

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño y análisis comparativo de una nave industrial de madera laminada y de acero aplicado al contexto guatemalteco

Trabajo de graduación presentado por Daniel Esaú Xulú Ordoñez para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2024

Diseño y análisis comparativo de una nave industrial de madera laminada y de acero aplicado al contexto guatemalteco

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño y análisis comparativo de una nave industrial de madera laminada y de acero aplicado al contexto guatemalteco

Trabajo de graduación presentado por Daniel Esaú Xulú Ordoñez para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2024

Vo.Bo.:

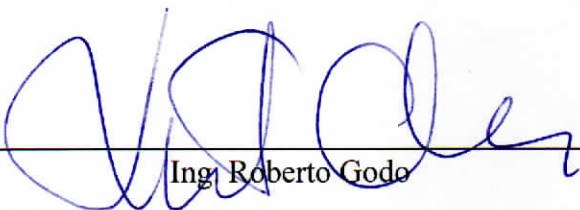
(f) 

Ing. Mario Rosada

Tribunal Examinador:

(f) 

Ing. Mario Rosada

(f) 

Ing. Roberto Godo

(f) 

Ing. Hugo Pallais

Fecha de aprobación: Guatemala, 11 de enero de 2024.

PREFACIO

El presente trabajo de graduación lo dedico a:

En primer lugar, a mi familia. Mi padre, madre y hermana. Quienes desde siempre me han apoyado y forjado como persona.

En segundo lugar, quiero agradecer a Isabel Gutiérrez de Bosh, quién creyó en mí y me brindó la oportunidad de estar acá.

En tercer lugar, agradezco al equipo de coaching de la Fundación Juan Bautista Gutiérrez, quienes me acompañaron en este proceso.

En cuarto lugar, agradezco a todos los profesionales que contribuyeron a mi formación universitaria. Especialmente a mi asesor, Ing. Mario Rosada, por su colaboración y tiempo.

En quinto lugar, deseo agradecer a Johana, que me acompañó en todo momento.

En sexto lugar, quiero agradecer a mis compañeros de promoción, quienes formaron parte fundamental de mi proceso de formación.

Por último, agradezco a cada persona que, a lo largo de mi vida, me ha brindado su tiempo y soporte para el cumplimiento de mis metas y anhelos.

CONTENIDO

	Página
PREFACIO	iv
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMEN	x
ABSTRACT	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	3
III. OBJETIVOS	5
A. Objetivo general.....	5
B. Objetivos específicos.....	5
IV. MARCO TEÓRICO	7
A. Madera.....	7
1 Estructuras del tronco.....	7
2 Estructuras de la madera	10
3 Propiedades físicas de la madera.....	11
4 Propiedades mecánicas de la madera	12
5 Tipos de madera	13
6 Secado de la madera.....	14
7 Propiedades estructurales de la madera.....	16
8 Agentes que afectan a la madera	18
B. Madera laminada encolada	23
1 Ventajas de la madera laminada.....	23
C. Acero	23
1 Ventajas del acero estructural.....	24
D. Marco normativo para el diseño de estructuras	25
1. NSE 2 demandas estructurales y condiciones de sitio.....	25
2. Eurocódigo 5.....	29
V. MARCO METODOLÓGICO	31
A. Etapa de investigación.....	31
B. Etapa de definición del proyecto	31
C. Definición e integración de cargas para las estructuras propuestas	31
D. Combinaciones de carga para las estructuras propuestas	32
E. Diseño de elementos de nave industrial de madera	33
F. Diseño de elementos de nave industrial de acero	40

G.	Comparación de resultados.....	41
VI.	RESULTADOS.....	42
A.	Secciones propuestas para la nave industrial de madera	42
B.	Secciones propuestas para la nave industrial de acero	42
C.	Peso de elementos de nave industrial de madera.....	42
D.	Costos totales y costos unitarios de materiales.....	42
VII.	DISCUSIÓN.....	43
VIII.	CONCLUSIONES.....	46
IX.	RECOMENDACIONES.....	47
X.	BIBLIOGRAFÍA.....	48
XI.	APÉNDICES.....	50

LISTA DE FIGURAS

Ilustración	Página
1 Partes de la madera	9
2 Tabla 3.7.1-1 del NSE 2 AGIES 2018.....	26
3 Mapa de zonificación sísmica de Guatemala NSE 2 AGIES 2018.....	27
4 Mapa de zonificación por viento de Guatemala NSE 2 AGIES 2018	28
5 Tabla 2.1 del EC5 Clases de duración de carga.....	30
6 Ficha técnica Lámina Ternium TRN-100.....	32
7 Tabla 6.2 EC5	34
8 Caracterización de Tectona Grandis realizada por ing. Jackeline Juárez	34
9 Rejilla trazada para la nave industrial en ETABS	36
10 Elevación del eje 1 de la nave industrial de madera	37
11 Elevación del eje A de la nave industrial de madera	37
12 Perfil de madera laminada GL 24h 200 mm x 400 mm.....	38
13 Perfil de madera sólida Teca 2 in x 8 in	38
14 Definición de cubierta de lámina	38
15 Definición de carga viva	39
16 Distribución de cargas de viento para análisis en X	39
17 Distribución de cargas de viento para análisis en Y	39
18 Obtención de momento máximo en la estructura	40
19 Análisis estructural de modelo 3D de estructura de acero	40
20 Secciones propuestas para estructura de madera.....	42
21 Secciones propuestas para estructura de acero.....	42
22 Pesos de elementos de GL24h y madera sólida Teca	42
23 Pesos, costos unitarios y costos totales por materiales.....	42

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se realiza un análisis de la viabilidad de la madera laminada como material estructural en Guatemala mediante el diseño de una nave industrial. La estructura planteada consta de sistemas de marcos de madera laminada especiales a momento y un techo a dos aguas. La nave industrial consta de 12 metros de ancho, 20 metros de largo y 5 metros de altura máxima. Esta propuesta de estructura parte desde la investigación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la madera laminada que lo hacen competente como material estructural en edificaciones. La razón de realizar este análisis se debe a la ausencia del uso de la madera como material estructural en Guatemala debido a la falta de estandarización del material y de profesionales que busquen hacer uso del mismo. Como punto de referencia se empleó otro material estructural, que para este trabajo de graduación fue el acero. Este material fue seleccionado por ser relativamente reciente en el mercado constructivo de Guatemala. Parte del análisis es estudiar el funcionamiento de cada material aplicado a una construcción en específico. Para ambas estructuras diseñadas se mantuvo la misma tipología y dimensiones. Los diseños se realizaron cumpliendo con las normativas existentes en el país y, en su defecto, normativas existentes en el contexto internacional. Finalmente, se realizó un análisis de la competitividad de la madera en el mercado constructivo con la información recopilada.

ABSTRACT

This research shows an analysis of the viability of laminated wood as a structural material in Guatemala through the design of an industrial warehouse. The proposed structure comprises special moment laminated timber frame systems and a gabled roof. The industrial warehouse is 12 meters wide, 20 meters long and 5 meters maximum height. This structure proposal is based on the investigation of the physical, chemical, and mechanical properties of laminated wood that make it competent as a structural material in buildings. The reason for carrying out this analysis is due to the absence of wood as a structural material in Guatemala due to the lack of standardization of the material and of professionals who seek to use it. Another structural material was used as a reference point for this graduation work, that in this case was steel. This material was selected because it is relatively recent in the Guatemalan construction market. Part of the analysis is to study the functioning of each material applied to a specific construction. For both designed structures, the same typology and dimensions were maintained. The designs were made in compliance with existing regulations in the country and, failing that, existing regulations in the international context. Finally, an analysis of the competitiveness of wood in the construction market was carried out with the information collected.

I. INTRODUCCIÓN

Cuando se piensa en construcción de madera en Guatemala no es posible decir el nombre de algún edificio que cuente con ella como principal material estructural. El uso de la madera en Guatemala se limita a acabados arquitectónicos y construcciones de baja complejidad. Cabe mencionar que la madera no está estandarizada en Guatemala, por lo que sólo es clasificada por su tipo, siendo las maderas más usadas las coníferas. A su vez, Guatemala es un país que cuenta con gran cantidad de recurso forestal, siendo uno de los principales pulmones de oxígeno de América. Siendo así, y considerando el alto nivel de sostenibilidad de la madera (cuando es bien gestionada), llega a ser muy ilógico que la madera no haya tenido un desarrollo como material estructural en Guatemala.

Por otra parte, hay que considerar que el desarrollo de materiales de construcción va relacionado al contexto social, económico y político de la región. Guatemala es un país con altos índices de pobreza. Según el censo del 2018, sólo el 64.7 por ciento de las viviendas del país son construidas con block y ladrillo. Mientras que el otro 35.3 por ciento está construido con materiales poco resistentes, como lámina metálica, madera no estructural e incluso adobe, pese a haber sido prohibido por completo luego del terremoto del año 1976. Por lo tanto, costear vivienda de materiales resistentes, como concreto reforzado y acero estructural, son oportunidades reservadas para una minoría de la población.

Otro tema interesante sobre los materiales de construcción es analizar su huella de carbono. Es decir, la cantidad de carbono que se emite por su uso. Los materiales que requieren mayores procesos químicos e industriales tienden a emitir mayor cantidad de carbono. En la actualidad, el tema de la sostenibilidad es cada vez más importante, por lo que analizar este factor es altamente significativo.

Partiendo del contexto descrito anteriormente, se plantea la necesidad de desarrollar alternativas de materiales constructivos para Guatemala. El costo de producción del concreto y del acero estructural superan los costos de producción de madera, siendo estos comparados en igualdad de condiciones. Es por ello que este trabajo de graduación busca estudiar la viabilidad de la madera como material constructivo aplicado al contexto guatemalteco.

II. JUSTIFICACIÓN

En Guatemala el material constructivo predominante en los últimos años ha sido el concreto reforzado. Desde el terremoto sucedido en 1976 en la Ciudad de Guatemala, el concreto reforzado sustituyó los materiales constructivos de la época: adobe y madera. Si bien, en el pasado se construyó con madera, la complejidad y diseño de dichas construcciones era muy bajo como para considerar que fue empleado alguna vez como un material de diseño estructural. Desde ese entonces, con la creciente demanda de construcciones en concreto reforzado, el uso de la madera para construcciones fue quedando en el olvido, siendo este usado principalmente para acabados y viviendas de diseño pobre y no como un elemento plenamente estructural. Posteriormente, se implementó el uso del acero como elemento estructural en múltiples edificaciones, dejando la madera casi totalmente en el olvido.

El acero ha sido un material estructural que fue cobrando más fuerza con los años. En Guatemala, el desarrollo de estructuras de acero fue bastante tardío en comparación con el resto del mundo. Sin embargo, ha logrado hacerse su lugar en el mercado constructivo actual, haciéndolo una excelente opción para diferentes tipos de construcciones. La resistencia del acero estructural es mayor que su densidad, lo que le permite soportar una cantidad sustancial de peso. Su impresionante durabilidad es la razón por la que este material constituye la estructura de soporte principal de edificios y puentes. Además, el acero estructural es capaz de soportar tensiones extremas y presiones externas, lo que lo hace ideal en la construcción naval. (of Standards & Technology, 2005)

Por otra parte, con el paso de los años y desde tiempos remotos, en otras regiones del mundo la madera se ha usado como material principal en muchas estructuras. La madera presenta una gran gama de ventajas, llegando a ser usado no sólo como un material para acabados, sino como elemento principal de estructuras tan complejas como podrían imaginarse. Su uso se ha extendido hasta construcciones diseñadas para resistir todo tipo de desastres naturales, incluso para regiones sísmicas, dando resultados altamente satisfactorios. El gimnasio en Sisikon, diseñado como una pila de tableros, pudo demostrar su valía como una contrapropuesta a una variante en hormigón armado, llegando a prevalecer y reemplazar un edificio antiguo (Natterer, 2011). Si bien, en Guatemala la madera no ha sido tomada como una opción para la elaboración de edificaciones; desde hace años en otros lugares del mundo ha sido estudiada para el diseño de forma eficaz. Además, la madera es un elemento que ha comenzado a usarse desde hace varios años como una propuesta ecológica y sostenible. En este campo, la madera se vuelve un material sumamente interesante de analizar, dado que cuenta con una ventaja enorme en comparación con los demás materiales constructivos. A diferencia de otros materiales, la madera retiene dióxido de carbono en lugar de emitirlo. Esta propiedad es sumamente importante al hablar de construcción, dado el fuerte impacto negativo que el campo constructivo suele tener en el ambiente. (Martín, 2001)

Como país, el avance a nivel constructivo ha sido lento y conservador. Sin embargo, la búsqueda de propuestas innovadoras y sostenibles estará cada vez más presente en la demanda constructiva del país. Es por ello que la generación de investigación e información sobre este material es altamente innovador y un campo con muchas posibilidades. Sin embargo, la fuerte competencia que

las construcciones de madera deben sostener hoy con las metálicas o de concreto armado, impone a este material un aprovechamiento integral de sus propiedades físicas y mecánicas, y la eliminación de todos aquellos factores que influyen en su conservación y duración. (Díaz, 2012) Partiendo de dicha premisa, se propone generar la comparación entre la madera y otro elemento estructural del mercado constructivo guatemalteco que tenga una implementación relativamente reciente: el acero.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Diseñar una nave industrial empleando madera laminada como elemento estructural principal acorde con los lineamientos del Eurocódigo5 y realizar un análisis comparativo de la misma estructura empleando el acero como elemento estructural principal.

B. Objetivos específicos

- Seleccionar una tipología constructiva para el diseño de una nave industrial de madera laminada y una nave industrial de acero.
- Identificar los lineamientos estipulados para el diseño de una nave industrial de madera laminada y una nave industrial de acero según las normativas correspondientes.
- Diseñar elementos estructurales para una nave industrial de madera laminada y una nave industrial de acero.
- Evaluar las ventajas y desventajas de una nave industrial de madera laminada y una nave industrial de acero contextualizadas al mercado constructivo guatemalteco.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Madera

Como bien se sabe, la madera es un recurso natural extraído de los troncos de los árboles. Por tanto, para entender el material primero hay que empezar por describir las propiedades del elemento del que proviene. El árbol es un organismo vivo que consta de una estructura de soporte natural formada por madera, que le permite desarrollar sus funciones vitales. La madera, por naturaleza, se conforma de subestructuras que le otorgan distintas propiedades con aplicaciones ingenieriles. Dichas propiedades varían dependiendo de la especie que se tenga, siendo esto algo a tomar en cuenta para los diversos usos que se le puedan dar a la madera. (Herzog, 2004)

A su vez, al hablar de árboles también es importante entender el concepto de los bosques. Los bosques se pueden entender como aquellos territorios en los que existe una cantidad considerable de árboles y otras plantas en un ambiente de correlación. Así como la especie, las zonas geográficas y climas en las que se desarrolla dicha especie pueden generar variaciones en sus propiedades y comportamientos. Por ello es importante comprender el entorno en el que la madera ha crecido y ha desarrollado sus propiedades mediante el estudio de los bosques. Los bosques pueden ser generados por la intervención humana, dedicados para la explotación forestal con el fin de dirigir el crecimiento de los árboles para proveer de madera en cantidad suficiente a alguna necesidad industrial. A su vez, los bosques pueden ser homogéneos, si cuentan con una sola especie arbórea, o heterogéneos, si cuentan con más de una especie arbórea. (Aguilar, 2011)

Desde las épocas más remotas, la madera ha sido un elemento vital para la construcción de herramientas y estructuras fundamentales para el desarrollo de la civilización humana. El estudio de este material ha permitido conocer sus múltiples usos y virtudes. La variedad de especies existentes y la variedad de entornos en los que esta crece permite obtener maderas con una gran variedad de propiedades. Todo esto hace de la madera un material altamente versátil y con características que le permiten ser considerado para aplicaciones estructurales dentro del campo de la ingeniería. (Suirezs, 2009)

1. Estructuras del tronco

La madera se encuentra compuesta por células. Estas cumplen distintas funciones dependiendo del árbol de origen. Sin embargo, las funciones que suelen cumplir son las de conducir nutrientes, dar sostén al árbol y almacenar nutrientes. Dependiendo de la especie, las células pueden cumplir una de estas funciones o todas a la vez. Por lo general, las maderas coníferas presentan una estructura más simple que la de las maderas frondosas. (Aguilar, 2011) La madera se encuentra compuesta por los siguientes componentes principales:

a. La corteza:

Es la parte más exterior del tronco. La principal función de la corteza es proteger al árbol de desecamiento, ataques fúngicos o fuego, además de que almacena y conduce nutrientes. Las

principales aplicaciones que se le dan a la corteza son la obtención de algunos alimentos, productos farmacéuticos y para perfumería. Se subdivide en dos partes.

1) Corteza interna:

La parte conformada por floema es una capa interna y posee corteza viva. (Aguilar, 2011) Su principal función es transportar nutrientes.

2) Corteza externa:

La parte conformada por ritidoma o cortex es la parte que reviste el tronco y está conformada de corteza muerta. (Aguilar, 2011) Es la parte de la corteza que cumple la función de protección a agentes atmosféricos, como viento, sol y lluvia. Posee propiedades aislantes, tanto térmicas como acústicas. (Cruz, 2011)

(Giménez, 2005)

b. El cambium:

Esta parte es la que se encuentra entre la corteza y el xilema. Posee células de crecimiento del árbol. En la parte exterior se genera corteza y en la parte interior se genera leño. (Cruz, 2011)

c. La madera:

También conocida como xilema o leño, corresponde a la parte más sólida del árbol, situada debajo de la corteza. Se puede definir como todo tipo de tejido formado desde el cambium hacia el interior del tronco. Se divide en tres elementos principales.

1) La albura:

Es una de las dos zonas definidas de la madera del árbol. Esta zona posee células vivas y material de reserva. Es una zona de transporte de una alta cantidad de agua y sales en solución, desde la raíz del árbol hasta sus hojas, además de ser una zona de reservorio de sustancias. Es la parte de leño más expuesta y externa, además de ser la zona del tronco que presenta una menor dureza y resistencia. Por dichas razones, suele ser descartada en varios usos industriales. (Giménez, 2005)

2) El duramen:

Es la otra zona definida de la madera del árbol. Se encuentra definida como la región dispuesta entre la médula (eje central) y la albura. El duramen es la zona del tronco que se encuentra biológicamente inactiva, dado que ya no cumple funciones de transporte y almacenamiento de líquidos de forma primordial. Su principal función es brindar soporte y estructura al árbol. También presenta una coloración más oscura en comparación con la albura. Esto se debe a que el duramen se forma por el envejecimiento del árbol, habiendo un constante incremento de la zona activa y una transformación de la zona activa que va perdiendo su vitalidad, convirtiéndose en duramen. Por lo tanto, las aguas, sales y nutrientes que eran transportados previamente a convertirse en duramen se transforman en taninos, resinas, grasas, carbohidratos y otras sustancias, oscureciendo el duramen. A su vez, esta carencia de sustancias nutritivas y su tejido compacto hacen que el duramen sea la región más dura y resistente del leño, tanto por ser más densa como por ser más resistente al ataque de hongos

e insectos. Por ello, esta parte del tronco es la de principal interés para la extracción de material destinado a usos industriales y constructivos. (Giménez, 2005)

3) La médula:

Es la parte central del leño. Está compuesto de tejido blando y poroso. A partir de este elemento se ramifican todos los radios medulares de las ramas hacia la periferia. Esta parte del leño es susceptible al ataque de insectos y hongos también. (Cruz, 2011)

4) Los anillos de crecimiento:

Se les denomina así a las marcas generadas por las células al final de cada año de vida del árbol. Por dicha razón también pueden ser conocidos como anillos anuales. Los anillos de crecimiento son muy útiles para tener una idea sobre el crecimiento que ha tenido un árbol. Dependiendo del espesor del anillo, es posible identificar algunas características sobre el desarrollo que ha tenido determinado árbol. Un mayor espesor del anillo indica crecimiento rápido y condiciones favorables para la planta. Por otra parte, un menor espesor del anillo indica un crecimiento lento y condiciones desfavorables para la planta. Los anillos de crecimiento se conforman de dos partes, un leño temprano y un leño tardío. El leño temprano se produce en el inicio del año del árbol, el cual corresponde a la primavera o la época en la que la planta reinicia su actividad vital. Esto genera que las células producidas en este lapso presenten paredes delgadas, lumen grande y coloración clara. Posteriormente, a medida que el período vegetativo llega a su fin la actividad vital de las células disminuye, generando paredes más espesas, lúmenes menores y tonalidades más oscuras.

En algunas ocasiones no es muy fácil distinguir los anillos de crecimiento. Dada la importancia que estos tienen en el entendimiento del comportamiento del crecimiento del árbol, se han ideado diferentes metodologías para poder identificarlos. Algunas de las técnicas existentes son la aplicación de colorantes, inmersión en ácido, exposición en llama de un mechero Bunsen, medición de la intensidad luminosa, aparatos test y exposición de rayos X. (Giménez, 2005)

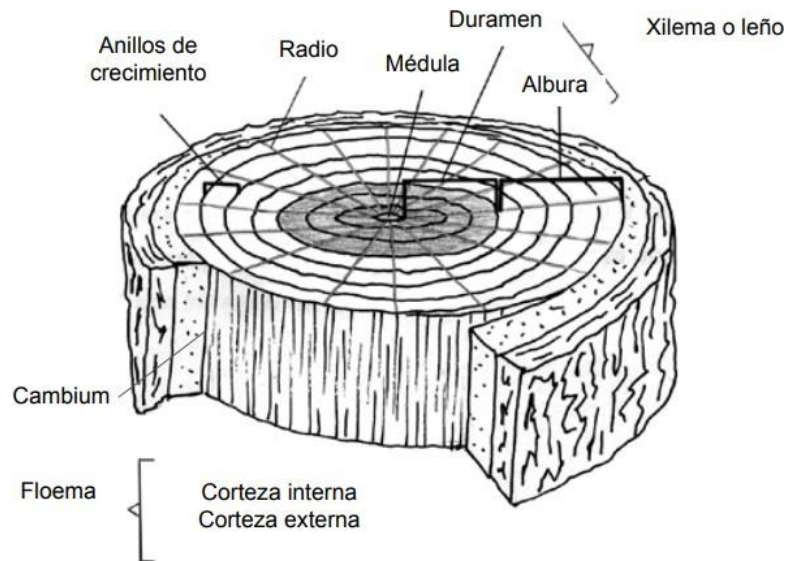


Figura 1. Partes de la madera

2. Estructura de la madera

La madera, la cual corresponde al material leñoso del árbol, posee una anatomía que es importante reconocer. Se conforma por diferentes elementos que cumplen funciones específicas y le permiten tener sus respectivas propiedades.

a. La corteza:

Este elemento es de vital importancia para la madera. Le permite generar varias de sus funciones vitales, además de que es el elemento que define propiedades fundamentales como su densidad, resistencia mecánica, contracción e hinchamiento, capacidad de aislamiento acústico y eléctrico, así como su flexibilidad. En términos básicos, la fibra es la que le proporciona la resistencia mecánica al árbol. La fibra se orienta en sentido paralelo al eje longitudinal del tronco. Además, este elemento también define la trabajabilidad de la madera. (Cruz, 2011)

b. Los vasos o poros:

Son los elementos encargados de transportar el agua y todo tipo de sustancias que van desde la raíz hasta las hojas del árbol. Al igual que la fibra, se orientan en el sentido paralelo al eje longitudinal del tronco. Los poros juegan un papel muy importante en el proceso de secado de la madera, pues son los encargados de canalizar el agua en dicho proceso. Dependiendo del tipo de poro que se tenga se tendrá diferentes efectos en el secado. (Cruz, 2011)

1) Poros pequeños o escasos:

Ocasiona una gran dificultad en la salida del agua de la madera en el secado. Se suele evidenciar en especias como la Quinilla o en la Capirona.

2) Poros tapados:

Estos pueden taparse por gomas abundantes o por la presencia de cristales y sílice. Dificultan la salida del agua en la madera al momento del secado. Se evidencian en especies como el Nogal y la Moena Rosada.

3) Poros muy grandes o abundantes:

Permiten que el proceso de secado se realice más rápidamente. Es evidente en especies como el Tornillo. (Cruz, 2011)

c. Los radios:

Son células que tienen la principal función de generar un transporte horizontal de sustancias. Además, también cumplen la función de almacenar las reservas de sustancias. Estas células se orientan en el sentido perpendicular al centro del árbol, es decir, que se dirigen desde la médula hacia la corteza. A este tipo de orientación se le dice sentido radial. (Cruz, 2011)

d. Parénquima longitudinal:

Son células que son más cortas y más claras que las fibras. La principal función de este tipo de células es conducir y almacenar sustancias. Al igual que la fibra y los vasos, se orientan en sentido paralelo al eje longitudinal del tronco. Su estructura es similar a la de una red. (Cruz, 2011)

3. Propiedades físicas de la madera

La madera es un material que posee diversas propiedades físicas. Se define propiedad física como toda aquella cualidad propia del elemento en sí, en este caso madera, que puede cuantificarse en un sistema físico, mediante valores comparables con un patrón determinado. (Edu.lat, 2022) Las propiedades físicas pueden verse afectadas por diversos factores. Algunos de ellos son la disposición y orientación de los componentes de la pared celular, la cantidad de sustancias básicas que conforman las paredes celulares, porcentaje de material celulósico, composición química de las sustancias básicas y el contenido de agua en la madera. (Suirezs, 2009). Entre algunas de las propiedades físicas más importantes de la madera se encuentran.

a. Peso Específico:

Es la relación entre el peso de la madera y su volumen. Esta propiedad posee una gran importancia, ya que influye en la gran mayoría de características físicas y mecánicas de la madera. Esta propiedad incluso permite tener una muy útil clasificación de la madera, dado que por lo general, las maderas más pesadas son más resistentes, elásticas y duras, mientras que las maderas livianas suelen ser de más difícil trabajabilidad y mayor variación volumétrica. A su vez, existen dos tipos de pesos específicos, siendo estos el peso específico real y el peso específico aparente.

