



Criterios de diseño y caso de estudio de pórticos arriostrados en madera.

Anthony Castro Hernández

Maria Camila Duque Duque

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Asesor

Juan Carlos Vélez Cadavid, Doctor (PhD) en Ingeniería de Materiales

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

Cita	(Castro Hernández & Duque Duque, 2025)
Referencia	Castro Hernández, A., & Duque Duque, M. C. (2025). <i>Criterios de diseño y caso de estudio de pórticos arriostrados en madera</i> , [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte XII.



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Introducción	7
Alcance.....	10
2 Objetivos	12
2.1 Objetivo general	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
3 Marco normativo	13
4 Marco teórico	14
4.1 Sistemas estructurales en madera	14
4.2 Caracterización y clasificación de la madera	14
4.3 Solicitudes y resistencias.....	15
4.4 Cargas laterales y diafragmas.....	17
4.5 Uniones y conexiones.....	17
4.6 Madera laminada encolada (MLE).....	17
5 Caso de estudio.....	19
5.1 Descripción.....	19
5.2 Predimensionamiento	20
5.3 Cargas.....	21
5.3.1 Cargas muertas.....	21
5.3.2. Cargas vivas	21
5.3.3 Combinaciones de carga	22
5.4 Metodología de diseño estructural	23
5.4.1 Especificaciones del material.....	23

5.4.2 Flexión simple.....	25
5.4.3 Cortante.....	26
5.4.4 Esfuerzo axial - Compresión paralela a la fibra.....	27
5.4.5 Esfuerzo axial - Tracción paralela a la fibra	29
5.4.6 Flexo-compresión y flexo-tracción (efectos combinados).....	30
5.5 Modelo estructural.....	31
5.5.1 Diafragma	32
5.5.2 Análisis sísmico	33
5.5.3 Solicitaciones	36
5.6 Resultados de diseño	39
5.6.1 Diseño viga	39
5.6.2 Diseño columna	40
5.6.3 Diseño de diagonal.....	41
6 Conclusiones	42
Referencias	43

Lista de tablas

Tabla 1. Valores para diseño ajustado. Adaptado de AIS-100-24, 2025.	16
Tabla 2. Dimensiones elementos estructurales. Fuente: elaboración propia.....	21
Tabla 3. Cargas muertas consideradas. Fuente: elaboración propia	21
Tabla 4. Cargas vivas consideradas. Fuente: elaboración propia.....	21
Tabla 5. Propiedades de madera laminada encolada. Adaptado de Nch2165, 2023.	23
Tabla 6. Factores de ajuste. Fuente (Nch2165, 2023).....	24
Tabla 7. Tipo de debilitamiento según clase de madera. Fuente (Nch 1198,2014).	29
Tabla 8. Resumen periodos de vibración y masa acumulada obtenidas en ETABS. Fuente: elaboración propia	34
Tabla 9. Resultado de derivas en dirección X y Y. Fuente: elaboración propia	35
Tabla 10. Diseño de viga MLE. Fuente: elaboración propia	39
Tabla 11. Solicitaciones viga. Fuente: elaboración propia.....	40
Tabla 12. Diseño columna MLE. Fuente: elaboración propia	40
Tabla 13. Solicitaciones columna. Fuente: elaboración propia.....	41
Tabla 14. Diseño diagonal MLE. Fuente: elaboración propia	41

Lista de figuras

Figura 1. Isométrico caso de estudio. Fuente: elaboración propia	19
Figura 2. Estructura caso de estudio. Fuente: elaboración propia.....	20
Figura 3. Planta y sección caso de estudio. Fuente: elaboración propia	20
Figura 4. Modelo estructural con articulaciones en la base. Fuente: elaboración propia	31
Figura 5. Asignación de releases en vigas y diagobales. Fuente: elaboración propia.....	31
Figura 6. Detallado diafragmas. Fuente (González, 2023).....	32
Figura 7. Espectro elástico de aceleraciones para diseño del edificio. Fuente: elaboración propia	33
Figura 8. Primer modo de vibración. Fuente: elaboración propia.....	34
Figura 9. Segundo modo de vibración. Fuente: elaboración propia.....	34
Figura 10. Derivas en X y Y, respectivamente. Fuente: elaboración propia.....	35
Figura 11. Diagramas de solicitaciones máximas en la viga. Fuente: elaboración propia.....	36
Figura 12. Diagramas de solicitaciones máximas en la columna. Fuente: elaboración propia.....	37
Figura 13. Diagramas de solicitaciones máximas en la riostra. Fuente: elaboración propia	38

Resumen

La presente monografía estudia los criterios de diseño aplicados a pórticos arriostrados en madera, estableciendo un marco metodológico basado en la normativa vigente y en referencias especializadas. Para la determinación de cargas gravitacionales y laterales se empleó exclusivamente la Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente NSR-10. El análisis estructural y el diseño de los elementos se desarrollaron conforme a la normativa chilena NCh1198 y NCh2165, debido a su mayor precisión en la definición de propiedades mecánicas, factores de modificación y verificaciones específicas para madera laminada encolada (MLE).

Como aplicación práctica, se plantea el diseño de una edificación en MLE ubicada en el municipio de El Retiro, Antioquia, correspondiente a una zona de amenaza sísmica intermedia y con un perfil de suelo tipo D. Se elaboró un modelo tridimensional en ETABS para efectuar análisis modal, espectral y estático, verificando periodos fundamentales, fuerzas cortantes basales y derivas de acuerdo con los límites de la NSR-10. Posteriormente, se desarrolló el diseño detallado de una viga, una columna y un arriostramiento diagonal, considerando los estados límite de flexión, compresión, tracción, cortante, esbeltez y efectos combinados bajo el método de esfuerzos admisibles (ASD) definido por la normativa chilena.

Palabras clave: Madera laminada encolada (MLE), Pórticos arriostrados, NCh1198, NCh2165, esfuerzos admisibles (ASD)

Abstract

This monograph examines the design criteria applied to braced timber frames, establishing a methodological framework based on current regulations and specialized technical references. Gravitational and lateral loads were determined exclusively using the Colombian Seismic Design Code NSR-10. The structural analysis and member design were developed in accordance with the Chilean standards NCh1198 and NCh2165, due to their greater precision in defining mechanical properties, modification factors, and verification procedures specific to glued laminated timber.

As a practical application, the study presents the structural design of a glued laminated timber building located in El Retiro, Antioquia, classified as a region of intermediate seismic hazard with a type D soil profile. A three-dimensional model was developed in ETABS to perform modal, spectral, and static analyses, verifying fundamental periods, base shear forces, and story drifts according to the limits established in NSR-10. Subsequently, the detailed design of a beam, a column, and a diagonal brace was conducted, considering limit states associated with bending, compression, tension, shear, slenderness, and combined actions under the Allowable Stress Design (ASD) method established in Chilean regulations.

Keywords: Glued laminated timber, braced timber frames, NCh1198, NCh2165, Allowable Stress Design (ASD)

Introducción

El diseño estructural en madera constituye un campo de creciente importancia en la ingeniería civil, debido a sus ventajas en sostenibilidad, ligereza y economía. En Colombia, el marco normativo está definido en el Título G de la Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente – NSR-10 (ICONTEC, 2010), que regula los materiales aceptados, las bases de diseño y los procedimientos de cálculo para asegurar estabilidad y seguridad estructural.

Este documento sintetiza los aspectos centrales de las normativas actuales, destacando sus disposiciones en caracterización de la madera, sistemas estructurales, resistencias, factores de modificación, cargas laterales y uniones. Adicionalmente, se señalan comentarios sobre las futuras actualizaciones normativas que complementarán y modernizarán el diseño en madera en Colombia. En donde, se mostrará un caso práctico de diseño de una estructura en madera siguiendo las normativas vigentes contextualizándolo en el marco de la construcción colombiana con el fin de que este documento sirva como guía de diseño.

Alcance

El procedimiento de diseño estructural, conforme al Apéndice I de la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-10; ICONTEC, 2010), se compone de nueve etapas fundamentales. Estas incluyen: la localización geográfica de la estructura, la evaluación del nivel de amenaza sísmica, la determinación de los valores de aceleración sísmica de diseño (A_a y A_v), la definición de los movimientos sísmicos de diseño y la caracterización tanto de la configuración estructural como del material empleado.

Asimismo, se consideran el grado de irregularidad de la estructura y el procedimiento de análisis correspondiente, la obtención de las fuerzas sísmicas de diseño, el análisis estructural para determinar desplazamientos horizontales y la verificación de derivas, culminando con el diseño detallado de los elementos estructurales.

En la presente monografía, se aplicarán estos pasos siguiendo el caso de estudio correspondiente a una estructura de madera destinada a uso residencial, se pretende detallar el diseño estructural de una columna y una viga en madera pertenecientes al sistema.

1 Justificación

El diseño de pórticos arriostrados en madera, empleados para resistir cargas laterales como sismos y viento, se encuentra contemplado en la Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR-10).

El enfoque de esta investigación radica en profundizar en el conocimiento del diseño de estructuras de madera, considerando sus propiedades mecánicas, los criterios de diseño estructural y las limitaciones técnicas inherentes al material. Se pretende identificar las variables y dimensiones que inciden en la estabilidad y eficiencia de los pórticos arriostrados, apoyándose en estudios previos y evidencias empíricas desarrolladas en otras regiones. El análisis se complementa con la revisión de normativas internacionales, como el Eurocódigo 5 y principalmente de la Norma Chilena de Construcciones en Madera, las cuales proporcionan criterios y directrices aplicables al diseño estructural en madera.

Como complemento teórico, se desarrollará un caso de estudio práctico en el que se planteará el diseño de una estructura en madera. Este ejercicio abordará el dimensionamiento adecuado de los elementos principales. Dicho caso permitirá aplicar los conceptos teóricos revisados y reconocer estrategias de diseño que optimicen la respuesta estructural en condiciones variables.

En resumen, esta monografía se propone ampliar el conocimiento técnico respecto a los pórticos arriostrados en madera, integrando la revisión de literatura, la aplicación de normativas — tanto nacionales como internacionales— y el desarrollo de un caso práctico. Con ello, se espera aportar un recurso útil para la consolidación de métodos y criterios de diseño aplicables en el contexto colombiano, en concordancia con la NSR-10 y con las particularidades en la disponibilidad de materiales en distintas regiones del país.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar los criterios de diseño de los pórticos arriostrados en madera, a partir de un caso de estudio representativo que permita aplicar normativas y principios estructurales.

2.2 Objetivos específicos

- Revisar y analizar la literatura existente sobre el comportamiento mecánico de la madera y los criterios de diseño aplicados en estructuras arriostradas.

- Examinar la normativa nacional (NSR-10) y las normativas internacionales (Eurocódigo 5, norma chilena) para identificar recomendaciones pertinentes al diseño de pórticos arriostrados en madera.

- Desarrollar un caso de estudio representativo que permita aplicar los criterios teóricos en el diseño de elementos en madera laminada encolada.

3 Marco normativo¹

El Título G de la NSR-10 establece los lineamientos para el diseño y construcción con madera, reconociendo materiales como madera aserrada, madera rolliza y madera laminada encolada (MLE). Así mismo, contempla criterios de diseño aplicables a elementos y configuraciones tales como entramados livianos, muros cortantes, pórticos resistentes a momento y pórticos arriostrados. No obstante, La normativa NSR-10 no establece de manera explícita una clasificación de los sistemas estructurales en madera y sus limitaciones exactas o cuales directamente no se pueden usar. Esto se actualizará en la siguiente normativa según AIS 10 - 24, en donde se definirá mejor los sistemas estructurales, sus derivas límites y la ductilidad que pueden desarrollar.

