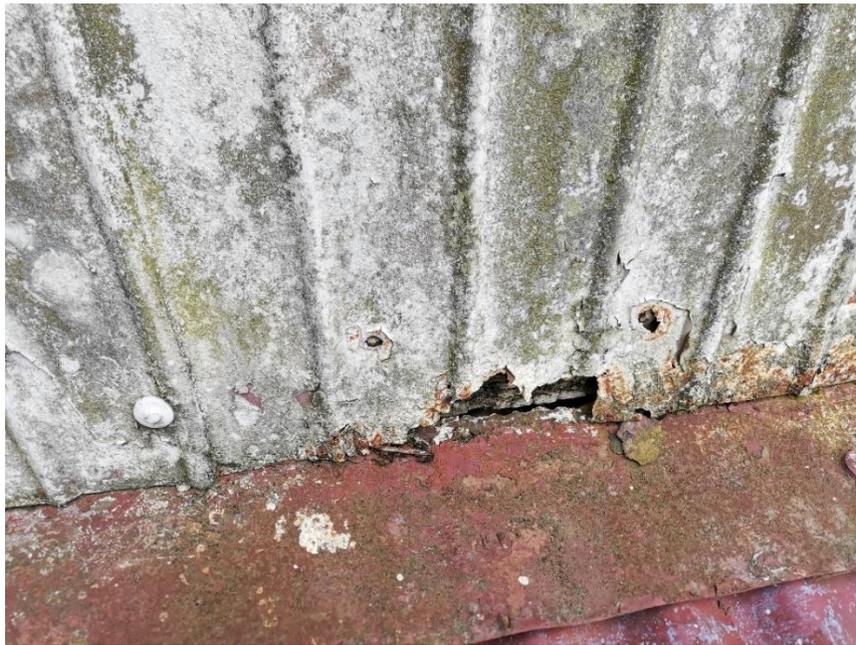


Figura 41. Óxido en tapicheles y botaguas

4.4 Modelo de análisis

El modelo de análisis fue realizado en el programa Robot Structural, para aprovechar la compatibilidad con Revit. Cabe resaltar que, a pesar de esto, se tuvieron que realizar cambios al modelo estructural. El primer cambio que se hizo, fue eliminar las paredes y modelar cada elemento vertical y diagonal de la parte interna de la pared, ya que se importaba como un muro de corte y este no era el comportamiento buscado. Las tablillas no se modelaron, ya que, debido a su espesor, se desprecia el aporte que tienen estas a nivel estructural.

Una vez que se comprobó que la estructura estuviera completa y existiera un flujo de cargas, mediante una correcta conexión de los nodos, se procedió a crear las cargas y combinaciones de estas, según el CSCR10-14 y los "Lineamientos

4.4.1 Cargas de diseño

Las cargas de diseño, mostradas en el Cuadro 24, se asignaron a partir de los materiales con que cuenta la estructura. A los elementos estructurales, al programa se le indicó la densidad del material asignado, por lo que, cada sección, en el modelo ya incluía el peso. Luego, las áreas tributarias se asignaron según la distancia entre clavadores, para calcular la carga por metro lineal. El mismo procedimiento se utilizó para el análisis del piso de madera interno.

Cuadro 24. Cargas de diseño aplicadas

Carga permanente (CP)	
Lámina de techo	5 kg/m ²
Cielorraso	7,2 kg/m ²
Carga temporal (CT)	
Aulas u oficinas	200 kg/m ²
Techos	40 kg/m ²
Carga de viento	
Presión neta de diseño	80 kg/m ²

Para las cargas de sismo, se dividió la estructura en distintas áreas, según el nodo en el que se iba a aplicar la carga sísmica, y se estimó el peso de la estructura que correspondía a esa área. Las cargas sísmicas aplicadas a la altura indicada, con el coeficiente sísmico, se muestran en el Cuadro 25.

Cuadro 25. Fuerzas sísmicas aplicadas en eje X

Zona	Altura (m)	$F=C*W$ (kgf)
A1	3,20	38,90
A2	3,20	38,90
A3	4,20	201,11
A4	4,20	201,11
A5	4,20	200,92
A6	4,20	200,92
A7	3,20	37,38
A8	3,20	37,38
A9	3,20	13,13
A10	3,20	13,13

De la misma forma, se calcularon las fuerzas sísmicas en el eje Y de la estructura, con una división distinta, como se observa en el Cuadro 26.

Cuadro 26. Fuerzas sísmicas aplicadas en eje Y

Zona	Altura (m)	$F=C*W$ (kgf)
A11	3,20	23,01
A12	3,20	23,01
A13	4,20	216,32
A14	4,20	229,16
A15	4,20	216,32
A16	4,20	229,16
A17	3,20	23,01
A18	3,20	23,01

Una vez que se conocieron las carga, se procedió a introducir las combinaciones de carga de la ecuación 2 a la 5 según el CSCR 2010-14. En el caso de las cargas sísmicas, estas se tuvieron que aplicar en un sentido positivo y luego negativo, y en ambas direcciones ortogonales. De la ecuación 6 a la 8 corresponde a las combinaciones de carga de los "Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de las fuerzas de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica".

$$CU_1 = 1.4 CP \quad [4]$$

$$CU_2 = 1.2 CP + 1.6 CT \quad [5]$$

$$CU_3 = 1.05 CP + CT \pm CS \quad [6]$$

$$CU_4 = 0.95 CP \pm CS \quad [7]$$

$$CU_5 = 1.2 CP + 1.6 CT + 0.5 CV \quad [8]$$

$$CU_6 = 1.2 CP + CT_{red} \pm CV + 0.5 CT_t \quad [9]$$

$$CU_7 = 0.90 CP \pm CV \quad [10]$$

4.4.2 Revisión de secciones de madera

Posterior a análisis realizado en el programa Robot Structural Analysis Professional 2022, de manera paralela, se realizaron modelos simplificados de los elementos para validar los resultados obtenidos. Una vez validado el modelo de esta otra manera, se extrajeron de las distintas secciones a revisar, los valores máximos de esfuerzos, para revisarlos por los factores de carga y resistencia últimos. En el Cuadro 27 se muestran los valores de esfuerzos básicos utilizados

Cuadro 27. Valores de esfuerzo básicos utilizados

Compresión (kg/cm ²)	274
Cortante (kg/cm ²)	119,3
Flexión (kg/cm ²)	748,7
MOE (kg/cm ²)	36324,4

Iniciando la revisión con las vigas del techo del corredor, los esfuerzos que rigen son los de flexión, y también se revisa el cortante. Para las 3 secciones presentes, para los dos esfuerzos mencionados, estas soportan las solicitaciones de carga, y cumplen también con las deflexiones máximas permitidas. En el Cuadro 28 se muestra el resumen de los datos y en la Figura 42 el elemento ubicación en un corte transversal de la edificación para mejor comprensión de los datos.

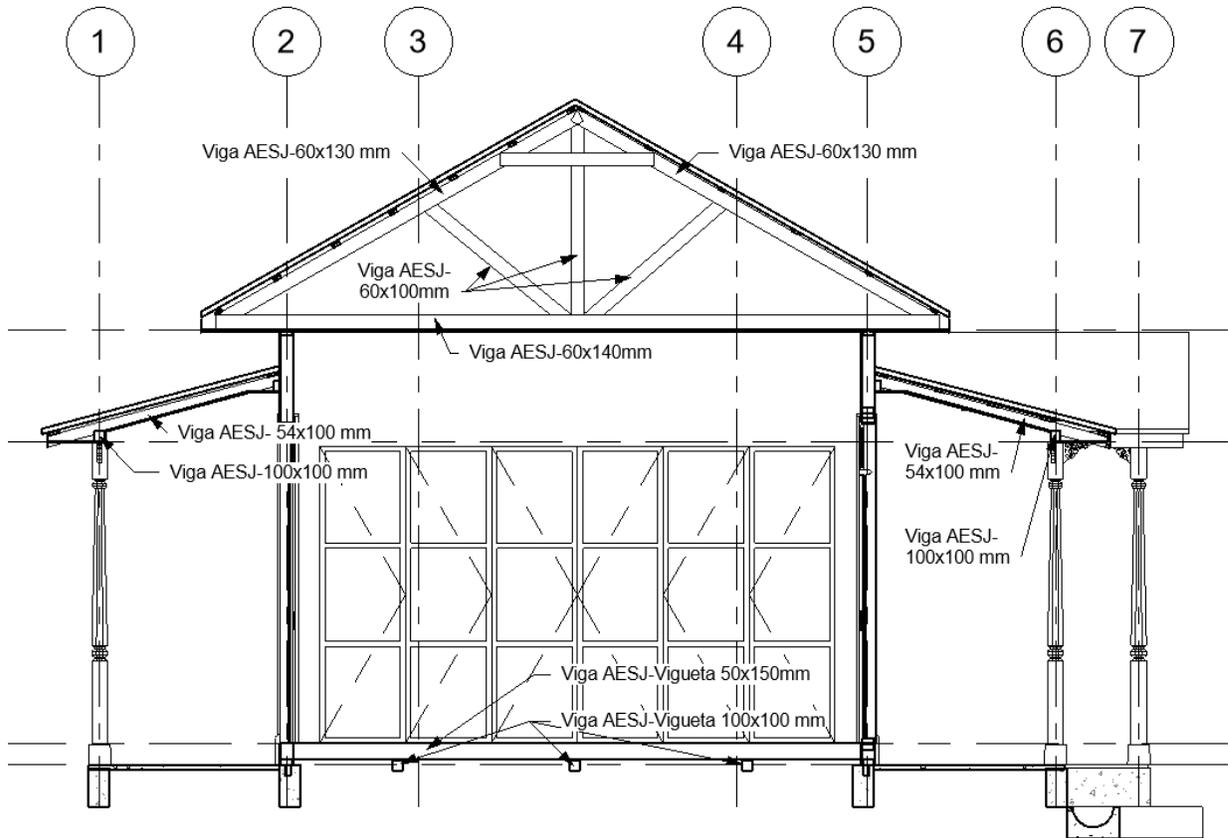
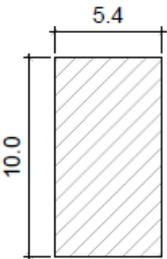
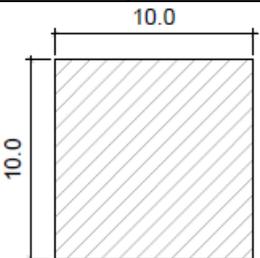


Figura 42. Ubicación de diferentes elementos estructurales

Cuadro 28. Fuerzas en vigas de techo

Elemento	Viga AESJ-	Sección	54x100mm		
	Flexión	Mu (kgf*m)	ϕ Mn (kgf*m)	Cumplimiento	
		99	139	Sí	
		Cortante	Vu (kgf)	ϕ Vn (kgf)	
			143	1283	Sí
		Deflexión	Calculada (cm)	Permitida (cm)	
		C. Temporal	0,1	0,5	Sí
C. Temp+ Perm	0,2	0,8	Sí		
Elemento	Viga AESJ-	Sección	100x100mm		
	Flexión	Mu (kgf*m)	ϕ Mn (kgf*m)	Cumplimiento	
		193	257	Sí	
	Cortante	Vu (kgf)	ϕ Vn (kgf)		
		391	2375	Sí	
	Deflexión	Calculada (cm)	Permitida (cm)		
	C. Temporal	0,3	1,1	Sí	
C. Temp+ Perm	0,7	1,7	Sí		
Elemento	Viga AESJ-	Sección	46x100mm		
	Flexión	Mu (kgf*m)	ϕ Mn (kgf*m)	Cumplimiento	
		86	118	Sí	
	Cortante	Vu (kgf)	ϕ Vn (kgf)		
		855	1092	Sí	
	Deflexión	Calculada (cm)	Permitida (cm)		
	C. Temporal	0,0	0,6	Sí	
C. Temp+ Perm	0,1	0,9	Sí		

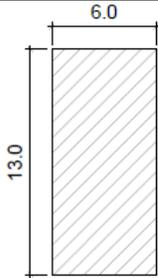
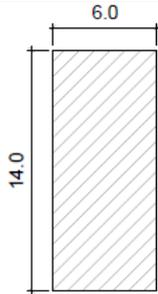
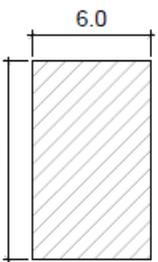
Los elementos que continúan siguiendo el flujo de las cargas, son las columnas. Para estas, solamente se verificó que cumplieran por fuerza axial en compresión, presentándose los datos en el Cuadro 29, ya que, por el tipo de unión con la viga, se despreció el momento que pudiera transmitirse entre estos dos elementos. Después de haber reducido la carga nominal de la columna por la longitud de esta, se concluye que estos elementos cumplen con las cargas impuestas.