1) Peso específico real:

Esta medida se define como la razón entre el peso del material y el volumen real ocupado por el material leñoso. Es decir, sin considerar los poros. Por lo general esta medida suele estar entre el rango de 1.53 y 1.56 gr/cm³ para todas las especies estudiadas a día de hoy.

2) Peso específico aparente:

Esta medida consiste en la razón entre el peso del material y el volumen ocupado, incluyendo el volumen de los poros, considerando que la medición se realice en las mismas condiciones de humedad. Este valor suele estar en un rango entre 0.1 a 1.4 gr/cm³.

b. Humedad:

Se refiere al contenido de agua de la madera que se presenta bajo tres formas, libre, imbibición y constitución. El contenido de humedad influye sobre las propiedades físicas, propiedades mecánicas, resistencia a agentes biológicos, rendimiento y calidad de la celulosa de la madera. (AGA, 2014) El árbol posee la mayor cantidad de agua al momento de recién cortarlo, luego pierde su humedad de forma progresiva. Además, la humedad que tendrá el árbol dependerá en gran medida de la época del año en la que se corte, la región a la que pertenezca y la especie de árbol de la que se trate. Por lo general, las maderas más livianas, al tener mayor cantidad de poro, suelen tener una mayor cantidad de agua en comparación que las maderas pesadas. Existen tres formas diferentes en las que se puede encontrar el agua en la madera:

1) Agua libre:

Corresponde al agua que se encuentra retenida en las cavidades celulares o en el lumen de los elementos vasculares. Es perdida mediante la evaporación, pues no es retenida por fuerzas demasiado resistentes. Cuando la madera logra perder esta humedad la madera llega a su punto de saturación de las fibras, el cual se encuentra comprendido entre un veintiuno por ciento y un treinta y dos por ciento. En este punto, las paredes celulares se encuentran completamente saturadas. La

pérdida de esta agua no afecta en las propiedades físicas ni mecánicas de la madera.

2) Agua higroscópica:

Es el agua que comienza a perderse luego de que toda el agua libre se pierde. Alcanza sus niveles de equilibrio al llegar a un rango de entre doce por ciento y dieciocho por ciento de humedad. El valor de equilibrio dependerá de las características del entorno en el que se realice el secado. La pérdida de esta agua sí afecta en las características físicas de la madera, como sus dimensiones, y en sus resistencias mecánicas.

3) Agua de constitución:

Corresponde a toda aquella agua que forma parte de la estructura química de las paredes celulares de la madera. Sólo es posible perderla mediante la destrucción de las células de la madera, es decir, destruyendo la madera.

(Suirezs, 2009)

c. Contracción o hinchamiento:

Se refiere al movimiento de la madera cuando reduce o aumenta su tamaño, al disminuir o aumentar el contenido de humedad por debajo del punto de saturación de las fibras. La variación del volumen por cada uno por ciento de variación de la humedad se denomina coeficiente de contracción constante que es característico en cada especie.

d. Conductibilidad térmica:

Es el coeficiente de la cantidad de calor que fluye de un material sometido a un gradiente de temperatura y se expresa en Kcal/m.h.°C.; o Vatios/m²°C. La conductibilidad térmica de la madera es directamente proporcional al contenido de humedad y a la densidad. La cantidad de calor conducida por la madera varía con la dirección de la fibra, el peso específico, la presencia de nudos y rajaduras. La madera seca es un buen aislante térmico.

e. Acusticidad:

Esta propiedad está íntimamente relacionada con la estructura fibrovascular de la madera, su naturaleza elastoplástica y su densidad. La madera presenta buena capacidad para absorber sonidos.

4. Propiedades mecánicas de la madera

El comportamiento mecánico de la madera es variable. Este puede cambiar en relación a la orientación de la fibra de la madera. Desde ese punto de vista, se tienen los siguientes tipos de análisis.

a. Paralelo:

Es el análisis de las distintas resistencias de la madera con esfuerzos aplicados en el mismo sentido de dirección de la fibra de la madera.

b. Perpendicular:

Es el análisis de las distintas resistencias de la madera con esfuerzos aplicados en un ángulo de 90° en relación a la dirección de la fibra de la madera.

c. Radial:

Es el análisis de las distintas resistencias de la madera con esfuerzos aplicados en sentido perpendicular a la dirección de crecimiento de los anillos de la madera.

5. Tipos de madera.

La madera puede clasificarse de distintas maneras. Uno de las clasificaciones más populares es por su dureza. Las maderas se pueden clasificar en dos grandes grupos, maderas blandas y maderas duras.

a. Maderas blandas:

Se conocen así a las maderas que son fáciles de trabajar y dúctiles. Esto no quiere decir que sean maderas frágiles o de poca resistencia. Por lo general, estas maderas suelen proceder de árboles de crecimiento rápido o acelerado. Algunos árboles que poseen este tipo de madera son el pino, álamo, olmo, ciprés, abeto y cedro. Sin embargo, si bien no son frágiles, sí

b. Maderas duras:

Poseen una resistencia mayor que la de las maderas blandas. Por ende, también suelen resultar más costosas que las maderas blandas. Se suelen obtener de árboles que presenten un crecimiento más lento. Por lo tanto, son más difíciles de obtener que las maderas blandas. A diferencia de las maderas blandas, las maderas duras son más difíciles de trabajar, ya que poseen un aspecto externo más irregular. Aunque pueda parecer que poseen más aspectos negativos, también tienen cualidades positivas, como su alta resistencia y durabilidad, además de ser mejores estéticamente. Algunos ejemplos de madera dura son la caoba, roble, nogal, teca, olivo, cerezo y fresno.

c. Maderas laminadas:

Por otra parte, también existen maderas fabricadas, con el fin de generar materiales con características superiores a las de la madera sólida tradicional. La madera laminada en sus orígenes fue empleada y fabricada con la finalidad de fabricar muebles y otros productos de índole no estructural. Sin embargo, en el año de 1909 el Sr. Hetzer en Suiza realizó su primera aplicación estructural. Este hecho abrió todo un campo para la madera laminada, permitiendo la construcción de estructuras de madera con mayores luces y aplicaciones estructurales más extensas que las de la madera sólida tradicional. La aplicación de la madera laminada llevó a la construcción de grandes estructuras de madera en países como Estados Unidos, Canadá, Finlandia, Suecia, Noruega, Holanda, Alemania y Bélgica. (Pérez, 1992)

La madera laminada consiste en la unión de tablas a través de sus cantos, caras y extremos, con su fibra en la misma dirección, a modo de formar un elemento no limitado en su cuadría ni en largo,

haciendo que funcione como una sola unidad estructural. Existen diferentes tipos de madera laminada. Una de sus clasificaciones es según el material o tipo de unión que se emplee para su fabricación, pudiendo ser esta clavada, pernada o encolada, la cual es la madera laminada a la que se hará referencia. (Pérez, 1992)

Las vigas de madera laminada encolada pueden clasificarse de diferentes formas. La primera clasificación es según la cantidad de tablas que conforman su ancho. A su vez, las vigas de madera laminada encolada pueden clasificarse según la orientación de pegado de las tablas. Esta puede ser horizontal o vertical.

6. Secado de la madera.

El secado de la madera es un proceso que busca eliminar la cantidad excesiva de agua presente en la madera. Esto se realiza con la intención de estabilizar la madera para un óptimo procesamiento y trabajabilidad. En los procesos de secado de la madera, ya sea mediante métodos naturales o artificiales, el agente deshidratante principal es el aire, el cual, al circular, elimina la humedad superficial de la madera. En el secado artificial, se mantienen condiciones climáticas específicas en una cámara para asegurar que el aire interno esté constantemente seco y retire la humedad superficial de la madera. Esto se logra suministrando calor mediante la regulación de la temperatura y controlando la humedad relativa del aire dentro de la cámara con la ayuda de ventiladores y sistemas de rocío de agua. Por otro lado, en el secado natural, no se pueden controlar las condiciones climáticas, como la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, pero se busca optimizar la ventilación y la circulación del flujo de aire para favorecer el proceso. (Cruz, 2011)

a. Beneficios de un buen proceso de secado:

Un correcto proceso de secado permite contar con ciertas propiedades en la madera que pueden ser muy ventajosas.

- 1) Ayuda a mejorar la estabilidad dimensional y el rendimiento de la madera. Cuando la madera es secada correctamente mantiene sus dimensiones durante su transformación y en todo el proceso de manufactura.
- 2) Se disminuye la cantidad de defectos, arqueamientos, despegues, abertura de uniones, rajaduras, etc.
- 3) Se incrementa la resistencia física, mecánica y biológica, siendo esta más resistente a ataques de hongos e insectos.
- 4) Permite a la madera presentar una mejor trabajabilidad y además permite tener un mejor acabado final de los diferentes productos de madera. (CITE madera, 2009)

b. Factores que incrementan la calidad del secado:

Como ya se mencionó, un buen secado es importante para una buena calidad de madera. Sin embargo, para lograr un adecuado proceso de secado es importante asegurar determinadas condiciones de la madera.

- 1) Especie de la madera:

Para propiciar un buen proceso de secado es importante no mezclar maderas provenientes de especies distintas. Cada especie responde de diferente manera a los diferentes procesos y tiempos de secado.

2) Espesor de la madera:

Es importante no mezclar tablas que posean diversos espesores, ni porrumas ni por cargas, en caso del secado artificial. Lo mejor siempre es secar madera de una especie y un espesor determinado. En caso se tenga que realizar alguna combinación de espesores, se recomienda que este no supere la media pulgada. Además, tampoco se recomienda secar espesores con más de dos pulgadas de diferencia, ya que no es para nada eficiente.

3) Contenido de humedad inicial de la madera:

Si bien este es un factor que puede variar bastante y es más difícil de controlar, se recomienda que en toda medida de lo posible se intente mantener una humedad inicial homogénea en las piezas a secar. De no tener homogeneidad en este aspecto se puede tener que al terminar el proceso de secado algunas tablas no hayan llegado al contenido de humedad requerido. O, por otra parte, se puede generar una resequeidad en la madera, lo cual provoca rajaduras en las tablas.

4) Anisotropía e higroscopicidad:

Es importante tomar en cuenta esta característica de la madera, ya que puede generar cambios en las dimensiones de la madera. Por tanto, es recomendable que se considere un excedente de un 1/16 a 1/8 en el espesor, dependiendo de la especie que se esté trabajando.

5) Contenido de humedad final:

La temperatura del ambiente en el cual se seque la madera es muy importante. Por lo tanto, se recomienda que se evalúe la temperatura del ambiente en el que se vaya a usar la madera, y respecto a ello, brindar a la madera la cantidad de humedad necesaria en el proceso de secado. Si la madera estará destinada a lugares más calurosos, se recomienda brindarle una cantidad de humedad mayor a los lugares en los que la madera se encontrará en ambientes más húmedos. De esta forma, no se permite equilibrar la humedad de la madera al momento de que se encuentre ya en el lugar de destino del producto.

6) Zona de extracción de la madera:

Como ya se ha mencionado, la zona de la cual proceda la madera otorga determinadas características al material. Por lo tanto, se recomienda tomar en consideración manejar cargas que tengan el mismo lugar de procedencia, a modo de poder homogenizar las características como densidad, humedad dureza, etc., de la madera. (CITE-madera, 2009)}

c. Consecuencias de un mal proceso de secado:

Un mal proceso de secado puede derivar en una serie de defectos en la madera.

1) Grietas superficiales:

Estas se producen por un resecamiento de la capa superficial de las tablas debido a un gradiente de secado demasiado alto al inicio del proceso de secado.

2) Colapso de la madera:

Este es causado por un proceso de secado abrupto de la capa superficial de la madera, como producto de un gradiente de secado muy alto en dicho proceso.

3) Cambios en la coloración:

En ocasiones la madera llega a presentar una coloración azulada o una serie de manchas. Estos efectos son causados por una inadecuada circulación de aire entre las tablas y un exceso de humedad en la cámara de secado o ya sea en el ambiente en el cual se está realizando el secado. Esta humedad deriva en la propagación de hongos cromógenos. Si bien esto afecta en la coloración de la madera no se afecta considerablemente su estructura.

4) Deformaciones de la madera:

Estos pueden ser alabeos, abarquillados, arqueaduras, encorvaduras o torceduras. Estos defectos se presentan por un mal emparrillado. Es decir, una inadecuada distribución de las cargas sobre las tablas durante el secado o su almacenamiento previo a este proceso. (CITEmadera, 2009)

7. Propiedades estructurales de la madera.

a. Resistencia a tensión:

La tensión resulta de la aplicación de fuerzas hacia afuera del cuerpo en los extremos de este. El resultado de la aplicación de un esfuerzo de tensión es la elongación y estrechamiento del material en la dirección de la fuerza aplicada. Estas acciones son lo opuesto a las fuerzas de compresión. La madera posee una alta resistencia a tensión en el sentido paralelo a la fibra. Esto quiere decir que la madera puede soportar altas fuerzas de tensión si estas se aplican en dirección paralela al sentido en el que apunta la fibra de la madera. Si bien, puede ser una desventaja presentar resistencia a tensión sólo en un sentido, también es importante mencionar que no es común aplicar tensión en ambos sentidos de la madera. Sin embargo, sigue siendo una cualidad a tomar en cuenta al momento de realizar diseños en madera a tensión. La resistencia a tensión de la madera depende directamente de la naturaleza de la madera y el arreglo de sus fibras. Las fallas a tensión que ocurren en la madera suelen manifestarse cuando esta es sometida a flexión. En especial si el material se encuentra en condiciones secas.

b. Resistencia a compresión:

Consiste en la capacidad de la madera en resistir las fuerzas externas que se dirigen hacia el centro del cuerpo del material. Al igual que la resistencia a tensión, la resistencia a compresión de la madera puede manifestarse en forma paralela a las fibras o perpendicular a ellas. La madera posee una mayor resistencia a compresión cuando las fuerzas de compresión se manifiestan de forma perpendicular a la fibra de la madera. La madera no posee una alta resistencia a compresión a esfuerzos paralelos a la fibra, por lo que siempre es ideal considerar dicha característica al momento de diseñar un elemento de madera a compresión. (Vargas, 2021)

c. Resistencia al corte:

Los esfuerzos de este tipo se manifiestan cuando se aplica una fuerza que compacta las fibras de la madera. Este tipo de esfuerzo puede manifestarse de dos maneras diferentes. La primera es de forma perpendicular a la fibra. A medida que la fuerza aumenta de igual forma se incrementa la densidad del material. Estos esfuerzos ocasionan irregularidades en la superficie y muchas veces esa es la razón de la falla en el material. Por otra parte, este efecto también puede presentarse de forma paralela a la fibra. Otra forma de definir la resistencia a corte de la madera es la capacidad que tiene el material a resistir la acción de las fuerzas paralelas y opuestas que tienden a producir deslizamientos de unas fibras con respecto al resto de fibras. (Vargas, 2021)

d. Resistencia a flexión:

La resistencia de flexión en la madera combina los tres tipos de esfuerzo mencionados anteriormente, tensión, compresión y corte. Se define también como la capacidad que posee la madera para resistir las cargas de deflexión, al ser estas aplicadas en dirección perpendicular a las fibras. La resistencia a flexión implica un valor importante, denominado el módulo de ruptura, el cual corresponde al valor medido de esfuerzos que generan la falla de la madera ante este tipo de esfuerzos. (Vargas, 2021) La resistencia a la flexión puede verse afectada por diversos factores. Algunos de estos factores son:

1) Inclinación de la fibra:

Esta no suele afectar mucho en la resistencia a corte. Sin embargo, la resistencia a flexión y tracción comienzan a evidenciar una disminución significativa al contar con una inclinación de la fibra superior a 1/25. Además, las inclinaciones de la fibra superiores a 1/10 también generan una disminución en la resistencia a compresión. Estos valores son importantes a considerar, ya que la flexión combina esfuerzos de tensión y compresión.

2) Peso específico:

La flexión y la densidad poseen una relación lineal, por lo que el peso específico del material afecta de forma proporcional su resistencia a flexión. Sin embargo, existen maderas que no responden del todo a esta relación debido a sus elevados niveles de resina.

3) Contenido de humedad:

La resistencia a flexión alcanza su máximo nivel en un porcentaje de humedad del cinco por ciento. Superior a dicho nivel, la resistencia comienza a decrecer, con un comportamiento lineal en ciertos tramos.

4) Temperatura:

A medida que se tienen temperaturas más altas la resistencia a flexión decrece gradualmente.

5) Nudos:

Los nudos generan discontinuidades que afectan en diferente medida la resistencia a flexión de

la madera. Por lo general, la influencia es mayor si el nudo se encuentra ubicado en la zona de tensión que en la de compresión.

6) Fatiga:

La madera también sufre de fatiga, por lo que a medida que la carga es soportada por un tiempo mayor la resistencia a flexión de la madera se ve disminuida. Luego de algunos años, la resistencia a flexión puede llegar a verse disminuida de entre cincuenta por ciento hasta setenta y cinco por ciento de la resistencia a flexión inicial medida en un ensayo.

7) Esbeltez:

La relación entre el largo y altura de la pieza de madera afecta drásticamente la resistencia a flexión, ya que está relacionada con la inercia de la sección. (Vargas, 2021)

8. Agentes que afectan a la madera.

La madera es un material altamente versátil y que se emplea en múltiples ámbitos. Sin embargo, para poder preservar el material y poder aprovechar de forma óptima sus propiedades es necesario aplicarle medidas de protección ante determinados agentes que la afectan. La madera puede sufrir deterioro por diferentes razones, como lo pueden ser el exceso de humedad, hongos, insectos, raíces de plantas o incluso por malas prácticas en la obra. A continuación, se mencionan algunos de los principales agentes que se deben considerar en todo uso de la madera, así como la medida de prevención y tratamientos necesarios para cuidar este material.

a. Insectos:

Existen numerosos insectos que afectan a la madera. Sin embargo, entre los más comunes se pueden nombrar los siguientes: Thysanura, Isoptera (termitas), Coleoptera (es- carabajos), Lepidoptera (polillas), Hymenoptera (hormigas, avispas) y otras de menor impacto. De estos, los que generan el mayor impacto a las estructuras de madera son los insectos pertenecientes al orden Isoptera y a los del orden Coleoptera.

El orden Isoptera posee siete familias y aproximadamente unas 2,000 especies diferentes distribuidas en todo el mundo. De entre estas, al menos 150 especies generan afectaciones a edificios, casas y construcciones de madera. Es importante mencionar que estos insectos generan mayores afectaciones en las zonas tropicales, por lo que son un factor bastante determinante a tomar en cuenta para la construcción en estas zonas. Las termitas se alimentan principalmente de materiales celulósicos procedentes de restos vegetales, y sobre todo, de la madera. Pueden subdividirse según su adaptación a la humedad en termitas de madera seca, termitas de madera húmeda y termitas subterráneas. Por lo general, las que suelen encontrarse en edificios son las termitas de madera seca, afectando estructuras como escaleras, techos o vigas de madera. También suelen encontrarse termitas de madera húmeda, afectando cabezas de vigas y pisos. Por otra parte, las termitas subterráneas suelen encontrarse en edificaciones sólo en lugares que presenten un ambiente más cálido y húmedo, los cuales suelen ser aquellos lugares cercanos a las costas o en zonas de mucha humedad.

En cuanto al orden Coleoptera, se encuentra compuesto de un total de 173 familias. Las especies que suelen encontrarse viviendo en la madera en obra son las familias de anóbidos, bostríquidos, ceraméricos, curculiónidos, líctidos y bupréstidos. En el caso de los escarabajos es su larva la que

causa la mayor cantidad de daño en la madera. El ciclo vital de los coleópteros es: huevo, larva, pupa y adulto. Sin embargo, vale la pena mencionar que el ciclo de vida depende de cada especie de coleóptero y de las condiciones climáticas que se tengan. Para los escarabajos que destruyen la madera, se puede tener una duración para una generación de pocos meses hasta de varios años. Por lo general las etapas de huevo, pupa y adulto duran poco tiempo, pudiendo durar días o semanas. Por otra parte, la etapa más larga es la etapa de larva, la cual es la que genera los mayores efectos en la madera, pues la larva debe satisfacer sus necesidades alimenticias por un buen tiempo. El insecto adulto es el que menos daños genera, ya que es la larva la que habita dentro de la madera la mayor cantidad del tiempo, haciendo diversas cavidades en el material, y el insecto adulto solamente realiza un agujero para salir de la madera una vez terminada su fase de larva.

Es importante conocer qué tipo de insecto es el que se encuentra afectando a la madera, ya que de esta forma es posible comprender qué condiciones son las más propicias para la proliferación de estos agentes y de esta manera evitar o actuar para preservar las estructuras de madera. Además, también es importante identificar, en medida de lo posible, a qué tipo de especie afectan más ciertos agentes y así proponer tratamientos y métodos constructivos que sean funcionales y permitan repeler estos agentes.

b. Hongos:

Así como los insectos, los hongos también conforman un reino independiente denominado Fungi, el cual implica un daño en las estructuras de madera y debe ser considerado como un agente afectante. Los hongos por mucho tiempo fueron criaturas cuyo estudio fue incierto y fueron considerados de diferentes maneras. Inicialmente fueron considerados como parte del reino plantae. Sin embargo, los estudios determinaron que poseían características que permitían identificarlos como un reino independiente. Actualmente el reino Fungi se subdivide en cuatro clasificaciones: *Phylum Chytridiomycota*, *phylum Zygomycota*, *phylum Ascomycota*, *phylum Basidiomycota*. Los hongos que deterioran a la madera son los hongos xylófagos, los cuales se encuentran en el *phylum Ascomycota* y *Basidiomycota*, correspondiente a las clases Basidiomicetes y Ascomicetes, implicando también sus formas imperfectas, los Deuteromicetes.

Los hongos representan una gran amenaza para la madera debido a una característica de estos organismos. Los hongos no producen clorofila, por lo que son incapaces de generar su propio alimento a partir de la luz solar, como las plantas. Por ello, se ven obligados a buscar su alimento a costa de otros seres vivos o muertos. Los hongos pueden actuar de dos formas diferentes, ya sea como saprófitos o como parásitos. Se comportan como saprófitos cuando obtienen su alimento de material orgánico muerto, como sucede cuando se alimentan de la madera. Por otra parte, se dice que actúan como parásitos cuando obtienen su alimento de organismos vivos. Con base en eso, se puede definir que los hongos que atacan a las edificaciones de madera son los hongos saprófitos.

Para entender cómo los hongos llegan a la madera hay que describir su ciclo de vida. Los hongos comienzan desde su etapa de espora. Estas son dispersadas por el viento, la lluvia o incluso por los animales, y germinan cuando hallan un sustrato con condiciones de humedad y temperatura adecuadas. La madera cumple la función de ser este sustrato que las esporas necesitan para germinar. Luego, surgen las hifas, las cuales son células tubulares con diámetros en un rango de entre dos y diez micrómetros. Las hifas son las encargadas de realizar la degradación de la madera, alimentándose de las sustancias de reserva que poseen las células del material. Otra forma en que degradan la madera es mediante la segregación de enzimas que se encargan directamente de descomponerla pared celular, a modo de que las hifas puedan luego asimilar las células de la madera

para su alimentación. Luego las hifas crecen, tanto en tamaño como en cantidad, y forman el micelio. Por último se forma el cuerpo fructífero del hongo, el cual es la parte observable del hongo desde un nivel macroscópico. Esta parte del hongo es la encargada luego de repartir las esporas y así iniciar el ciclo de nuevo.

Existen condiciones en las cuales los hongos pueden afectar en mayor medida a la madera. Las condiciones con altos niveles de humedad son las ideales para la acción de los hongos. Por tanto, es importante evitar poner elementos de madera en contacto con el suelo, así como tomar las consideraciones necesarias en tiempos de lluvias o de humedad excesiva, las cuales pueden afectar a cabezas de vigas, zapatas y arrastres. Diversos estudios demuestran que la madera comienza a ser considerablemente vulnerable al ataque de hongos alrededor del veinte por ciento de humedad. Además, la madera con un treinta por ciento de humedad genera ambientes óptimos para el desarrollo de hongos. Los hongos suelen albergarse en grietas o aberturas que permiten la infiltración de agua y concentran humedad. Algunos autores clasifican a los hongos que afectan a la madera en moho, hongos cromógenos y hongos de pudrición. A su vez, los hongos de pudrición producen tres tipos diferentes de pudrición, siendo esta parda, blanca y blanda.