La norma adopta principalmente el método de esfuerzos admisibles (ASD) como procedimiento de cálculo, comparando las solicitaciones con las resistencias ajustadas mediante factores de modificación.

¹ En la próxima actualización (AIS, 2024), se mantiene el ASD como método principal, pero se abre formalmente la posibilidad del diseño por estados límite (LRFD), incorporando factores de conversión y mayor compatibilidad con normas internacionales como el NDS 2018 (AWC, 2018) y los Eurocódigos (CEN, 2004).

4 Marco teórico

4.1 Sistemas estructurales en madera²

El proceso de diseño comienza con las consideraciones arquitectónicas, que condicionan el tipo de sistema estructural a emplear. Se analizan aspectos como la distribución espacial, altura entre pisos, ubicación geográfica, clima, exposición a agentes agresivos y disponibilidad de materiales. Según la NSR-10 (2010), la elección del sistema estructural debe responder a estos factores y garantizar compatibilidad con la función del edificio. En estructuras de madera, es común optar por sistemas de entramado ligero tipo platform framing, muros portantes o pórticos ya sea arriostrado o resistentes a momento (PRM). La norma chilena NCh1198 también establece requisitos similares en cuanto a la elección del sistema estructural, enfatizando la eficiencia sísmica y resistencia lateral. En esta etapa de diseño esencialmente se debe limitar su ductilidad o sus derivas admisibles dependiendo de cada sistema.

En zonas sísmicas, la norma enfatiza el diseño de muros cortantes, diafragmas horizontales y sistemas de amarre que garanticen suficiente rigidez lateral.

4.2 Caracterización y clasificación de la madera³

la madera no es un material isotrópico, aunque no es isotrópico, se puede idealizar como ortotrópico, es decir unas propiedades en la dirección paralela a la fibra y otras en la dirección radial y tangencial, que en realidad no son tan semejantes ambas, pero se puede idealizar como iguales.

La NSR-10 exige que toda madera empleada en estructuras sea clasificada por calidad y estructuralmente mediante métodos visuales y mecánicos, respectivamente, de acuerdo con normas como ASTM D245 (ASTM, 2019). La clasificación vigente por calidad distingue si una madera estructural selecta (E.S) o estructural normal (E.N), y en el caso de la clasificación estructural, se define por grados estructurales desde ES1 hasta ES6, sin diferenciar entre maderas coníferas o latifoliadas.

² La normativa futura ampliará explícitamente los sistemas a muros y losas en CLT, así como sistemas híbridos (madera-concreto o madera-acero), en línea con el SPWS 2021 (AWC, 2021) y el Eurocódigo 8 (CEN, 2004).

³ En el futuro, la clasificación de calidad cambiará a categorías A, B y C, y se implementarán las "Clases Estructurales Colombianas (SEC)", que distinguirán entre coníferas (P) y latifoliadas (L), superando la limitación de los grados ES (INN, 2006; NTC 2500), además, las diferentes especies no se asociarán directamente a un grado estructural sino cada diferente lote que se use en construcción.

4.3 Solicitudes y resistencias

La norma de madera actual y la siguiente está pensada para esfuerzo admisibles (ASD), pero se puede usar el método LFRD usando unos coeficientes de conversión de formato. En este caso, se describirá lo asociado a la metodología de esfuerzo admisibles.

La NSR-10 establece un conjunto de sollicitaciones y disposiciones que deben verificarse en el diseño estructural con madera, abarcando diferentes tipos de esfuerzos y condiciones de los elementos. En primer lugar, se contemplan los esfuerzos de flexión y corte en vigas, los cuales se determinan con base en la teoría elástica, incluyendo verificaciones de estabilidad lateral y de deflexiones admisibles. En el caso de los miembros a compresión, como columnas macizas, ensambladas o en celosía, la normativa exige considerar la estabilidad global para garantizar su resistencia. Asimismo, se regula la tracción paralela a la fibra, recomendando evitar miembros sometidos a tracción perpendicular por su limitada capacidad. Para los miembros sometidos a flexión biaxial, la norma contempla criterios que aseguren la interacción adecuada entre los esfuerzos en ambas direcciones, mientras que en los elementos a flexo-tracción y flexo-compresión se establecen verificaciones combinadas que integran los efectos simultáneos de cargas de flexión y axiales, ajustando las resistencias según los factores de interacción correspondientes. Finalmente, se incluye el diseño por aplastamiento en los apoyos, tanto en dirección paralela como perpendicular a las fibras, debido a la concentración de esfuerzos en estas zonas. Estas disposiciones constituyen la base normativa para garantizar la seguridad y el desempeño estructural de los sistemas en madera en el marco de la NSR-10.

A estas resistencias se aplican factores de modificación (según NSR-10, Título G) los factores generales de modificaciones (que están presentes en todos los ajustes de las resistencias en los diferentes efectos) son: duración de carga, temperatura e incisiones. Los demás dependen del tipo de solicitud, como se puede apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores para diseño ajustado. Adaptado de AIS-100-24, 2025.

Valores para diseño ajustado	Coficiente por duración de carga	Coficiente por humedad en condiciones de servicio	Coficiente por temperatura	Coficiente de estabilidad en vigas	Coficiente por volumen	Coficiente por uso de plancho	Coficiente curvatura	Coficiente por interacción de esfuerzos	Coficiente de reducción de cortante	Coficiente de estabilidad en columnas	Coficiente por área de apoyo
$F'_b = F_b \times$	C_D	C_M	C_t	C_L	C_V	C_{fu}	C_c	C_i	-	-	-
$F'_t = F_t \times$	C_D	C_M	C_t	-	C_V	-	-	-	-	-	-
$F'_v = F_v \times$	C_D	C_M	C_t	-	-	-	-	-	C_{VT}	-	-
$F'_{ct} = F_{ct} \times$	C_D	C_M	C_t	-	-	-	-	-	-	-	-
$F'_c = F_c \times$	C_D	C_M	C_t	-	C_V	-	-	-	-	C_p	-
$F'_{c\perp} = F_{c\perp} \times$	C_D	C_M	C_t	-	-	-	-	-	-	-	C_b
$E' = E \times$	-	C_M	C_t	-	-	-	-	-	-	-	-
$E'_{min} = E_{min} \times$	-	C_M	C_t	-	-	-	-	-	-	-	-

Las propiedades básicas se ajustan mediante factores de modificación que consideran duración de carga, humedad, condiciones de servicio y tipo de carga, siguiendo principios del Manual de Diseño de Madera del AWC (2015). En paralelo, la NCh819 chilena regula la resistencia de la madera según su clasificación estructural y tratamiento.

El diseño estructural debe contemplar diferentes tipos de solicitaciones: flexión, compresión axial y perpendicular a la fibra, tracción y cortante. donde las solicitaciones se comparan con las resistencias de diseño, ajustadas con factores de seguridad. Las cargas consideradas incluyen cargas muertas, vivas, de nieve, viento y sismo, conforme a los Títulos B y C de la misma norma. En zonas sísmicas, se exige un diseño especial de los muros cortantes, diafragmas horizontales y sistemas de amarre, garantizando suficiente rigidez lateral (NSR-10, Título G, Sección G.3). La NCh433 chilena complementa estos criterios con exigencias específicas de diseño sísmico en madera.

4.4 Cargas laterales y diafragmas⁴

El Capítulo G7 de la NSR-10 regula el diseño de estructuras de madera frente a cargas de viento y sismo, destacando el papel de los diafragmas como elementos que transfieren las cargas horizontales hacia muros de corte o pórticos. Estos pueden considerarse rígidos o flexibles: en el primer caso, la distribución de cargas depende de la rigidez relativa de los elementos resistentes, mientras que en el segundo se realiza por áreas tributarias. En situaciones de duda, la norma recomienda analizar ambos casos y adoptar la condición más desfavorable.

El desempeño del diafragma depende de la interacción de sus componentes principales: los cordones, que trabajan a tracción y compresión; los colectores, que transmiten los esfuerzos cortantes hacia los muros; y el revestimiento, encargado de resistir los cortantes en su plano. La calidad de las uniones, definida por el tipo, tamaño y espaciamiento de los clavos, resulta determinante para la resistencia y ductilidad del sistema. En términos generales, el diafragma puede asimilarse al comportamiento de una viga de gran altura en posición horizontal, donde cada componente cumple una función estructural específica.

4.5 Uniones y conexiones⁵

La NSR-10 reconoce la importancia de las uniones, especialmente mediante clavos, pernos y tornillos, los cuales deben cumplir con requisitos de espaciamiento, penetración y resistencia a cortante, compresión y tracción.

4.6 Madera laminada encolada (MLE)⁶

La madera laminada encolada (MLE) es un producto estructural compuesto por láminas de madera encoladas entre sí en dirección paralela a las fibras, las cuales pueden ser unidas longitudinalmente mediante empalmes tipo *finger-joint*. La NSR-10 (Título G, Capítulo G.9) reconoce a la MLE como un sistema estructural permitido en Colombia, exigiendo que sea fabricada con madera seca (contenido de humedad cercano al 12 %), bajo control de calidad en procesos de fresado, prensado y acabado, y utilizando adhesivos resistentes a la humedad,

⁴ En la actualización se introducen ecuaciones para determinar rigidez y capacidad cortante de muros y diafragmas, siguiendo criterios del SPWS 2021 y del Eurocódigo 8, lo que representa un avance frente a los métodos actuales de la NSR-10 (AWC, 2021; CEN, 2004).

⁵ La próxima normativa incorpora cálculos de las resistencias de uniones, reemplazando tablas fijas por fórmulas analíticas y ensayos con especies locales (Johansen, 1949; AWC, 2015).

⁶ la normativa actualizada amplía las disposiciones, definiendo dimensiones estandarizadas de lamelas, valores de referencia con factores de ajuste y requisitos para elementos curvos y variables en sección, aspectos no contemplados en la NSR-10 (ICONTEC, 2010).

prohibiéndose expresamente el uso de adhesivos tipo PVA en elementos estructurales (NSR-10, 2010). De manera complementaria, la Norma Técnica Colombiana NTC 2500 (ICONTEC, 2007) establece requisitos para el uso de la madera en construcción, indicando que la MLE ofrece ventajas frente a la madera maciza, tales como reducción de defectos naturales, mayor estabilidad dimensional y la posibilidad de fabricar piezas de grandes dimensiones y formas diversas. A nivel internacional, el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2004) también contempla la madera laminada encolada como material estructural, proporcionando criterios de diseño y directrices de cálculo que respaldan su aplicación en vigas, columnas, pórticos y cubiertas de luces considerables.

5 Caso de estudio

5.1 Descripción

Se plantea el diseño de una estructura en madera, localizada en el municipio de El Retiro, Antioquia, el cual se encuentra clasificado en una zona de amenaza sísmica intermedia, de acuerdo con la reglamentación nacional vigente. El emplazamiento del proyecto corresponde a un terreno caracterizado por un perfil de suelo tipo D, lo que implica consideraciones específicas en el análisis estructural y en la aplicación de los coeficientes sísmicos establecidos en la NSR-10.

La edificación proyectada corresponde a una vivienda campestre de dos niveles, concebida con un sistema estructural en madera laminada encolada (MLE), seleccionada por sus propiedades mecánicas, estabilidad dimensional y versatilidad en el diseño. El sistema estructural adoptado se basa en pórticos de madera arriostrados, configurados para garantizar un desempeño adecuado frente a cargas gravitacionales y acciones sísmicas, conforme a lo estipulado en la normativa nacional (NSR-10, Título G). En la Figura 1, Figura 2 y Figura 3, se muestran la propuesta de arquitectura, la estructura y la geometría del caso de estudio.