Cuadro 29. Fuerzas en columnas

Elemento	AESJ-	Sección	Columna	
	Compresión	Pu (kgf)	ϕ Pn (kgf)	Cumplimiento
		777	920	Sí

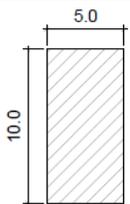
Las cerchas del techo que cubre la zona de aulas, son el siguiente elemento a comprobar que sus secciones cumplan. Estas tienen tres perfiles que se detallan en el Cuadro 30, uno para la cuerda inferior, otro para las diagonales y para la cuerda superior. Debido al comportamiento de estas, que son por carga axial, se procede a revisar tensión, compresión y cortante. Debido a que las cargas son muy bajas, rigiendo las fuerzas gravitacionales, todas las secciones cumplen estos esfuerzos antes mencionados.

Cuadro 30. Fuerzas en elementos de cerchas

Elemento	Viga AESJ-	Sección	60x130 mm (cuerda sup)	
	Compresión	Pu (kgf*m)	$\emptyset P_n$ (kgf*m)	Cumplimiento
		487	917	Sí
	Tensión	Tu (kgf)	$\emptyset T_n$ (kgf)	
		413	4195	Sí
	Cortante	Vu (kgf)	$\emptyset V_n$ (kgf)	
		125	2154	Sí
Elemento	Viga AESJ-	Sección	60x140 mm (cuerda inf)	
	Compresión	Pu (kgf*m)	$\emptyset P_n$ (kgf*m)	Cumplimiento
		120	1123	Sí
	Tensión	Tu (kgf)	$\emptyset T_n$ (kgf)	
		390	4518	Sí
	Cortante	Vu (kgf)	$\emptyset V_n$ (kgf)	
		400	2320	Sí
Elemento	Viga AESJ-	Sección	60x100 mm (diagonales)	
	Compresión	Pu (kgf*m)	$\emptyset P_n$ (kgf*m)	Cumplimiento
		487	645	Sí
	Tensión	Tu (kgf)	$\emptyset T_n$ (kgf)	
		413	3227	Sí
	Cortante	Vu (kgf)	$\emptyset V_n$ (kgf)	
		125	1657	Sí

Con respecto a las riostras, estas son los elementos que se encargan de soportar las cargas de sismo, tanto en tensión como en compresión. A pesar de que soportan las fuerzas impuestas como se puede observar en el Cuadro 31, si se ven muy exigidas para estas cargas.

Cuadro 31 .Fuerzas en elementos diagonales de paredes (riostras)

Elemento	AESJ-	Sección	50x100 mm	
	Compresión	Pu*SR (kgf*m)	$\emptyset Pn$ (kgf*m)	Cumplimiento
		2625	2827	Sí
	Tensión	Tu (kgf)	$\emptyset Tn$ (kgf)	
		2530	2689	Sí

Para las viguetas del piso de madera interno, se elaboró un modelo donde solo se consideraron por las cargas gravitacionales. Debido a su función, los esfuerzos que predominan son los de flexión y de igual manera se revisa el cortante. Del Cuadro 32, las viguetas de 50x150 mm cumplen con los requerimientos de esfuerzos y deflexiones. Para las viguetas de 100x100 mm, que es el elemento que soporta las otras viguetas en dirección perpendicular, los esfuerzos calculados son menores a los producidos por las cargas y las deflexiones no cumplen con el máximo permitido, por lo que esta sección no es adecuada para estas cargas. Es importante resaltar que estas secciones utilizadas son las existentes en los planos, por lo que, debe verificarse las secciones existentes, y en caso que no coincidan, deberá realizarse de nuevo el análisis. El sistema de viguetas se muestra en la Figura 43.

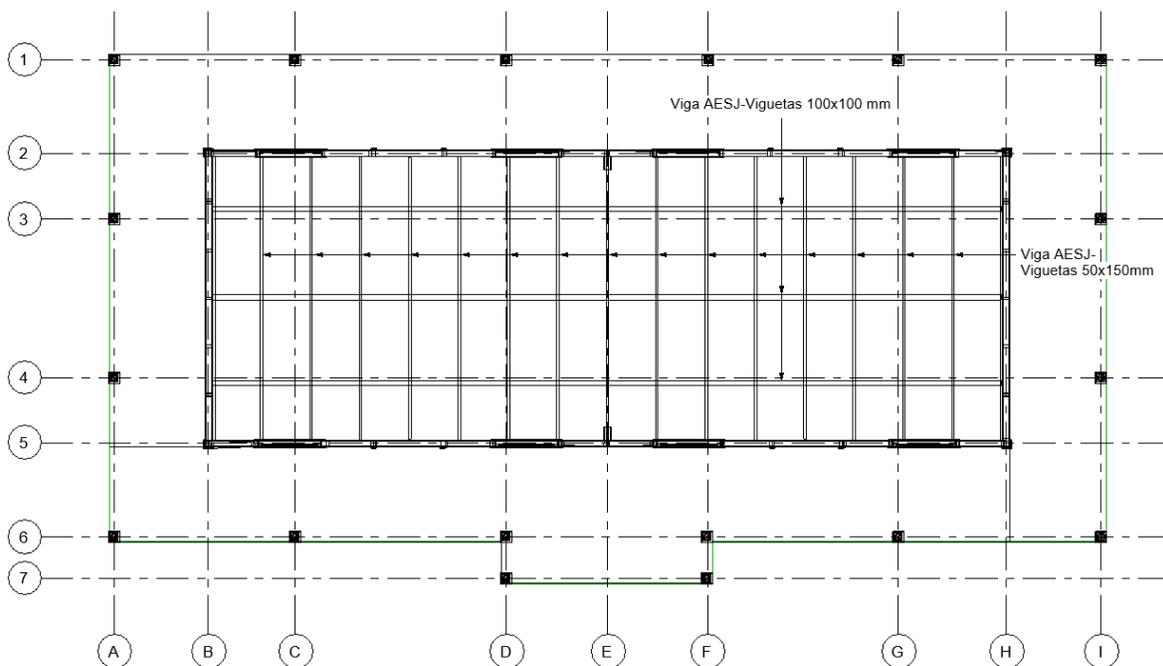
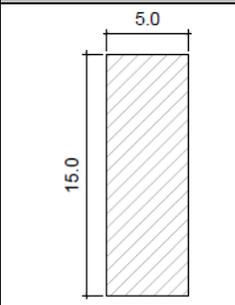
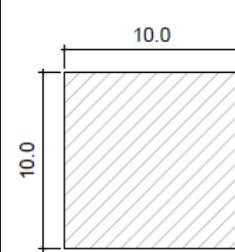


Figura 43. Sistema de viguetas de piso

Cuadro 32. Fuerzas en elementos de viguetas de piso

Elemento	Viga AESJ-	Sección	Vigueta 50x150mm	
	Flexión	Mu (kgf*m)	ϕ Mn (kgf*m)	Cumplimiento
		68	290	Sí
	Cortante	Vu (kgf)	ϕ Vn (kgf)	
		281	1781	Sí
	Deflexión	Calculada (cm)	Permitida (cm)	
	C. Temporal	0,01	0,2	Sí
C. Temp+ Perm	0,01	0,3	Sí	
Elemento	Viga AESJ-	Sección	Vigueta 100x100mm	
	Flexión	Mu (kgf*m)	ϕ Mn (kgf*m)	Cumplimiento
		512	257	Sí
	Cortante	Vu (kgf)	ϕ Vn (kgf)	
		1209	2375	Sí
	Deflexión	Calculada (cm)	Permitida (cm)	
	C. Temporal	0,8	0,5	No
C. Temp+ Perm	0,9	0,6	No	

4.5 Propuesta de intervención

Para realizar la intervención de la edificación, lo que se pretende es que vuelva a su condición original, donde se reparen aquellos elementos que se encuentren en mal estado y mejorando el aspecto general de esta. Para la propuesta de intervención, se separa por los distintos elementos a reparar.

4.5.1 Columnas perimetrales

Para reforzar la estructura en sus condiciones actuales, lo primero que debe realizar es volver a la estructura a sus condiciones originales, es decir, colocar las columnas faltantes, cuya ubicación se muestra en la Figura 44, en círculos de color rojo. Estas columnas deben confeccionarse en su totalidad.

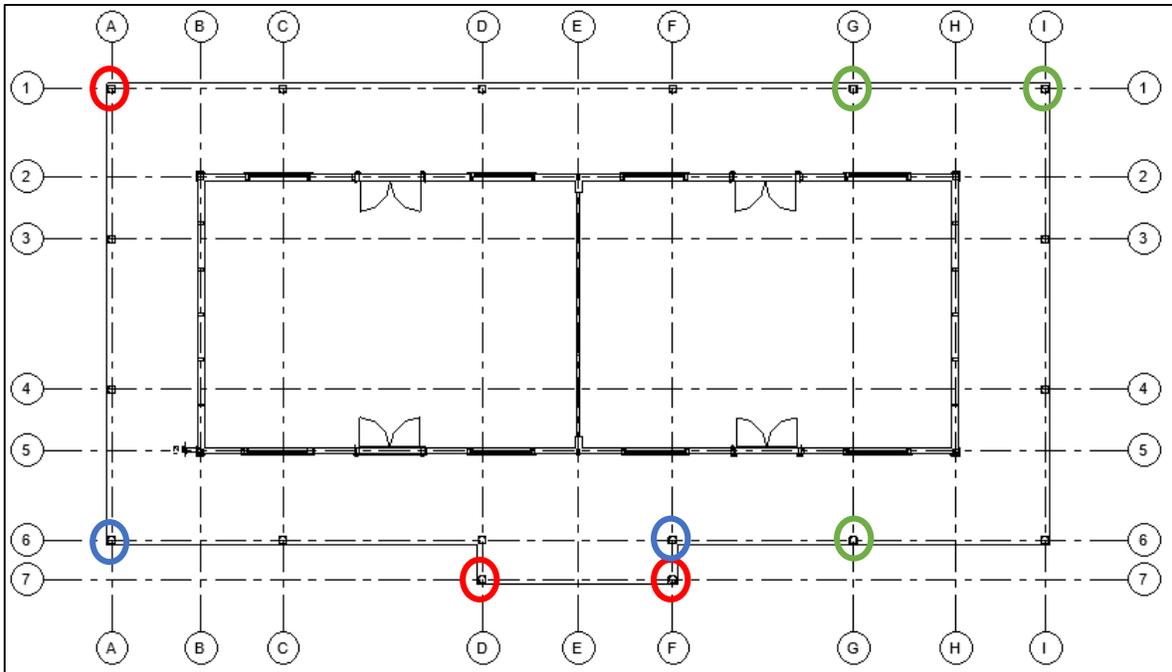


Figura 44. Ubicación de columnas a que requieren reparación

Para el anclaje a la base, se recomienda en aquellas basas que ya no posean el acero o pin, sustituirlo con una base de acero, anclada por medio de pines de acero y epóxico al concreto, de forma que las cargas se puedan transmitir de forma correcta a la base. En la Figura 45 se muestra el detalle del anclaje a la base.