La pudrición parda es la más grave y peligrosa, siendo reconocida también como pudrición destructiva. Se puede identificar su presencia, pues generan una coloración marrón oscura en la madera, además de agrietar perpendicular y transversalmente al material. Esto ocasiona estructuras prismáticas o laminares. Las especies de hongos que pueden generar estos daños son los basidiomicetos, de entre los cuales destaca la *Serpula lacrimans*, *Poriaspp* y *Coniophora puteana*.

(Vargas, 2021)

c. Plantas:

Otro agente que hay que tomar en cuenta en las construcciones de madera son las plantas. Estas pueden crecer en las estructuras en general, por lo general las plantas de tipo enredaderas. Las plantas de este tipo penetran sus raíces en las uniones de la estructura y provocan infiltraciones del agua de lluvia en la estructura. Una de las plantas que con mayor frecuencia suele crecer en las azoteas y en las paredes de cantería es la *Nicotiana glauca*. Su propagación se debe a que posee una capacidad de germinación excelente. Basta con que logre ubicarse en una pequeña grieta y que exista un poco de tierra o un material poroso que le permita crecer. Además, las plantas no pueden sólo afectar a una estructura por su propagación por diversas partes de esta, sino que también pueden afectar por raíces de gran tamaño que llegan a afectar subterráneamente. Algunos ejemplos de este caso suelen pasar con árboles como fresnos, ceibas y ficus, que cuentan con raíces capaces de crecer por debajo del edificio, llegando a ocasionar levantamiento de pisos, agrietamientos en muros y deterioros de diversa índole. (Vargas, 2021)

d. Agua subterránea:

Al hablar del agua subterránea como un agente que afecta a las estructuras se habla específicamente de los mantos freáticos. Estos son variables, ya que pueden aparecer en los primeros metros de profundidad o pueden estar a una distancia bastante profunda. Sin embargo, debido a que pueden aparecer a poca profundidad deben ser un factor a considerar. Los mantos freáticos afectan a las estructuras de diferentes materiales, tanto de concreto, acero y madera. La manera en que los mantos freáticos afectan a las estructuras es por el efecto de la capilaridad del agua. Esta característica provoca que el agua ascienda por los diferentes elementos estructurales de la edificación y degraden

dichos elementos. En el caso de la madera, es importante evaluar qué tan vulnerable es la especie que se está trabajando a los efectos de capilaridad del agua y qué tanta resistencia posee ante el deterioro por agua. (Vargas, 2021)

e. Condiciones climáticas:

La madera es un material que puede ser fuertemente afectado por los factores climáticos. Al hablar de agentes climáticos se hace referencia a los rayos del sol y a la humedad provocada por la lluvia o bien, la humedad propia del medio ambiente.

Los rayos solares generan en la madera un daño fotoquímico, el cual es ocasionado por los rayos ultravioletas y los rayos infrarrojos. Por una parte, los rayos ultravioletas afectan la superficie, generando una degradación de la lignina y una pérdida de cohesión entre las células. La degradación de la lignina ocasiona en la madera una coloración café. En caso de que la madera cuente con algún tipo de protección de pintura o barniz, los rayos solares degradan progresivamente las resinas. Por lo tanto, es importante tomar en cuenta dicho factor para el mantenimiento del material y las estructuras. Otro efecto que puede llegar a generarse por los rayos solares es una decoloración superficial grisácea y, posteriormente, una desfibración superficial, la cual combinada con agua de lluvia y viento pueden llegar a ocasionar desigualdades superficiales de cierta importancia.

Por otra parte, la humedad es uno de los agentes más influyentes en la madera. Este factor debe ser fuertemente estudiado y analizado al momento de pensar en el empleo de la madera como un material estructural. Ya se ha mencionado con anterioridad la gran influencia que el agua puede tener en la madera, siendo esta dependiente del entorno en el que se encuentre y también del tipo de especie que se tenga. Es fundamental saber que la madera requiere de un rango de humedad ideal en el cual puede mantener su integridad y funcionalidad. Por lo tanto, tomar en cuenta factores como la humedad relativa del aire y la temperatura son fundamentales cuando de aplicación de la madera se refiere. Un contenido de humedad de equilibrio para la madera suele oscilar entre el diez por ciento y el quince por ciento de humedad interna de la madera. Una humedad excedente de la madera puede generar una mayor susceptibilidad de deterioro. Este exceso de humedad puede ser ocasionado por acumulación de agua de lluvia en cubiertas, defectos en los techos, contacto de la madera con muros de materiales porosos que absorban humedad, poca ventilación, condensación en zonas poco ventiladas y contacto con materiales metálicos. Es importante recalcar el fenómeno de condensación, ya que es más común de lo que suele pensarse. Este fenómeno suele darse cuando la madera se encuentra en contacto con materiales que posean diferente capacidad térmica o se encuentre colocada en ambientes con fuertes diferencias térmicas diurnas y estacionales. (Vargas, 2021)

f. Fuego:

Al hablar de la madera como material estructural sale a relucir la preocupación a causa por uno de sus más conocidos enemigos: el fuego. Como es bien sabido, la madera es inflamable, esto debido a que la madera es un material combustible. Para la generación del fuego basta con que exista una fuente de calor, oxígeno y un combustible. Por ello, cuando se plantea a la madera como material estructural se piensa que no es una buena idea, debido a su "vulnerabilidad" al fuego. Sin embargo, este concepto no está correctamente asimilado. Si bien la madera arde, también resiste. Para explicar los efectos que el fuego tiene en la madera es necesario repasar diferentes conceptos.

En primer lugar, vale la pena mencionar que para que cualquier elemento de madera arda la llama

debe ser proporcional en tamaño para calentar toda la pieza. Además, es importante mencionar que en altas temperaturas la combustión es más rápida y se generan más gases. También es importante mencionar que el oxígeno es fundamental para la propagación del fuego. Sin oxígeno no hay fuego. Una vez sabidos estos conceptos, vale la pena mencionar el motivo por el cual la madera es un material combustible. La razón de que la madera sea inflamable es debido a su contenido de celulosa y lignina, las cuales están compuestas de carbono, hidrógeno y oxígeno.

Tras explicar los fundamentos del fuego y la madera, es importante mencionar los motivos por los cuales se puede originar un incendio. Por lo general, debido al fundamento mencionado de la relación entre el tamaño del elemento y la llama, los incendios no suelen iniciarse directamente en los elementos estructurales de un edificio de madera. Estos suelen originarse en elementos decorativos, como alfombras y cortinas. Una vez la llama crece debido a la combustión con estos materiales se genera un fuego del tamaño suficiente para poder incendiar los elementos constructivos de madera. Es importante mencionar que el ángulo de inclinación de la llama afecta significativamente en la velocidad del incendio. Además, hasta cierto punto, la madera ofrece una ventaja cuando de incendios se habla, y es la de avisar sobre el incendio. En numerosos casos, la mayor causa de muertes producidas en incendios es debido a la inhalación de humos, debido al desconocimiento de la presencia del incendio. Por ello, la madera al evidenciar con mayor facilidad la presencia de llamas con respecto a otros materiales, ofrece la ventaja de la alerta ante un incendio, pudiendo brindar a las personas más tiempo de reacción ante el incidente.

Ahora bien, la madera posee características propias que la protegen del fuego. La madera es por sí misma un aislante térmico, en relación a otros materiales. Esto permite que al momento de un incendio el interior de la pieza no se calienta, manteniendo su capacidad interna intacta ante el fuego. Aún las maderas que poseen baja resistencia térmica llegan a ser entre 200 y 900 veces más aislantes que el acero y 10 veces mejor aislante que el hormigón. Además, no hay que olvidar que la madera estructural posee un porcentaje de humedad en su interior, la cual le permite retrasar el proceso de combustión. Por tanto, para una pieza de madera de una tonelada con un rango de entrechocho por ciento y quince por ciento de humedad, se debe evaporar entre ochenta y ciento cincuenta kilogramos de agua. Vale la pena mencionar que una pérdida del uno por ciento de humedad de la madera equivale a un incremento del cuatro por ciento en la resistencia a compresión y un dos por ciento en la resistencia a flexión. Por tanto, dichos aumentos en sus resistencias permiten contrarrestar la pérdida de sección transversal generada por la combustión. Por último, es importante hacer mención de una última propiedad de la madera que la protege del fuego. La madera sufre un carbonización a una velocidad aproximada de 0.7 milímetros por minuto en dirección perpendicular a las fibras. Sin embargo, una vez la capa es carbonizada dicha velocidad disminuye. Si bien, la parte carbonizada de la madera ya no tiene las resistencias mecánicas originales, protegen a la pieza de nuevas combustiones. Esta protección llega a ser seis veces mayor que la de la madera sin carbonizar.

En cuanto al aislamiento que se le puede proporcionar, existen tratamientos ignífugos que permiten suministrarle una mayor resistencia al fuego. El primer tratamiento es el de barnices y pintura. Tienen el objetivo de dotar a la madera de una pantalla protectora, la cual posee muy baja conductividad térmica y retrasa el proceso de pirólisis. Por lo general este tipo de tratamientos suelen tener una duración de entre cinco y diez años. Por otra parte, existe el tratamiento por sales ignífugas. Este tratamiento consiste en sales que se disuelven en agua y se aplican de diferentes maneras a la madera. Esas modifican las reacciones de combustión de la madera, haciéndola emitir gases incombustibles que sofocan los vapores y cierran el paso al oxígeno. Sirven como un cortafuegos en las reacciones de la madera. Pueden ser aplicadas por pulverizado o inmersión, aunque estos procesos no son tan eficaces, pues se puede producir un deslavado de las sales. El método más eficaz

es el de vacío y presión en autoclave, pues permite que las sales penetren en las piezas de madera.

(Cabrero, 2013)

B. Madera laminada encolada

La madera laminada es un material conformado por la unión de varias capas de madera de un espesor determinado, encoladas y comprimidas, permitiendo obtener un material maderoso de mayores propiedades estructurales que las de la madera ordinaria. El espesor de las láminas que se emplean para la fabricación de la madera laminada pueden variar de entre 20 milímetros a 45 milímetros. Es importante mencionar que la madera laminada no emplea en ningún momento algún elemento adicional a parte del pegamento para la unión de las diferentes láminas que conforman al material. Una de las principales ventajas que ofrece la madera laminada encolada es la opción de generar vigas (u otros elementos estructurales) con diversas formas, pudiendo así construirse vigas curvas, de sección variable u alguna otra geometría. Además, la fabricación en cuanto a su largo se ven limitadas únicamente por la accesibilidad a transporte que se tenga, ya que no existen limitantes por parte del material en sí. (Demkoff, 2003)

1. Ventajas de la madera laminada.

Como ya se ha mencionado, una de las grandes virtudes de la madera laminada es la libertad de fabricación que ofrece. La madera laminada se ha popularizado por ser un material que revolucionó la forma de construir con madera, permitiendo proponer una solución tangible a los problemas de resistencia y limitantes estructurales que experimentaba el material en el campo constructivo. Además, la madera laminada no sólo se ha abierto paso en el campo ingenieril, sino que, por su versatilidad, se ha abierto paso como un material arquitectónico también. A nivel mundial, la madera laminada evidencia una evolución constante en cuanto a su fabricación y usos.

La madera laminada encolada con respecto a la madera maciza ofrece diversas virtudes. Puede llegar a alcanzar un ochenta por ciento más de resistencia que la madera maciza y hasta un cuarenta por ciento más de rigidez. Estas características son las principales razones por las cuales la madera laminada revolucionó la construcción en madera y comienza a ser utilizada cada día más en el campo constructivo, pues permite construir edificaciones con luces más grandes, ampliando la paleta de usos de construcciones posibles con madera y abriendo un mar de posibilidades. La madera laminada también permite una gran libertad creativa. Tiene la gran ventaja de permitir la realización de diversas formas para la fabricación de elementos estructurales y no estructurales. Por lo general, la madera laminada se suele emplear por dicha razón, permitiendo la fabricación de vigas con formas ostentosas y arquitectónicamente muy atractivas. Según estimaciones del año 2015, la madera laminada encolada es el producto más importante de la industria de la ingeniería en madera a nivel mundial, siendo Europa y Japón las regiones que dominan el mercado de la madera laminada encolada, representando juntos el ochenta y cuatro por ciento del mercado consumidor a nivel mundial y el setenta y cuatro por ciento en capacidad de producción. (J., 2021)

C. Acero.

El acero es un material con grandes aplicaciones estructurales y que en muchas ocasiones es el preferido para la construcción. Actualmente, es empleado para la construcción de puentes, edificios, torres y diversas estructuras. Este material se caracteriza por su alta versatilidad y su resistencia en comparación a otros materiales. Sin embargo, como cualquier material, posee ventajas y desventajas.

1. Ventajas del acero estructural.

a. Alta resistencia:

La elevada fortaleza del acero por unidad de peso implica que las estructuras hechas de este material tendrán un peso comparativamente bajo. Esto es especialmente relevante en la construcción de puentes de amplia extensión, edificios de gran altura y estructuras con limitaciones en sus cimientos.

b. Uniformidad:

A diferencia de las estructuras de concreto reforzado, las propiedades del acero se mantienen constantes con el tiempo.

c. Elasticidad:

El comportamiento del acero se asemeja más a las suposiciones de diseño que la mayoría de los materiales, ya que sigue la ley de Hooke incluso bajo esfuerzos significativamente altos. Los momentos de inercia de una estructura de acero se pueden calcular con precisión, en contraste con los valores relativamente imprecisos obtenidos para una estructura de concreto reforzado.

d. Durabilidad:

Si se realiza un adecuado mantenimiento de las estructuras de acero, estas pueden durar indefinidamente. Investigaciones en aceros modernos indican que, bajo ciertas condiciones, no se requiere ningún mantenimiento basado en la aplicación de pintura.

e. Ductilidad:

La ductilidad se refiere a la capacidad de un material para soportar grandes deformaciones sin romperse bajo esfuerzos de tensión elevados. Cuando se somete a tensión, el acero con bajo contenido de carbono, conocido como acero dulce, experimenta una marcada reducción en su sección transversal y un significativo alargamiento antes de fracturarse. Un material que carece de esta propiedad suele ser inaceptable, ya que tiende a ser rígido y frágil, rompiéndose fácilmente ante impactos repentinos.

En miembros estructurales sometidos a cargas normales, se generan concentraciones de esfuerzos en diversos puntos. La naturaleza dúctil de los aceros estructurales comunes permite que fluyan localmente en estos puntos, evitando así fallos prematuros. Una ventaja adicional de las estructuras dúctiles es que, cuando se sobrecargan, sus grandes deformaciones ofrecen una evidencia visual de que se acerca una posible falla, a veces llamada humorísticamente “cuenta regresiva”.

f. Tenacidad:

Los aceros estructurales son tenaces, lo que significa que poseen tanto resistencia como ductilidad. Un miembro de acero sometido a grandes deformaciones seguirá siendo capaz de resistir considerables fuerzas. Esto es esencial, ya que permite que los miembros de acero sean moldeados, martillados, cortados y perforados sin daños aparentes. La capacidad de un material para absorber una gran cantidad de energía se llama tenacidad.

g. Modificación de estructuras existentes:

Las estructuras de acero se adaptan fácilmente a posibles ampliaciones. Es posible agregar nuevas secciones y, en ocasiones, alas completas a estructuras de acero ya existentes. Además, los puentes de acero suelen poder expandirse con relativa facilidad.

Existen otras ventajas significativas del acero estructural, como: a) su facilidad para unir distintos componentes mediante diversos tipos de conexiones simples, como la soldadura y los pernos; b) la posibilidad de prefabricar los componentes; c) la rapidez en su montaje; d) la capacidad de producirlo en una amplia variedad de tamaños y formas, tal como se describe en la Sección 1.4 de este capítulo; e) su potencial para ser reutilizado después de desmontar una estructura; y f) la opción de venderlo como chatarra, incluso si no puede utilizarse en su forma original. El acero es, por excelencia, el material reciclable.

(Aulestia, 2014)

D. Marco normativo para el diseño de estructuras

1. NSE 2 Demandas estructurales y condiciones de sitio.

a. Alcance:

Acorde al Capítulo 1 de esta norma, el alcance de la Norma de Seguridad Estructural AGIES NSE 2 es establecer las cargas mínimas, las bases para establecer la condición del terreno y los niveles mínimos de protección sísmica (NPS) que se deberán emplear en el diseño estructural de edificaciones para Guatemala. Además, establece las diferentes solicitaciones y condiciones que deben tomarse en cuenta para el diseño estructural. Estas solicitaciones involucran cargas por gravedad, empujes laterales por sismos, efectos de actividad volcánica, efectos de viento y otros efectos meteorológicos y ambientales

b. Cargas muertas:

En el Capítulo 2 se definen las especificaciones para la consideración de Cargas Muertas. Se definen las cargas muertas como todas aquellas cargas de elementos permanentes de la construcción. Menciona que se consideran así todos los elementos de peso propio y también puede involucrar elementos no pertenecientes al peso propio como pisos, rellenos, cielos, vidrieras, tabiques fijos y equipo permanente rígidamente anclado a la estructura. Además, involucra también cargas especiales, como equipos pesados, equipos fijos, cargas móviles y fluidos

c. Cargas vivas:

En el Capítulo 3 de esta norma se definen las consideraciones para las cargas vivas, definiéndolas como aquellas producidas por el uso y la ocupación de la edificación. Acorde a la norma, se pueden tener los siguientes tipos de cargas vivas.

- Cargas uniformemente distribuidas (W_v).
- Cargas concentradas (P_v).
- Cargas concentradas en estacionamientos.
- Escaleras.
- Cargas especiales y cargas de impacto.
- Cargas vivas en cubiertas no accesibles al público.

- Cargas vivas sobre cubiertas livianas.
- Cargas vivas especiales.
- Carga parcial.

También se hace una mención especial a cargas vivas generadas por pasamanos y barandas. Sin embargo, estas cargas no serán implementadas para el desarrollo de las naves industriales propuestas. La norma hace mención en el inciso 3.4 sobre las cargas vivas que generan impacto y les asigna un porcentaje de incremento acorde a una categorización que se propone.

Existen también reducciones de carga viva que pueden ser aplicables a determinadas cargas vivas acorde a lo establecido en la Tabla 3.7.1-1 de esta norma. La norma asigna un factor K_v que genera una reducción en la carga. En cuanto a la prevención de percepción de vibraciones la norma no define prescripciones específicas, dejándolas a libertad del diseñador.

Tabla 3.7.1-1 (continuación)

Tipo de ocupación o uso	Wv (kg/m ²)	Pv (kg)
Almacenes		
Minoristas	500	800
Mayoristas	600	1200
Bodegas		
Cargas livianas	600	800
Cargas pesadas	1200	1200
Fábricas		
Industrias livianas	500	800
Industrias pesadas	1000	1200
Cubiertas pesadas (Inciso 3.3 (g))		
Azoteas de concreto con acceso	200	
Azoteas sin acceso horizontal o inclinadas	100	
Azoteas con inclinación mayor de 20°	75 ^[b]	
Azoteas usadas para jardín o para reuniones	500	
Cubiertas livianas (Inciso 3.3 (h))		
Techos de láminas, tejas, cubiertas plásticas, lonas, etc. (aplica a la estructura que soporta la cubierta final)	50 ^{[b][c]}	135

[a] Carga depende del tipo de cancha

[b] Sobre proyección horizontal

[c] Carga no reducible

[R] Puede aplicar reducción de carga viva según Sección 3.5.

Figura 2. Tabla 3.7.1-1 del NSE 2 AGIES 2018

Por último, la norma brinda una tabla en la que propone valores de carga vivas para diferentes tipos de ocupación o usos. Entre ellos se encuentra el uso por vivienda, oficina, hospitales, hoteles, carga de escaleras y elevadores, educativos, áreas de reunión, estacionamientos, instalaciones deportivas públicas, almacenes, bodegas, fábricas, cubiertas pesadas y cubiertas livianas. Para los propósitos de este trabajo de graduación, las cargas de interés son las correspondientes a la categoría de cubiertas livianas. A continuación, se muestra la tabla correspondiente a dichos valores.

d. Aspectos sísmicos:

En el Capítulo 4 de la norma se especifican los requisitos de nivel de protección sísmica para cada obra acorde a su localidad y clasificación asignada por la norma. Además, establece parámetros y espectros sísmicos para análisis y diseño de estructuras. Por lo tanto, todo lo referente a parámetros relacionados a las demandas y análisis sísmicos que se deban realizar a las estructuras están estipulados en este capítulo de la norma. Para los propósitos de este trabajo de graduación se hará uso de este capítulo para la verificación por sismo, considerando que Guatemala es considerada una zona altamente sísmica.

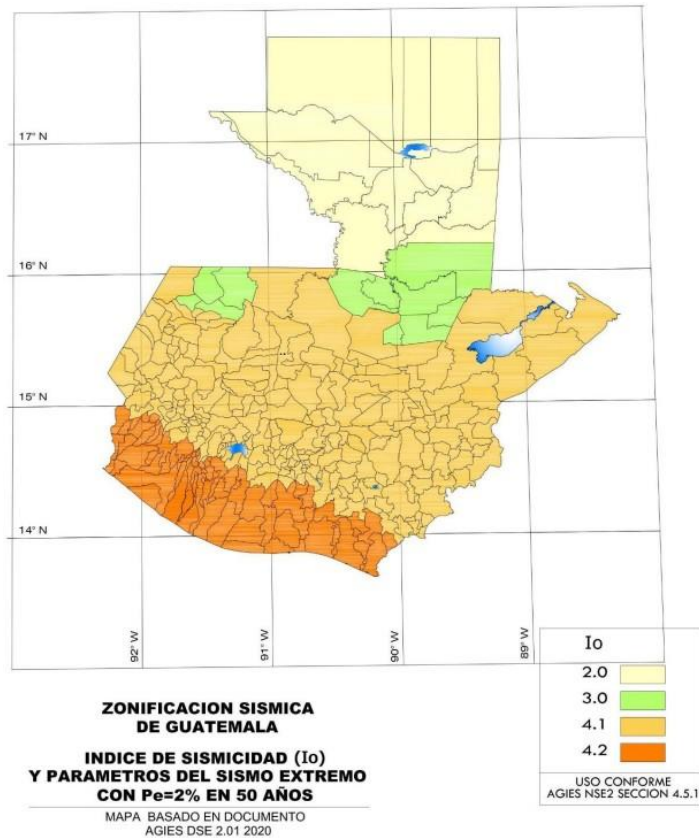


Figura 3. Mapa de zonificación sísmica de Guatemala NSE 2 AGIES 2018

En este apartado de la norma se pueden encontrar las tablas que contienen todos los parámetros a considerar para el análisis sísmico de estructuras. En el inciso 4.2 se definen los niveles de sismicidad y niveles de protección sísmica considerados por la norma. Esta considera un índice de sismicidad, el cual puede tener un valor desde 2 hasta 4, distribuido en una zonificación específica para Guatemala. Esta distribución se encuentra en la Tabla 4.5-1 de esta norma. Se muestra el mapa de zonificación sísmica de Guatemala en la Figura 3 de este documento.

La norma establece un nivel de protección sísmica a aplicar a las estructuras acorde al índice de sismicidad previamente descrito y a la clasificación de obra. La norma establece cinco niveles de protección sísmica, siendo estos el A, B, C, D y E. La Tabla 4.2.2-1 indica los niveles de protección sísmica respectivos a los parámetros que influyen en ella e indica el nivel de sismo que aplica según el caso. La norma establece cuatro tipos de sismo, siendo estos el sismo básico, sismo severo, sismo

extremo y sismo mínimo. En el resto del capítulo se pueden encontrar los parámetros y ecuaciones que la norma estipula para la elaboración del espectro de respuesta sísmica, así como especificaciones sobre su elaboración, casos especiales y excepciones.

e. Acciones del viento:

En el Capítulo 5 de esta norma se establecen los requerimientos que las estructuras deben cumplir en relación a las acciones generadas por el viento. Acorde con lanorma, las edificaciones serán diseñadas para resistir los empujes y succiones provocadas por la acción del viento. Se establece que debe hacerse una diferenciación entre el sistema estructural contra viento de la edificación, la fachada (cerramiento vertical), la cubierta y los componentes adosados. Se menciona también que elementos no estructurales pero vulnerables a viento deben diseñarse para resistir la acción del mismo, tales como rótulos, antenas, chimeneas, silos y similares.

La norma establece que se debe asignar un tipo de exposición al sitio donde se localizará la edificación. Se establecen tres tipos de exposiciones al viento, siendo estas la Exposición B, Exposición C y Exposición D. En la norma también se define la velocidad básica del viento y la zonificación por viento propuesta para el territorio de Guatemala. Esta zonificación, así como la sísmica, se encuentra ilustrada en un mapa, el cual corresponde a la Figura 5.2-1 de esta norma y se muestra a continuación.