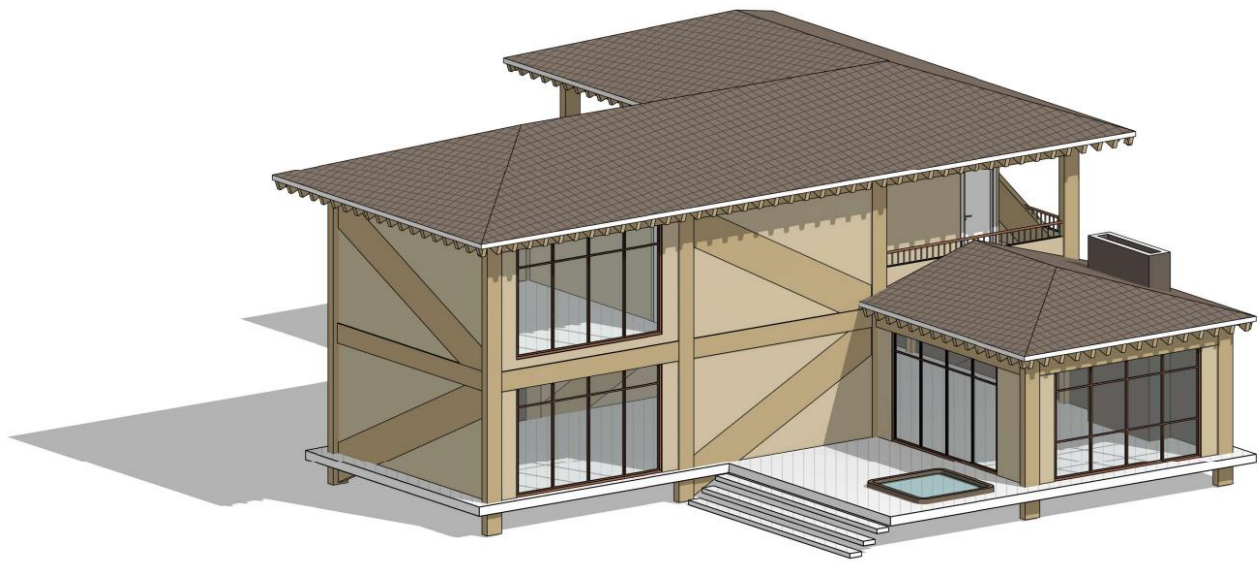


Figura 1. Isométrico caso de estudio. Fuente: elaboración propia

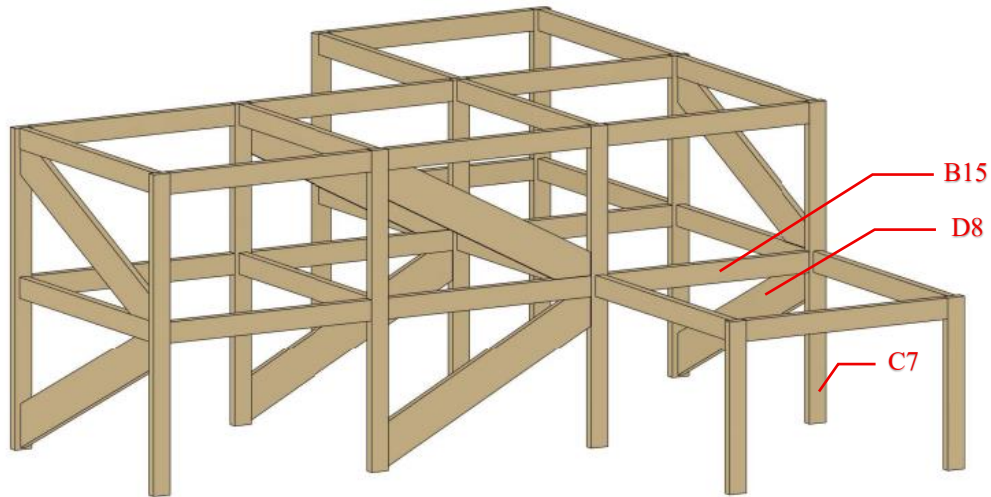


Figura 2. Estructura caso de estudio. Fuente: elaboración propia

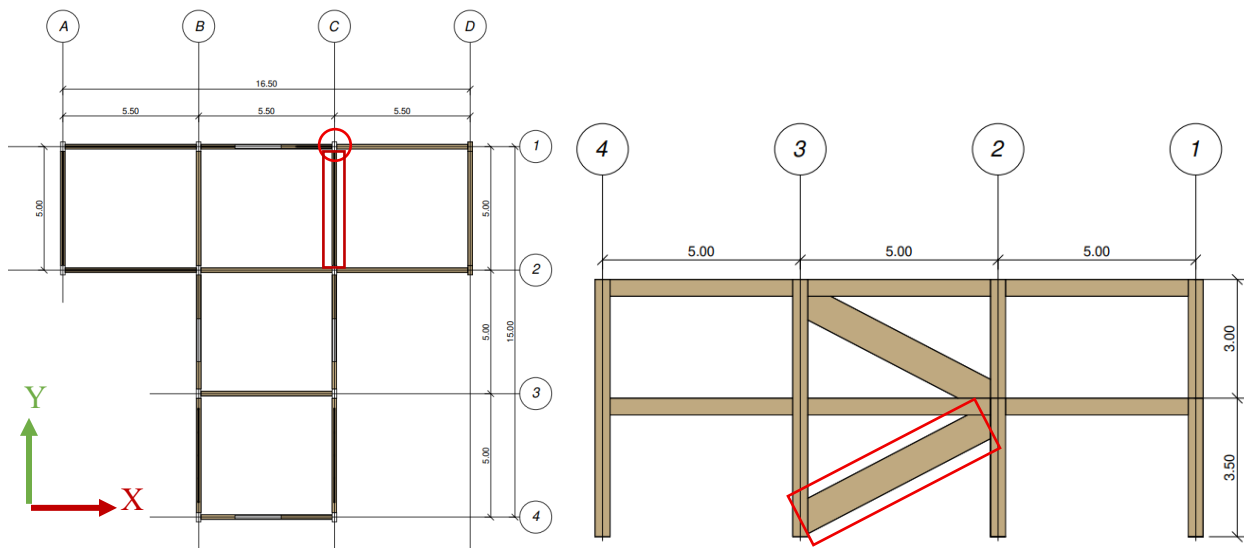


Figura 3. Planta y sección caso de estudio. Fuente: elaboración propia

5.2 Predimensionamiento

Para el predimensionamiento de los elementos estructurales se empleó la Tabla 3.1: Secciones preferenciales (PADT-REFORT) contenida en el *Manual de diseño para maderas del Grupo Andino* (Junta del Acuerdo de Cartagena, 1984). Dicha tabla propone dimensiones comercialmente estandarizadas y usos recomendados para vigas, columnas y otros elementos estructurales en madera, constituyendo una guía práctica para la selección preliminar de secciones. A partir de esta referencia se definieron las secciones iniciales del proyecto, las cuales servirán como base para el análisis estructural detallado y la verificación normativa conforme a lo establecido en la NSR-10.

De acuerdo con lo anterior, para el presente proyecto se seleccionaron las secciones preferenciales mostradas en la Tabla 2:

Tabla 2. Dimensiones elementos estructurales. Fuente: elaboración propia

Elemento	Dimensiones [cm]
Columnas	14 x 14
Vigas	14 x 19
Arriostramientos diagonales	14 x 19

Estas dimensiones iniciales serán posteriormente verificadas y ajustadas mediante el análisis estructural y el diseño detallado conforme a lo establecido en la NSR-10 (Título G)

5.3 Cargas

5.3.1 Cargas muertas

En la Tabla 3 se presentan las cargas muertas consideradas en el modelo estructural, las cuales han sido determinadas conforme a los criterios establecidos por la Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente, NSR-10. Además de estas cargas, se incluye el peso propio de los elementos de madera laminada encolada MLE 22 H.

Tabla 3. Cargas muertas consideradas. Fuente: elaboración propia

Cargas muertas		
Acabados	1.40	[kN/m ²]
Particiones	2.00	[kN/m ²]
Instalaciones	0.30	[kN/m ²]
Cubierta		
Madera aserrada	0.3	[kN/m ²]
Tableros de madera	0.25	[kN/m ²]
Tablillas (shingles) de madera	0.15	[kN/m ²]

5.3.2. Cargas vivas

De igual manera, en la Tabla 4 se presentan las cargas vivas consideradas en el modelo estructural, determinadas según los valores y categorías de uso establecidos en la NSR-10. Estas cargas representan las acciones variables asociadas a la ocupación y utilización de la edificación, tales como el tránsito de personas.

Tabla 4. Cargas vivas consideradas. Fuente: elaboración propia

Cargas vivas		
Cuartos y corredores	1.80	[kN/m ²]
Escaleras	3.00	[kN/m ²]
Cubierta	0.50	[kN/m ²]

5.3.3 Combinaciones de carga

Se usan las combinaciones de cargas para el método de diseño por tensiones admisibles indicadas en la NCh 3171, las cuales son cargas sin mayorar:

- 1) D
- 2) D + L
- 3) D + (Lr o S o R)
- 4) D + 0.75 L + 0.75 (Lr o S o R)
- 5a) D + W
- 5b) D + E
- 6a) D + 0.75 W + 0.75 L + 0.75 (Lr o S o R)
- 6b) D + 0.75 E + 0.75 L + 0.75 S
- 7) 0.6 D + W
- 8) 0.6 D + E

Donde:

D: Carga muerta

L: Carga viva

Lr: Carga viva de techo

S: Carga de nieve

R: Carga de lluvia

W: Carga de viento

E: Carga sísmica

5.4 Metodología de diseño estructural

5.4.1 Especificaciones del material

Las Propiedades características (resistencia a compresión paralela $F_{c,k}$, tracción paralela $F_{t,k}$, flexión $F_{m,k}$, cortante $F_{v,k}$, módulo de elasticidad E , densidad ρ) se obtienen de las tablas de la NCh 2165 cuando correspondan. La norma define procedimientos de ensayo y agrupación por especies/grados en caso de que no se pueda usar las tablas.

Se usará una madera conífera denominada pino radiata, la cual es la más estandarizada e industrializada en Chile y la mayor parte de la normativa se basa en el diseño en mle de esta especie en particular. De esta surgen diferentes clases estructurales, descritas en la Tabla 5.

Tabla 5. Propiedades de madera laminada encolada. Adaptado de Nch2165, 2023.

Propiedades	Símbolo	Unidad	Clase estructural de la madera laminada encolada				
			mle 20h	mle 22h	mle 24h	mle 26h	mle 28h
Resistencia de flexión	$R_{f,mle,k}$	MPa	20	22	24	26	28
Resistencia de tracción paralela	$R_{tp,mle,k}$	MPa	16	17.6	19.2	20.8	22.3
Resistencia de tracción normal	$R_{tn,mle,k}$	MPa	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Resistencia de compresión paralela	$R_{cp,mle,k}$	MPa	20	22	24	26	28
Resistencia de compresión normal	$R_{cn,mle,k}$	MPa	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Resistencia de cizalle (corte y torsión)	$R_{czc,mle,k}$	MPa	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Resistencia de cizalle rodante	$R_{cZR,mle,k}$	MPa	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Módulo de elasticidad (paralelo)	$E_{p,mle,prom}$	MPa	8400	10500	11500	12100	12600
	$E_{p,mle,k}$	MPa	7000	8800	9600	10100	10500
Módulo de elasticidad (normal)	$E_{n,mle,prom}$	MPa	300	300	300	300	300
	$E_{n,mle,k}$	MPa	250	250	250	250	250
Módulo de corte	$G_{mle,prom}$	MPa	650	650	650	650	650
	$G_{mle,k}$	MPa	540	540	540	540	540
Módulo de cizalle rodante	$G_{cZR,mle,prom}$	MPa	65	65	65	65	65
	$G_{cZR,mle,k}$	MPa	54	54	54	54	54
Densidad	$\rho_{mle,k}$	kg/m ³	340	370	385	405	425
	$\rho_{mle,prom}$	kg/m ³	370	410	420	445	460

El material seleccionado para el desarrollo estructural del proyecto es madera laminada encolada, específicamente del tipo MLE 22 H, según la clasificación establecida en la Norma Chilena NCh 2165. Este material se compone de láminas de madera aserrada de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don), dispuestas y unidas mediante adhesivos estructurales resistentes a las condiciones de servicio, esta al ser la más frecuente en el mercado de Chile, y la cual tiene varios equivalentes en Colombia en algunas propiedades importantes. Se aclara que, esta clasificación estructural es diferente a la normativa colombiana, esencialmente porque la norma colombiana hasta el momento solo caracteriza madera aserrada y remite a la norma chilena o europea, no obstante, a una versión antigua de la norma chilena, en las cuales la clasificación es diferente, pero el ejercicio práctico se decide hacer con la nueva clasificación debido a que probablemente todas las normativas migren a algo similar.