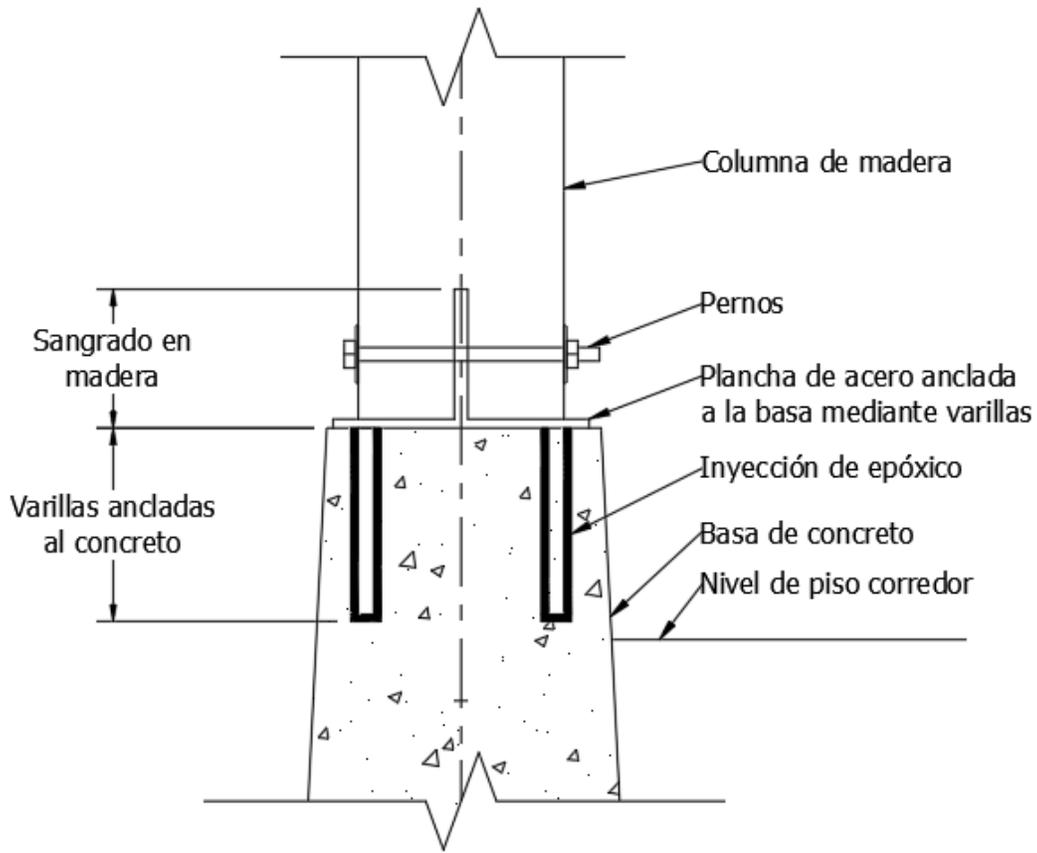


Figura 45. Detalle de anclaje con epóxido en base de columna

Además, las columnas señaladas en azul, deben repararse de forma adecuada, ya que fueron reparadas en su base, pero la unión entre elementos de madera provoca que las cargas no se transmitan de forma adecuada al cimiento, ocurriendo excentricidades. Las columnas señaladas en verde, corresponden a aquellas cuya base debe sustituirse, hasta una altura donde la madera ya no presente problemas de humedad. El detalle de unión para estos dos casos se presenta en la Figura 46.

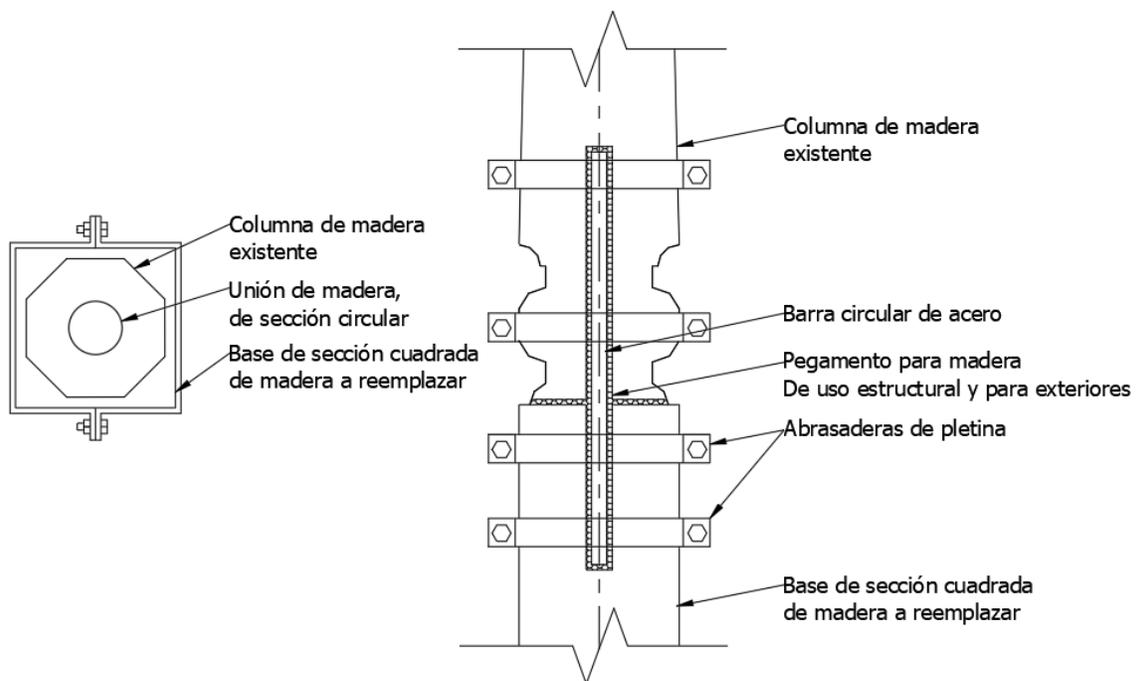


Figura 46. Detalle de unión de columnas

Para realizar reparaciones o sustituciones en algún elemento estructural, se recomienda que la madera a utilizar haya sido secada al horno y recibido un tratamiento contra hongos y humedad por inmersión. Para la escogencia de esta, debe estar libre de nudos y/o reventaduras (Tuk, 2019). En el Cuadro 33 se describen las especies que pueden sustituir al chiricano, así como el uso estructural que se recomienda. Los usos se basan en las propiedades mecánicas de cada especie, dadas por el libro "Fichas técnicas de veinte especies maderables de importancia comercial en Costa Rica". Con esto se asegura también que no se vayan a utilizar otras especies prohibidas por la ley, como lo es el chiricano.

Cuadro 33. Maderas recomendadas para uso estructural

Nombre común	Nombre científico	Uso estructural recomendado
Pilón	<i>Hieronyma alchorneiodes</i> Fr. Allem	Columnas, vigas, cerchas
Surá	<i>Terminalia oblonga</i>	Vigas, cerchas
Teca	<i>Tectona grandis</i> L.f.	Columnas

4.5.2 Paredes

Se deben sustituir todas aquellas secciones de tablilla de cerramiento que presenten un deterioro significativo en su sección. Para sustituir estos elementos, se debe asegurar que el perfil a utilizar coincida con el existente. Para este caso, se recomienda mandar a fabricar la cuchilla en caso de que no exista el perfil en el mercado.

Al momento de sustituir estas piezas, cuando se desarma, se debe inspeccionar que los elementos ocultos de uso estructural, se encuentren en buen estado. En caso de que no sea así, se deben sustituir por otros con la misma sección transversal, en la misma ubicación.

4.5.3 Techos

Debido a la alta humedad que presenta el sitio, existen zonas del techo que presentan deterioro avanzado de oxidación, así como presencia de hongos. Para tratar estos problemas se recomienda lo siguiente:

- Lavar el techo para eliminar los hongos presentes en este, así como para eliminar presencia de cenizas y hojas de los árboles
- En las zonas que presenta óxido, limpiar con cepillo de acero y aplicar un convertidor de óxido, para tratar las zonas afectadas y que aún no presente agujeros la lámina
- Las láminas que presenten un deterioro avanzado y no puedan ser tratadas con el convertidor de óxido, se deben sustituir por nuevas, y estas deben ser de calibre #24
- Posterior al tratamiento, aplicar pintura anticorrosiva
- Para los tapicheles, botaguas y cumbreras, se debe aplicar el mismo tratamiento descrito anteriormente. Las láminas que presenten problemas de oxidación avanzada se deberán cambiar, manteniendo el perfil y calibre existente.

Para evitar que el agua caiga libremente al caño existente, se recomienda colocar una canoa perimetral, de frente liso, para que no interfiera con la arquitectura del sitio, cuyo tamaño cumpla con la demanda de agua del sitio. Además, los bajantes se deberán colocar en sitios donde no interfiera tanto con la fachada del edificio, según la aprobación del Centro de Patrimonio.

4.5.4 Caño perimetral

El caño perimetral cuenta con secciones de cuneta que están destruidas y en las esquinas no existe continuidad de en la canalización del agua de lluvia. Además, no es claro hacia donde se canaliza el agua. Por lo que se proponen las siguientes mejoras:

- Construir aquellos segmentos que se encuentren en mal estado, para evitar que el agua pueda filtrarse hacia las cimentaciones de la edificación.
- Revisar la pendiente de los diferentes segmentos, y corregir en caso de que el agua se estanque o devuelva.
- Construir cajas de registro en las esquinas de los caños, y que estas se encauce el agua pluvial mediante tuberías que desfoguen en el cordón de caño.

4.5.5 Piso externo

Para el mosaico presente en el corredor, se deberán fabricar los mosaicos faltantes, con las dimensiones y colores reales. Para esto, se recomienda realizarlos en una fábrica que cuente con experiencia, y se realicen pruebas de color, para que la diferencia entre los elementos nuevos y viejos sea imperceptible.