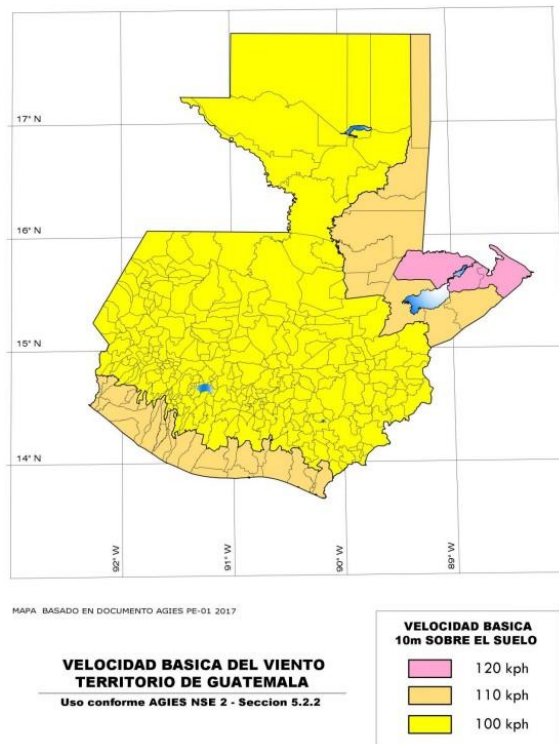


Figura 4. Mapa de zonificación por viento de Guatemala NSE 2 AGIES 2018

En el resto del capítulo se pueden encontrar los factores y fórmulas a considerar para el cálculo de la presión de viento en la estructura principal y componentes de la misma. Se encuentran las tablas que poseen los coeficientes a tomar en cuenta dependiendo del tipo de sistema que se tenga, el tipo de cubierta, el tipo de efecto (barlovento o sotavento), la pendiente de la cubierta y geometría de la cubierta. Por último, se mencionen las consideraciones para integración de fuerzas de viento en las

fachadas, el análisis estructural por fuerzas de viento, corte basal a considerar por viento y efectos de volteo por viento.

f. Otras cargas:

En el Capítulo 6 de la norma se toman en consideración los parámetros a considerar por efectos de cargas de diferente índole. En este capítulo se incluyen las consideraciones por cargas de ceniza volcánica, presiones hidrostáticas, empujes de materiales a granel, empujes desuelos, sub-presiones en sótanos y otras estructuras, cargas de lluvia y esfuerzos internos autoinducidos. Se deben considerar los aspectos pertinentes a tomar en cuenta acorde a la ubicación y uso propuesto para la nave industrial a diseñar.

g. Combinaciones de carga:

En el Capítulo 8 de la norma se establecen las diferentes combinaciones de carga a considerar para el diseño de estructuras. Se mencionan las combinaciones de carga para cargas gravitacionales, solicitaciones sísmicas y carga de viento. Además, se incluyen cuadros de nomenclatura recomendada para el nombramiento de las cargas y combinaciones específicas para casos especiales.

(AGIES, 2018)

b. **Eurocódigo 5.**

Publicado en el año 1995 por la UNE EN y reformada en el año 2016, es la normativa Europa oficial para el diseño de estructuras de madera. En ella se abarcan todas las consideraciones a tomarse en cuenta para cualquier tipo de estructura diseñada en madera, tomando consideraciones tanto para la madera maciza, madera laminada y cualquier otro material que tenga como base la madera. Estipula los requisitos básicos a tomarse en cuenta para el diseño de estructuras de madera y estipula los criterios de resistencia que deben emplearse. La norma se centra principalmente en algunos puntos fundamentales para el diseño de estructuras de madera. Entre ellas se encuentran las propiedades del material (lo cual incluye resistencia y rigidez), comportamiento dependiendo del tiempo de los materiales, condiciones climáticas y diferentes situaciones de cálculo. Para tener un mejor entendimiento de lo planteado por la norma se deben consultar los demás Eurocódigos a los cuales la norma hace referencia. Sin embargo, la norma realiza un recordatorio sobre las consideraciones generales para el diseño.

a. Consideraciones de otras normas:

Para los análisis considerados en esta norma se debe tener presente que existen partes aplicables de diferentes normas europeas. Estas incluyen:

- EN 1991-1-1 Pesos específicos, peso propio y sobrecargas.
- EN 1991-1-1 Cargas de nieve.
- EN 1991-1-1 Acciones del viento.
- EN 1991-1-5 Acciones térmicas.

- EN 1991-1-6 Acciones en la ejecución.
- EN 1991-1-7 Acciones accidentales

Además, se hace alusión a las consideraciones a tomar en cuenta por la duración de carga y el contenido de humedad, como principales factores influyentes en la resistencia de la madera.

b. Clases de duración de la carga:

La norma toma en cuenta una diferenciación en cómo se considera una carga en relación al tiempo que permanece dicha carga en la estructura. Acordea eso, en la Tabla 2.1 se establecen las diferentes clases de duración de la carga, pudiendo esta ser permanente, larga, media, corta o instantánea.

(EN, 1995)

Tabla 2.1 – Clases de duración de la carga

Clase de duración de la carga	Orden de duración acumulada de la carga característica
Permanente	más de 10 años
Larga	6 meses – 10 años
Media	1 semana – 6 meses
Corta	menos de una semana
Instantánea	

Figura 5. Tabla 2.1 del EC5 Clases de duración de carga

V. MARCO METODOLÓGICO

A. Etapa de investigación

Esta etapa consistió en la recopilación de la información necesaria para realizar el diseño de una nave industrial empleando elementos principales de madera laminada. En primer lugar, se investigó sobre la madera como material estructural, debido al poco conocimiento general que se suele tener de este material en dicho ámbito. Posteriormente, se investigó sobre la madera laminada y su desempeño en el campo constructivo. Luego se investigó sobre los lineamientos establecidos en el Eurocódigo5 para el diseño de elementos de madera laminada a flexión, compresión y revisión de deflexiones. Se recopiló información sobre el diseño de viento y de sismo respectivos acorde al NSE 2 y NSE 3 de AGIES.

B. Etapa de definición del proyecto

En esta etapa se definieron los datos generales del proyecto. Se definió una ubicación para el proyecto, acorde a los intereses del trabajo de graduación. Dado que una de las finalidades del presente trabajo fue realizar una propuesta acorde a las condiciones constructivas del país, se consideró una ubicación competente para la realización del proyecto propuesto. Por ello, se seleccionó el municipio de Amatitlán, en el departamento de Guatemala, debido a la alta presencia estructural industrial en dicha región del país. Se determinaron las dimensiones de la nave industrial, constando esta de 12 metros de ancho y 20 metros de largo. Se consideraron marcos a cada 4 metros, con 4 metros de altura a hombro y 5 metros de altura máxima hasta la cumbre. Para el diseño de las estructuras se consideró únicamente el uso de perfiles prismáticos y no perfiles acartelados, como suele ser común en otras naves industriales. Esto con el fin de mantener simplicidad en el diseño y en el análisis comparativo. Además, se definieron los parámetros de caracterización del proyecto según AGIES y el Eurocódigo.

C. Definición e integración de cargas para las estructuras propuestas

1. Cargas gravitacionales.

- Carga viva:

Para la integración de cargas gravitacionales se hizo uso de las cargas definidas en la Tabla 3.7.1-1 de la NSE 2 de AGIES, actualización 2018. Específicamente, se hizo uso de la carga definida para “Cubiertas livianas”, la cual posee un valor de 50 kilogramos sobre metro cuadrado.

- Carga muerta:

En primer lugar, se consideró el peso propio de cada elemento diseñado en la hoja de cálculo. Por otra parte, se consideró una carga muerta por sobrecarga debida al material de la cubierta empleada. Se seleccionó una Lámina Ternium TRN-100 (galvanizada), la cual se encuentra disponible en el mercado nacional. Acorde con la descripción del fabricante, esta lámina se encuentra especificada para

su uso en cubiertas de naves industriales que requieran resistencia estructural y/o diseños con pendientes bajas. A continuación, se muestra la ficha técnica de la lámina, extraída directamente de la página web de Ternium.

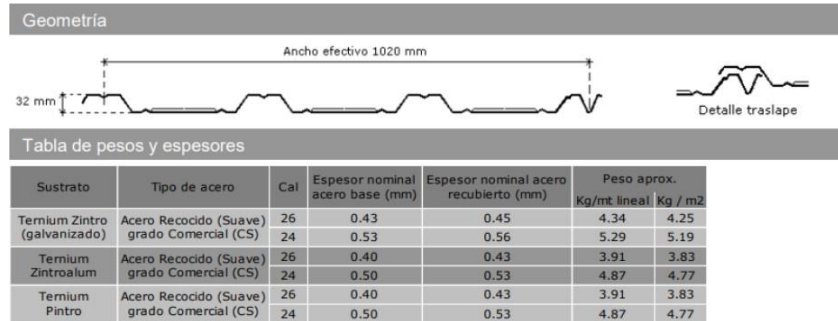


Figura 6. Ficha técnica Lámina Ternium TRN-100

2. Cargas de viento.

La integración de cargas de viento se realizó acorde con lo estipulado en la NSE 2. Debido a la ubicación seleccionada para la estructura se consideró un nivel de exposición C. También se empleó una velocidad básica del viento igual a 100 kilómetros por hora, acorde al mapa de zonificación de viento de Guatemala mostrado en la misma norma. Se realizó el cálculo de la presión básica del viento mediante la siguiente expresión:

$$P_z = C_{ez} \cdot C_q \cdot q_s \cdot I_c$$

Ecuación 1. Cálculo de presión básica del viento.

Posteriormente, se seleccionó el coeficiente. Para dicho coeficiente la norma establece valores acordes a la exposición y la altura sobre el nivel promedio del terreno en metros. Dado que la tabla mostrada en la norma no posee un valor para la altura de 5 metros, se realizó una interpolación del valor, la cual se encuentra permitida según la nota 2 de dicha tabla.

Luego, se obtuvieron los coeficientes especificados para el cálculo de presiones de viento, tanto para superficies verticales como para techo inclinado. Los cálculos se realizaron acorde a lo especificado en la norma, empleando una distribución por ancho tributarios correspondientes a la geometría propuesta de la estructura. Los cálculos de dichos valores se encuentran detallados en la hoja de cálculo incorporada en los anexos del presente trabajo.

D. Combinaciones de carga para las estructuras propuestas

Para las estructuras propuestas se emplearon las combinaciones de carga estipuladas en la Norma de Seguridad Estructural 2 de AGIES 2018.

1. Combinaciones de carga por cargas gravitacionales.

- CC1. 1.4 M
- CC2. 1.2 M + 1.6 V + 0.5 Vt
- CC3. 1.2 M + V + 1.6 Vt

En donde:

- M: Carga muerta
- V: Carga viga
- Vt: Carga viva de techo

2. Combinaciones de carga por cargas de viento.

CC4. $1.2 M + V \pm 1.3 W + 0.5 Vt$

CC5. $0.9 M \pm 1.3 W$

En donde:

- M: Carga muerta
- V: Carga viga
- W: Carga de viento
- Vt: Carga viva de techo

Vale la pena mencionar que para las cargas de viento se hizo uso del comentario 8.3.4 de la Norma de Seguridad Estructural 2, la cual indica que el factor de mayoración del viento se ha conservado en 1.3 por la conservación de las normas NSE respecto a la metodología de la referencia UBC 1997. Sin embargo, se permite realizar el ajuste acorde a la sección 5.3 de la ASCE 7. Por tanto, se empleó un factor de mayoración de 1.0 en lugar de 1.3.

E. Diseño de elementos de nave industrial de madera

El diseño propuesto tiene como alcance la generación de propuestas para las dimensiones y materiales de madera de las vigas principales y vigas secundarias de la nave industrial. Se comenzó realizando un análisis de predimensionamiento de los elementos descritos. Debido a que en el Eurocódigo 5 no se especifica parámetros de predimensionamiento, se realizó una revisión de resistencia de los elementos ante esfuerzos de flexión, esfuerzos de corte y deflexiones admisibles en los elementos. El objetivo de la etapa de predimensionamiento fue para otorgar una noción de las posibles dimensiones de los elementos al momento de realizar un modelo en software. El siguiente paso fue la realización de un modelo 3D mediante el software ETABS. Mediante dicho modelo se obtuvieron las reacciones en los elementos ocasionadas por la presencia de fuerzas gravitacionales y acciones del viento. Con las fuerzas máximas obtenidas mediante el análisis del software se realizó una última verificación de resistencia de los elementos.

1. Definición de materiales para los elementos estructurales.

Dado que en Guatemala no se fabrican elementos de madera laminada encolada ni existe una reglamentación al respecto, para la determinación de materiales se tomó en cuenta el mercado y contexto europeo. Por ello, se evaluaron las tablas propuestas en el Eurocódigo 5 sobre los diferentes tipos de madera laminada encolada considerados en dicha norma. Con base en dicha información, se seleccionó arbitrariamente una madera GL24h para las columnas y vigas principales, como punto de partida para las verificaciones de dichos elementos ante las respectivas cargas de la estructura. Las dimensiones de los elementos se fueron considerando acorde a las dimensiones de la estructura mediante prueba y error para evaluar diferentes tamaños de perfiles. Se debe tomar en cuenta que estos materiales pueden generarse con diversos tipos de madera, siempre

y cuando se cumpla con los estándares establecidos por la norma para estas clasificaciones.

Table 6.2 The strength, stiffness and density properties of homogeneous glulam strength classes (GL 24h, GL 28h and GL 32h) and combined glulam strength classes (GL 24c, GL 28c and GL 32c)^a

Glulam strength class	Homogeneous glulam			Combined glulam		
	GL 24h	GL 28h	GL 32h	GL 24c	GL 28c	GL 32c
Bending strength $f_{m,g,k}$ (N/mm ²)	24	28	32	24	28	32
Tension strength $f_{t,0,g,k}$ (N/mm ²)	16.5	19.5	22.5	14	16.5	19.5
$f_{t,90,g,k}$ (N/mm ²)	0.4	0.45	0.5	0.35	0.4	0.45
Compression strength $f_{c,0,g,k}$ (N/mm ²)	24	26.5	29	21	24	26.5
$f_{c,90,g,k}$ (N/mm ²)	2.7	3.0	3.3	2.4	2.7	3.0
Shear strength $f_{vg,k}$ (N/mm ²)	2.7	3.2	3.8	2.2	2.7	3.2
Modulus of elasticity $E_{0,g,mean}$ (kN/mm ²)	11.6	12.6	13.7	11.6	12.6	13.7
$E_{t,0,g,05}$ (kN/mm ²)	9.4	10.2	11.1	9.4	10.2	11.1
$E_{t,90,g,mean}$ (kN/mm ²)	0.39	0.42	0.46	0.32	0.39	0.42
Shear modulus $G_{g,mean}$ (kN/mm ²)	0.72	0.78	0.85	0.59	0.72	0.78
Density $\rho_{g,k}$ (kg/m ³)	380	410	430	350	380	410

Note: For strength-related calculations, take $G_{j,05} = E_{t,j,05}/16$.

Mean density is taken to be the average of the mean density of the inner and outer laminates, based on BS EN 338.

^a Based on the properties given in BS EN 1194:1999.

Figura 7. Tabla 6.2 EC5

Por otra parte, dado que el propósito del presente trabajo es contextualizar el diseño de una estructura de madera al contexto guatemalteco, se propuso emplear una madera endémica de Guatemala para los elementos secundarios o correas. Para ello, se seleccionó madera sólida, específicamente madera Teca o Tectona Grandis. Se empleó de referencia el trabajo de graduación realizado por la Ing. Jackeline Juárez en su trabajo de graduación Caracterización de las propiedades mecánicas de madera natural y clonada de Tectona grandis para el uso en el sector de construcción en Guatemala realizado en el año 2020. Se consideraron los valores de densidad característica, resistencia a flexión, resistencia a compresión, resistencia a cortante y módulo de elasticidad obtenidos en los ensayos realizados por la Ing. Juárez en su trabajo de graduación.

<i>Tectona Grandis Clonada</i>	
Valores característicos de resistencia [N/mm^2]	
Flexión	82.56
Tracción paralela	49.53
Tracción perpendicular	0.60
Compresión Paralela	49.92
Compresión Perpendicular	6.77
Cortante	2.83
Valores característicos de rigidez [kN/mm^2]	
Módulo de elasticidad	
paralelo promedio	5.29
perpendicular promedio	0.36
percentil 5	2.16
Módulo de cortante medio	0.69
Valores característicos de densidad [kg/m^3]	
Densidad característica	2057.50
Densidad media	2012.50

Figura 8. Caracterización de Tectona Grandis realizada por Ing. Jackeline Juárez

2. Diseño a flexión de elementos.

Para la evaluación de los elementos a flexión primero se calculó el esfuerzo último de flexión sobre el elemento y la resistencia a flexión del elemento, acorde a lo estipulado en el Eurocódigo 5. Como primer paso, se calculó la inercia de la sección. Luego, con la carga lineal obtenida de la integración de cargas gravitacionales, se calculó el momento máximo en el elemento. Posteriormente, se calculó el esfuerzo último a flexión.

$$f_{m.y.d} = \frac{k_{mod} \cdot k_{sys} \cdot k_h \cdot f_{mk}}{\gamma_M}$$

Ecuación 2. Cálculo de resistencia a flexión del elemento de madera.

Para el cálculo de la resistencia a flexión del elemento se empleó la ecuación descrita según el Eurocódigo 5. El valor K_{mod} depende de la duración de las cargas, las cuales se consideraron de larga duración, por criterio conservador de diseño. El factor K_{sys} depende de la interacción que posee el elemento evaluado con otros elementos, considerando si existen otros elementos que le generen un aporte adicional en su resistencia. Para este caso, se consideró un valor correspondiente al caso de no participación de otros elementos adicionales. El factor f_{mk} corresponde a la resistencia neta a flexión evaluada en laboratorio para el material del elemento. En este caso, se empleó el valor descrito en el cuadro 14 del trabajo de graduación de la Ing. Jackeline Juárez, previamente citado. Finalmente, se determinó el factor γ_M , el cual corresponde al tipo de material evaluado.

3. Diseño a corte de elementos de madera.

El diseño a corte de elementos de madera acorde al Eurocódigo 5. El valor K_{cr} corresponde al coeficiente de influencia del ancho efectivo de la pieza a evaluar. Este varía dependiendo del tipo de material que se esté empleando. Para los elementos diseñados se empleó el factor correspondiente para madera sólida y para madera laminada.

$$f_{v.d} = \frac{k_{mod} \cdot k_{sys} \cdot f_{v.k}}{\gamma_M}$$

Ecuación 3. Cálculo de resistencia a corte del elemento de madera.

El valor f_{vk} corresponde a la resistencia a corte neta del material del elemento. Se emplearon los valores correspondientes para la madera sólida teca y el estipulado para la madera GL24h.

4. Chequeo de deflexiones en elementos de madera laminada.

En el caso del diseño de elementos de madera este criterio suele ser el determinante. Para la revisión de deflexiones de los elementos de madera se consideraron los lineamientos del EC5. El factor K_{def} varía en relación a la clase de obra de la estructura. A su vez, la clase de obra se asigna en función del porcentaje de humedad de la región. Por lo tanto, este se asignó conforme a la humedad existente en el municipio de Amatitlán y se clasificó según lo especificado en el Eurocódigo 5. Para la región seleccionada se cuenta con un valor de humedad relativa superior al 20%, por lo que corresponde asignar una clase de servicio 3. Se pueden observar los cálculos requeridos en los anexos adjuntos al final del documento.

$$\mu_{inst} = \frac{5 \cdot w \cdot L^4}{32 \cdot E_0 \cdot b \cdot h^3} \cdot \left(1 + 0.96 \left(\frac{E_0}{G_0} \right) \cdot \left(\frac{h}{L} \right)^2 \right)$$

Ecuación 4. Cálculo de deflexiones instantáneas del elemento de madera.

$$\mu_{creep} = k_{def} \cdot \psi_2 \cdot \mu_{inst}$$

Ecuación 5. Cálculo de deflexiones a largo plazo del elemento de madera.

Luego de realizar los cálculos de revisión a flexión, corte y deflexiones, se pudo realizar una propuesta de perfil para los elementos principales y secundarios.

5. Modelado de la estructura de madera en ETABS.

Con las dimensiones de los perfiles propuestos mediante el predimensionamiento, dimensiones de la estructura propuestos, integración de cargas y combinaciones de carga definidas, se procedió a realizar un modelo 3D en el software ETABS con la finalidad de poder realizar un análisis de fuerzas externas y analizar las fuerzas actuantes máximas en la estructura. Para ello, primero se trazó la rejilla de la estructura y se dibujaron los marcos con las dimensiones propuestas. A continuación, se muestran figuras sobre esta parte del modelado.

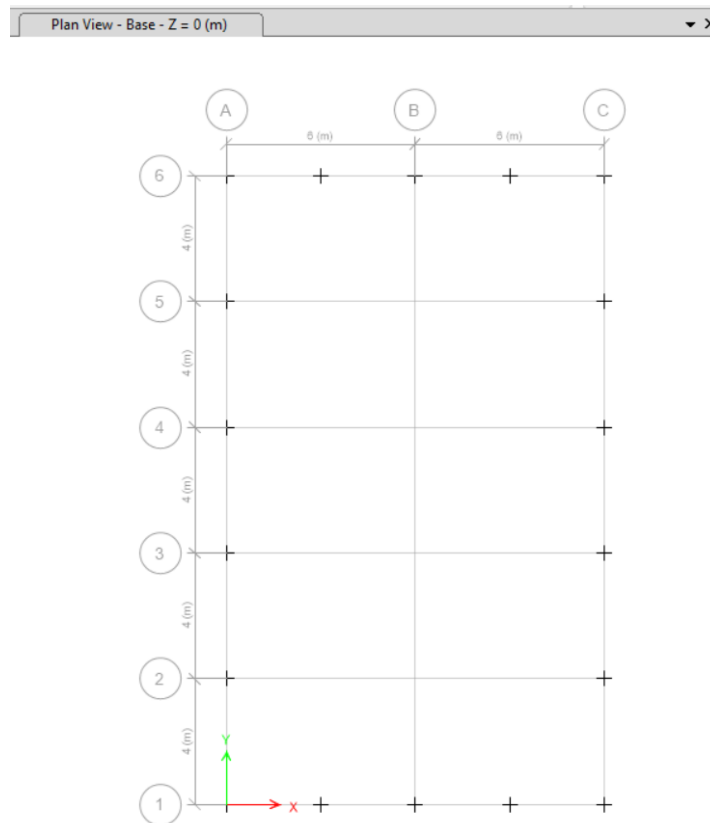


Figura 9. Rejilla trazada para la nave industrial en ETABS.

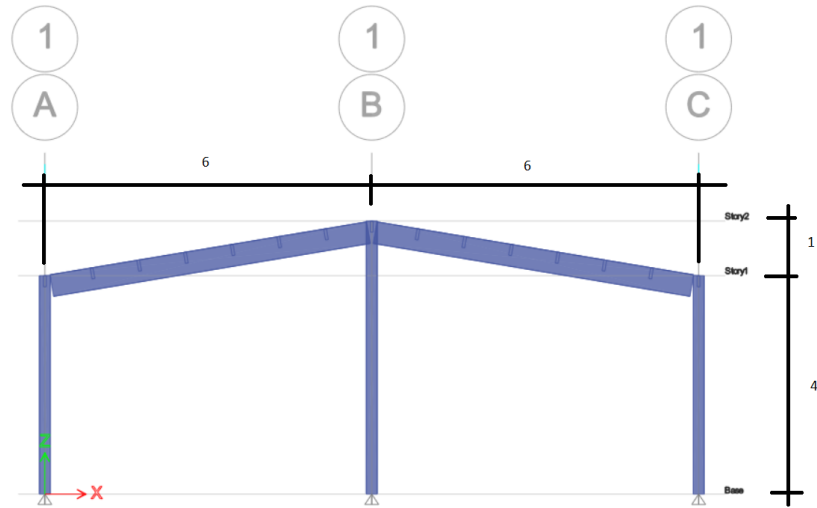


Figura 10. Elevación del eje 1 de la nave industrial de madera

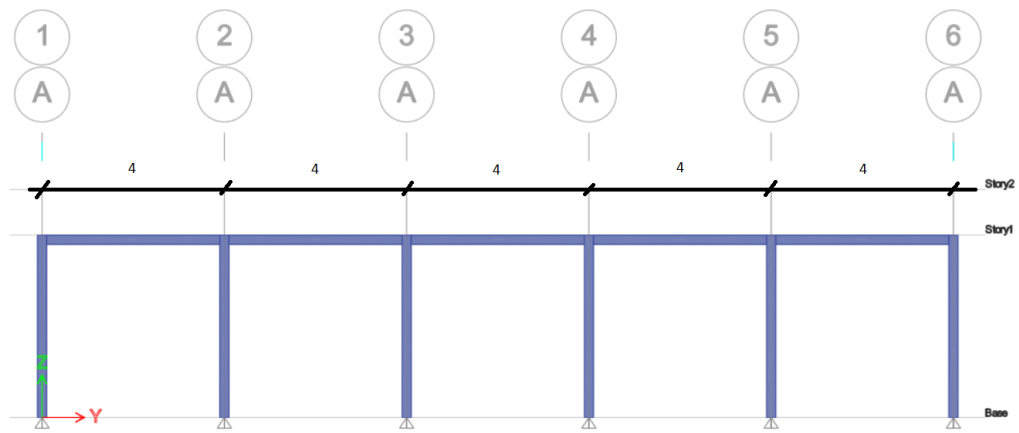


Figura 11. Elevación del eje A de la nave industrial de madera

Una vez trazada la geometría de la estructura se definieron las secciones a emplear para los elementos de la estructura, definiendo los materiales en el software y las dimensiones deseadas para los perfiles. Para el perfil de madera laminada se definió una sección con la densidad respectiva de la GL 24h y dimensiones de 200 mm de ancho y 400 mm de alto. Por otra parte, para el perfil de madera sólida Teca se empleó la densidad 2057.50 kg/m³, estipulada en la referencia citada anteriormente para las propiedades de este material. A continuación, se muestran figuras sobre la definición de materiales en el software.