A partir de estas propiedades se obtienen las resistencias admisibles, las cuales son las resistencias características divididas por un factor de ajuste por tipo de efecto, los cuales se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Factores de ajuste. Fuente (Nch2165, 2023).

Factores de ajuste - determinación tensiones admisibles	
Flexión	2.1
Tracción paralela a la fibra	2.1
Tracción normal a la fibra	4.1
Compresión paralela a la fibra	1.9
Compresión normal a la fibra	1.667
Corte	2.1

Con estos valores, se proceden a calcular las diferentes capacidades por diseño en cada tipo de efecto, como se indica en el siguiente capítulo.

5.4.2 Flexión simple

El diseño a flexión simple se realiza principalmente para las vigas del sistema estructural, las cuales están sometidas a esfuerzos de momento flector producidos por las cargas verticales. Asimismo, se verifica este efecto en las columnas, con el propósito de evaluar la influencia del momento generado por las condiciones de apoyo y continuidad. El procedimiento de cálculo y las comprobaciones de resistencia se desarrollan conforme a los criterios establecidos en la Norma Chilena NCh 1198, que regula el diseño estructural de elementos de madera.

Se debe verificar que:

$$f_f \leq F_{f,dis}$$

Se define,

f_f : Esfuerzo de trabajo en flexión en la fibra extrema [MPa]

$$f_f = \frac{M_{max}}{W_n}$$

Donde:

M_{max} : Momento máximo de flexión [N mm]

W_n : Módulo de flexión de la sección transversal, respecto al eje neutro [mm³]

$$W_n = \frac{b * h^2}{6}$$

$F_{f,dis}$: Esfuerzo de diseño en flexión [MPa]

$$F_{f,dis} = F_f \cdot K_H \cdot K_D \cdot K_C \cdot K_V$$

Donde:

F_f : Esfuerzo admisible en flexión (calculada según NCh 2165)

K_H : factor modificador por contenido de humedad

K_D : factor modificador por duración de las cargas

K_C : factor modificador por trabajo conjunto en flexión

K_V : factor modificador por volumen, igual a $\left(\frac{6.4}{L}\right)^{1/10} \cdot \left(\frac{300}{h}\right)^{1/10} \cdot \left(\frac{135}{b}\right)^{1/10}$, ningún termino puede ser mayor a 1.

5.4.3 Cortante

El diseño a esfuerzo cortante se realiza tanto para las vigas como para las columnas del sistema estructural, con el objetivo de verificar la resistencia del material frente a las fuerzas transversales que se generan por la acción de las cargas verticales y por la transmisión de esfuerzos en las uniones. Esta comprobación garantiza que los esfuerzos de corte no excedan los valores admisibles para la madera laminada encolada MLE 22 H, conforme a los parámetros de la Norma Chilena NCh 2165 y a los criterios de diseño establecidos en la norma NCh 1198.

Se debe verificar que:

$$f_{cz} \leq F_{cz,dis}$$

Se define,

f_{cz} : Esfuerzo de trabajo en cortante [MPa]

$$f_{cz} = 1.5 * \frac{V_{max}}{b * h}$$

Donde:

V_{max} : Cortante máximo [N]

$F_{cz,dis}$: Esfuerzo de diseño en cortante [MPa]

$$F_{cz,dis} = F_{cz} \cdot K_H \cdot K_D \cdot K_r$$

Donde:

F_{cz} : Esfuerzo admisible en cortante (calculada según NCh 2165)

K_H : factor modificador por contenido de humedad

K_D : factor modificador por duración de las cargas

K_r : factor modificador por rebaje

El factor de rebaje depende de si el apoyo de las columnas o vigas tiene cortes o modificaciones que reduzcan su sección como se indica en las tablas 11 y 12 de la Nch1198. Esto no suele ocurrir en madera laminada así que se considera igual a 1.

5.4.4 Esfuerzo axial - Compresión paralela a la fibra

Las restricciones de esbeltez para columnas de madera son:

Para elementos principales (columnas):

$$\lambda \leq 170$$

Para elementos constituyentes de sistemas arriostrados que quedan comprimidos únicamente bajo los efectos de estados de carga eventuales (viento, sismo):

$$\lambda \leq 200$$

Se debe verificar que:

$$f_{cp} \leq F_{cp,\lambda,dis}$$

Se define,

f_{cp} : Esfuerzo de trabajo en compresión paralela [MPa]

$$f_{cp} = \frac{N}{A}$$

Donde:

N : carga axial aplicada [N]

A : área de la sección transversal de la columna [mm²]

$F_{cp,\lambda,dis}$: Esfuerzo de diseño en compresión paralela [MPa]

Columnas sin problemas de inestabilidad lateral ($\lambda < 10$)

$$F_{cp,dis} = F_{cp} \cdot K_H \cdot K_D$$

Donde:

F_{cp} : Esfuerzo admisible en compresión paralela (calculada según NCh 2165)

K_H : factor modificador por contenido de humedad

K_D : factor modificador por duración de las cargas

Columnas con problemas de inestabilidad lateral ($\lambda \geq 10$)

$$F_{cp,\lambda,dis} = F_{cp,dis} \cdot K_\lambda$$

Por lo cual:

$$F_{cp,\lambda,dis} = F_{cp} \cdot K_H \cdot K_D \cdot K_\lambda$$

Donde:

$F_{cp,dis}$: Esfuerzo de diseño en compresión paralela (sin inestabilidad)

K_λ : factor modificador por esbeltez

$$K_\lambda = A - \sqrt{A^2 - B}$$

Con:

$$A = \frac{\frac{F_{cE,ml}}{F_{cp,dis}} \cdot \left(1 + \frac{\lambda}{300}\right) + 1}{1.8}$$

$$B = \frac{\frac{F_{cE,ml}}{F_{cp,dis}}}{0.9}$$

Donde:

- $F_{cE,ml}$: Esfuerzo crítica de pandeo [MPa]
- $F_{cp,dis}$: Esfuerzo de diseño en compresión paralela (sin inestabilidad)
- λ : esbeltez de diseño

Esfuerzo crítico de pandeo

$$F_{cE,ml} = \frac{5.0 \cdot E_{dis}}{\lambda^2}$$

Donde:

- E_{dis} : módulo de elasticidad de diseño [MPa]
- λ : esbeltez de diseño

5.4.5 Esfuerzo axial - Tracción paralela a la fibra

Se debe verificar que:

$$f_{tp} \leq F_{tp,dis}$$

Se define,

f_{tp} : Esfuerzo de trabajo en tracción paralela [MPa]

$$f_{tp} = \frac{T}{A_n}$$

Donde:

T : Solicitación a tracción paralela a las fibras [N]

A_n : Área neta de la sección transversal [mm²]

$F_{tp,dis}$: Esfuerzo de diseño en tracción paralela [MPa]

$$F_{tp,dis} = F_{tp} \cdot K_H \cdot K_D \cdot K_V \cdot K_{ct}$$

Donde:

F_{tp} : Esfuerzo admisible para tracción paralela (calculada según NCh 2165)

K_H : factor modificador por contenido de humedad

K_D : factor modificador por duración de las cargas

K_V : factor modificador por volumen

K_{ct} : factor modificador por concentración de tensiones

Considera el efecto de concentración de tensiones en zonas traccionadas debido a perforaciones, vaciados, entalladuras, etc. En la Tabla 7 se muestra los valores en los diferentes tipos de debilitamiento.

Tabla 7. Tipo de debilitamiento según clase de madera. Fuente (Nch 1198,2014).

Tipo de debilitamiento	Madera aserrada	Madera laminada encolada
Perforaciones pequeñas y uniformemente distribuidas (clavos)	0.8	0.9
Perforaciones individuales mayores (pernos)	0.7	0.8
Conectores de anillo	0.5	0.6
Ranuras longitudinales: espesor ≤ 5 mm	0.8	0.85
Ranuras longitudinales: espesor ≤ 10 mm	0.7	0.8

5.4.6 Flexo-compresión y flexo-tracción (efectos combinados)

Para tracción y flexión, las piezas solicitadas simultáneamente por flexión y tracción axial se deben dimensionar de manera que se verifique para:

Zona traccionada:

$$\frac{f_{tp}}{F_{tp,dis}} + \frac{f_f}{F_{f,t,dis}} \leq 1,0$$

Zona comprimida:

$$\frac{f_f - f_{tp}}{F_{f,v,dis}} \leq 1,0$$

Se define,

f_{tp} : tensión de trabajo por tracción paralela

f_f : tensión de trabajo por flexión

$F_{tp,dis}$: tensión de diseño para tracción paralela

$F_{f,t,dis}$: tensión de diseño en flexión, en el borde traccionado

$F_{f,v,dis}$: tensión de diseño en flexión, en el borde comprimido

Para compresión y flexión, las piezas sometidas a una combinación de flexión respecto a uno de los ejes principales y a la compresión axial se deben dimensionar de manera que se verifique lo siguiente:

$$\left(\frac{f_{cp}}{F_{cp,\lambda,dis}}\right)^2 + \frac{f_f}{\left(1 - \frac{f_{cp}}{F_{cE}}\right) * F_{f,dis}} \leq 1,0$$

Se define,

f_{cp} : tensión de trabajo por compresión paralela

f_f : tensión de trabajo por flexión

$F_{cp,\lambda,dis}$: tensión de diseño para compresión paralela

$F_{f,dis}$: tensión de diseño en flexión

F_{cE} : tensión crítica de pandeo

5.5 Modelo estructural

Para el cálculo y dimensionamiento de la estructura se realiza un modelo tridimensional en el programa ETABS. El modelo está compuesto por elementos tipo frame que están restringidos en la base con articulaciones como se muestra en la Figura 4. se asignaron releases a los elementos tipo frame (Figura 5) correspondientes a las vigas y diagonales, con el propósito de representar adecuadamente las condiciones reales de apoyo y transmisión de esfuerzos.