4.5.6 Piso interno

Según el análisis estructural donde se evaluó el piso el piso de madera, la sección de 10x10 cm no cumplía con la demanda calculada en un 50% aproximadamente, por lo que se elaboró el detalle de la Figura 47 que muestra la ubicación donde se debe colocar el nuevo soporte.

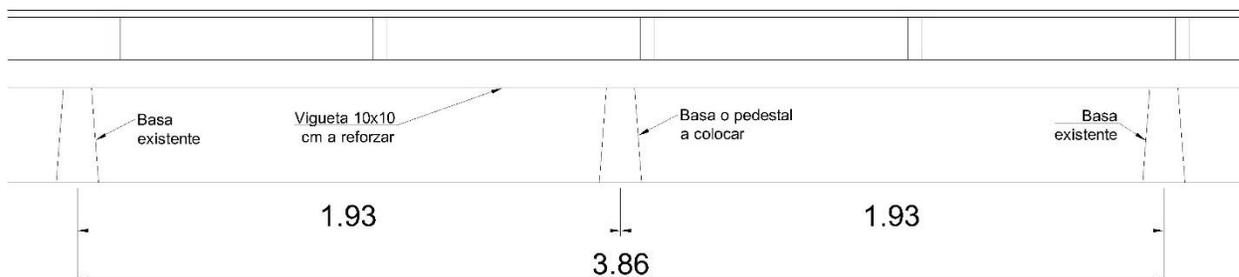


Figura 47. Detalle de reforzamiento de piso de madera

Es importante recalcar que, al realizar la intervención, las secciones de vigas que soportan el piso deben de verificarse, ya que para el diseño se utilizaron las disponibles en los planos

existentes, y en caso de que sean distintas a las utilizadas en el análisis, se debe volver a realizar este con las medidas reales, tanto de las secciones de madera, así como de distancia entre apoyos. Debe revisarse también que no presenten problemas de humedad, insectos ni se encuentren agrietados

4.5.7 Instalación eléctrica

La instalación eléctrica actual, de la cual en los archivos no se encuentra fecha de cuando fue hecha, la mayor parte de ella se encuentra entubada en el cielorraso, como se muestra en la Figura 48, por lo que sugiere una intervención en los últimos años.



Figura 48. Instalación eléctrica actual

Sin embargo, se debe prestar atención a las salidas, como por ejemplo, para las luces, donde los cables no cuentan con ninguna caja para realizar la conexión a la salida, como se observa en la Figura 49. Además, el centro de carga no se encontraba en este inmueble, por lo que deben verificarse las distancias máximas de los circuitos, así como temas de seguridad para la desconexión en caso de algún incidente.



Figura 49. Detalle de salida a lámpara en cielorraso

Por lo que se recomienda:

- Evaluar con un profesional eléctrico, el estado actual de la instalación, tomando en cuenta la vida útil de esta, ya que no existe en el expediente el año en que se construyó.
- Considerar para un nuevo diseño las necesidades tecnológicas del momento, tanto del aumento de dispositivos electrónicos, así como de uso del internet.

4.5.8 Protección contra incendios

Debido a que la estructura es de madera, material altamente vulnerable ante el fuego, se recomienda aplicar la normativa NFPA y se recomienda lo siguiente:

- Colocar un sistema de detección y alarma de fuego
- Colocar extintores internos y externos en el edificio
- Colocar capa de pintura ignifuga, que retarde cualquier conato de incendio

Es importante que los equipos colocados cumplan con los requerimientos de Ingeniería de Bomberos del Instituto Nacional de Seguros (INS), ente rector en seguridad contra incendios en Costa Rica y la Norma NFPA.

4.5.9 Mantenimiento general

Con respecto a la preservación de la edificación, es importante sustituir todos aquellos elementos tanto estructurales como de cerramiento que tengan presencia de plagas de insectos, por otras nuevas, que cumplan con las dimensiones y especie según su función. Para eliminar y prevenir la presencia de estas en otras zonas donde el acceso sea limitado o que no se pueda del todo, se debe fumigar la estructura con una empresa especializada, que tenga los permisos sanitarios respectivos y que cuente con el conocimiento de las plagas a tratar, así como de los productos adecuados. La fumigación se recomienda dos veces al año.

Se recomienda también, aplicar a aquellos elementos de madera que no cuenten con una capa de pintura, dos o tres manos de preservante para madera, según las recomendaciones del fabricante. Para las columnas que están en contacto continuo con humedad, pero no presente signos externos de deterioro, se puede aplicar un producto que proteja la madera de la humedad y que se puede pintar posterior a su aplicación.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Con base a los objetivos planteados al principio de este proyecto, se tienen las siguientes conclusiones:

- Se pudo crear un modelo arquitectónico y estructural bajo la metodología de trabajo HBIM de la Antigua Escuela de San Jerónimo de Moravia, con información valiosa para su preservación y mantenimiento.
- Fue posible realizar el escaneo tridimensional con los equipos láser, en un tiempo corto y pudiendo capturar detalles con gran precisión, cuya nube de puntos final tiene un error global de 5 mm.
- Al elaborar el Plan de Ejecución BIM, se pudo trabajar de manera más ordenada el modelo tridimensional, ya que toda la información se guardó en su carpeta correspondiente y con un nombre adecuado, que facilita la búsqueda posterior. También, al elaborar cada familia, se tenía el nivel de desarrollo claro, por lo que se tardaba menos decidiendo los parámetros a crear y la información a utilizar.
- Se logró identificar las especies de madera de uso estructural, así como las de forro de paredes, con ayuda del ingeniero Juan Tuk, quien es especialista en el tema. Y las propiedades físico-mecánicas se extrajeron de la literatura disponible sobre especies de madera.
- Con ayuda del LanammeUCR fue posible realizar ensayos de diversa índole, como los necesarios para un estudio de suelo y ensayos con muestras de concreto, que permitieron estimar propiedades mecánicas de este, así como conocer la forma en que se construyó el contrapiso y el muro perimetral.
- Se realizó un modelo HBIM de la escuela, que contiene la información obtenida tanto de la caracterización de las especies de madera, pruebas de laboratorio. La geometría de esta se extrajo de la nube de puntos, por lo que se pudo modelar con detalle la geometría levantada.
- Con base al modelo arquitectónico, fue posible realizar un modelo para el análisis estructural en el programa Robot Structural, tomando en cuenta el Código Sísmico de Costa Rica 2010-14 y los "Lineamientos técnicos para el cálculo y la aplicación de la fuerza de viento en el diseño y construcción de edificaciones en Costa Rica".

- A partir de los resultados del modelo estructural y las patologías presentes, se hacen recomendaciones para mejorar el estado de la edificación, tanto estructural como arquitectónicamente.

5.2 Recomendaciones

A partir de la experiencia obtenida en el desarrollo de este proyecto, se dan las siguientes recomendaciones:

- Aunque no fue parte del alcance de este proyecto el levantamiento, análisis y modelado de los sistemas eléctricos, basado en las observaciones de campo, es fundamental realizar una revisión profunda del estado de conservación de éstos, así como del cumplimiento de los códigos vigentes y tomar las acciones correctivas pertinentes de forma inmediata.
- Contar con equipo y software adecuado para el desarrollo de este tipo de proyectos, ya que, de no contar con la tecnología adecuada, los procesos pueden verse afectados por falta de capacidad de estos.
- Dedicar suficiente tiempo a la búsqueda de información relacionada con los distintos temas a desarrollar, así como realizar en los programas BIM de forma previa proyectos más sencillos pero que ayuden a familiarizarse con los programas, con el fin de agilizar el desarrollo del proyecto.
- Para realizar ensayos de laboratorio, en la medida de lo posible, buscar entrevistas con personas, ya sean profesionales, ex estudiantes o técnicos que hayan realizado o realicen estas pruebas. Esto con la intención de contar con una base para la ejecución de las pruebas y tener criterio si las cosas se están haciendo de forma correcta o no.
- Planear en la medida de lo posible, con un profesional o técnico con conocimiento en herramientas BIM, que ayude a la planificación del modelo, para obtener mejores resultados.
- Se aconseja al Laboratorio de Diseño y Construcción Virtual, adquirir herramientas de mano como focos o lámparas inalámbricas con buena potencia, para obtener mejores resultados en el escaneo de zonas oscuras.
- Se recomienda al Ministerio de Educación y Centro de Patrimonio Cultural de Costa Rica, contar con profesionales y técnicos especializados en el manejo de información

BIM, con el fin de que, toda la información generada no se pierda, sino que cumpla su propósito de aportar a la preservación de la Antigua Escuela de San Jerónimo de Moravia.

6 REFERENCIAS

- AITIM. (09 de Enero de 2014). *TRATAMIENTOS CURATIVOS DE LA MADERA – MÉTODOS DE TRATAMIENTO*. Obtenido de Consejo Superior de Colegios de Arquitectos de España:
https://www.cscae.com/area_tecnica/aitim/enlaces/documentos/AITIM_Proteccion_curativa_madera_01.09.14.pdf
- Antonopoulou, S., & Bryan, P. (2017). *BIM for Heritage: Developing a Historic Building Information*. Swindon, Inglaterra: Historic England. Recuperado el Abril de 2020, de <https://historicengland.org.uk/advice/technical-advice/recording-heritage/>
- ASTM International. (2020). *ASTM C42 Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete*.
- Bedford, J. (2017). *Photogrammetric Applications for Cultural Heritage. Guidance for Good Practice*. Swindon: Historic England. Recuperado el Abril de 2020, de [HistoricEngland.org.uk/advice/technical-advice/recording-heritage/](https://historicengland.org.uk/advice/technical-advice/recording-heritage/)
- Blanco Roja, M. L., Carpio Malavassi, I. M., & Muñoz Umaña, F. d. (2005). *Fichas técnicas de veinte especies maderables de importancia comercial en Costa Rica*. San José: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Boardman, C., & Bryan, P. (2018). *3D Laser Scanning for Heritage: Advice and Guidance on the Use of Laser Scanning in Archaeology and Architecture*. Swindon, Inglaterra: Historic England. Recuperado el Abril de 2020, de [HistoricEngland.org.uk/advice/technical-advice/recording-heritage/](https://historicengland.org.uk/advice/technical-advice/recording-heritage/)
- Building SMART Spain Chapter. (2018). *Building Smart Spain*. (A. A. Fernández, Editor) Recuperado el 15 de Abril de 2020, de BIM Aplicado al Patrimonio Cultural: <https://www.buildingsmart.es/>
- Building SMART Spanish Chapter. (2014). *Building Smart Spain*. (M. B. Cavada, Editor) Recuperado el 15 de Abril de 2020, de Guia de Usuarios BIM: <https://www.buildingsmart.es/>
- Centro de Conservación de Patrimonio Cultural. (s.f.). *Patrimonio Histórico Arquitectónico*. Obtenido de <http://www.patrimonio.go.cr/patrimonio/material/index.aspx>
- Centro de conservación Patrimonio Cultural. (s.f.). *Centro de conservación Patrimonio Cultural*. Obtenido de <http://www.patrimonio.go.cr/busqueda/ResultadoBusquedaInmuebles.aspx>
- Centro de Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural. (2000). *Informe Inspección Técnica Hacienda Coyolar-Orotina*. San José. Recuperado el 14 de 2020 de Abril
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. (2014). *Código Sísmico de Costa Rica 2010 (Revisión 2014)*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