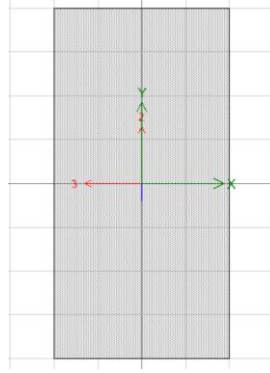


Figura 12. Perfil de madera laminada GL 24h 200 mm x 400 mm.

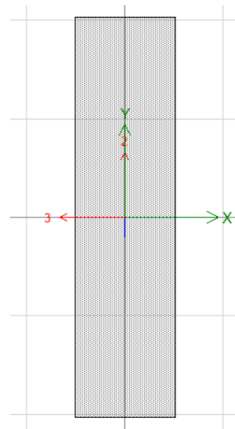


Figura 13. Perfil de madera sólida Teca 2 in x 8 in.

Posteriormente, se procedió a definir en el modelo de ETABS las cargas y las combinaciones de carga previamente estipuladas. Para las cargas por cubierta y carga viva se empleó la configuración por defecto, verificando que se consideraran las cargas como gravitacionales y asignándoles los valores de carga obtenidos en la integración de carga hecha a mano. De esta manera se asignó un valor de 4.25 kg/m para la sobrecarga o cubierta de lámina y un valor de 50 kg/m para la carga viva de cubierta.

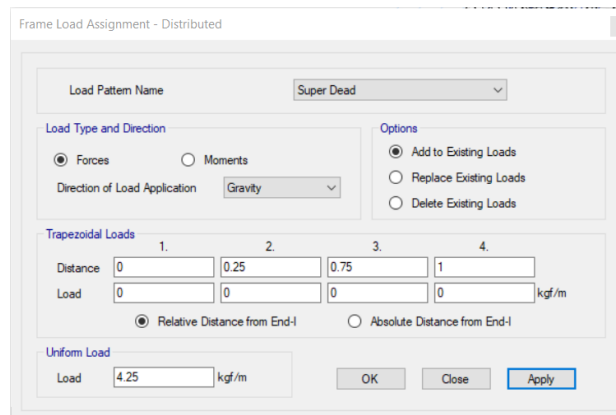


Figura 14. Definición de cubierta de lámina

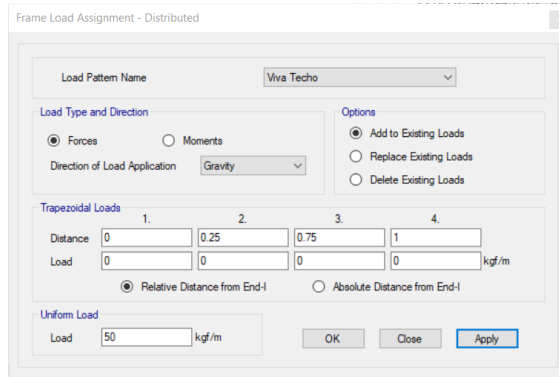


Figura 15. Definición de carga viva

En cuanto a la definición de cargas por viento, se calculó la presión de viento acorde al efecto producido en cada dirección y superficie de análisis. De esta manera, se obtuvo el valor de presión de viento aplicada por unidad de área en cada elemento principal de la estructura, empleando su respectiva presión de viento y área efectiva. A continuación, se muestran figuras del modelo 3D con la distribución de presiones de viento finales para el análisis tanto en dirección X y dirección Y de la estructura.

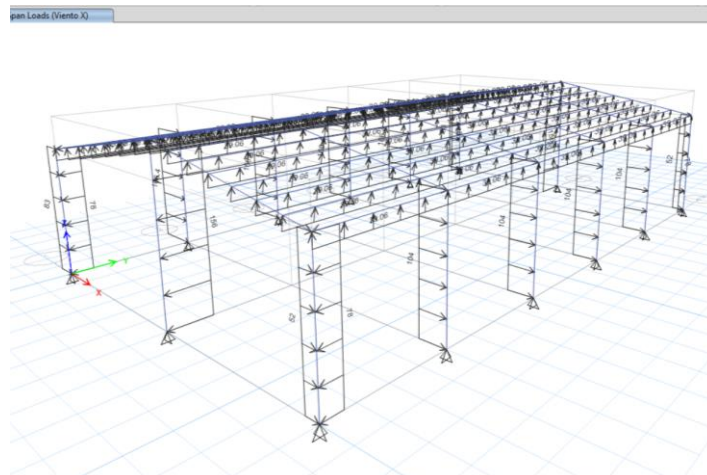


Figura 16. Distribución de cargas de viento para análisis en X

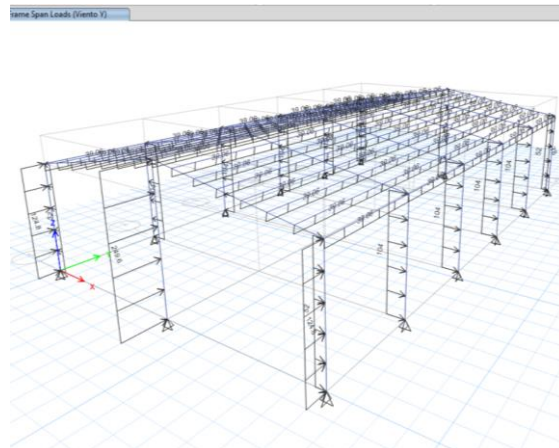


Figura 17. Distribución de cargas de viento para análisis en Y

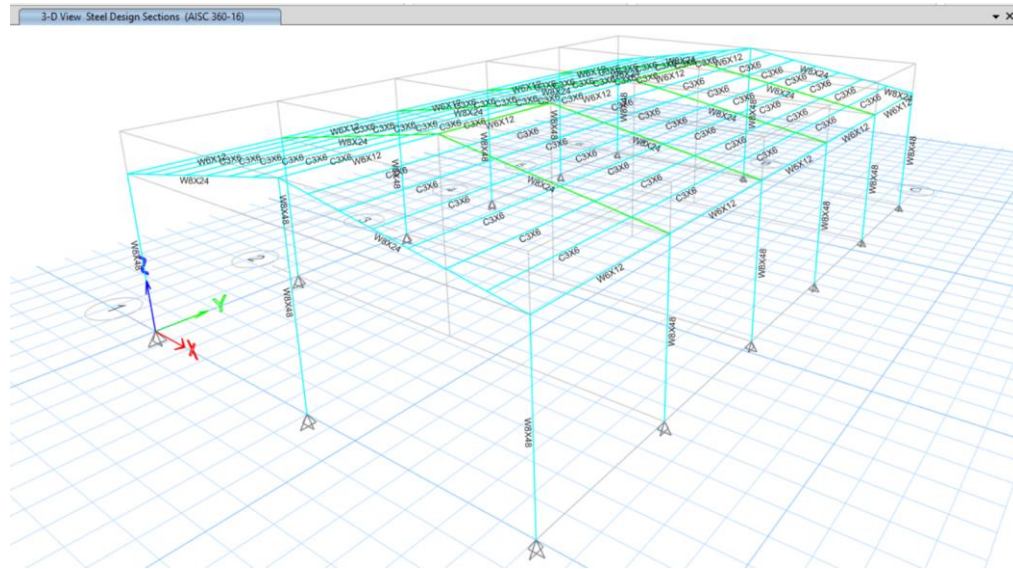


Figura 19. Análisis estructural de modelo 3D de estructura de acero.

G. Comparación de resultados

Mediante el diseño de ambas naves industriales se pudo tener información para poder comparar ambos materiales. La forma en que se realizó esta comparación fue mediante pesos y costos. Para la estructura de madera se calculó el peso de forma manual, mediante el peso específico de los materiales y las dimensiones de las piezas empleadas. Para el acero se consideró el valor de peso obtenido mediante el análisis del software. Para la comparativa de precios se investigó en el mercado local el precio de la madera Teca y se obtuvo su valor por unidad de peso. De igual forma para la madera laminada se consideró un valor de referencia de una sección en específico y se obtuvo el precio por unidad de peso. En el caso del acero se investigó en el mercado nacional el precio del material por unidad de peso. Finalmente, se obtuvo un peso total de cada estructura, un precio total y un precio unitario para cada una de las estructuras realizadas.

VI. RESULTADOS

A. Secciones propuestas para la nave industrial de madera

Material	Perfil	Cantidad
Madera sólida Teca	2"x8"	75
GL24h	200x400x6100mm	12
GL24h	200x200x4000mm	14

Figura 20. Secciones propuestas para estructura de madera

B. Secciones propuestas para la nave industrial de acero

Perfil	Cantidad
C3x6	60
W6x12	15
W8x24	12
W8x48	14

Figura 21. Secciones propuestas para estructura de acero

C. Peso de elementos de nave industrial de madera

Material	Peso (kgf)
Madera sólida Teca	5672
GL24h	3076

Figura 22. Pesos de elementos de GL24h y madera sólida Teca

D. Costos totales y costos unitarios de materiales

Tipo de estructura	Peso (Kgf)	Precio unitario (Q/kgf)	Precio total
Estructura de madera	8748	Q 24.42	Q 213,647.56
Estructura de acero	9876.47	Q 16.93	Q 167,248.51

Figura 23. Pesos, costos unitarios y costos totales por materiales

VII. DISCUSIÓN

La madera laminada es un material que posee una alta resistencia a diferente tipo de esfuerzos y permite el diseño de naves industriales acorde a las condiciones de sitio propuestas. Mediante los cálculos realizados a mano se pudo comprobar que los diferentes elementos de madera laminada cumplieron satisfactoriamente los requisitos por esfuerzos de flexión, esfuerzos de corte y chequeo de deflexiones. Además, es válido proponer que la madera teca es apta para la construcción, habiendo chequeado de forma satisfactoria al mismo tipo de esfuerzos acorde a los lineamientos establecidos en el Eurocódigo 5.

Para plantear la ubicación del proyecto fue de vital importancia identificar el enfoque se le deseaba dar al trabajo de graduación. El planteamiento de ubicar la nave industrial en el municipio de Amatlán fue un acierto, pudiendo considerar condiciones bastante realistas para el diseño. Se pudo haber seleccionado una ubicación que tuviera condiciones de viento menos exigentes, a modo de favorecer el diseño. Sin embargo, el propósito del diseño realizado fue plasmar un diseño que pudiera estar bastante encaminado a un escenario real. Cabe destacar que la selección del sitio se basó en la experiencia y conocimiento empírico del estudiante en relación a los ambientes que han podido ser identificados por él. La zona seleccionada es considerada una alta zona de influencia industrial, y permitió el uso de condiciones que no representaron ni escenarios óptimos ni críticos, siendo un buen escenario para el planteamiento del diseño propuesto. La ubicación afectó en dos criterios importantes que es importante destacar. En primer lugar, influyó en las presiones de viento que fueron integradas a la estructura. En segundo lugar, afectó en la clasificación de clase de obra que estipula el Eurocódigo 5. Debido a la humedad de la zona, la cual se encuentra entre el 69 y 90 por ciento, se consideró una clase de obra tipo 3, la cual corresponde para zonas con humedades superiores al 20.

Por otra parte, al realizar el diseño de los elementos de la nave industrial de madera se tuvo la incógnita de cómo abordar el cálculo. Acorde a investigación previa, se consideró el uso de diferentes softwares. Sin embargo, se decidió realizar los chequeos de resistencia de forma manual, a fin de poder demostrarlos y generar un proceso más académico. Para la parte del predimensionamiento se evaluaron secciones para las vigas principales y secundarias mediante verificación de resistencia a flexión, cortante y deflexiones. Para esta primera parte sólo se consideró la acción de fuerzas gravitacionales, ya que el parámetro controlador en este tipo de estructuras suelen ser las deflexiones y estas no se ven afectadas por las fuerzas de viento.

Para las vigas secundarias, se evaluó elementos de madera sólida de Teca con una sección de 2'x4' y una longitud de 4 metros. Mediante el cálculo se obtuvo un esfuerzo a flexión último de 6.439 N/mm² y una resistencia a flexión de 44.45 N/mm², cumpliendo satisfactoriamente empleando únicamente 14.49 por ciento de la resistencia a flexión. Por otra parte, se obtuvo un esfuerzo a corte máximo de 0.491 N/mm² y una resistencia a corte de 1.906 N/mm², cumpliendo satisfactoria empleando únicamente el 25.74 por ciento de la capacidad a corte del elemento. Finalmente, la verificación de deflexiones evidenció una deflexión instantánea de 12.27 mm y una deflexión a largoplazo de 9.1 mm como deflexiones últimas. Como deflexiones admisibles se obtuvo un valor de 13.33 mm para deflexiones instantáneas y un valor de 26.67 mm para las deflexiones a largo plazo. Por lo tanto, se cumplió correctamente con la sección propuesta.

Para las vigas primarias se evaluó elementos de madera laminada GL28h con una sección de 200mm x 400mm y una longitud de 6.10 metros. Mediante el cálculo se obtuvo un esfuerzo a flexión último de 2.595 N/mm² y una resistencia a flexión de 14 N/mm², cumpliendo satisfactoriamente empleando únicamente 18.54 por ciento de la resistencia a flexión. Por otra parte, se obtuvo un esfuerzo a corte máximo de 0.256 N/mm² y una resistencia a corte de 1.512 N/mm², cumpliendo satisfactoria empleando únicamente el 16.93 por ciento de la capacidad a corte del elemento. Finalmente, la verificación de deflexiones evidenció una deflexión instantánea de 4.002 mm y una deflexión a largo plazo de 7.546 mm como deflexiones últimas. Como deflexiones admisibles se obtuvo un valor de 20.276 mm para deflexiones instantáneas y un valor de 40.552 mm para las deflexiones a largo plazo. Por lo tanto, se cumplió correctamente con la sección propuesta.

Para la parte de integración de cargas de viento se siguió los lineamientos de la NSE 2. En primer lugar, para superficies verticales se obtuvo un valor de presión a barlovento equivalente 8.52 psf y una presión a sotavento igual a 5.325 psf. En cuanto a las presiones de viento sobre techo inclinado se obtuvo un valor de 7.455 psf en succión para el viento perpendicular a la cumbrera y un valor de 7.455 psf para el viento paralelo a la cumbrera, también en succión. Las presiones por carga de viento resultaron ser las cargas de mayor valor en toda la integración de cargas realizada. Por lo tanto, se considera que la influencia por acciones de viento es la parte controladora para las condiciones y estructura propuestas.

En cuanto al modelado, se realizó un modelo en ETABS para la nave industrial de acero y para la nave industrial de madera. En ambos modelos se definieron las secciones y materiales a emplear y las cargas gravitacionales y de viento correspondientes. De esta forma, para la nave industrial de madera se evaluaron las acciones, a modo de obtener los momentos y cortes máximos en las vigas secundarias y primarias de la estructura. Para las vigas secundarias el modelo indicó un valor de momento máximo de 3.24 kN*m, generando un esfuerzo último equivalente a 9.28 N/mm². Se volvió a evaluar la resistencia a flexión para las vigas secundarias empleando las acciones del modelo y se obtuvo un cumplimiento de las solicitudes con un 20.88 por ciento de la capacidad del elemento. Finalmente, para las vigas principales se obtuvo un momento máximo de 70.74 kN*m, generando un esfuerzo último por flexión equivalente a 13.265 N/mm². Con dichos valores, se alcanzó el cumplimiento de las solicitudes con un 94.77 por ciento de la capacidad a flexión del elemento. Por tanto, se consideró que las secciones GL24h seleccionadas en el predimensionamiento fueron acertadas y apropiadas. Las vigas secundarias, si bien aún demostraron poder ser optimizables, se conservaron de igual forma que en el predimensionamiento y no fueron cambiadas.

Para el diseño de la nave de acero se empleó un modelo ETABS con secciones seleccionadas arbitrariamente para los diferentes elementos de la estructura. Se empleó el módulo de diseño del software, el cual se configuró con los lineamientos del AISC 360-16. Luego, se fue realizando un diseño optimizando los diferentes perfiles hasta llegar a un cumplimiento de demandas con capacidades cerca de los valores admisibles para los elementos de las costaneras. El diseño generó perfiles de tipo C3x6 y W6x12, marcos principales con perfiles W8x24 para las vigas principales y perfiles W8x48 para las columnas.

Por último, se realizó el análisis comparativo de las estructuras. Para ello, se realizó un cálculo manual para la obtención del peso de la estructura de madera. Se obtuvo un peso de 3,076 kgf para los elementos de madera laminada GL24h. Para los elementos de madera sólida de Teca se obtuvo

un peso de 5,672 kgf. Esta diferencia se atribuyó inicialmente a que se contaba con mayor cantidad de elementos de madera sólida. El volumen total de elementos de madera laminada GL24h es de 8.10 m³ mientras que el volumen total de elementos de madera sólida de Teca es de 2.32 m³, por lo que realmente se tiene un mayor volumen de elementos de madera laminada. Sin embargo, la densidad de la madera laminada encolada GL24h es de 380 kg/m³, mientras que la densidad de la madera sólida Teca es de 2442 kg/m³, siendo esta última más de seis veces la densidad de la madera GL24h. Por lo tanto, se considera que dicha diferencia de peso se debe a la densidad elevada de la madera sólida de Teca. Al final, la estructura de madera tuvo un peso equivalente a 8,748 kgf. Por otra parte, para la revisión del peso de la estructura de acero se revisó el modelo de ETABS, obteniendo un peso total de la estructura de 9,876 kgf.

Aparte de la revisión de peso, se realizó un análisis comparativo de costo total de la estructura y costos unitarios. Para ello, se evaluaron precios de referencia en el mercado nacional para el acero y la madera sólida de Teca, mientras que para la madera laminada se evaluaron precios en el mercado internacional. Luego de cuantificar los elementos y asignarles un precio se obtuvo un costo total para la estructura de madera de Q213,647.56. Para la estructura de acero se obtuvo un precio de Q167,248.51. Es importante destacar que dichos precios únicamente contemplan los costos por materiales de elementos principales de la estructura. No se contempló una integración por mano de obra. Finalmente, se obtuvo un precio unitario de Q24.42 por kgf para la estructura de madera y un precio unitario de Q16.93 por kgf para la estructura de acero.

VIII. CONCLUSIONES

- Se diseñó una nave industrial de marcos a dos aguas, con un ancho de 12 metros, un largo de 20 metros, equidistancia entre marcos de 4 metros, altura a hombro de 4 metros y altura a cumbrera de 5 metros, considerando elementos principales de madera laminada y elementos secundarios de madera sólida como material estructural y se diseñó otra nave industrial con la misma geometría utilizando acero para todos sus elementos.
- Se realizó el diseño considerando una integración de cargas gravitacionales y acciones del viento acorde a la norma NSE 2, así como revisión de elementos de madera por método LRFD acorde al Eurocódigo 5 y revisión de elementos de acero según norma AISC 360-16 mediante software.
- Se realizó el diseño por esfuerzos de flexión, esfuerzos de corte y cumplimiento de deflexiones admisibles para los elementos de una nave industrial con madera laminada empleando una cubierta de lámina galvanizada, costaneras de madera Teca con perfiles de 2" de ancho, 6" de alto y 4 metros de largo y marcos principales de madera laminada GL28h con perfiles de 200 mm de ancho, 400 mm de alto y 6.10 metros de longitud máxima.
- Se realizó el diseño de elementos de una nave industrial de acero, considerando costaneras con perfiles C3x6 y W6x12, marcos principales con perfiles W8x24 para las vigas principales y perfiles W8x48 para las columnas, mediante un modelo 3D en ETABS con los lineamientos de la norma AISC 360-16.
- Se obtuvo valores de peso y precio para la estructura de madera, obteniendo un peso para la estructura de madera igual a 8,748 kgf, un precio total de Q213,647.56 y un costo unitario equivalente a Q24.42 por kilogramo fuerza.
- Se obtuvo valores de peso y precio para la estructura de acero, obteniendo un peso igual a 9,876 kgf, un precio total de Q167,248.51 y un costo unitario equivalente a Q16.93 por kilogramo fuerza.
- Mediante la comparación de pesos y precios unitarios se considera que, para la tipología y consideraciones de carga planteadas, es más rentable económicamente emplear acero como material estructural en lugar de madera laminada y madera sólida.

IX. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar comparaciones entre el rendimiento de la nave industrial propuesta y naves industriales de madera laminada con diferentes tipologías, a modo de obtener resultados que puedan mostrar escenarios más competentes para la madera laminada en el contexto guatemalteco.
- Se recomienda incluir un análisis estructural con consideraciones de efecto de sismo, a modo de verificar la combinación de carga crítica para las estructuras propuestas.
- Se recomienda realizar un análisis comparativo de los materiales mencionados haciendo uso de perfiles acartelados con la finalidad de analizar escenarios que permitan la optimización de los materiales y un análisis comparativo bajo criterios más realistas.
- Se recomienda realizar el análisis comparativo de la nave industrial de madera laminada propuesta con una nave industrial de acero diseñada mediante el Eurocódigo 8, a modo de obtener conclusiones tomando de referencia los criterios planteados por la normativa europea para ambas estructuras.
- Se recomienda realizar el análisis comparativo de la nave industrial de acero propuesta con una nave industrial de madera laminada diseñada mediante la norma estadounidense de construcción de madera, a modo de tener homogeneidad en los criterios de diseño empleados.
- Se recomienda generar propuestas de conexiones para las estructuras propuestas con el fin de complementar el análisis comparativo realizado y obtener nuevas conclusiones en relación a la comparación de precios propuesta en el presente trabajo.
- Al Gremial Forestal de Guatemala, se recomienda el fomento en la investigación del mercado constructivo de la madera en Guatemala, a modo de incentivar la generación de un mercado competente de madera en nuestro país, con regulaciones apropiadas para nuestros recursos forestales.
- Se recomienda el aprendizaje de diseño de estructuras de madera, a modo de generar profesionales capaces de realizar este tipo de diseños y que puedan responder a una futura demanda en el diseño de estructuras de madera en Guatemala.
- Al departamento de ingeniería civil de la Universidad del Valle de Guatemala, se recomienda el uso de softwares que incorporen la madera como material estructural dentro de sus configuraciones para tener análisis más completos y comparaciones más detalladas a diferentes niveles en el aprendizaje del diseño de estructuras de madera.

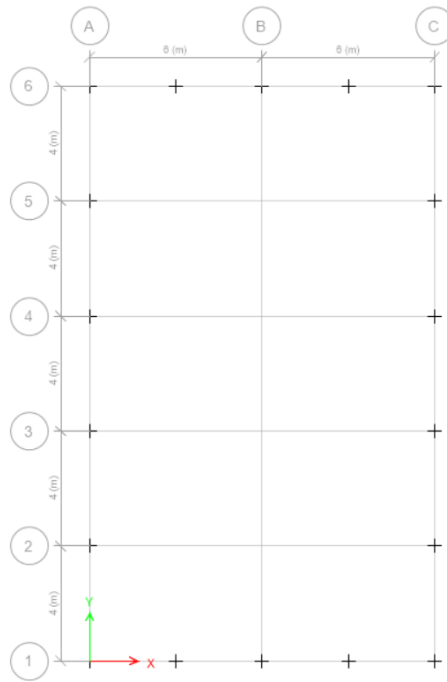
X. BIBLIOGRAFÍA

- AENOR. 2016. *Eurocódigo 5 Proyecto de estructuras de madera*. Madrid: AENOR. 148 págs.
- AGIES. 2018. *NSE 2 Demandas estructurales y condiciones de sitio*. Ciudad de Guatemala. 108 págs.
- Aguilar, Jorge. 2011. *Madera: Materiales y materias primas*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Ministerio de Educación. 27 págs.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. 2014. *NEC: Estructuras de Acero*. Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI. 114 págs.
- Cabrero, José Manuel, *et al.* 2013. *Madera y fuego*. Comunidad Foral de Navarra: 20&02 Otero & Ollo Comunicación S.L.L. 39 págs.
- CITEmadera. 2009. *Técnicas de secado de la madera*. Lima: CITEmadera. 64 págs.
- Cruz de León, José. 2010. *Manual para la protección contra el deterioro de la madera*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 94 págs.
- Demkoff, Miguel. 2003. «Vigas laminadas estructurales de madera, su fabricación y empleo». Concordia: XVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. 6 págs.
- Díaz, Ángel. 2012. *Guía de tipología de maderas para la construcción de una vivienda en Guatemala*. Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala. Ciudad de Guatemala. 172 págs.
- Giménez, Ana. 2005. *Anatomía de madera*. Ciudad del Santiago del Estero: Facultad de ciencias forestales de la Universidad Nacional de Santiago del Estero. 78 págs.
- Gysling, Janina, *et al.* 2021. *El mercado de productos de ingeniería en madera en Chile: Madera laminada encolada y cerchas industrializadas*. Santiago: Instituto Forestal. 72 págs.
- Herzog, Thomas. 2004. *Timber Construction Manual*. Munich: Friedemann Zeitler. 375 págs.
- Juárez, Jackeline. 2020. *Caracterización de las propiedades mecánicas de madera natural y clonada de "Tectona grandis"*. Tesis Universidad del Valle de Guatemala. Ciudad de Guatemala. 128 págs.
- Luecke, William, *et al.* 2005. *Mechanical Properties of Structural Steels*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. 324 págs.
- Martín, Francisco; Ruíz, Jesús e Izquierdo M. 2001. «La madera como fijadora de C O₂». Boletín de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural de la Universidad Politécnica de Madrid. I (210): 63-67.
- Natterer, Julius. 2011. *Einfach Bauen mit Holz*. Landesbeirat Holz: Berlin/Brandenburg. 63 págs.