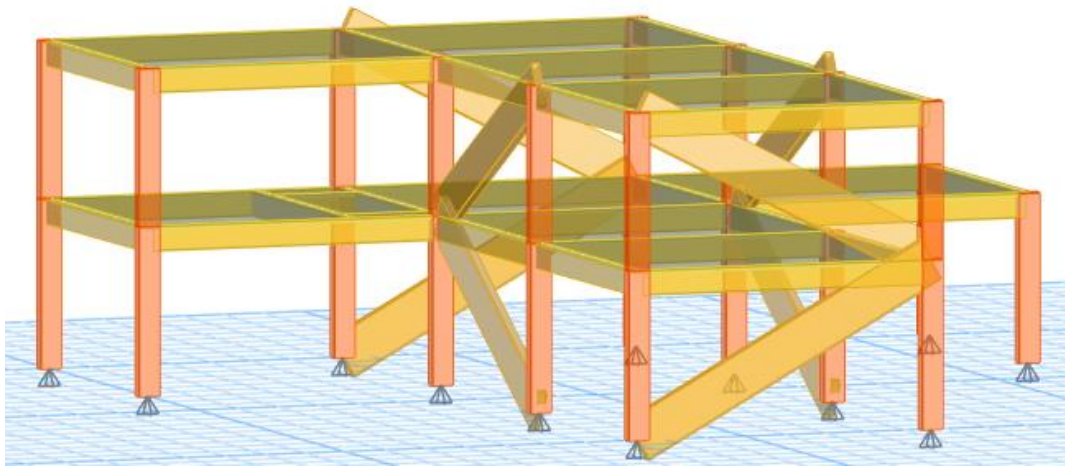


Figura 4. Modelo estructural con articulaciones en la base. Fuente: elaboración propia

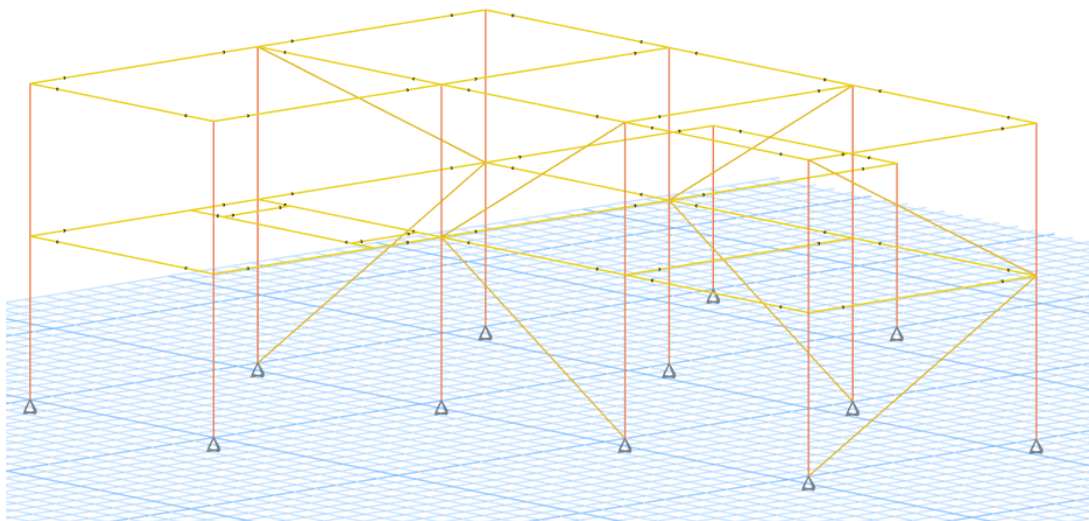


Figura 5. Asignación de releases en vigas y diagonales. Fuente: elaboración propia

5.5.1 Diafragma

En el modelo de análisis, se usará un diafragma semi rígido al ser un caso más crítico para efectos de diseño. No obstante, en la práctica, es posible sustentar un diafragma rígido teniendo en cuenta un entrepiso con las vigas secundarias, cadenas y tableros OSB (“Oriented Strand Board”) conectados con pernos en todos sus bordes a las vigas, como se muestra en la Figura 6.

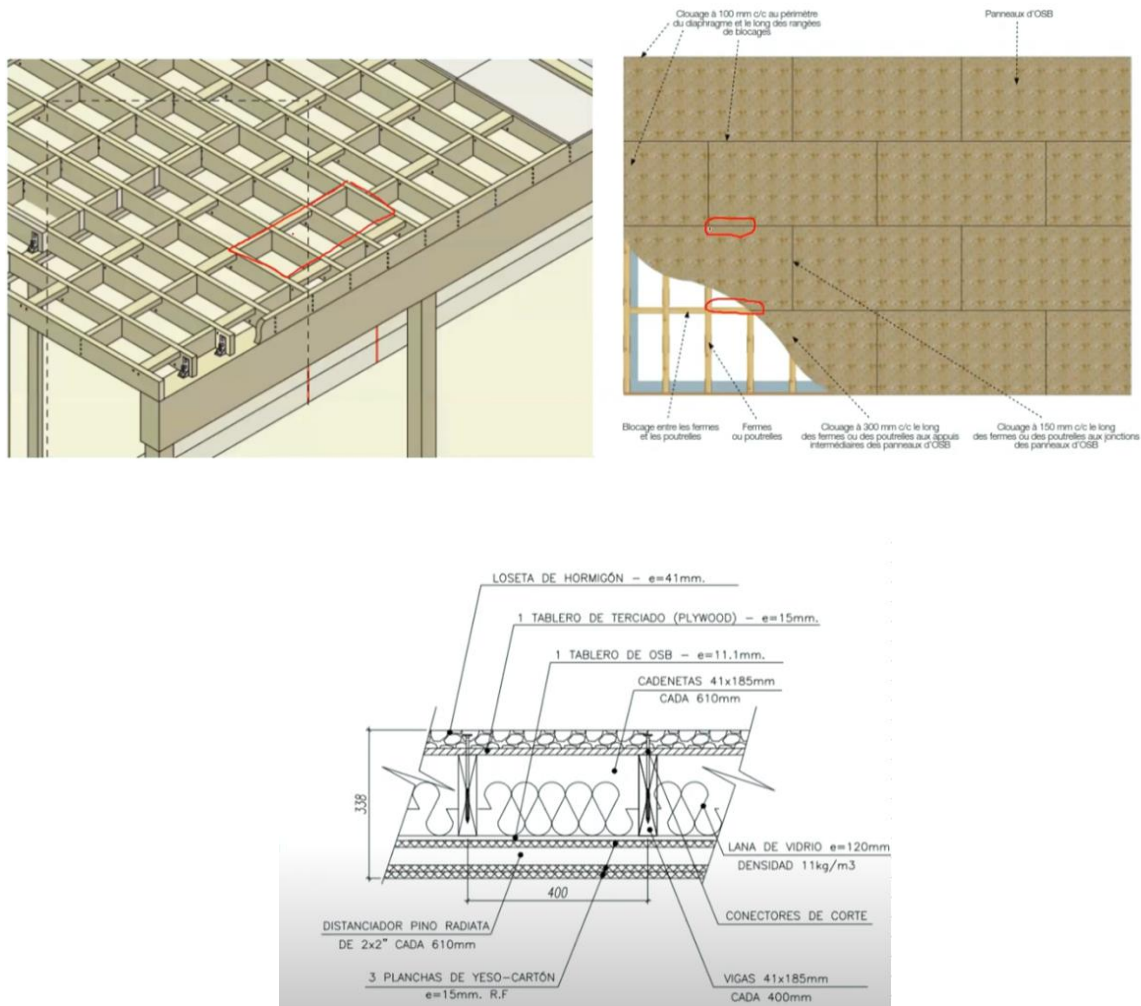


Figura 6. Detallado diafragmas. Fuente (González, 2023).

En este caso no se calculará y se analizará a profundidad los elementos pertenecientes al diafragma, aun así, se recalca la importancia de esta parte del diseño para un diseño estructural en madera.

5.5.2 Análisis sísmico

Se presenta el espectro sísmico de diseño correspondiente al sitio donde se encuentra ubicada la estructura proyectada. Dicho espectro ha sido obtenido conforme a los parámetros definidos en la NSR-10, considerando la zonificación sísmica del municipio de El Retiro, Antioquia, clasificado como una zona de amenaza sísmica intermedia, con un perfil de suelo tipo D y perteneciente al Grupo de uso I, correspondiente a edificaciones de uso residencial.

La representación del espectro permite caracterizar la demanda sísmica esperada en el sitio, expresada en términos de aceleraciones de diseño en función del período estructural.

Para esta zona, $A_a = 0.15$ y $A_v = 0.20$, en la Figura 7 se muestra el espectro.

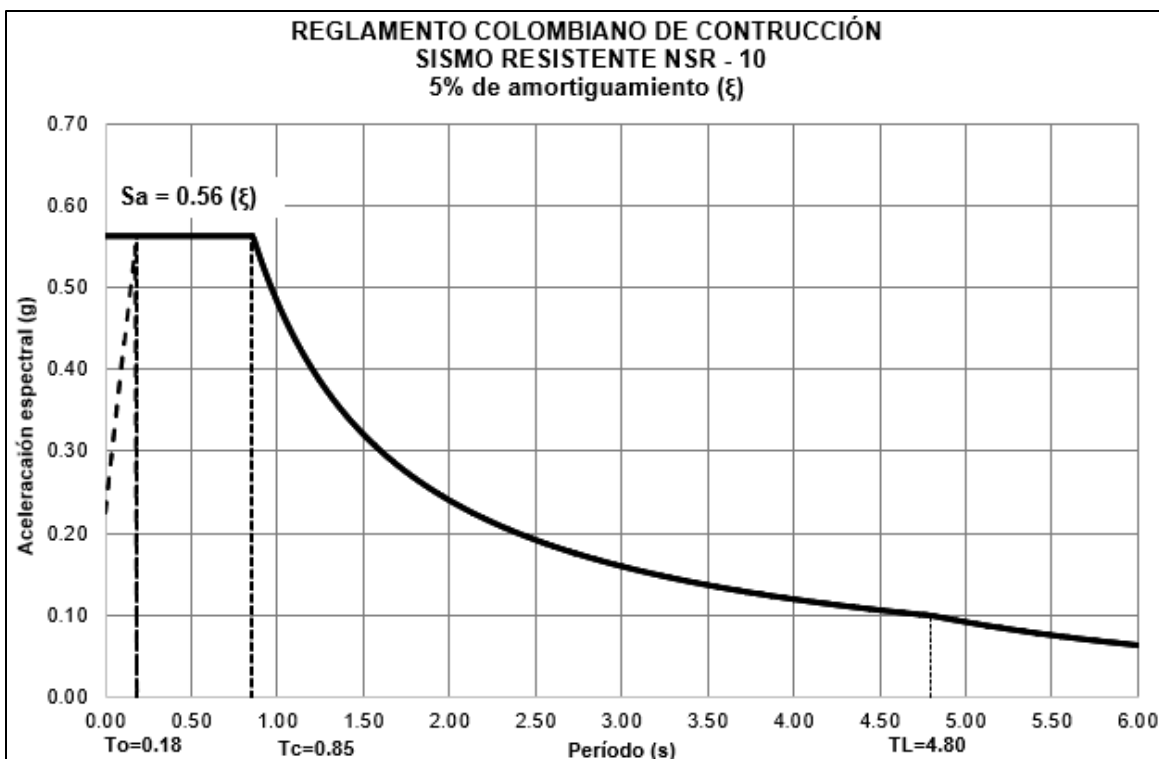


Figura 7. Espectro elástico de aceleraciones para diseño del edificio. Fuente: elaboración propia

A partir del modelo estructural desarrollado en ETABS, se determinó el período fundamental de vibración de la estructura mediante el análisis modal, considerando la distribución de masas, rigideces y las condiciones de apoyo definidas, en la Figura 8 y Figura 9 se enseña los modos de vibración de la estructura.