- Coto Portuguez, A. (2015). *Manual de uso de la madera para la construcción*. San José: Fondo Nacional de Financiamiento Forestal.
- Das, B. (2012). *Fundamentos de Ingeniería en Cimentaciones*. México D.F.: Cengage Learning.
- Del Pezo Manya, M. (2018). *PROTOCOLO PARA EL DISEÑO DE UN PLAN DE EJECUCIÓN DE HISTORIC BUILDING INFORMATION MODELLING (HBIM) EN LA PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DEL PARQUE ARQUEOLÓGICO DE SACSAYHUAMAN*. Trabajo de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado el 4 de Marzo de 2021
- Delibes, A. (1982). Determinación de la resistencia del hormigón mediante ensayos no destructivos realizados con esclerómetro y untrasonidos. *Informes De La Construcción*, 49-55.
- Diara, F., & Rinaudo, F. (2018). Open Source HBIM for Cultural Heritage: a project proposal. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 303-309. Recuperado el Abril de 2020, de <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-2/303/2018/>
- El Presidente de la República y la Ministra de Cultura, Juventud y Deportes. (20 de Mayo de 1994). Decreto N° 23240-C. San José, Costa Rica: La Gaceta No. 97.
- Evans, J. (2015). *Filling in the Blanks: Documenting Concealed Fabric and Deteriorations in Existing Structures*. Recuperado el Abril de 2020, de repository.upenn.edu/hp_theses/584
- Feijo, C., Ramón, D., & Pucha, D. (2018). *Guía de cortes anatómicos de la madera*. Loja, Ecuador: Universidad Nacional de Loja. Recuperado el Mayo de 2020
- ICOMOS. (2004). *Recomendaciones para el análisis, conservación y restauración estructural del Patrimonio arquitectónico*. Cataluña: ICOMOS. Recuperado el 13 de Mayo de 2020, de <http://www.icomoscr.org/doc/teoria/ICOMOS.2003.recomendaciones.analisis.conse rvacion.restauracion.patrimonio.arquitectonico.pdf>
- Internacional Council on Monuments and Sites. (Octubre de 2003). *Principio para el análisis, conservación y restauración de las estructuras del patrimonio arquitectónico*. Obtenido de https://www.icomos.org/charters/structures_sp.pdf
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de suelos Tomo I Fundamentos de la mecánica de suelos*. México D.F.: Limusa .
- Kreider, R. G., & Messner, J. I. (Setiembre de 2013). *"The Uses of BIM: Classifying and Selecting BIM Uses". Version 0.9*. Recuperado el Abril de 2020, de The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA: bim.psu.edu
- Leica Geosystems. (2022).

- López Menardi, R. E. (2003). *DETERMINACION IN SITU DE PROPIEDADES INGENIERILES DE LOS SUELOS Y SU RELACION CON EL ENSAYO NORMAL DE PENETRACION*.
Obtenido de
https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/ensayo_penetracion.pdf
- Montero P., W. (1999). EL TERREMOTO DEL 4 DE MARZO DE 1924 (Ms 7,0):. *Revista Geológica de América Central*, 25-62. Recuperado el 9 de Mayo de 2020, de
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/view/8586/8109>
- PCE Iberica S.L. Instrumentación. (2021). *PCEs*. Recuperado el 16 de Agosto de 2021, de
https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/comprobador-de-hormig_n-escler_metro-kat_162776.htm
- Penn State . (4 de Marzo de 2021). *PennState College of Engineering*. Obtenido de
<https://bim.psu.edu/>
- Peña Mondragón, F., & Lourenço, P. B. (20 de Junio de 2012). Criterios para el refuerzo antisísmico de estructuras históricas. *Revista de Ingeniería Sísmica*(87), 47-66.
Recuperado el Abril de 2020, de
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2012000200003&lang=es
- PlanBim. (2021). *PlanBim*. Obtenido de <https://planbim.cl/que-es-planbim/>
- Pocobelli, D. P., Boehm, J., Bryan, P., Grau-Bové, J., & Still, J. (16 de Mayo de 2018). *BIM for Heritage science: a review*. Recuperado el Abril de 2020, de Springer Open:
<https://heritagesciencejournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40494-018-0191-4>
- Ross, R. J. (2015). *Nondestructive Evaluation of Wood* (Segunda edición ed.). Madison, Wisconsin: Forest Products Laboratory. Recuperado el 11 de Mayo de 2020
- Tuk, J. (2019). *Madera: Diseño y construcción*. San José, Costa Rica: Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica.
- US Institute of Building Documentation. (2019). *Level of Accuracy (LOA) Specification for Building Documentation*.
- Vargas Rosales, J. D. (2017). Vulnerabilidad Sísmica del edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica en la sede Rodrigo Facio. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

7 ANEXOS Y APÉNDICES

ANEXO A PLAN DE EJECUCIÓN BIM

Plan de Ejecución BIM (BEP)

Análisis de vulnerabilidad sísmica y modelo HBIM de la obra patrimonial: Antigua Escuela San Jerónimo

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

Departamento de Construcción

Elaborado por: Erick Ureña Villalobos

2022

1 VISION GENERAL DEL PLAN DE EJECUCION BIM

El presente documento corresponde al Plan de Ejecución BIM (PEB) para la obra Patrimonial Antigua Escuela de San Jerónimo, cuyo fin es trazar una guía para el desarrollo del Trabajo Final de Graduación "Análisis de Vulnerabilidad Sísmica y Modelo HBIM de la Obra Patrimonial Antigua Escuela San Jerónimo".

Además, el desarrollo de este PEB para este proyecto, puede servir de base para futuros trabajos de intervención en la edificación, ya que reúne información de las distintas partes involucradas y muestra parte del trabajo que se ha realizado hasta el momento, con el fin de documentar la información de una manera más centralizada y de forma ordenada.

Este documento fue elaborado en base al BIM Project Execution Planning Guide V 2.0 desarrollado por The Computer Integrate Construction (CIC) de la Universidad Estatal de Pennsylvania y el Estándar BIM para proyectos Públicos de Chile (2019).

2 INFORMACION DEL PROYECTO

- Dueño del proyecto: Junta de Educación Escuela San Jerónimo de Moravia
- Nombre del proyecto: Análisis de Vulnerabilidad Sísmica y Modelo HBIM de la Obra Patrimonial Antigua Escuela de San Jerónimo de Moravia
- Localización del proyecto: San José, Moravia, San Jerónimo. Costado oeste del parque de San Jerónimo de Moravia
- Información general del proyecto: Edificación declarada Patrimonio Arquitectónico de Costa Rica, fue construida entre 1932 y 1936. Posee un área de 175 m² en un único piso y la madera es el principal material de construcción.

2.1 Cronograma del proyecto/Fases/Hitos

Cuadro A 1. Cronograma del proyecto

Fase del proyecto/hito	Fecha estimada de comienzo	Fecha de finalización estimada	Grupos de interés del proyecto
Planificación preliminar	21 setiembre 2020	2 de octubre 2020	Todos
Escaneo del inmueble	1 de diciembre 2020	18 de diciembre 2020	Modelador BIM
Modelado en Revit de la estructura	4 de enero del 2021	26 de febrero del 2021	Modelador BIM
Estudios de laboratorio	15 de marzo del 2021	15 de mayo del 2021	Diseñador estructural
Análisis estructural	6 de setiembre del 2021	5 de octubre del 2021	Diseñador estructural
Documentos	21 de setiembre del 2020	29 de octubre del 2021	Todos

2.2 CONTACTOS DEL PROYECTO

Como parte del proyecto, se enumeran a continuación, los distintos contactos de las partes interesadas del proyecto.

Cuadro A 2. Contactos del proyecto

Rol	Organización	Nombre	e-mail
Cliente	Junta de Educación Escuela de San Jerónimo		3008117883@junta.mep.go.cr
Modelador BIM	EIC	Erick Ureña Villalobos	erick.urena@ucr.ac.cr
Inspección	Centro de Conservación Patrimonio Cultural	Gustavo Morera	gmorera@patrimonio.go.cr
BIM Manager	EIC	Robert Anglin Fonseca	robert.anglin@ucr.ac.cr
Revisión Estructural y Geotécnica	EIC	Julian Trejos Villalobos	julian.trejosvillalobos@ucr.ac.cr
Revisión en BIM	EIC	Allan Rojas	allan.rojas@ucr.ac.cr

3 OBJETIVOS DEL PROYECTO/ USOS DEL BIM

Al iniciar el proyecto, se deben definir los objetivos y la prioridad que estos tienen dentro del proyecto, con el fin de potenciar las diferentes herramientas BIM disponibles. Los objetivos de este BEP se muestran en el *Cuadro A 3*.

Cuadro A 3. Principales metas BIM/Objetivos

Prioridad (Alta/Media/Baja)	Descripción del objetivo	Uso potencial del BIM
Media	Realizar un escaneo tridimensional de la edificación	Estado actual del edificio, Documentación
Alta	Realizar un modelo HBIM arquitectónico de la edificación, con caracterización de materiales	Diseño, documentación
Media	Identificar en el modelo zonas con deterioro considerable	Comparación del modelo digital con la nube de puntos
Alta	Realizar un análisis de vulnerabilidad sísmica	Diseño estructural
Alta	Realizar modelo HBIM incluyendo las posibles mejoras a realizar	Modelo de intervención

3.1 Hoja de análisis del BIM

El uso BIM principal del proyecto es Capturar las condiciones existentes de la edificación, a través del desarrollo de un modelo 3D. para el levantamiento del edificio utilizará el escaneo láser y métodos tradicionales, además de información preliminar existentes, como planos de levantamientos anteriores.

A partir del levantamiento realizado, se construirá un modelo digital de las condiciones actuales del edificio, el cual incluirá información como las dimensiones, y en elementos estructurales el tipo de madera con que está construido.

Dentro del valor potencial se encuentra lo siguiente:

- Mejorar la eficiencia y precisión de la documentación de las condiciones existentes.
- Proporcionar documentación del entorno para futuros usos.

- Ayuda en el modelado y coordinación 3D.
- Proporciona una representación precisa del trabajo realizado.
- Proporciona información detallada sobre el diseño.
- Planificación previa al desastre.
- Registro posterior al desastre.
- Utilizar el modelo con fines de visualización.

Para poder llevar a cabo estos potenciales usos, se deben disponer de los siguientes recursos:

- Programa para modelado BIM
- Programa especializado para manipular la nube de puntos obtenida del escaneo láser.
- Equipo láser 3D.
- Equipo convencional para el levantamiento.

El equipo de trabajo debe tener las siguientes competencias:

- Habilidad para manipular, navegar y revisar el modelo 3D
- Conocimiento en herramientas BIM
- Conocimiento en herramientas de escaneo 3D
- Conocimiento en herramientas y equipo de levantamiento manual.
- Habilidad para examinar gran cantidad de datos generados por el escaneo laser 3D.
- Habilidad para determinar el nivel de información que requerirá el proyecto
- Habilidad para generar el modelo BIM a partir del escaneo 3D y/o el levantamiento manual.