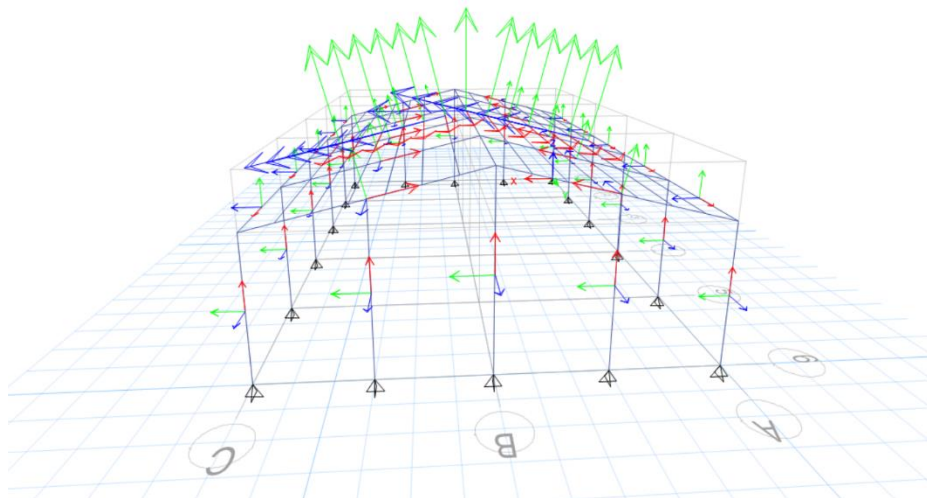
- Pérez, Vicente. 1992. *Manual 11: Manual de madera laminada*. 2ª edición. Santiago de Chile: INFOR. 306 págs.
- Suárez, Edhison. 2021. *La resistencia a la flexión en la madera*. Quito: Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas. 11 págs.
- Suirezs, Teresa. 2009. *Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera*. Buenos Aires: Editorial Universitaria de Misiones. 56 págs.
- UVG. (2016). Recuperado el 15 de agosto del 2023, de *¿Cómo ha cambiado el panorama forestal de Guatemala en los últimos cinco años?: <https://noticias.uvg.edu.gt/mapa-cobertura-forestal-universidad-valle-laboratorio-sig-ceab/>*

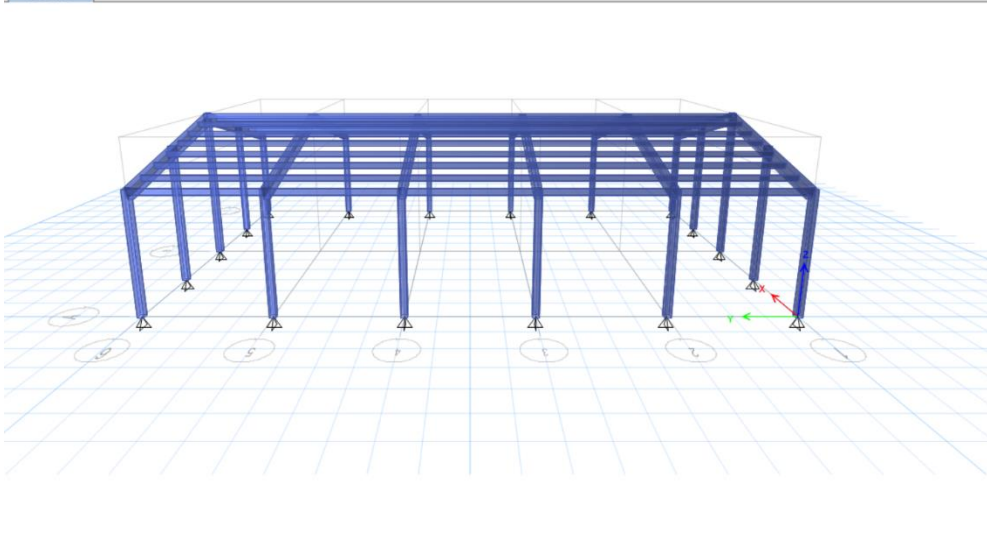
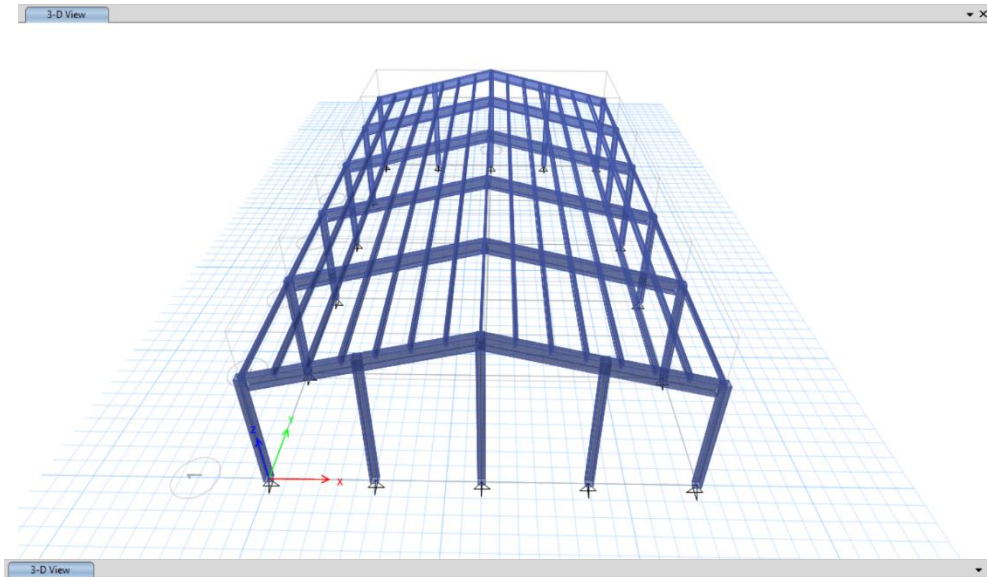
XI. APÉNDICES

Plan View - Base - Z = 0 (m)



3-D View Local Axes





E Define Load Patterns

Load	Type	Self Weight Multiplier	Auto Lateral Load
Viento Y	Other	0	
Dead	Dead	1	
Live	Live	0	
Super Dead	Super Dead	0	
Viva Techo	Roof Live	0	
Viento X	Other	0	
Viento Y	Other	0	

Click To:

Frame Load Assignment - Distributed

Load Pattern Name: Super Dead

Load Type and Direction:

 Forces Moments

 Direction of Load Application: Gravity

Options:

 Add to Existing Loads

 Replace Existing Loads

 Delete Existing Loads

Trapezoidal Loads

	1.	2.	3.	4.
Distance	0	0.25	0.75	1
Load	0	0	0	0

kgf/m

Relative Distance from End-I Absolute Distance from End-I

Uniform Load

Load: 4.25 kgf/m

OK Close Apply

Frame Load Assignment - Distributed

Load Pattern Name: Viva Techo

Load Type and Direction:

 Forces Moments

 Direction of Load Application: Gravity

Options:

 Add to Existing Loads

 Replace Existing Loads

 Delete Existing Loads

Trapezoidal Loads

	1.	2.	3.	4.
Distance	0	0.25	0.75	1
Load	0	0	0	0

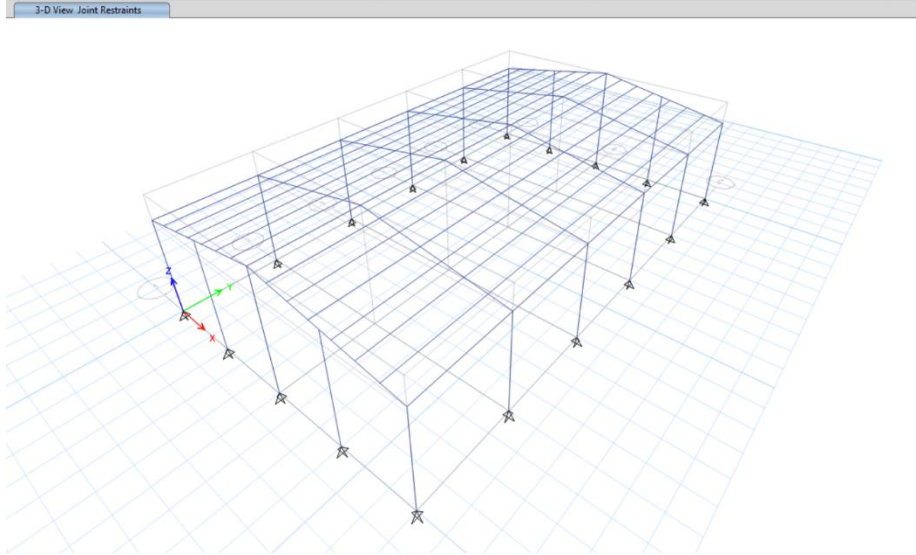
kgf/m

Relative Distance from End-I Absolute Distance from End-I

Uniform Load

Load: 50 kgf/m

OK Close Apply



Frame Load Assignment - Distributed

Load Pattern Name: Viento X

Load Type and Direction: Forces Moments
Direction of Load Application: Local-2

Options: Add to Existing Loads Replace Existing Loads Delete Existing Loads

Trapezoidal Loads:

	1.	2.	3.	4.
Distance	0	0.25	0.75	1
Load	0	0	0	0

Relative Distance from End-I Absolute Distance from End-I

Uniform Load: Load: 39.06 kgf/m

Buttons: OK, Close, Apply

Frame Load Assignment - Distributed

Load Pattern Name: Viento Y

Load Type and Direction: Forces Moments
Direction of Load Application: Local-2

Options: Add to Existing Loads Replace Existing Loads Delete Existing Loads

Trapezoidal Loads:

	1.	2.	3.	4.
Distance	0	0.25	0.75	1
Load	0	0	0	0

Relative Distance from End-I Absolute Distance from End-I

Uniform Load: Load: 39.06 kgf/m

Buttons: OK, Close, Apply

Frame Load Assignment - Distributed

Load Pattern Name: Viento X

Load Type and Direction:

 Forces Moments

 Direction of Load Application: Global-X

Options:

 Add to Existing Loads

 Replace Existing Loads

 Delete Existing Loads

Trapezoidal Loads

	1.	2.	3.	4.
Distance	0	0.25	0.75	1
Load	0	0	0	0

kgf/m

Relative Distance from End-I Absolute Distance from End-I

Uniform Load

Load: 166.4 kgf/m

OK Close Apply

Frame Load Assignment - Distributed

Load Pattern Name: Viento X

Load Type and Direction:

 Forces Moments

 Direction of Load Application: Global-X

Options:

 Add to Existing Loads

 Replace Existing Loads

 Delete Existing Loads

Trapezoidal Loads

	1.	2.	3.	4.
Distance	0	0.25	0.75	1
Load	0	0	0	0

kgf/m

Relative Distance from End-I Absolute Distance from End-I

Uniform Load

Load: 83.2 kgf/m

OK Close Apply

Frame Load Assignment - Distributed

Load Pattern Name: Viento X

Load Type and Direction:

 Forces Moments

 Direction of Load Application: Global-X

Options:

 Add to Existing Loads

 Replace Existing Loads

 Delete Existing Loads

Trapezoidal Loads

	1.	2.	3.	4.
Distance	0	0.25	0.75	1
Load	0	0	0	0

kgf/m

Relative Distance from End-I Absolute Distance from End-I

Uniform Load

Load: 104 kgf/m

OK Close Apply

Load Pattern Name: **Viento X**

Load Type and Direction

Forces Moments

Direction of Load Application: **Global-X**

Options

Add to Existing Loads
 Replace Existing Loads
 Delete Existing Loads

Trapezoidal Loads

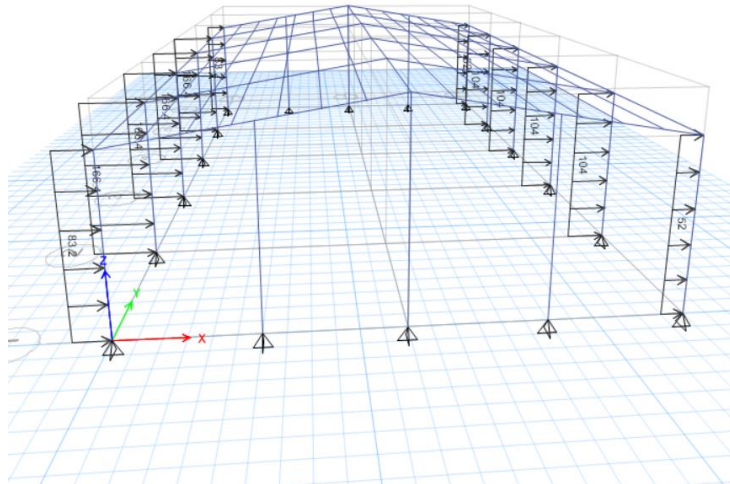
	1.	2.	3.	4.
Distance	0	0.25	0.75	1
Load	0	0	0	0

Relative Distance from End-I Absolute Distance from End-I

Uniform Load

Load: **52** kgf/m

OK Close **Apply**



Load Pattern Name: **Viento X**

Load Type and Direction

Forces Moments

Direction of Load Application: **Global-Y**

Options

Add to Existing Loads
 Replace Existing Loads
 Delete Existing Loads

Trapezoidal Loads

	1.	2.	3.	4.
Distance	0	0.25	0.75	1
Load	0	0	0	0

Relative Distance from End-I Absolute Distance from End-I

Uniform Load

Load: **-156** kgf/m

OK Close **Apply**

Load Pattern Name: Viento X

Load Type and Direction: Forces Moments
Direction of Load Application: Global-Y

Options: Add to Existing Loads Replace Existing Loads Delete Existing Loads

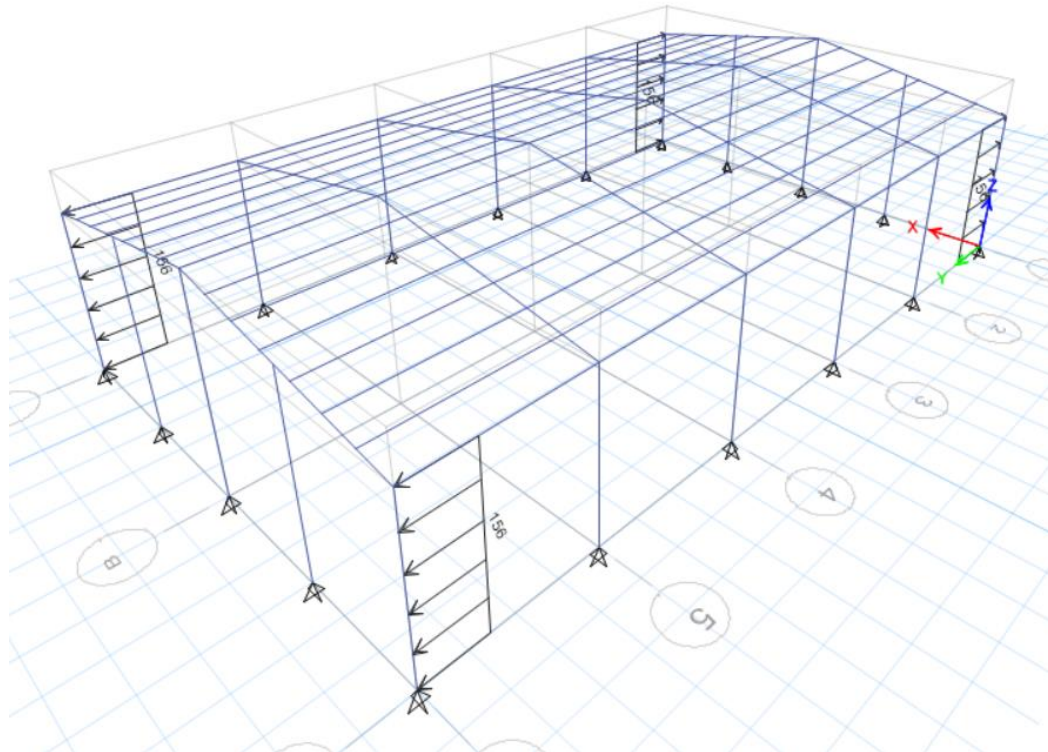
Trapezoidal Loads

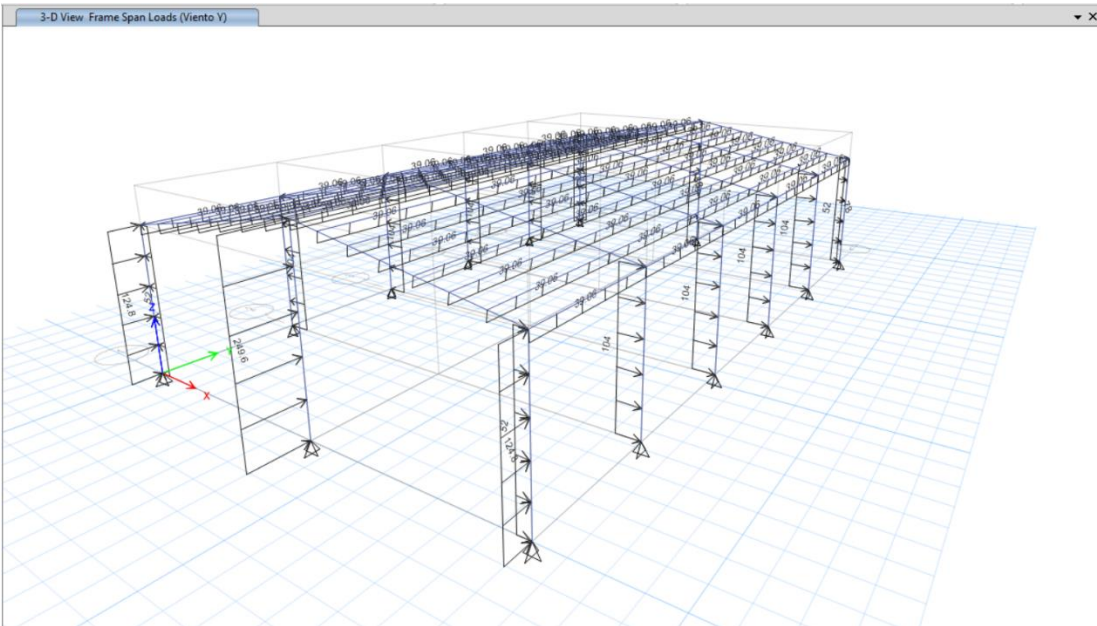
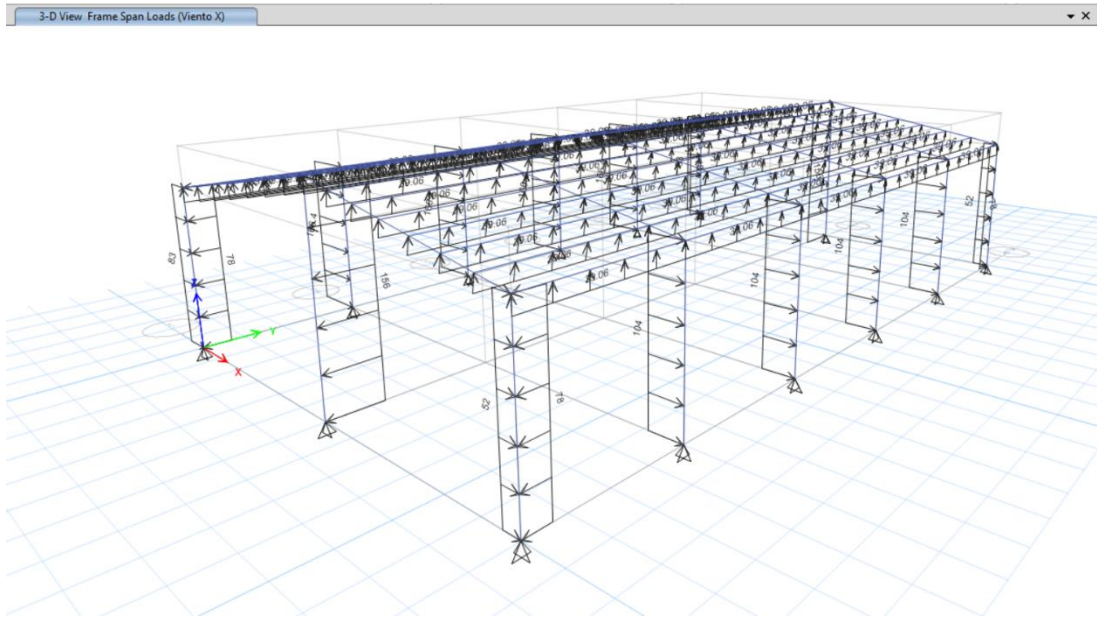
	1.	2.	3.	4.
Distance	0	0.25	0.75	1
Load	0	0	0	0

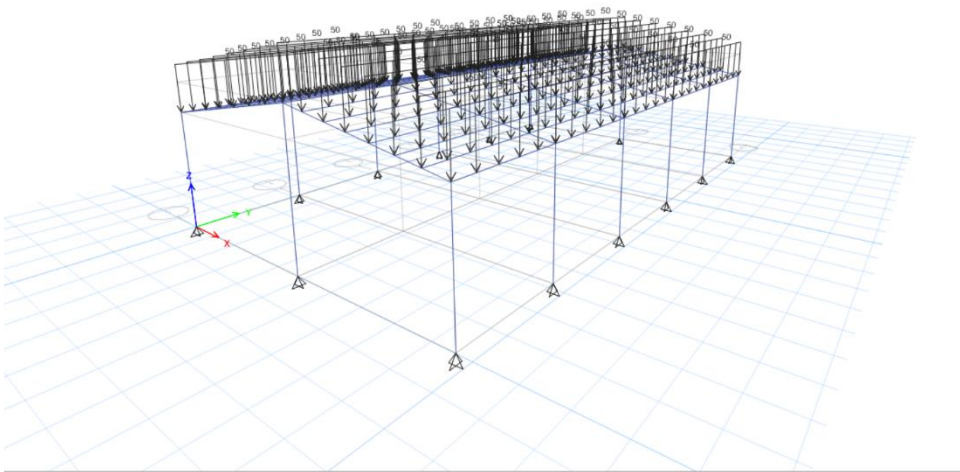
Relative Distance from End-I Absolute Distance from End-I

Uniform Load: Load: 156 kgf/m

Buttons: OK, Close, Apply







E Load Combination Data [X]

General Data

Load Combination Name:

Combination Type:

Notes:

Auto Combination:

Define Combination of Load Case/Combo Results

Load Name	Scale Factor
Dead	1
Super Dead	1

E Load Combination Data [X]

General Data

Load Combination Name:

Combination Type:

Notes:

Auto Combination:

Define Combination of Load Case/Combo Results

Load Name	Scale Factor
1. CM	1
Viva Techo	1

E Load Combination Data [X]

General Data

Load Combination Name:

Combination Type:

Notes:

Auto Combination:

Define Combination of Load Case/Combo Results

Load Name	Scale Factor
1. CM	1.4

E Load Combination Data

General Data

Load Combination Name:

Combination Type:

Notes:

Auto Combination:

Define Combination of Load Case/Combo Results

Load Name	Scale Factor
1. CM	1.2
Live	1.6
Viva Techo	0.5

E Load Combination Data

General Data

Load Combination Name:

Combination Type:

Notes:

Auto Combination:

Define Combination of Load Case/Combo Results

Load Name	Scale Factor
1. CM	1.2
Live	1
Viva Techo	1.6

E Load Combination Data

General Data

Load Combination Name:

Combination Type:

Notes:

Auto Combination:

Define Combination of Load Case/Combo Results

Load Name	Scale Factor
1. CM	1.2
Viento X	1
Live	1
Viva Techo	0.5

E Load Combination Data [Close]

General Data

Load Combination Name: CR6-b

Combination Type: Linear Add

Notes: [Modify/Show Notes...]