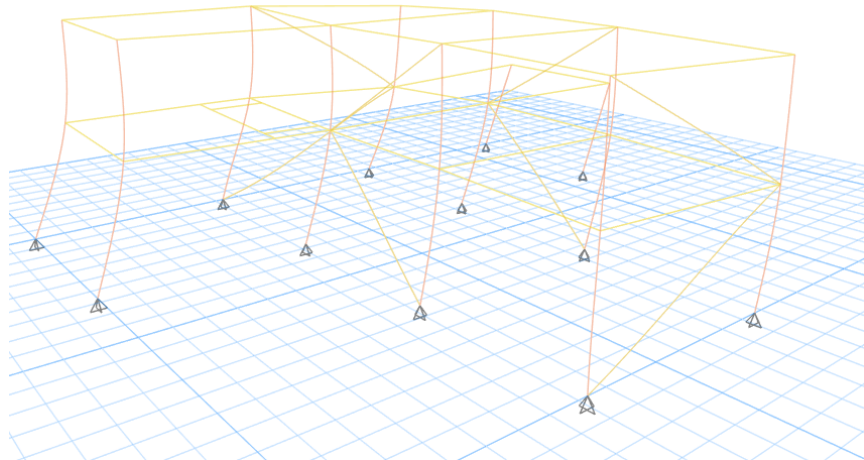


Figura 8. Primer modo de vibración. Fuente: elaboración propia

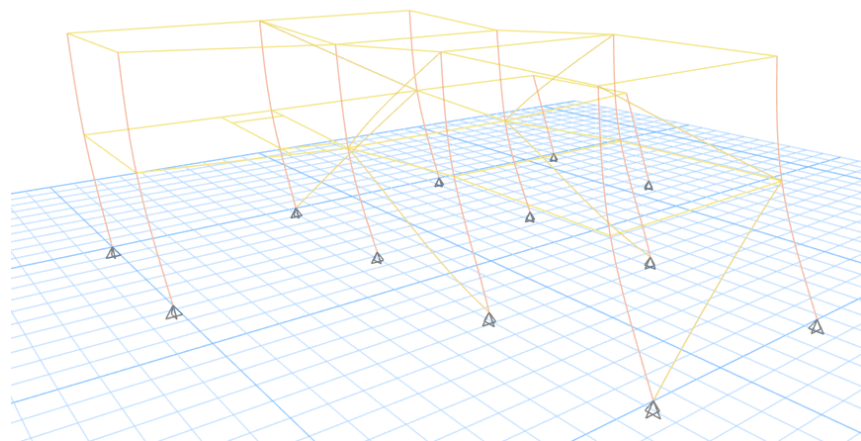


Figura 9. Segundo modo de vibración. Fuente: elaboración propia

Tabla 8. Resumen periodos de vibración y masa acumulada obtenidas en ETABS. Fuente: elaboración propia

Modo	Periodo [s]	Ux	Uy
1	0.279	0.902	0.014
2	0.261	0.018	0.970

Con base en la Tabla 8, se efectuó el análisis dinámico modal espectral, obteniéndose una fuerza cortante basal de 318.43 kN en la dirección X y de 338.11 kN en la dirección Y. Estos valores se compararon con los del análisis estático, el cual arrojó una fuerza de 334.13 kN en ambas direcciones, teniendo en cuenta un peso sísmico de 599kN y una aceleración espectral de 0.56g.

Dado que las diferencias entre ambos métodos se encuentran dentro de los límites establecidos por la NSR-10, no fue necesario aplicar factores de ajuste o corrección a los resultados del análisis dinámico.

Adicionalmente, se lleva a cabo la verificación de las derivas laterales de la estructura, con base en los resultados obtenidos del análisis dinámico, como se muestra en la Tabla 9 y en la Figura 10.

Tabla 9. Resultado de derivas en dirección X y Y. Fuente: elaboración propia

Deriva en dirección x [%]	Deriva en dirección y [%]
0.40	0.33

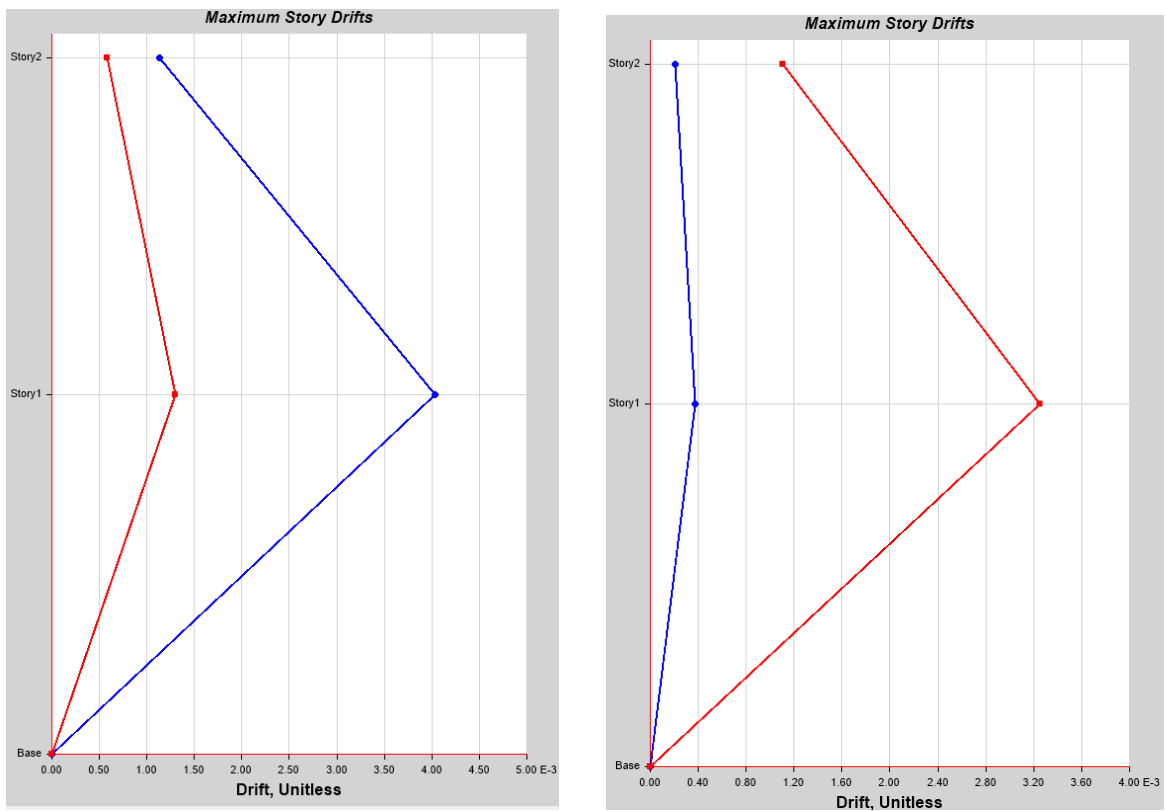


Figura 10. Derivas en X y Y, respectivamente. Fuente: elaboración propia

5.5.3 Solicitaciones

En la Figura 11, se presentan los diagramas obtenidos para la viga de estudio bajo la combinación de carga D+L, identificada como la más crítica. Aunque se evidencia la presencia de una carga axial para la combinación D + Ex, el diseño a flexocompresión de la viga no se incluye dentro del alcance del presente trabajo.

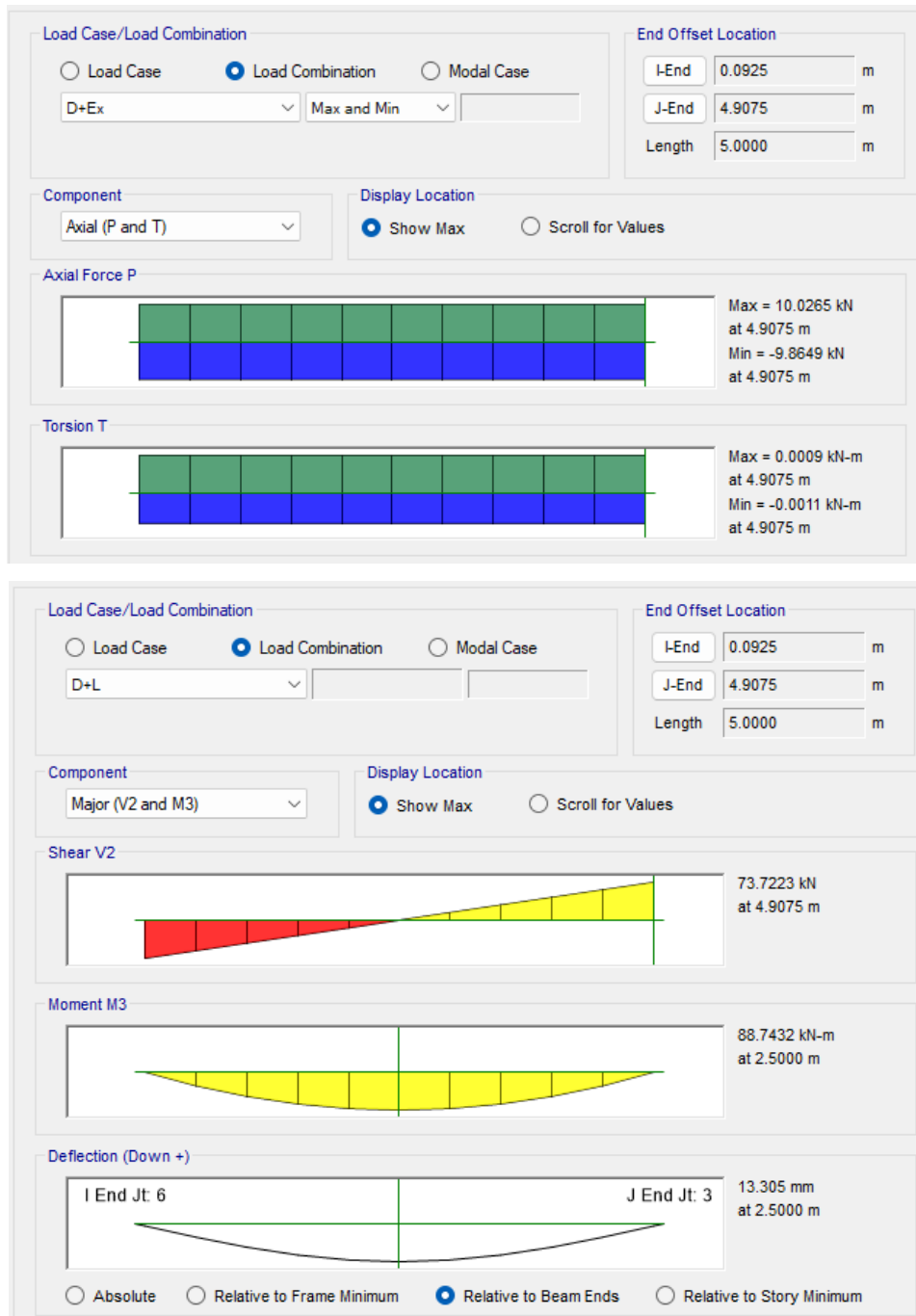


Figura 11. Diagramas de solicitaciones máximas en la viga. Fuente: elaboración propia

En la Figura 12, se enseñan las solicitaciones para la columna para el caso de carga $0.6D+Ex$:

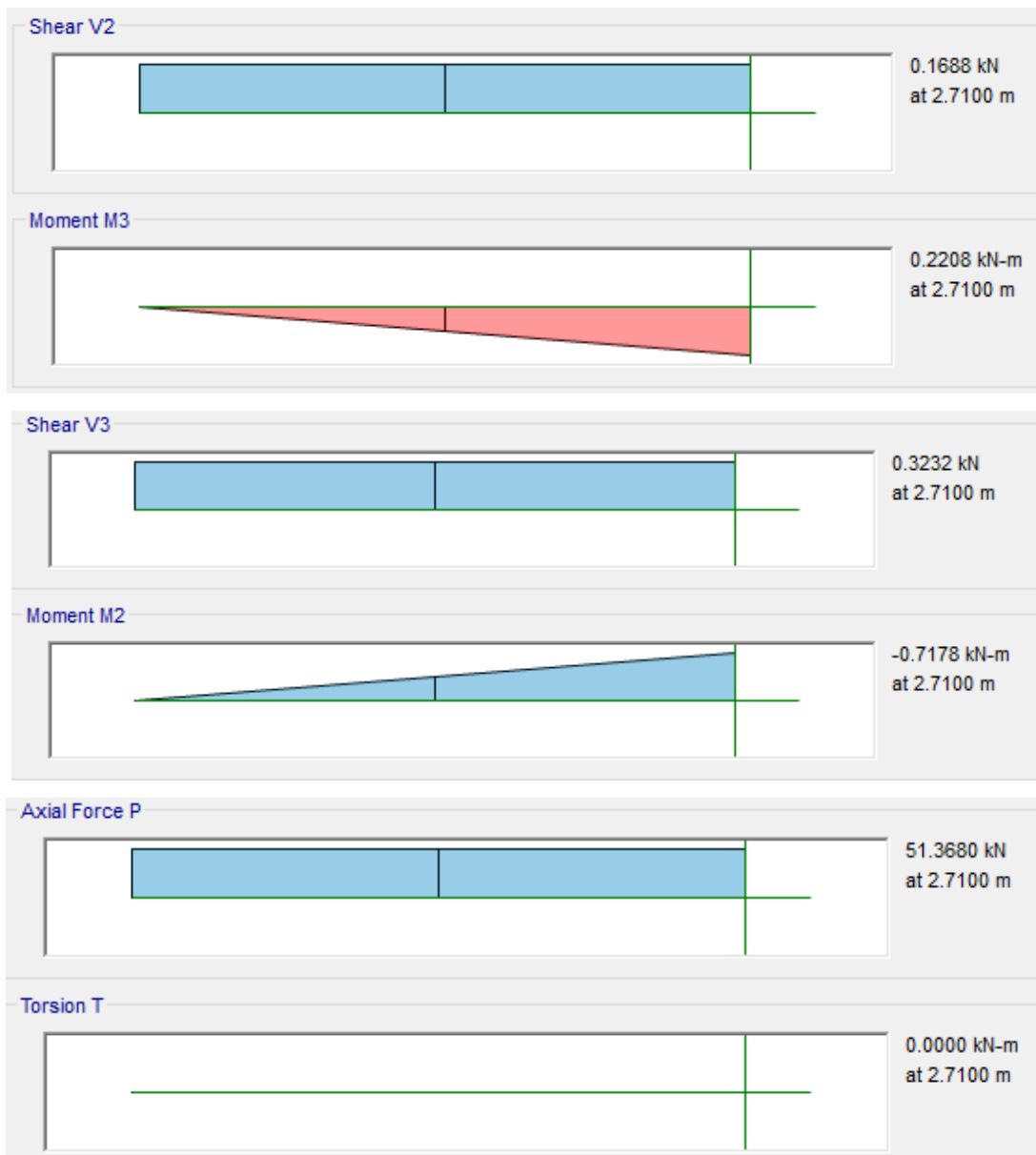


Figura 12. Diagramas de solicitaciones máximas en la columna. Fuente: elaboración propia

En la Figura 13, se muestra para la diagonal, D+Ex:

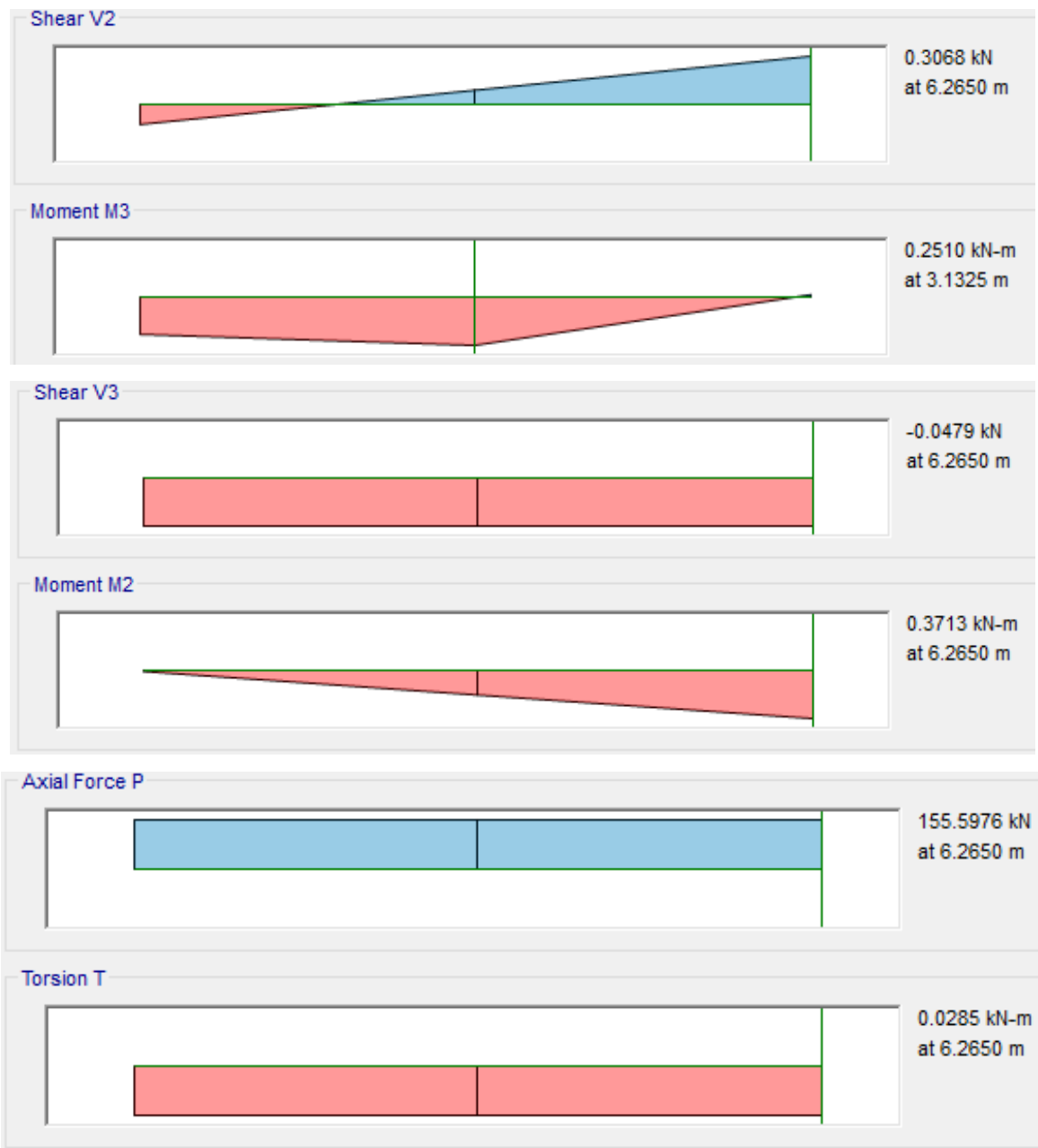


Figura 13. Diagramas de solicitaciones máximas en la riostra. Fuente: elaboración propia

5.6 Resultados de diseño

De acuerdo con lo descrito en el numeral 5.5, se presenta el diseño de la viga y la columna indicadas en la Figura 3.

5.6.1 Diseño viga

Inicialmente, se consideró una dimensión para la viga de 140 x 290 mm, pero debido a la dimensión de las luces que se requieren arquitectónicamente, se requieren mayor sección que solo es alcanzable con madera laminada, para el caso de la viga se obtiene lo mostrado en la Tabla 10 y en la Tabla 11:

Tabla 10. Diseño de viga MLE. Fuente: elaboración propia

DISEÑO DE VIGAS MLE homogénea					
Geometría y datos iniciales					
ID	B15				
L_v	5.00 [m]	Longitud viga	b	185.00 [mm]	Base
e_v	5.50 [m]	Espaciamiento vigas	h	500.00 [mm]	Altura
e_{viguetas}	1.00 [m]	Espaciamiento viguetas	t	20.00 [mm]	Espesor
H_s	12.00 [%]	Humedad de equilibrio	n_i	25.00 -	Número de láminas
Propiedades					
Clase estructural mle 22h					
$E_{p,mle,k}$	8800 [MPa]	Módulo de elasticidad (paralelo)			
$\gamma_{mle,prom}$	4.10 [kN/m ³]	Peso específico			
W	7708333 [mm ³]	Módulo de flexión de la sección transversal			
I_x	1927083333 [mm ⁴]	Momento de Inercia			
l_v	2060 [mm]	Longitud efectiva de volcamiento			
λ_v	8.55 -	Esbeltez de volcamiento			
k	1.05				
Esfuerzos admisibles					
$R_{f,mle,adm}$	11.00 [MPa]	Esfuerzo a flexión admisible			
$R_{czf,mle,adm}$	1.67 [MPa]	Esfuerzo a cortante admisible			
Factores de Modificación					
K_H	1.00 -	Por contenido de humedad			
K_D	1.00 -	Por duración de carga			
K_C	1.00 -	Por trabajo conjunto en flexión			
K_V	0.92 -	Por volumen			
k_r	1.00 -	Por rebaje			
$K_{\lambda,V}$	0.99 -	Por volcamiento			
$F_{fE,ML}$	69.81 [MPa]	Flexión crítica de pandeo			
$F_{f,dis}^*$	11.00 [MPa]	Flexión de diseño para calculo de volcamiento			
$E_{f,dis}$	8360 [MPa]	Módulo de elasticidad de diseño			
Esfuerzos de diseño					
$F_{ft,dis}$	10.13 [MPa]	Esfuerzo de diseño en flexión en el borde traccionado			
$F_{fv,dis}$	10.90 [MPa]	Esfuerzo de diseño en flexión considerando inestabilidad volcamiento			
$F_{f,dis}$	11.65 [MPa]	Esfuerzo de diseño en flexión			
$F_{cz,dis}$	1.67 [MPa]	Esfuerzo de diseño por cortante			

Tabla 11. Solicitaciones viga. Fuente: elaboración propia

Combinaciones	SOLICITACIONES			CORTANTE		FLEXIÓN		DESPLAZAMIENTO	
	V2	M3	$\Delta_{m\acute{a}x}$	f_{cz}	% USO	f_f	% USO	Δ_{adm}	% USO
	kN	kN-m	mm	MPa		MPa		mm	
D	-49.75	59.89	9.00	0.81	48%	7.77	67%	16.67	54%
D+L	-73.72	88.74	13.31	1.20	72%	11.51	99%	16.67	80%
D+Ex	-49.75	59.89	8.77	0.81	48%	7.77	67%	16.67	53%
D+Ey	-49.75	59.89	8.69	0.81	48%	7.77	67%	16.67	52%
D+0.75Ex+0.75L	-67.63	81.41	13.02	1.10	66%	10.56	91%	16.67	78%
D+0.75Ey+0.75L	-67.63	81.41	12.96	1.10	66%	10.56	91%	16.67	78%
0.6D+Ex	-29.85	35.93	5.33	0.48	29%	4.66	40%	16.67	32%
0.6D+Ey	-29.85	35.93	5.25	0.48	29%	4.66	40%	16.67	32%