3.2 Usos del BIM

Debido a la variedad de posibles usos BIM dentro de un proyecto, estos deben definirse al iniciar el proyecto, para poder lograr los objetivos planteados anteriormente. En el Cuadro A 4 se resaltan en color naranja los Usos BIM del presente proyecto.

Cuadro A 4. Usos BIM del proyecto

Planificación	Diseño	Construcción	Operación
Programación	Diseñador	Planificación del sitio	Programación del mantenimiento de edificio
Análisis de sitio	Revisión del diseño	Diseño de sistema constructivo	Análisis del sistema constructivo
	Coordinación 3D	Coordinación 3D	Gestión de activos
	Análisis estructural	Fabricación digital	Gestión / Seguimiento del espacios
	Análisis de iluminación	Control y planificación 3D	Prevención de desastres
	Análisis energético	Registro del modelo	Registro del modelo
	Análisis mecánico		
	Otros análisis de ingeniería		
	Evaluación de sustentabilidad		
	Validación de código		
Fase planificación (Modelado 4D)			
Estimación de costos	Estimación de costos	Estimación de costos	Estimación de costos
Modelo de condiciones existentes			

4 ROLES DE LOS PARTICIPANTES

4.1 Roles y responsabilidades BIM

En el *Cuadro A 5* se asignan los encargados de los distintos roles BIM presentes dentro del proyecto. Y en el Cuadro A 6 se describen las funciones y responsabilidades de cada uno

Cuadro A 5. Asignaciones de los distintos roles BIM

Rol BIM	Encargado
Dirección BIM	Ing. Robert Anglin
Modelación BIM	Erick Ureña Villalobos
Revisión BIM	Ing. Julian Trejos Ing. Allan Rojas
Coordinación BIM	Erick Ureña
Gestión BIM	Erick Ureña
Usuario	Junta Educativa Escuela San Jerónimo de Moravia Centro de Conservación de Patrimonio Cultural Dirección de Infraestructura Educativa MEP

Modificado de: Estándar BIM para Proyectos Públicos, 2019.

Cuadro A 6. Roles BIM y sus funciones

Rol BIM	Funciones y responsabilidades
Dirección BIM	<ul style="list-style-type: none"> Liderar y fomentar la implementación de BIM en una organización, de acuerdo a las necesidades del proyecto
Modelación BIM	<ul style="list-style-type: none"> Desarrollar modelos BIM según la especialidad utilizando diferentes tipos de representación y extracción de documentación técnica Dominar el intercambio de información entre diferentes formatos Modelar los elementos o actualizar la información requerida, así como usar y crear nuevas entidades
Revisión BIM	<ul style="list-style-type: none"> Visualizar y verificar la información (geométrica y datos) de los modelos desarrollados en BIM, según la etapa del proyecto
Coordinación BIM	<ul style="list-style-type: none"> Validar e integrar modelos entre diferentes especialidades, prever conflictos y conciliar soluciones Mantener los modelos actualizados y livianos
Gestión BIM	<ul style="list-style-type: none"> Definir los estándares que se utilizarán, el entorno de modelación, los modelos que se crearán, como se organizará y gestionará la información

Modificado de: Estándar BIM para Proyectos Públicos, 2019.

4.2 Diseño del proceso BIM

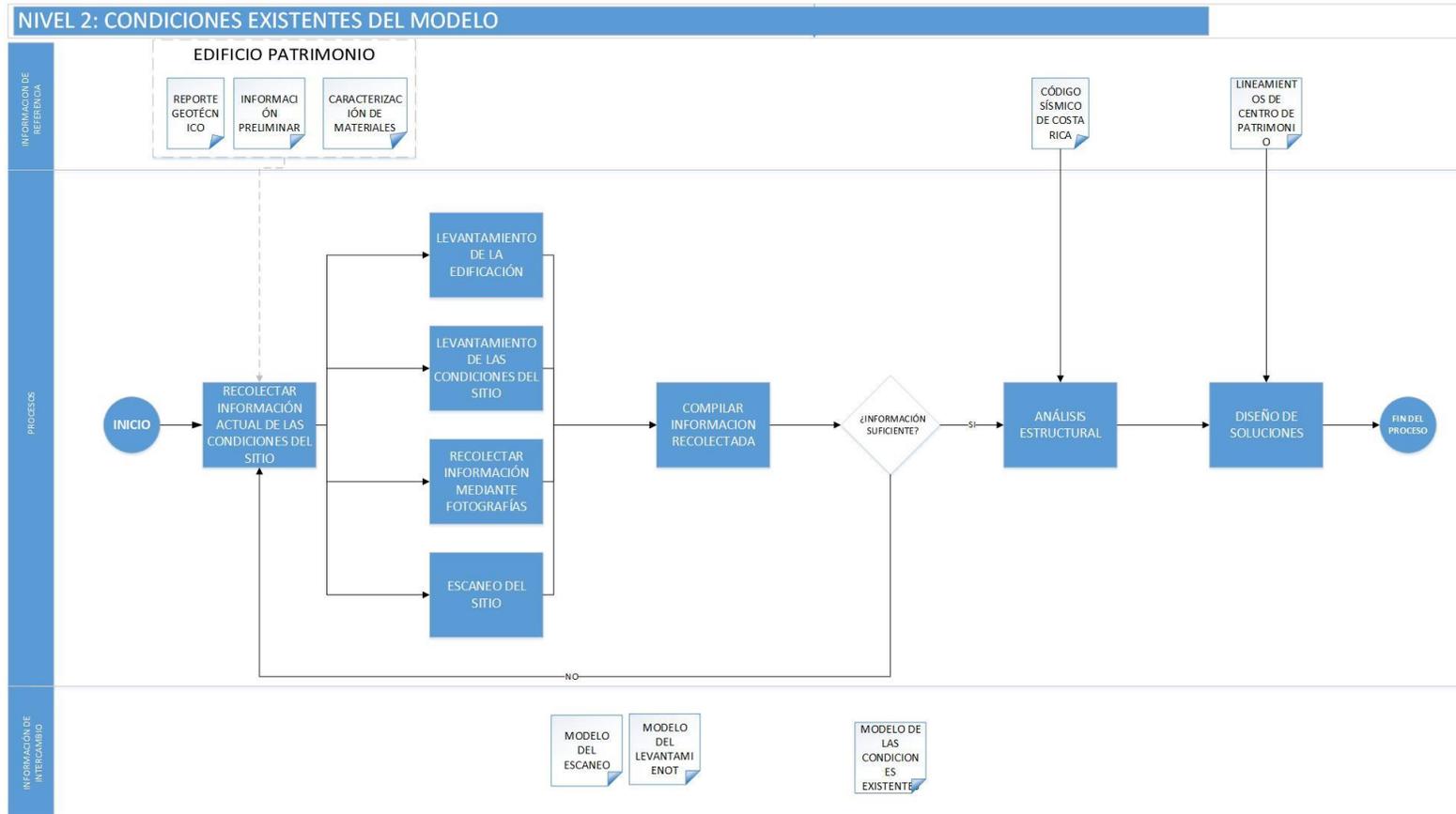


Figura A 1. Flujo de trabajo BIM

Modificado de: USPenn, 2019

5 CONTROL DE CALIDAD

Para asegurar que el proyecto cuente con la información necesaria y modelada de la mejor manera, en el Cuadro A 7 se define el proceso de control de calidad de las diferentes disciplinas

Cuadro A 7. Datos de control de calidad del proceso BIM

Chequeo	Definición	Responsable	Software	Frecuencia
Revisión visual	Asegurarse de que no haya componentes del modelo no deseados y se haya seguido la intención del modelo	Erick Ureña V Julian Trejos Allan Rojas	Revit Robot	Semanal
Comprobación de interferencias	Detectar problemas en el modelo que dos componentes estén en conflicto	Erick Ureña V	Revit	Semanal
Comprobación de estándares	Asegurarse que el modelo se ajusta a los estándares BIM (fuentes, dimensiones, estilos de línea, etc)	Erick Ureña V	Revit Robot	Semanal
Comprobación de integridad del modelo	Asegurarse que el conjunto de datos no tiene elementos no definido, duplicados o definidos incorrectamente	Erick Ureña V	Revit Robot	Semanal

6 NECESIDADES DE TECNOLOGÍA

Cuadro A 8. Programas de cómputo necesarios para el desarrollo BIM del proyecto

Uso BIM	Disciplina	Software(.extension)	Empresa	Versión
Nube de puntos	Arquitectura	ReCap (.rcp)	Autodesk	2020
		Cyclone Register (.e57)	Leica Geosystem	
Diseño	Arquitectura	Revit (.rvt)	Autodesk	2020
Análisis estructural	Ingeniería	Robot (.rdt)		2020
Informes	Todas	Microsoft Word (.docx) Microsoft Excel (.xlsx) Microsoft Visio (.vsdx) Microsoft Project (.mpp) Microsoft PowerPoint (.pptx)	Microsoft	2016
		Acrobat Reader DC (.pdf)	Adobe	
		Visor de imagenes (.jpg)		

7 ESTRUCTURA DEL MODELO

7.1 Estructura de carpetas

AESJ_UCR-EIC_BIM	
1_AESJ-Bitácora Proyecto	
2_AESJ-Gestión Proyecto	
2.1_AESJ-PEB	
2.2_AESJ-Cronograma	
3_AESJ-Captura de la Realidad	
3.1_AESJ-Imágenes	
3.2_AESJ-Nube de puntos	
3.2.1_AESJ-Escaneos	
3.2.2_AESJ-Archivos E57	
3.2.3_AESJ-Archivo RCP	
4_AESJ-Modelos BIM	
4.1_AESJ-Familias Revit	
4.1.1_AESJ-Familias	
4.1.2_AESJ-Plantillas	
4.2_AESJ-Modelos IFC	
4.3_AESJ-Modelo As-Built	
4.3.1_AESJ-Modelo As-Built Arquitectónico	
4.4_AESJ-Modelos de Análisis	
4.4.1_AESJ-Modelo Análisis Estructural	
4.4.2_AESJ-Memoria de Cálculo	
5_AESJ-Dibujos 2D	
6_AESJ-Visualizaciones	
7_AESJ-Documentación	

La estructura a utilizar para la nomenclatura para los nombres de los archivos es la siguiente:

Proyecto-Empresa-Disciplina-Zona-Nivel-Tipo de Documento.ext

Donde .ext se refiere al formato del archivo

Cuadro A 9. Nombres de los distintos entregables del proyecto

Disciplina	Nombre
Modelo arquitectónico actual	AESJ-EIC-ARQ-01-01-MO.rvt
Modelo arquitectónico con mejoras	AESJ-EIC-ARQ-01-01-MO01.rvt
Modelo estructural	AESJ-EIC-STR-01-01-MO.rvt

7.2 Nombres de las familias del modelo

La estructura a utilizar para la nomenclatura de las familias del proyecto es la siguiente:

Proyecto-Elemento-Tipo_Dimensión.rfa

Cuadro A 10. Nombres de las distintas familias de Revit utilizadas

Elemento	Nombre
Muro Perimetral	AESJ-MURO-Muro básico 15cm.rfa
Caño	AESJ-CAÑO-01.rfa
Basas	AESJ-BASA-Basas.rfa
Piso	AESJ-SUELO-PISO_CORREDOR_3cm.rfa AESJ-SUELO-PISO_MADERA.rfa
Columnas	AESJ-COLUMNAS-Columnas.rfa
Paredes	AESJ-MURO_CORTINA-ESTRUCTURA_DE_MADERA.rfa AESJ-MURO_BASICO-PARED_TABLILLA.rfa AESJ-MURO_BASICO-LAMINA_HG.rfa
Puertas	AESJ-PUERTA-PUERTA.rfa AESJ-PUERTA_INTERNA.rfa
Ventanas	AESJ-VENTANA-VENTANA.rfa
Vigas	AESJ-VIGA-VIGA_54x104mm.rfa AESJ-VIGA-VIGA_54x100mm.rfa AESJ-VIGA-VIGA_100x100mm.rfa AESJ-VIGA-VIGA_46x104mm.rfa AESJ-VIGA-VIGA_50x150mm.rfa
Clavador	AESJ-CLAVADORES-CLAVADORES_75x25mm.rfa AESJ-CLAVADORES-CLAVADORES_100x25mm.rfa
Techo	AESJ-CUBIERTA-LAMINA_DE_TECHO_ONDULADA.rfa AESJ-ALEROS_CURVOS.rfa
Cielorraso	AESJ-MURO-20cm.rfa AESJ-IMPOSTA-PRECINTA_13cm.rfa AESJ-IMPOSTA-PRECINTA_14cm.rfa
Cerchas	AESJ-CERCHA-CERCHA_PRINCIPAL.rfa

7.3 Sistemas de medidas y coordenadas

Las dimensiones del modelo deben trabajarse en unidades métricas, siendo los milímetros la precisión usada, debido a la precisión milimétrica obtenida del escaneo.

El punto de origen del proyecto se ubica en el eje de la columna esquinera sur-este del edificio, como se presenta en la Figura A 2.

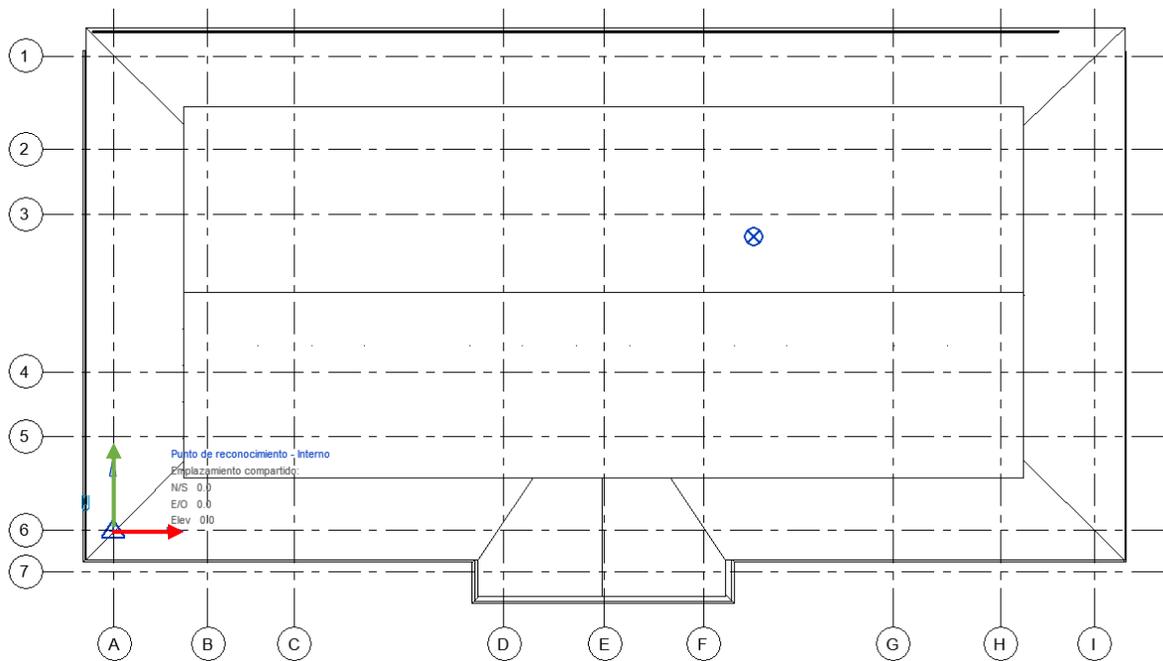


Figura A 2. Ubicación del centro del eje de coordenadas

7.4 Nivel de desarrollo de los distintos elementos

El nivel de desarrollo de los diferentes elementos se elaboró a partir del documento "Level of Development (LOD) Specification Part I & Commentary 2019" del BIM Forum. En el Cuadro A 11 se detalla el nivel de desarrollo para cada familia del modelo.

Cuadro A 11. Nivel de desarrollo para las distintas familias de Revit utilizadas

Elemento	LOD	Descripción	Código Unifomat
Muro Perimetral	LOD 200	Tamaño y forma aproximada del elemento	A1010
Caño	LOD 200	Tamaño aproximado del elemento	G3030
Basas	LOD 200	Tamaño y forma aproximada de la fundación	A1010.10
Piso corredor	LOD 300	Geometría del elemento y espesor Resistencia del concreto encontrado	B1010.10
Piso madera	LOD 300	Perfiles de los miembros de la estructura, orientación, ubicación, espaciado y material.	B1010.20.10
Columnas	LOD 500	Dimensiones, forma, ubicación, cantidad, material y orientación verificadas en sitio. Información estructural de los elementos	
Paredes	LOD 350	Revestimiento de la pared modelado como elemento independiente. Las aberturas se modelan con las dimensiones reales. La estructura de la pared se modela como un elemento aparte	B2010.20
Puertas	LOD 350	Se definen los perfiles, geometría, ubicación y material de los elementos. Dimensiones reales	B2050.30
Ventanas	LOD 350	Se define la forma de los perfiles y la geometría. Material Dimensiones reales de los paneles de vidrio	B2020.30
Vigas y cerchas	LOD 300	Tamaño, profundidad y material de las armaduras con la pendiente Espaciado y elevaciones finales	B1010.10.80
Clavador	LOD 300	Tamaño, profundidad y material de las armaduras con la pendiente Espaciado y elevaciones finales	B1010.10.80
Techo	LOD 200	Representación genérica del material de techo	B3010
Cielorraso	LOD 300	Representación genérica del material de cielorraso, así como material y espesor del mismo	B3080

8 ENTREGABLES DEL PROYECTO

Cuadro A 12. Entregables del proyecto

Ítem de entrega BIM	Etapa	Formato	Notas
Nube de puntos	Levantamiento	.rpc	La nube de puntos entregada corresponde al edificio de interés. No se incluyen los alrededores.
Modelo arquitectónico	Modelo actual	.rvt	Se entrega un archivo en formato .ifc para que cualquier interesado pueda hacer uso del modelo sin depender de un programa
Modelo Estructural	Análisis de vulnerabilidad sísmica	.rst	Modelo estructural extraído del modelo de condiciones existentes

ANEXO B FAMILIAS DE REVIT

En el Anexo B se muestran las familias utilizadas en el modelo de Revit, con su correspondiente nombre.