Auto Combination: No

Define Combination of Load Case/Combo Results

Load Name	Scale Factor
1. CM	1.2
Viento Y	1
Live	1
Viva Techo	0.5

[Add] [Delete]

[OK] [Cancel]

E Load Combination Data [Close]

General Data

Load Combination Name: CR7-a

Combination Type: Linear Add

Notes: [Modify/Show Notes...]

Auto Combination: No

Define Combination of Load Case/Combo Results

Load Name	Scale Factor
1. CM	0.9
Viento X	1

[Add] [Delete]

[OK] [Cancel]

E Load Combination Data [Close]

General Data

Load Combination Name: CR7-b

Combination Type: Linear Add

Notes: [Modify/Show Notes...]

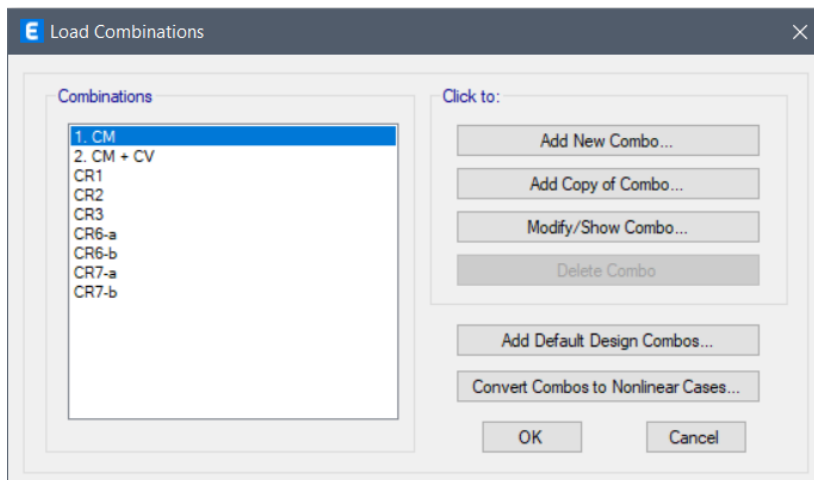
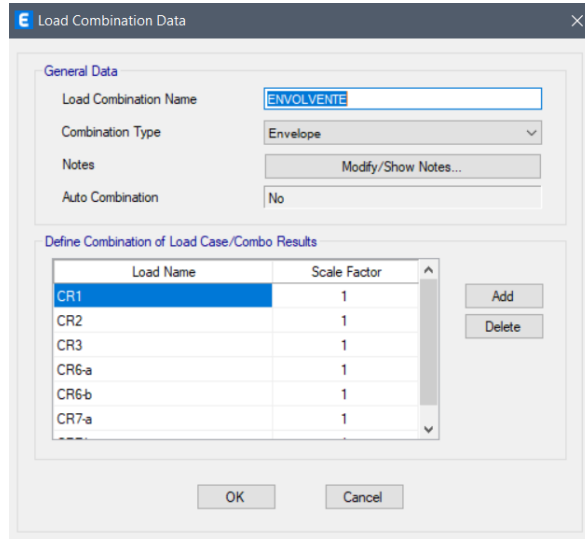
Auto Combination: No

Define Combination of Load Case/Combo Results

Load Name	Scale Factor
1. CM	0.9
Viento Y	1

[Add] [Delete]

[OK] [Cancel]



Load Case/Load Combination/Modal Case

Case
 Combo
 Mode

ENVOLVENTE Max and Min

Component

Axial Force
 Torsion
 Inplane Shear
 Shear 2-2
 Moment 2-2
 Inplane Moment
 Shear 3-3
 Moment 3-3

Scaling

Automatic
 User Defined
 Scale Factor:

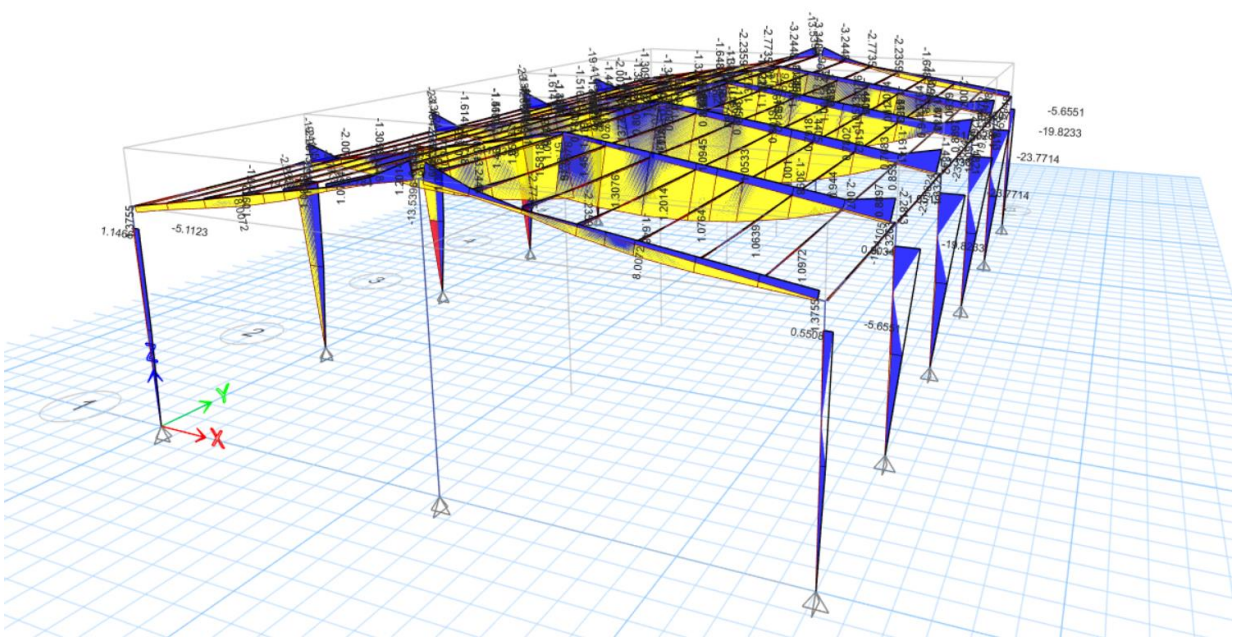
Display Options

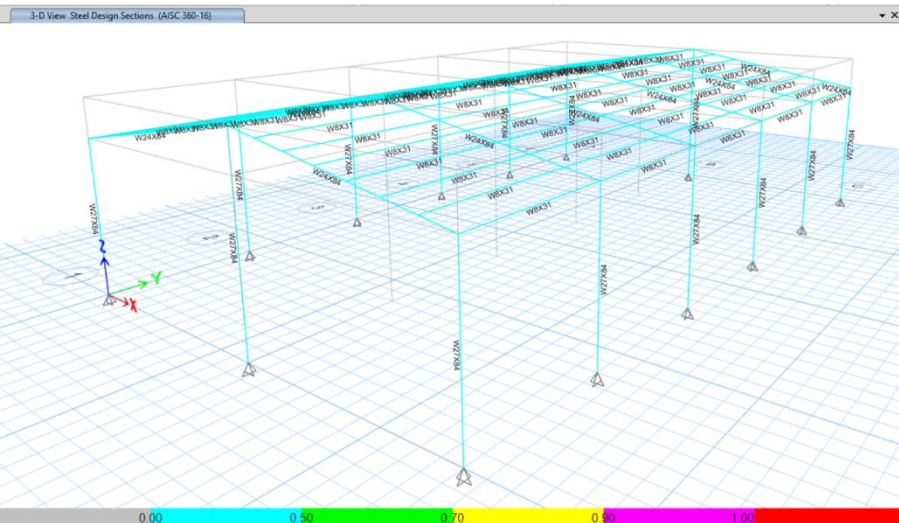
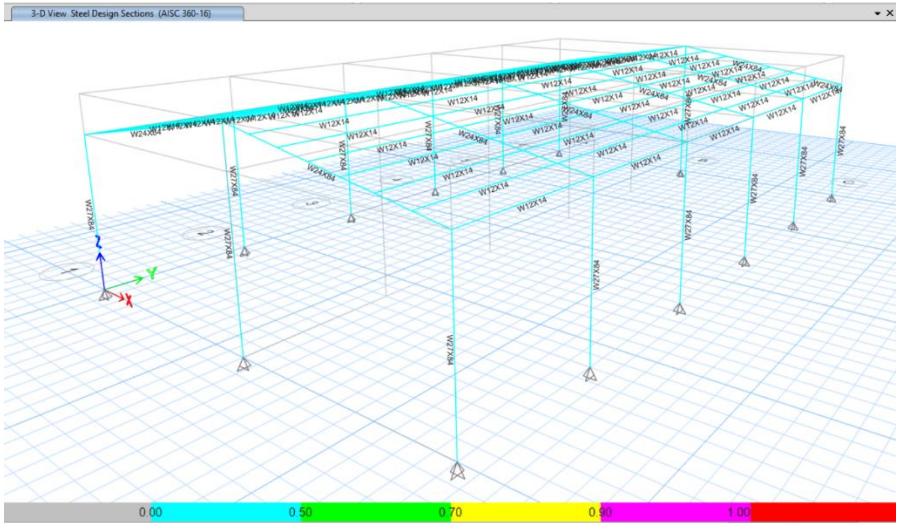
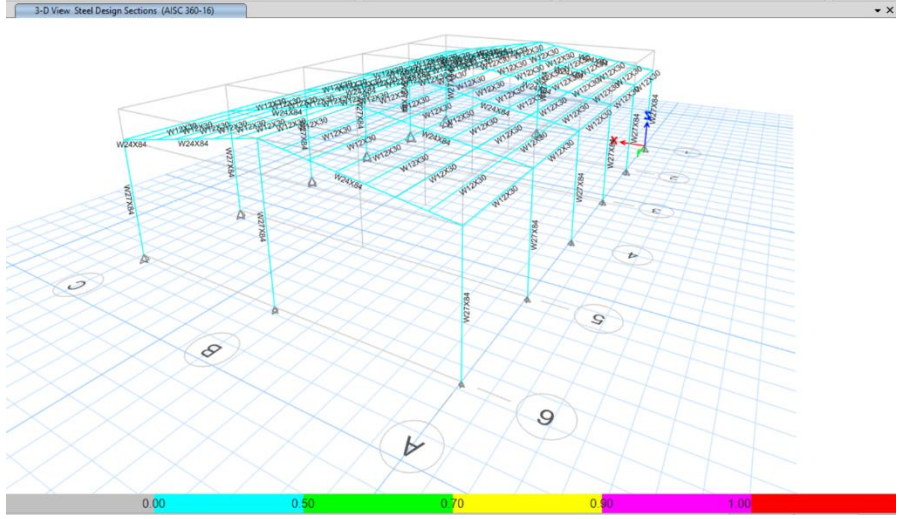
Fill Diagram
 Show Values at Controlling Stations on Diagram

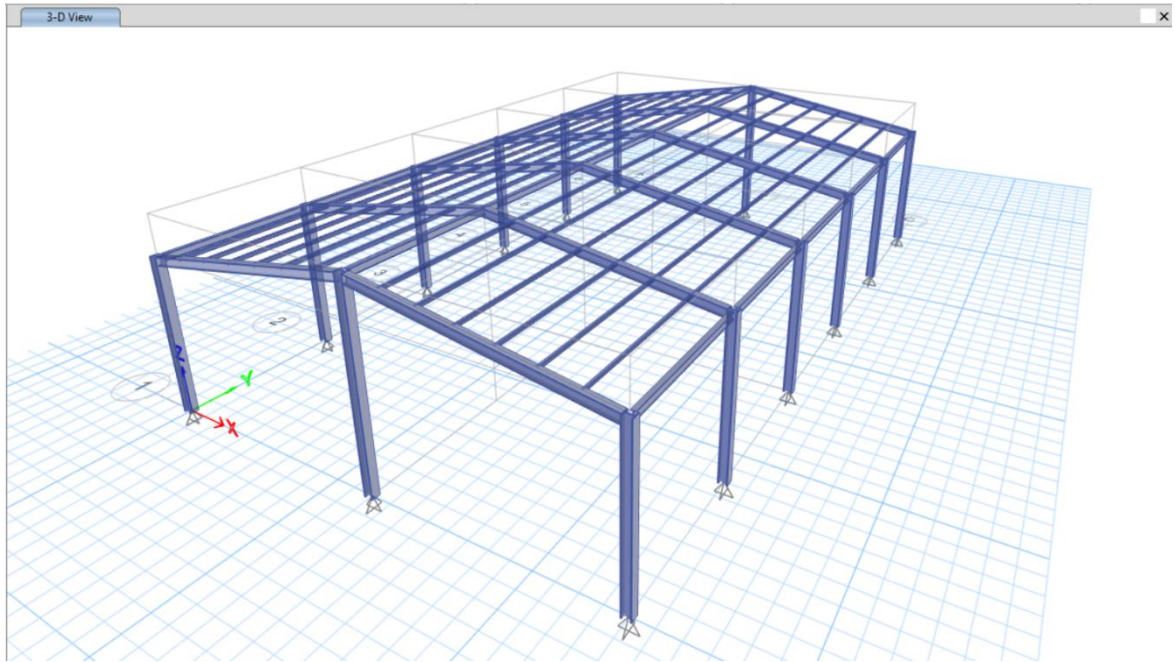
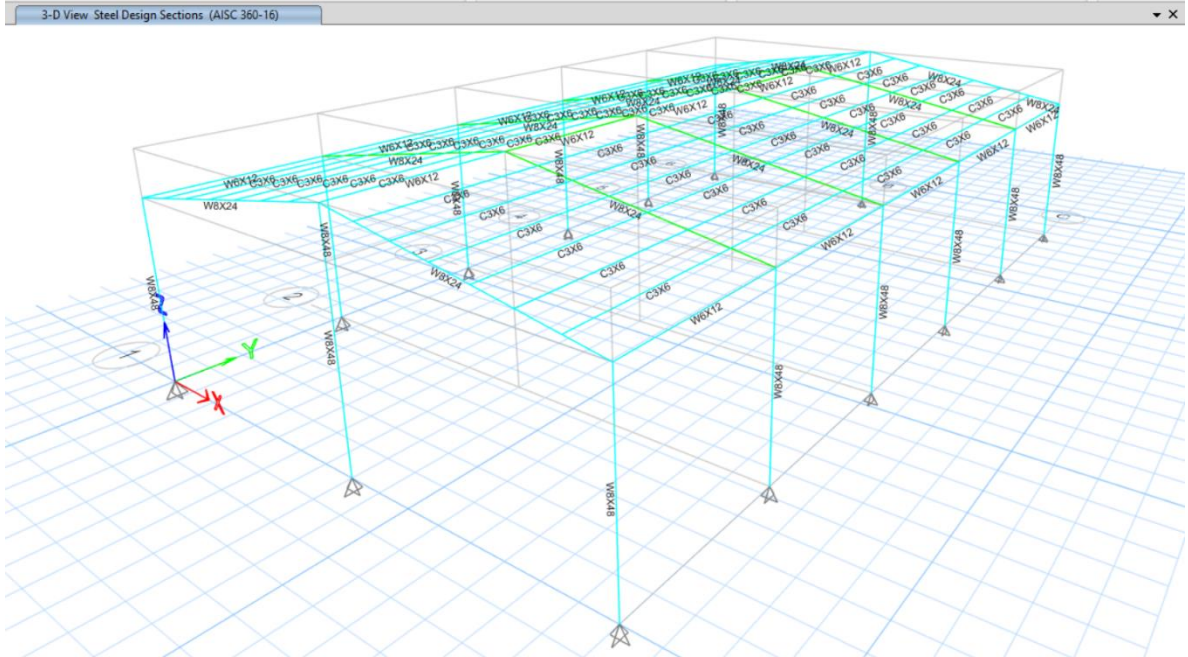
Include

Frames
 Piers
 Spandrels
 Links

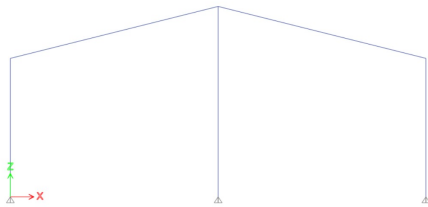
3-D View Moment 3-3 Diagram (ENVOLVENTE) Max and Min [kN-m]





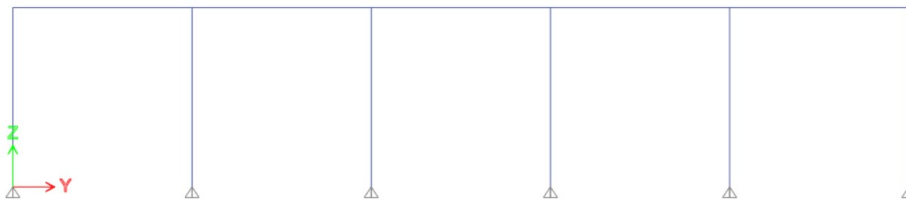


DISEÑO DE ELEMENTOS DE UNA NAVE INDUSTRIAL DE MADERA LAMINADA



Datos de la obra	
Municipio	Amatitlán
Departamento	Guatemala
Suelo tipo	C
	Suelo tipo C
Suelo tipo	Categoría II: Obra ordinaria
	Ordinaria

Humedad relativa: 69% - 90%



Medidas generales de la nave industrial:

Fachada frontal: $L_{dist.x} := 6 \text{ m}$

Fachada lateral: $L_{dist.y} := 4 \text{ m}$

Alturas: $H_{hombro} := 4 \text{ m}$ $H_{cumbreira} := 1 \text{ m}$

$$H_{total} := H_{hombro} + H_{cumbreira} = 5 \text{ m}$$

$L := 8 \text{ m} = 26.247 \text{ ft}$

$B := 4 \text{ m} = 13.123 \text{ ft}$

$s := 1 \text{ m}$

Definición de características la cubierta:

Material de la cubierta: Lámina Ternium TRN-100 (galvanizado)

$F_y := 30 \text{ ksi}$

Ternium TRN-100

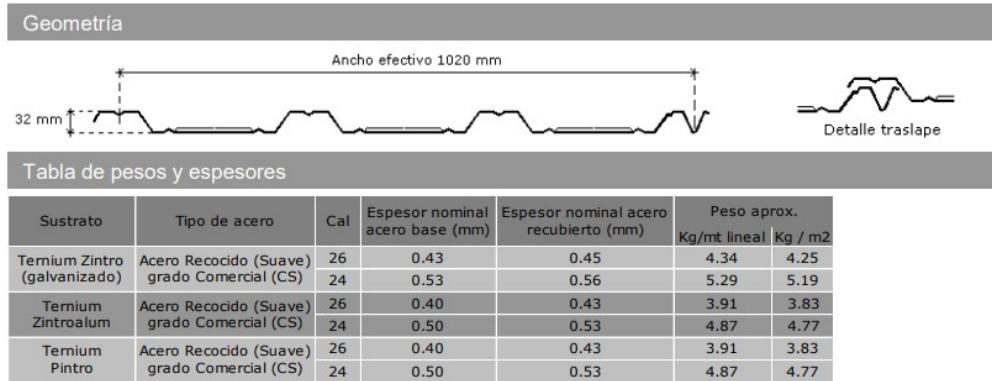
Descripción

El acanulado trapezoidal TRN-100 es un producto fabricado en planta mediante una roladora estacionaria a partir de rollo de Ternium Zintro, Ternium Zintro Alum o Ternium Pintro. Este producto es eslibable y por lo tanto traslapable. Está dirigido a utilizarse en cubiertas de naves industriales donde se requiere resistencia estructural y/o diseñar con pendientes bajas. Se aplica también en fachadas industriales.

Sustratos y recubrimientos

Producto	Grado
Ternium Zintro (galvanizado)	Acero Recocido (Suave) grado Comercial (CS) (Fy= 30 Ksi min)*
Ternium Zintroalum	Acero Recocido (Suave) grado Comercial (CS) (Fy= 30 Ksi min)*
Ternium Pintro	Acero Recocido (Suave) grado Comercial (CS) (Fy= 30 Ksi min)*

Geometría de la lámina para la cubierta:



$$cal_{lámina} := 26 \quad e_{lámina} := 0.45 \text{ mm} \quad w_{lámina} := 4.25 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$h_{lámina} := 32 \text{ mm} \quad A \cdot e_{lámina} := 1020 \text{ mm} = 1.02 \text{ m}$$

Definición de características de las costaneras:

Material: Madera sólida Teca

B. Diseño de tabla para propiedades mecánicas de la madera natural y clonada de *Tectona Grandis*

Tectona Grandis Natural	
Valores característicos de resistencia [N/mm ²]	
Flexión	82.55
Tracción paralela	49.53
Tracción perpendicular	0.60
Compresión Paralela	49.83
Compresión Perpendicular	7.20
Cortante	3.54
Valores característicos de rigidez [kN/mm ²]	
Módulo de elasticidad	
paralelo promedio	6.12
perpendicular promedio	0.36
percentil 5	4.83
Módulo de cortante medio	0.69
Valores característicos de densidad [kg/m ³]	
Densidad característica	2365.00
Densidad media	2442.86

Cuadro 13: Propiedades mecánicas de la madera *Tectona Grandis* natural
Fuente: Elaboración propia

Densidad: $\rho_{k.teca} := 2442 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Peso específico: $\gamma_{w.teca} := \rho_{k.teca} \cdot g$
 $\gamma_{w.teca} = (2.442 \cdot 10^3) \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$

Resistencia a flexión: $f_{mk.teca} := 82.55 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Resistencia a cortante: $f_{v.k.teca} := 3.54 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Resistencia a compresión:

Paralelo: $f_{c.0.k.teca} := 49.83 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ Perpendicular: $f_{c.90.k.teca} := 49.83 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Módulo de elasticidad: $E_{0.teca} := 6.12 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$ $E_{0.teca} = 624.06632234 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$

Módulo de cortante: $G_{teca} := 0.56 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$

Geometría de las costaneras:

$$b_{vs} := 2 \text{ in}$$

$$h_{vs} := 8 \text{ in}$$

$$L_{vs} := B = 4 \text{ m}$$

$$s_{cost} := 1 \text{ m}$$

Área tributaria de las costaneras: $A_{tributaria.cost} := s_{cost} = 1 \text{ m}$

Inclinación de costaneras: $\theta := \text{atan}\left(\frac{H_{cumbreira}}{L_{dist.x}}\right) = 9.462 \text{ deg}$

Definición del material de las vigas principales:

Material: Madera laminada encolada clase **GL 24h**

Table 6.2 The strength, stiffness and density properties of homogeneous glulam strength classes (GL 24h, GL 28h and GL 32h) and combined glulam strength classes (GL 24c, GL 28c and GL 32c)*

Glulam strength class	Homogeneous glulam			Combined glulam		
	GL 24h	GL 28h	GL 32h	GL 24c	GL 28c	GL 32c
Bending strength						
$f_{m,24}$ (N/mm ²)	24	28	32	24	28	32
Tension strength						
$f_{t,24}$ (N/mm ²)	16.5	19.5	22.5	14	16.5	19.5
$f_{t,24k}$ (N/mm ²)	0.4	0.45	0.5	0.35	0.4	0.45
Compression strength						
$f_{c,24}$ (N/mm ²)	24	26.5	29	21	24	26.5
$f_{c,24k}$ (N/mm ²)	2.7	3.0	3.3	2.4	2.7	3.0
Shear strength						
$f_{v,24}$ (N/mm ²)	2.7	3.2	3.8	2.2	2.7	3.2
Modulus of elasticity						
$E_{0,24}$ (kN/mm ²)	11.6	12.6	13.7	11.6	12.6	13.7
$E_{0,24k}$ (kN/mm ²)	9.4	10.2	11.1	9.4	10.2	11.1
$E_{0,24,mean}$ (kN/mm ²)	0.39	0.42	0.46	0.32	0.39	0.42
Shear modulus						
$G_{0,24}$ (kN/mm ²)	0.72	0.78	0.85	0.59	0.72	0.78
Density ρ_{24} (kg/m³)	380	410	430	350	380	410

Note: For strength-related calculations, take $G_{0,24} = E_{0,24}/16$. Mean density is taken to be the average of the mean density of the inner and outer laminates, based on BS EN 338.

* Based on the properties given in BS EN 1194:1999.