5.6.2 Diseño columna

Tabla 12. Diseño columna MLE. Fuente: elaboración propia

DISEÑO DE COLUMNAS MLE homogénea									
Geometría y datos iniciales									
ID	C7	-		b	185	[mm]	Base		
L	3	[m]	Longitud columna	h	380	[mm]	Altura		
k_x	1	-		t	38	[mm]	Espesor		
k_y	1	-		n_i	10	-	Número de láminas		
H_s	12	[%]	Humedad de equilibrio						
Propiedades									
Clase estructural	mle 22h	-		A	70300	[mm ²]	Área de la sección transversal		
$E_{p,mle,k}$	8800	[MPa]	Módulo de elasticidad (paralelo)	I_x	845943333	[mm ⁴]	Momento de Inercia en x		
$E_{n,mle,k}$	250	[MPa]	Módulo de elasticidad (normal)	I_y	200501458	[mm ⁴]	Momento de Inercia en y		
$G_{mle,k}$	540	[MPa]	Módulo de corte	r_x	109.70	[mm]	Radio de giro en x		
$G_{czz,mle,k}$	54	[MPa]	Módulo de cizalle rodante	r_y	53.40	[mm]	Radio de giro en y		
$\rho_{mle,prom}$	410	[MPa]	Densidad	K	1.005	-			
Esbellez									
λ_x	27.35	-							
λ_y	56.17	-							
λ_{dis}	56.17	-	Esbellez de diseño						
Esfuerzos admisibles									
$R_{f,mle,adm}$	10.53	[MPa]	Esfuerzo a flexión admisible	$R_{cn,mle,adm}$	1.50	[MPa]	Esfuerzo a compresión normal admisible		
$R_{tp,mle,adm}$	8.38	[MPa]	Esfuerzo a tracción paralela admisible	$R_{czz,mle,adm}$	1.67	[MPa]			
$R_{n,mle,adm}$	0.12	[MPa]	Esfuerzo a tracción normal admisible	$R_{czz,mle,adm}$	0.57	[MPa]	Esfuerzo cortante rodante admisible		
$R_{cp,mle,adm}$	11.58	[MPa]	Esfuerzo a cortante admisible						
Esfuerzos de diseño									
<u>Compresión paralela</u>					<u>Tracción paralela</u>				
K_H	1	-	Factor de modificación por contenido de humedad	K_H	1	-	Factor de modificación por contenido de humedad		
K_D	1	-	Factor de modificación por duración de carga	K_D	1	-	Factor de modificación por duración de carga		
$E_{dis,cp}$	8360	[MPa]	Módulo de elasticidad de diseño	K_v	0.95	-	factor modificador por volumen		
F_{cE}	13.25	[MPa]	Esfuerzo crítica de pandeo	Debilitamiento	Pernos	-			
$F_{cp,dis}$	11.58	[MPa]	Esfuerzo de diseño en compresión paralela (sin inestabilidad)	K_{ct}	0.8	-	factor modificador por concentración de tensiones		
A	1.31			$F_{tp,dis}$	6.35	[MPa]	Esfuerzo de diseño en tracción paralela		
B	1.27			<u>Flexión</u>					
K_λ	0.64	-	Factor modificador por esbellez	K_H	1	-	Factor de modificación por contenido de humedad		
$F_{cp\lambda,dis}$	7.44	[MPa]	Esfuerzo de diseño en compresión paralela	K_D	1	-	Factor de modificación por duración de carga		
P_{max}	523.25	[kN]	Fuerza axial	K_C	1	-	Factor de modificación por trabajo conjunto en flexión		
<u>Cortante</u>					K_v	0.95	-	factor modificador por volumen	
K_H	1	-	Factor de modificación por contenido de humedad	$E_{dis,f}$	8360	[MPa]	Módulo de elasticidad de diseño		
K_D	1	-	Factor de modificación por duración de carga	$F_{fc,dis}$	9.97	[MPa]	Esfuerzo de diseño en flexión		
K_r	1	-	Factor de modificación por rebaje						
$F_{cz,dis}$	1.67	[MPa]	Esfuerzo de diseño por cortante						

Tabla 13. Solicitaciones columna. Fuente: elaboración propia

EJE X SECCIÓN	SOLICITUDES					
	Comb	P	V2	V3	M2	M3
2		kN	kN	kN	kN m	kN m
	D	-58.14	0.07	0.49	-1.33	-0.20
	D+L	-86.36	0.09	0.72	-1.96	-0.23
	D+Ex	-144.39	-0.05	0.46	-1.41	-0.54
	D+Ey	-91.07	0.02	0.43	-1.49	-0.33
	D+0.75Ex+0.75L	-143.99	-0.01	0.64	-1.86	-0.48
	D+0.75Ey+0.75L	-104.01	0.05	0.62	-1.92	-0.32
	0.6D+Ex	51.37	0.17	0.32	-0.72	0.22
	0.6D+Ey	-67.81	0.00	0.23	-0.96	-0.25

USO AXIAL				USO CORTANTE		USO FLEXIÓN				CHECK P+M	
f _{cp}	% USO	f _{tp}	% USO	f _{cz}	% USO	f _{rx}	% USO	f _{ry}	% USO	≤1.0	
Mpa	COMPRESIÓN	Mpa	TRACCIÓN	Mpa	CORTANTE	Mpa	FLEXIÓN X	Mpa	FLEXIÓN Y	x	y
-0.83	11.1%	0.00	0.0%	0.01	0.6%	-0.30	3.0%	-0.61	6.1%	0.04	0.07
-1.23	16.5%	0.00	0.0%	0.02	0.9%	-0.44	4.4%	-0.90	9.1%	0.07	0.11
-2.05	27.6%	0.00	0.0%	0.01	0.6%	-0.32	3.2%	-0.65	6.5%	0.10	0.13
-1.30	17.4%	0.00	0.0%	0.01	0.5%	-0.34	3.4%	-0.69	6.9%	0.06	0.09
-2.05	27.5%	0.00	0.0%	0.01	0.8%	-0.42	4.2%	-0.86	8.6%	0.11	0.15
-1.48	19.9%	0.00	0.0%	0.01	0.8%	-0.43	4.3%	-0.89	8.9%	0.08	0.12
0.00	0.0%	0.97	15.4%	0.01	0.4%	-0.16	1.6%	-0.33	3.3%	0.17	0.19
-0.96	13.0%	0.00	0.0%	0.00	0.3%	-0.22	2.2%	-0.44	4.4%	0.04	0.06
Controla:										0.6D+Ex	

5.6.3 Diseño de diagonal

De manera análoga a la columna, se realiza el diseño de la diagonal (D8), obteniendo una sección transversal de 135 x 798 mm, en la Tabla 14, se enseñan los resultados:

Tabla 14. Diseño diagonal MLE. Fuente: elaboración propia

EJE X SECCIÓN	SOLICITUDES					
	Comb	P	V2	V3	M2	M3
2		kN	kN	kN	kN m	kN m
	D	-0.59	0.23	-0.05	0.34	-0.19
	D+L	-0.70	0.25	-0.08	0.50	-0.20
	D+Ex	-156.77	0.16	-0.06	0.31	-0.37
	D+Ey	-60.32	0.21	-0.06	0.29	-0.26
	D+0.75Ex+0.75L	-117.81	0.19	-0.08	0.43	-0.33
	D+0.75Ey+0.75L	-45.47	0.22	-0.08	0.42	-0.25
	0.6D+Ex	-156.54	0.07	-0.04	0.17	-0.29
	0.6D+Ey	-60.08	0.11	-0.04	0.15	-0.18

USO AXIAL				USO CORTANTE		USO FLEXIÓN				CHECK P+M	
f _{cp}	% USO	f _{tp}	% USO	f _{cz}	% USO	f _{rx}	% USO	f _{ry}	% USO	≤1.0	
Mpa	COMPRESIÓN	Mpa	TRACCIÓN	Mpa	CORTANTE	Mpa	FLEXIÓN X	Mpa	FLEXIÓN Y	x	y
-0.01	0.4%	0.00	0.0%	0.00	0.1%	0.02	0.2%	0.14	0.9%	0.00	0.01
-0.01	0.4%	0.00	0.0%	0.00	0.1%	0.03	0.2%	0.21	1.3%	0.00	0.01
-1.46	95.5%	0.00	0.0%	0.00	0.1%	0.02	0.1%	0.13	0.8%	0.91	0.92
-0.56	36.8%	0.00	0.0%	0.00	0.1%	0.02	0.1%	0.12	0.8%	0.14	0.14
-1.09	71.8%	0.00	0.0%	0.00	0.1%	0.03	0.2%	0.18	1.2%	0.52	0.52
-0.42	27.7%	0.00	0.0%	0.00	0.1%	0.03	0.2%	0.17	1.1%	0.08	0.09
-1.45	95.4%	0.00	0.0%	0.00	0.0%	0.01	0.1%	0.07	0.5%	0.91	0.91
-0.56	36.6%	0.00	0.0%	0.00	0.1%	0.01	0.1%	0.06	0.4%	0.13	0.14
Controla:										D+Ex	

6 Conclusiones

El diseño estructural en madera laminada encolada, basado en pórticos arriostrados, ofrece un comportamiento eficiente frente a cargas sísmicas, siempre que se apliquen adecuadamente los criterios normativos nacionales e internacionales, como los contenidos en la NSR-10 y la norma chilena NCh1198.

La metodología de diseño por esfuerzos admisibles (ASD), complementada con factores de modificación, permite una evaluación detallada y realista del desempeño de los elementos estructurales de madera frente a solicitaciones combinadas (flexión, corte, compresión y tracción).

El análisis modal y espectral desarrollado para el caso de estudio reveló un adecuado control de derivas y distribución de fuerzas sísmicas, validando el uso de diafragmas semi-rígidos y arriostramientos diagonales en el sistema adoptado.

El uso de dimensiones iniciales basadas en normas regionales (como el Manual PADT-REFORT) fue útil para predimensionar los elementos, pero debió ajustarse, lo que confirma la necesidad de iterar el diseño estructural tras el modelado numérico.

La madera laminada encolada (MLE) clase 22H resultó apropiada para cubrir los requerimientos estructurales, siendo una solución industrial viable en Colombia por su resistencia, estabilidad dimensional y posibilidades de fabricación en diversas formas.

Aunque los pórticos arriostrados en madera presentan una menor ductilidad en comparación con los pórticos resistentes a momento construidos en concreto, su menor peso estructural implica una reducción significativa en las solicitaciones sísmicas, lo que favorece la eficiencia del diseño en zonas de amenaza sísmica intermedia. Esta característica, sumada a la posibilidad de prefabricación y montaje rápido, convierte a la madera en una solución estructural eficiente y adaptable. Además, al tratarse de un material renovable y con menor huella de carbono, la madera laminada encolada ofrece ventajas relevantes en términos de sostenibilidad ambiental, especialmente frente al concreto, cuya producción está asociada a emisiones significativas de CO₂.

Referencias

- American Wood Council (AWC). (2015). National Design Specification (NDS) for Wood Construction. Leesburg, VA: AWC.
- AIS. (2025). AIS 100-24: Diseño y construcción de edificaciones sismo-resistentes (AIS 100-24). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- ASTM International. (2019). ASTM D245-06(2019): Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber. West Conshohocken, PA: ASTM.
- Computers and Structures, Inc. (2024). *ETABS (Version 22.4.0)* [Software]. Computers and Structures, Inc.
- González, I. (2023). Diseño de Estructuras de Madera UCM 2023 [Playlist]. YouTube. https://www.youtube.com/playlist?list=PLCS1_rz8h3S5VxgFohEwT7y2BwfJzbrNZ
- ICONTEC. (2007). NTC 2500: Uso de la madera en la construcción. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- ICONTEC. (2010). NSR-10. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- INN – Instituto Nacional de Normalización. (2024). NCh1198.Of2024: Cálculo estructural – Madera – Criterios generales y requisitos. Santiago de Chile: INN.
- INN – Instituto Nacional de Normalización. (2023). NCh2165:2023 Madera estructural: Madera laminada: Clasificación estructural y requisitos de resistencia. Santiago de Chile: INN.
- INN – Instituto Nacional de Normalización. (2003). NCh433.Of1996 Modificada 2003: Diseño sísmico de edificios. Santiago de Chile: INN.