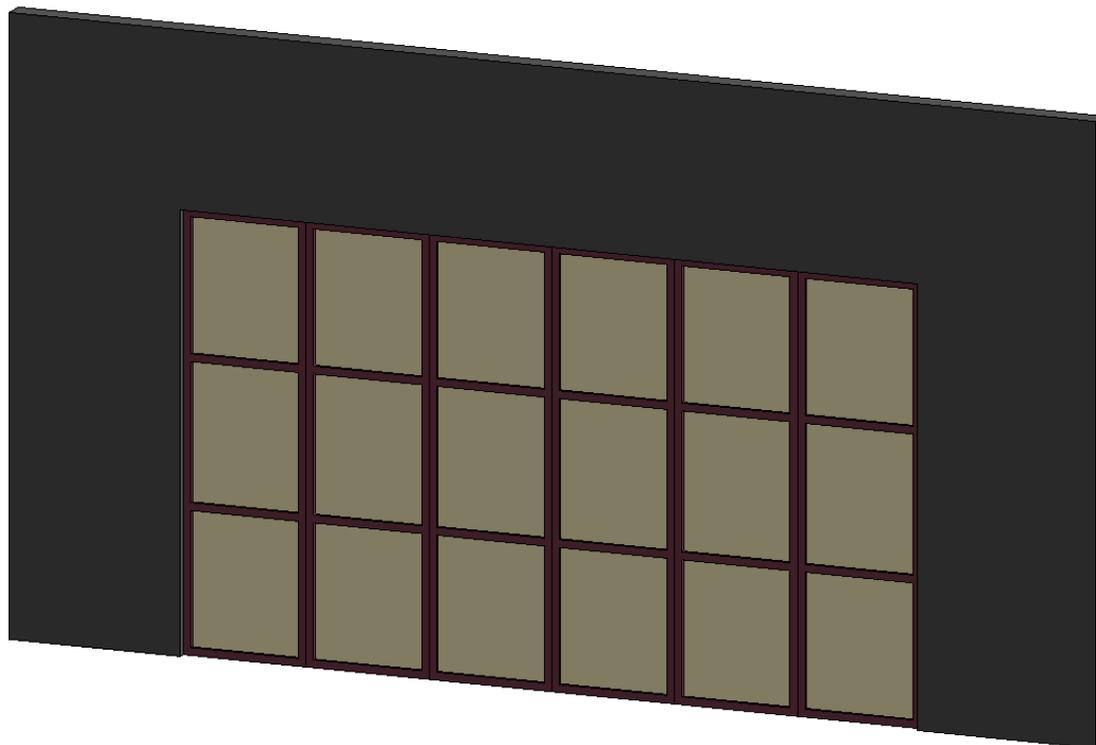


Figura B 1. AESJ-MURO_BASICO-LAMINA_HG.rfa

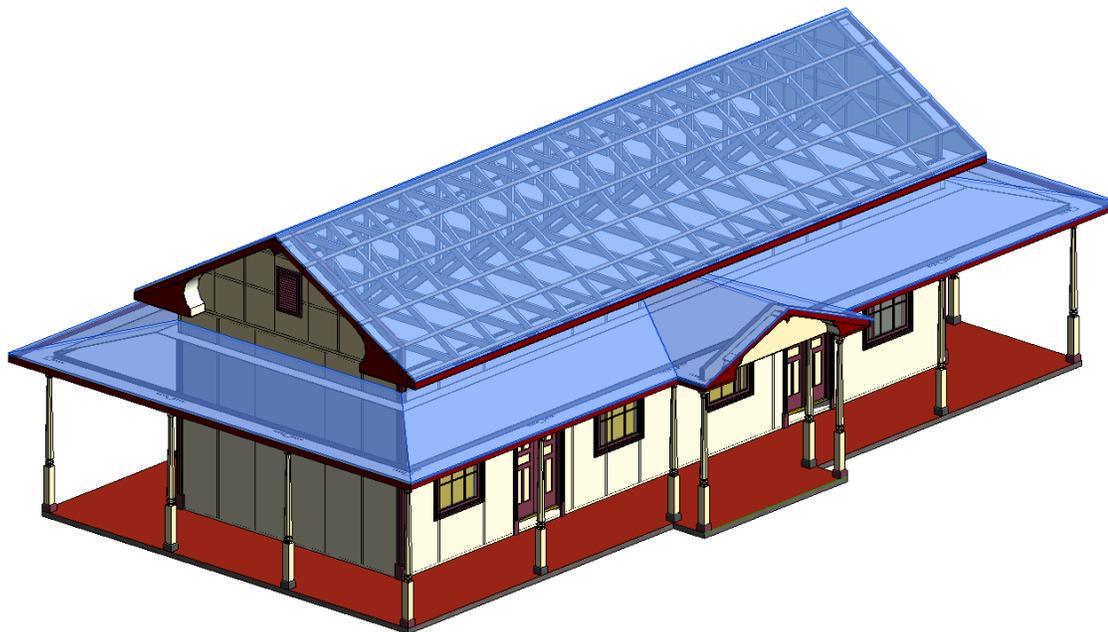


Figura B 2. AESJ-CUBIERTA-LAMINA_DE_TECHEO_ONDULADA.rfa

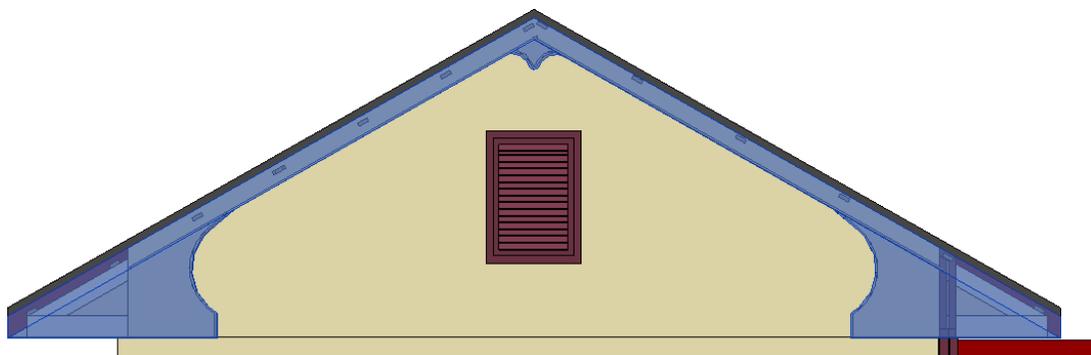


Figura B 3. AESJ-ALEROS_CURVOS.rfa

- Cerchas

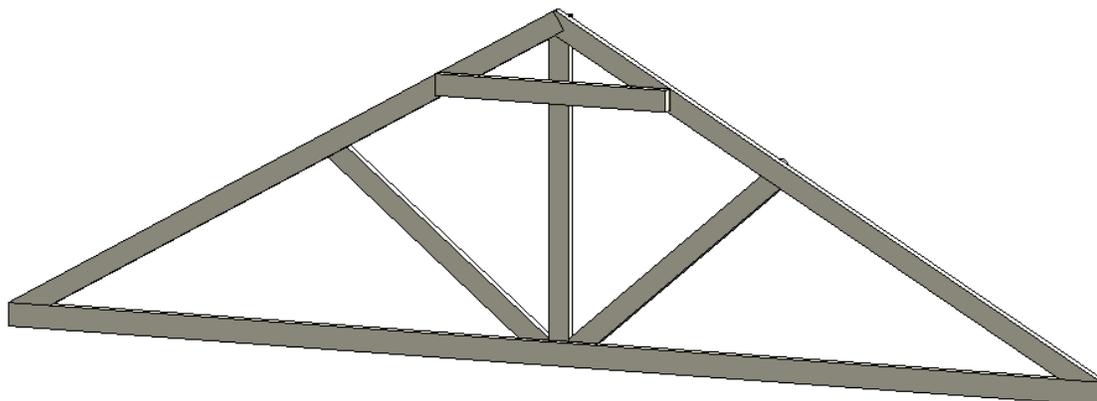


Figura B 4. AESJ-CERCHA-CERCHA_PRINCIPAL.rfa

- Clavadores

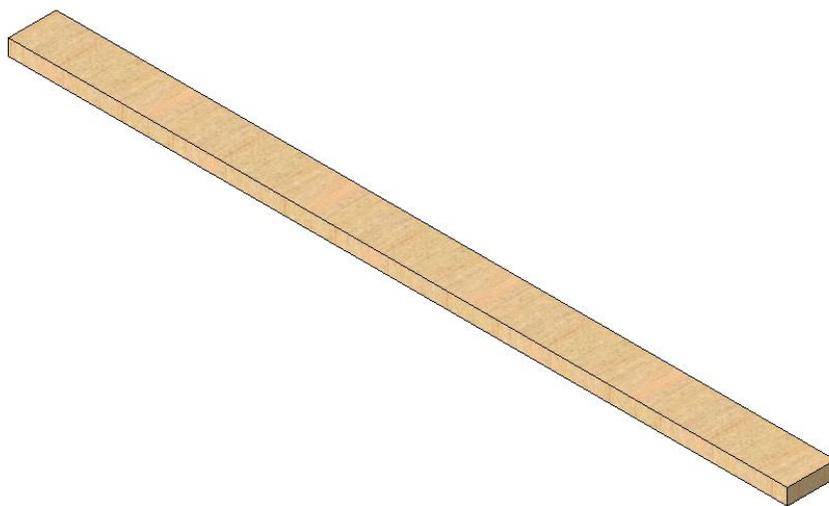


Figura B 5. AESJ-CLAVADORES-CLAVADORES_100x25mm.rfa

ANEXO C MEMORIA DE CÁLCULO ESTRUCTURAL

Cuadro C 1. Factores de reducción según grado estructural para cada esfuerzo permisible

Grado	Flexión	Tensión	Compresión perpendicular al grano	Compresión paralelp al grano	Cortante paralelo al grano	Módulo de elasticidad
1	0,69	0,38	1,0	0,82	0,50	1,0
2	0,53	0,29	1,0	0,66	0,50	0,9
3	0,40	0,22	1,0	0,56	0,50	0,8

Modificado de: (Tuk, 2019)

Cuadro C 2. Resistencia disponible correspondiente a varias inclinaciones del grano

Inclinación del grano	Resistencia máxima (%)	
	Flexión o tensión paralela al grano	Compresión paralela al grano
1:6	40	53
1:8	53	66
1:10	61	74
1:12	69	82
1:14	74	87
1:16	76	100
1:18	80	
1:19	85	
1:20	100	

Tomado de: (Tuk, 2019)

Revisión de flexión y cortante para vigas

Fórmulas utilizadas

$$F_{b05} = F_{bprom} \left(1 - 1,645 * \frac{CV}{100} \right) \quad [9]$$

$$F_b^* = (\text{Factores de reducción}) * F_{b05} \quad [10]$$

$$\phi \lambda M_n = \phi_b * \lambda * F_b^* * \frac{S}{100} \quad [11]$$

$$S = \frac{\text{Ancho} * \text{Alto}^2}{6} \quad [12]$$

$$\phi \lambda V = \phi_v * \lambda * \frac{2}{3} * A * F_v^* \quad [13]$$

Cuadro C 3. Ejemplo de diseño a flexión para viga de 54x100 mm

Diseño a Flexión			
Elemento	54x100mm		
Dimensiones			Propiedades geométricas
Ancho	5,4 cm		S
Alto	10 cm		90 cm ³
Especie	Pilón		
F _{b prom}	748,7 kg/cm ²		
Humedad medida (%)	16		
Factores de reducción			
Inc. del grano	0,53	01:08	
Grado	0,69		CV
C _p	1		20,00 (%)
C _d	1		F _{b05}
C _{vol}	1		502,38 kg/cm ²
C _H	0,86		F _{b*}
C _I	1		181,70 kg/cm ²
C _r	1,15		
λ	1		Mu
ø _b	0,85		99 kg-m
			øλMn
			139,00 kg-m
			Cumple

Cuadro C 4. Ejemplo de diseño a cortante para viga de 54x100 mm

Diseño a cortante		Propiedades geométricas	
Elemento	54x100mm	I	450 cm ⁴
Dimensiones		Área	54 cm ²
Ancho	5,4 cm		
Alto	10 cm		
Especie	Pilón		
F _{vprom}	119,3 kg/cm ²		
Humedad medida (%)	16		
Factores de reducción			
Grado	0,69		
C _H	0,86	CV	20,00 (%)
λ	1	F _{v05}	80,05 kg/cm ²
ø _b	0,75	F _v [*]	47,50 kg/cm ²
		Vu	143 kg
		øλV	1282,55 kg
			Cumple

Revisión de Compresión, tensión y cortante para cerchas

Fórmulas utilizadas

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad [13]$$

$$P_{\sigma} = \frac{\pi^2 EA}{r_e^2} \quad [14]$$

$$F_{cE} = \frac{0,822 E'_{\min}}{(l_e/d)^2} \quad [15]$$

$$\alpha_1 = \frac{1 + (F_{cE}/F_c^*)}{2c} \quad [16]$$

$$\alpha_2 = \frac{(F_{cE}/F_c^*)}{c} \quad [17]$$

$$C_p = \alpha_1 - \sqrt{\alpha_1^2 - \alpha_2} \quad [18]$$

$$P_n = \phi_c * \lambda * C_p * F_{c05} * (\text{Factores reducción}) \quad [19]$$

Cuadro C 5. Ejemplo de diseño a compresión pura para sección de 60x130 mm

Diseño a Compresión pura			
Elemento	60x130 mm (cuerda sup)		
Dimensiones		Propiedades geométricas	
Ancho	6 cm	S	169,00 cm ³
Alto	13 cm	Inercia	234,00 cm ⁴
Especie	Pilón	Área	78 cm ²
F _{cprom}	274 kg/cm ²	r	1,7 cm
E _{prom}	36324 kg/cm ²		
Información del elemento			
Longitud	2,3 m	CV	20,00 (%)
U (K)	1	F _{c05}	183,85 kg/cm ²
L efectiva	2,3 m		
r _e	17,69	E _{corregido}	24373,69 kg/cm ²
r (radio de giro)	1,73		kg
Factores de reducción		P _{cr}	89335,50
Inc. del grano	0,53	F _{cE}	64,01
Grado	0,69	α ₁	1,22
C _p	1	α ₂	0,44
C _d	1	C _p	0,19
λ	1		
øc	0,9	øλP _n	916,55 kg
c	0,8	Pu	487 kg
			Cumple

Cuadro C 6. Ejemplo de diseño a tensión para sección de 60x130 mm

Diseño a Tracción			
Elemento	60x130 mm (cuerda sup)		
Dimensiones		Propiedades geométricas	
Ancho	6 cm	S	169,00 cm ³
Alto	13 cm	Inercia	234,00 cm ⁴
Especie	Pilón	Área	78 cm ²
F_t	274 kg/cm ²		
E_{prom}	36324 kg/cm ²		
Factores de reducción			
Inc. del grano	0,53	CV	20,00 (%)
Grado	0,69 G2	F_{t05}	183,85 kg/cm ²
C_p	1		
C_d	1	$E_{corregido}$	24373,69 kg/cm ²
λ	1		
ϕ_t	0,8		
		$\phi\lambda T_n$	4195,49
		T_u	413,00
			Cumple