Densidad: $\rho_{k.gl24h} := 380 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Peso específico: $\gamma_{w.gl24h} := \rho_{k.gl24h} \cdot g$

$$\gamma_{w.gl24h} = 3.727 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$\gamma_{w.gl24h} = 380 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

Resistencia a flexión: $f_{m,k.vp} := 24 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Resistencia a cortante: $f_{v,k.vp} := 2.7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Resistencia a compresión:

Paralelo: $f_{c,0.k.vp} := 24 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Perpendicular: $f_{c,90.k.vp} := 2.7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Módulo de elasticidad: $E_{0.vp} := 11.6 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$

$$E_{0.vp} = 1182.871 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$$

Módulo de cortante: $G_{0.vp} := 0.72 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$

$$G_{0.vp} = 73.42 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$$

Geometría de la viga principal:

$$b_{vp} := 200 \text{ mm}$$

$$h_{vp} := 400 \text{ mm}$$

$$L_{vp} := \sqrt[2]{L_{dist.x}^2 + H_{cumbreira}^2} = 6.083 \text{ m}$$

Cálculos para el diseño de las costaneras acorde a EC5:

Integración de cargas de la cubierta:

Datos de las cargas:

- Carga viva para cubierta liviana según

$$C_{v.cubierta} := 50 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$f_{vivas} := 1.5$$

Tipo de ocupación o uso	Wv (kg/m ²)	Pv (kg)
Cubiertas livianas (Inciso 3.3 (h))		
Techos de láminas, tejas, cubiertas plásticas, lonas, etc. (aplica a la estructura que soporta la cubierta final)	50 [a][c]	135
[a] Carga depende del tipo de cancha [b] Sobre proyección horizontal [c] Carga no reducible [R] Puede aplicar reducción de carga viva según Sección 3.5.		

$$w_{viva.cubierta} = C_{v.cubierta} \cdot A_{tributaria.cost} \quad A_{tributaria.cost} := s$$

$$w_{viva.cubierta} := C_{v.cubierta} \cdot A_{tributaria.cost} = 0.49 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$w_{viva.cubierta} = 50 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

- Carga muerta por peso propio de la lámina:

$$w_{pp.lámina} = A_{tributaria.cost} \cdot w_{lámina} \quad f_{muertas} := 1.35$$

$$w_{pp.lámina} := A_{tributaria.cost} \cdot w_{lámina}$$

$$w_{pp.lámina} = 0.042 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad w_{pp.lámina} = 4.25 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

- Valor de carga lineal total:

$$w_{total.cubierta} := w_{viva.cubierta} + w_{pp.lámina} \quad w_{total.cubierta} = 0.532 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Valor de carga lineal total de diseño:

$$w_{total.d.cubierta} := f_{vivas} \cdot w_{viva.cubierta} + f_{muertas} \cdot w_{pp.lámina}$$

$$w_{total.d.cubierta} = 0.792 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Integración de cargas de la cubierta sobre las costaneras:

- Carga muerta por peso propio de la costanera:

$$w_{pp.vs} = A_{trans.vs} \cdot \gamma_{w.teca}$$

$$A_{trans.vs} := b_{vs} \cdot h_{vs} = 0.01 \text{ m}^2$$

$$w_{pp.vs} := A_{trans.vs} \cdot \gamma_{w.teca}$$

$$w_{pp.vs} = 0.247 \frac{kN}{m}$$

- Valor de carga lineal total:

$$w_{total.vs} := w_{viva.cubierta} + w_{pp.lámina} + w_{pp.vs}$$

$$w_{total.vs} = 0.779 \frac{kN}{m}$$

- Valor de carga lineal total de diseño:

$$w_{total.d.vs} := f_{vivas} \cdot w_{viva.cubierta} + f_{muertas} \cdot (w_{pp.lámina} + w_{pp.vs})$$

$$w_{total.d.vs} = 1.125 \frac{kN}{m}$$

- Fuerza cortante máxima en las vigas secundarias:

$$V_{d.vs} := 0.5 \cdot w_{total.d.vs} \cdot L_{vs} = 2.251 \text{ kN}$$

- Cálculo del momento máximo:

$$M_{max.vs} := \frac{1}{8} \cdot w_{total.d.vs} \cdot L_{vs}^2$$

$$M_{max.vs} = 2.251 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- **Chequeo de las vigas secundarias a flexión:**

- Último:

$$W_{y.vs} := \frac{b_{vs} \cdot h_{vs}^2}{6} = (3.496 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^3$$

$$\sigma_{m.y.d.vs} := \frac{M_{max.vs}}{W_{y.vs}} = 6.439 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

- Admisible:

$$f_{m.y.d.vs} = \frac{k_{mod.vs} \cdot k_{sys.vs} \cdot k_{h.vs} \cdot f_{mk.vs}}{\gamma_{M.vs}}$$

$$k_{mod.vs} := 0.7$$

$$k_{sys.vs} := 1$$

$$f_{mk.vs} := f_{mk.teca}$$

$$\gamma_{M.vs} := 1.3$$

*Madera sólida

*Larga duración

$$u_{vs} := \left(\frac{150 \text{ mm}}{h_{vs}} \right)^{0.2}$$

$$k_{h.vs} := \text{if} (u_{vs} \leq 1.3, u_{vs}, 1.3) = 0.941$$

$$k_{h.vs} := \text{if} (h_{vs} \geq 150 \text{ mm}, 1, k_{h.vs}) = 1$$

$$f_{m.y.d.vs} := \frac{k_{mod.vs} \cdot k_{sys.vs} \cdot k_{h.vs} \cdot f_{mk.vs}}{\gamma_{M.vs}} = 44.45 \frac{N}{mm^2}$$

- Evaluando:

$$\sigma_{flexión.vs} := \text{if}(\sigma_{m.y.d.vs} \leq f_{m.y.d.vs}, \text{"Sí cumple"}, \text{"No cumple"})$$

$$cap.flex_{vs} := \frac{\sigma_{m.y.d.vs}}{f_{m.y.d.vs}} = 14.486\%$$

Por tanto:

$$\sigma_{flexión.vs} = \text{"Sí cumple"}$$

- **Chequeo de las vigas secundarias a corte:**

- Último:

$$k_{cr.vs} := \frac{2}{3} = 0.667 \quad \text{*Para madera sólida}$$

$$\tau_{v.d.vs} := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{d.vs}}{k_{cr.vs} \cdot b_{vs} \cdot h_{vs}} = 0.491 \frac{N}{mm^2}$$

- Admisible:

$$f_{v.k.vs} := f_{v.k.teca} = 3.54 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{v.d.vs} := \frac{k_{mod.vs} \cdot k_{sys.vs} \cdot f_{v.k.vs}}{\gamma_{M.vs}} = 1.906 \frac{N}{mm^2}$$

- Evaluando:

$$\sigma_{corte.vs} := \text{if}(\tau_{v.d.vs} \leq f_{v.d.vs}, \text{"Sí cumple"}, \text{"No cumple"})$$

$$cap.cort_{vs} := \frac{\tau_{v.d.vs}}{f_{v.d.vs}} = 25.74\%$$

Por tanto:

$$\sigma_{corte.vs} = \text{"Sí cumple"}$$

Chequeo de las vigas secundarias por deflexiones:

- Deflexiones últimas:

$$E_{0.vs} := E_{0.teca} \quad G_{0.vs} := G_{teca}$$

Deflexiones instantáneas:

$$\mu_{inst.cv.vs} := \frac{5 \cdot w_{viva.cubierta} \cdot L_{vs}^4}{32 \cdot E_{0.vs} \cdot b_{vs} \cdot h_{vs}^3} \cdot \left(1 + 0.96 \left(\frac{E_{0.vs}}{G_{0.vs}} \right) \cdot \left(\frac{h_{vs}}{L_{vs}} \right)^2 \right) = 7.723 \text{ mm}$$

$$\mu_{inst.cm.vs} := \frac{5 \cdot w_{pp.vs} \cdot L_{vs}^4}{32 \cdot E_{0.vs} \cdot b_{vs} \cdot h_{vs}^3} \cdot \left(1 + 0.96 \left(\frac{E_{0.vs}}{G_{0.vs}} \right) \cdot \left(\frac{h_{vs}}{L_{vs}} \right)^2 \right) = 3.893 \text{ mm}$$

$$\mu_{inst.cm.t.vs} := \frac{5 \cdot w_{pp.lámina} \cdot L_{vs}^4}{32 \cdot E_{0.vs} \cdot b_{vs} \cdot h_{vs}^3} \cdot \left(1 + 0.96 \left(\frac{E_{0.vs}}{G_{0.vs}} \right) \cdot \left(\frac{h_{vs}}{L_{vs}} \right)^2 \right) = 0.656 \text{ mm}$$

$$\mu_{inst.vs} := \mu_{inst.cv.vs} + \mu_{inst.cm.vs} + \mu_{inst.cm.t.vs} = 12.272 \text{ mm}$$

Deflexiones a largo plazo (creep):

$$k_{def.vs} := 2$$

$$\psi_{2.vs} := 0$$

$$1.25 \frac{gm}{cm^3} = (1.25 \cdot 10^3) \frac{kg}{m^3}$$

- Carga variable:

$$\mu_{creep.cv.vs} := k_{def.vs} \cdot \psi_{2.vs} \cdot \mu_{inst.cv.vs} = 0 \text{ mm}$$

- Carga permanente:

$$\mu_{creep.cm.t.vs} := k_{def.vs} \cdot \mu_{inst.cm.t.vs} = 1.313 \text{ mm}$$

$$\mu_{creep.cm.vs} := k_{def.vs} \cdot \mu_{inst.cm.vs} = 7.787 \text{ mm}$$

$$\mu_{creep.total.vs} := \mu_{creep.cv.vs} + \mu_{creep.cm.t.vs} + \mu_{creep.cm.vs} = 9.1 \text{ mm}$$

$$\mu_{total.vs} := \mu_{creep.total.vs} = 9.1 \text{ mm}$$

- Deflexiones admisibles:

Instantáneas:

$$\mu_{adm.inst.vs} := \frac{L_{vs}}{300} = 13.333 \text{ mm}$$

Totales (considerando instantáneas y a largo plazo):

$$\mu_{adm.vs} := \frac{L_{vs}}{150} = 26.667 \text{ mm}$$

- Evaluando:

$$\mu_{total.inst.vs} := \text{if} (\mu_{inst.vs} \leq \mu_{adm.inst.vs}, \text{"Sí cumple"}, \text{"No cumple"})$$

$$\mu_{total.vs} := \text{if} (\mu_{total.vs} \leq \mu_{adm.vs}, \text{"Sí cumple"}, \text{"No cumple"})$$

Por tanto:

$$\mu_{total.inst.vs} = \text{"Sí cumple"}$$

$$\mu_{total.vs} = \text{"Sí cumple"}$$

Chequeo de las vigas secundarias por aplastamiento:

- Último:

$$Reac_{d.vs} := 0.5 \cdot w_{total.d.vs} \cdot L_{vs} = 2.251 \text{ kN}$$

$$A_{ef.vs} := b_{vs} \cdot b_{vp} \qquad k_{c.90.vs} := \text{if} (L_{vs} > 2 \cdot h_{vs}, 1.5, 1)$$

$$\sigma_{c.90.d.vs} := k_{c.90.vs} \cdot \frac{Reac_{d.vs}}{A_{ef.vs}} = 0.332 \frac{N}{mm^2}$$

- Admisible:

$$f_{c.90.k.vs} := f_{c.90.k.teca}$$

$$f_{c.90.d.vs} := \frac{k_{mod.vs} \cdot k_{sys.vs} \cdot f_{c.90.k.vs}}{\gamma_{M.vs}} = 26.832 \frac{N}{mm^2}$$

- Evaluando:

$$\sigma_{aplast.vs} := \text{if} (\sigma_{c.90.d.vs} \leq f_{c.90.d.vs}, \text{"Sí cumple"}, \text{"No cumple"})$$

Por tanto:

$$\sigma_{aplast.vs} = \text{"Sí cumple"}$$

Cálculos para el diseño de las vigas principales acorde a EC5:

- **Integración de las cargas sobre las vigas principales:**

Datos de las cargas:

- Carga muerta de la propia madera (viga primaria):

$$w_{pp.vp} = A_{trans.vp} \cdot \gamma_{w.gl24h}$$

$$A_{trans.vp} := b_{vp} \cdot h_{vp} = 0.08 \text{ m}^2$$

$$w_{pp.vp} := A_{trans.vp} \cdot \gamma_{w.gl24h}$$

$$w_{pp.vp} = 0.298 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Carga muerta de la propia viga (diseño):

$$w_{pp.d.vp} := f_{muertas} \cdot w_{pp.vp} = 0.402 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Carga lineal por reacciones generadas por vigas secundarias y entrepiso:

$$R_{vs.vp} := 0.5 \cdot w_{total.d.vs} \cdot L_{vs} = 2.251 \text{ kN}$$

$$w_{reac.vp} := \frac{7 \cdot R_{vs.vp}}{L_{vp}} = 2.59 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Valor de carga lineal total de diseño:

$$w_{total.d.vp} := w_{pp.d.vp} + w_{reac.vp} = 2.993 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$w_{total.d.vp} = 2.993 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Reacción en los apoyos de la viga principal:

$$Reac_{d.vp} := 0.5 \cdot w_{total.d.vp} \cdot L_{vp} = 9.102 \text{ kN}$$

- Cálculo del momento máximo y del corte máximo mediante software:

$$V_{d.vp} := Reac_{d.vp} = 9.102 \text{ kN}$$

$$M_{max.vp} := \frac{w_{total.d.vp} \cdot L_{vp}^2}{8}$$

$$M_{max.vp} = 13.842 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- Chequeo de las vigas principales a flexión:

- Último:

$$W_{y.vp} := \frac{b_{vp} \cdot h_{vp}^2}{6} = 0.005 \text{ m}^3$$

$$\sigma_{m.y.d.vp} := \frac{M_{max.vp}}{W_{y.vp}} = 2.595 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

- Admisible:

$$f_{m.y.d.vp} = \frac{k_{mod.vp} \cdot k_{sys.vp} \cdot k_{h.vp} \cdot f_{mk.vp}}{\gamma_{M.vp}}$$

$$k_{mod.vp} := 0.7 \quad k_{sys.vp} := 1 \quad f_{mk.vp} = 24 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \gamma_{M.vp} := 1.25$$

$$u_{vp} := \left(\frac{600 \text{ mm}}{h_{vp}} \right)^{0.1} \quad k_{h.vp} := \text{if} (u_{vp} \leq 1.3, u_{vp}, 1.3) = 1.041$$

$$f_{m.y.d.vp} := \frac{k_{mod.vp} \cdot k_{sys.vp} \cdot k_{h.vp} \cdot f_{mk.vp}}{\gamma_{M.vp}} = 14 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

- Evaluando:

$$\sigma_{flexión.vp} := \text{if} (\sigma_{m.y.d.vp} \leq f_{m.y.d.vp}, \text{“Sí cumple”}, \text{“No cumple”})$$

$$cap.flex_{vp} := \frac{\sigma_{m.y.d.vp}}{f_{m.y.d.vp}} = 18.544\%$$

Por tanto:

$$\sigma_{flexión.vp} = \text{“Sí cumple”}$$

- **Chequeo de las vigas principales a corte:**

- Último:

$$k_{cr.vp} := \frac{2}{3} \quad \text{*Para Glulam}$$

$$\tau_{v.d.vp} := \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{d.vp}}{k_{cr.vp} \cdot b_{vp} \cdot h_{vp}} = 0.256 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

- Admisible:

$$f_{v.k.vp} := 2.7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{v.d.vp} := \frac{k_{mod.vp} \cdot k_{sys.vp} \cdot f_{v.k.vp}}{\gamma_{M.vp}} = 1.512 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

- Evaluando:

$$\sigma_{corte.vp} := \text{if} (\tau_{v.d.vp} \leq f_{v.d.vp}, \text{"Sí cumple"}, \text{"No cumple"})$$

Por tanto:

$$\sigma_{corte.vp} = \text{"Sí cumple"}$$

• **Chequeo de las vigas principales por deflexiones:**

- Deflexiones últimas:

$$E_{0.vp} = 11.6 \frac{kN}{mm^2} \quad G_{0.vp} = 0.72 \frac{kN}{mm^2}$$

Deflexiones instantáneas:

Se calculan las deflexiones generadas por la carga otorgada por las vigas secundarias, separando entre vivas y muertas:

- Vivas:

$$R_{v.vs.vp} := 0.5 \cdot w_{viva.cubierta} \cdot L_{vs} = 0.981 \text{ kN}$$

$$w_{reac.v.vp} := \frac{9 \cdot R_{v.vs.vp}}{L_{vp}} = 1.451 \frac{kN}{m}$$

- Muertas:

$$R_{m.vs.vp} := 0.5 \cdot (w_{pp.lámina} + w_{pp.vs}) \cdot L_{vs} = 0.578 \text{ kN}$$

$$w_{reac.m.vp} := \frac{9 \cdot R_{m.vs.vp}}{L_{vp}} = 0.855 \frac{kN}{m}$$

$$\mu_{inst.cv.vp} := \frac{5 \cdot w_{reac.v.vp} \cdot L_{vp}^4}{32 \cdot E_{0.vp} \cdot b_{vp} \cdot h_{vp}^3} \cdot \left(1 + 0.96 \left(\frac{E_{0.vp}}{G_{0.vp}} \right) \cdot \left(\frac{h_{vp}}{L_{vp}} \right)^2 \right) = 2.23 \text{ mm}$$

$$\mu_{inst.cm1.vp} := \frac{5 \cdot w_{reac.m.vp} \cdot L_{vp}^4}{32 \cdot E_{0.vp} \cdot b_{vp} \cdot h_{vp}^3} \cdot \left(1 + 0.96 \left(\frac{E_{0.vp}}{G_{0.vp}} \right) \cdot \left(\frac{h_{vp}}{L_{vp}} \right)^2 \right) = 1.314 \text{ mm}$$

$$\mu_{inst.cm2.vp} := \frac{5 \cdot w_{pp.vp} \cdot L_{vp}^4}{32 \cdot E_{0.vp} \cdot b_{vp} \cdot h_{vp}^3} \cdot \left(1 + 0.96 \left(\frac{E_{0.vp}}{G_{0.vp}} \right) \cdot \left(\frac{h_{vp}}{L_{vp}} \right)^2 \right) = 0.458 \text{ mm}$$

$$\mu_{inst.vp} := \mu_{inst.cv.vp} + \mu_{inst.cm1.vp} + \mu_{inst.cm2.vp} = 4.002 \text{ mm}$$

Deflexiones a largo plazo (creep):

$$k_{\text{creep}} := 2$$

$$\psi_{\text{creep}} := 0$$

- Carga variable:

$$\mu_{creep.cv.vp} := k_{def.vp} \cdot \psi_{2.vp} \cdot \mu_{inst.cv.vp} = 0 \text{ mm}$$

- Carga permanente:

$$\mu_{creep.cm1.vp} := k_{def.vp} \cdot \mu_{inst.cm1.vp} = 2.628 \text{ mm}$$

$$\mu_{creep.cm2.vp} := k_{def.vp} \cdot \mu_{inst.cm2.vp} = 0.916 \text{ mm}$$

$$\mu_{creep.total.vp} := \mu_{creep.cv.vp} + \mu_{creep.cm1.vp} + \mu_{creep.cm2.vp} = 3.544 \text{ mm}$$

$$\mu_{total.vp} := \mu_{creep.total.vp} + \mu_{inst.vp} = 7.546 \text{ mm}$$

- Deflexiones admisibles:

Instantáneas:

$$\mu_{adm.inst.vp} := \frac{L_{vp}}{300} = 20.276 \text{ mm}$$

Totales (considerando instantáneas y a largo plazo):

$$\mu_{adm.vp} := \frac{L_{vp}}{150} = 40.552 \text{ mm}$$

- Evaluando:

$$\mu_{total.inst.vp} := \text{if} (\mu_{inst.vp} \leq \mu_{adm.inst.vp}, \text{“Sí cumple”}, \text{“No cumple”})$$

$$\mu_{total.vp} := \text{if} (\mu_{total.vp} \leq \mu_{adm.vp}, \text{“Sí cumple”}, \text{“No cumple”})$$

Por tanto:

$$\mu_{total.inst.vp} = \text{“Sí cumple”}$$

$$\mu_{total.vp} = \text{“Sí cumple”}$$

- Chequeo de la viga principal por aplastamiento:

- Último:

Se considera el área de apoyo de la columna:

$$b_{\dots\dots} := 20 \text{ cm}$$

$$A_{ef.vp} := b_{muro} \cdot b_{vp}$$

$$k_{c.90.vp} := \text{if}(L_{vp} > 2 \cdot h_{vp}, 1.5, 1)$$

$$\sigma_{c.90.d.vp} := k_{c.90.vp} \cdot \frac{Reac_{d.vp}}{A_{ef.vp}} = 0.341 \frac{N}{mm^2}$$

- Admisible:

$$f_{c.90.k.vp} = (2.7 \cdot 10^6) \text{ Pa}$$

$$f_{c.90.d.vp} := \frac{k_{mod.vp} \cdot k_{sys.vp} \cdot f_{c.90.k.vp}}{\gamma_{M.vp}} = 1.512 \frac{N}{mm^2}$$

- Evaluando:

$$\sigma_{aplast.vp} := \text{if}(\sigma_{c.90.d.vp} \leq f_{c.90.d.vp}, \text{"Sí cumple"}, \text{"No cumple"})$$

Por tanto:

$$\sigma_{aplast.vp} = \text{"Sí cumple"}$$

- Chequeo de la viga principal por pandeo torsional lateral:

$$f_{mk.vp} = 24 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_{m.y.d.vp} = 13.996 \frac{N}{mm^2}$$

$$G_{0.05.vp} := G_{0.vp}$$

$$E_{0.05.vp} := 9.4 \frac{kN}{mm^2}$$

$$\sigma_{m.crit.vp} := \frac{\pi \cdot b_{vp}^2}{h_{vp} \cdot s} \cdot \sqrt{E_{0.05.vp} \cdot G_{0.05.vp} \cdot \left(1 - 0.63 \cdot \frac{b_{vp}}{h_{vp}}\right)}$$

$$\sigma_{m.crit.vp} = 0.676 \frac{kN}{mm^2}$$

$$\lambda_{rel.m.vp} := \sqrt{\frac{f_{mk.vp}}{\sigma_{m.crit.vp}}} = 0.188$$

$$\lambda_{rel.m.vp} \leq 0.75$$

Por tanto, no hay pandeo torsional lateral. Cumple con el parámetro

Cálculo de fuerzas por viento acorde a NSE 2:

Tipo de exposición:

Exposición C

(a) *Exposición B* — El 80% del cuadrante a barlovento será urbano con edificaciones de un nivel o más o bien bosques u otras irregularidades superficiales significativas que se extiendan más de 1500 metros desde el sitio del proyecto.

(b) *Exposición C* — El 80% del cuadrante a barlovento tendrá explanadas llanas y generalmente abiertas, con o sin cultivos agrícolas bajos que se extiendan más de 750 metros desde el sitio del proyecto. En general, será terreno que no clasifique como D ni como B.

(c) *Exposición D* — Es la exposición más crítica. El 80% del cuadrante a barlovento estará frente a un cuerpo de agua que se extiende más de 1500 metros de la costa. El sitio estará en exposición D si se localiza a menos de 500 metros, desde la costa, o a 10 veces la altura de la edificación, lo que resulte mayor.

Velocidad básica del viento:

$$V := 100 \frac{km}{hr}$$

Cálculo de la presión básica del viento:

$$P_z = C_{ez} \cdot C_q \cdot q_s \cdot I_c$$

$$q_s := 0.0048 \cdot \left(V \cdot \frac{hr}{km} \right)^2 \cdot \frac{kgf}{m^2} = 48 \frac{kgf}{m^2}$$

- Intensidad y distribución de presiones:

$$h := H_{total} = 5 \text{ m}$$

$$y_x = y_o + \frac{x - x_o}{x_1 - x_o} (y_1 - y_o)$$

$$C_{ez} := 1.06 + \frac{H_{total} - 4.5 \text{ m}}{6 \text{ m} - 4.5 \text{ m}} \cdot (1.13 - 1.06)$$

$$C_{ez} = 1.083$$

Tabla 5.3.3-1 — Coeficiente C_{ez}

Altura sobre el nivel promedio del terreno (m) [1][2]	Exposición D	Exposición C	Exposición B
4.5	1.39	1.06	0.62
6.0	1.45	1.13	0.67
7.5	1.50	1.19	0.72
9.0	1.54	1.23	0.76
12.0	1.62	1.31	0.84
18.0	1.73	1.43	0.95
24.0	1.81	1.53	1.04
30.0	1.88	1.61	1.13
36.0	1.93	1.67	1.20
48.0	2.02	1.79	1.31
60.0	2.10	1.87	1.42
90.0	2.23	2.05	1.63
120.0	2.34	2.19	1.80

[1] Alturas menores a 4.50m deben utilizar el factor C_e para 4.50m

[2] Alturas mayores a 4.50m pueden ser interpoladas

- Factor de importancia:

$$I_c := 1$$

Coefficiente de presión:

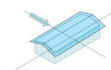
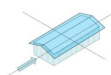


1. Sistema resistente principal:

A. Presión sobre superficies verticales:

- Superficie a barlovento: $C_{q_ver_bar} := 0.8$ Empuje
- Superficie a sotavento: $C_{q_ver_sot} := -0.5$ Succión

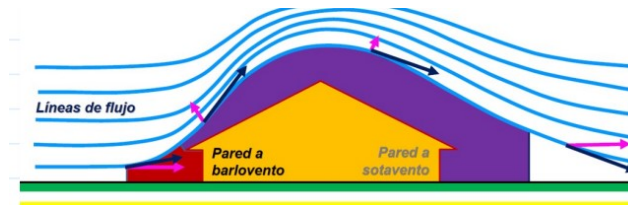
B. Presión sobre techo inclinado:

- 
 • Viento en X - Viento perpendicular a la cumbre: $C_{q_techo_xs_su} := -0.7$ Succión
- 
 • Viento en Y - Viento paralelo a la cumbre: $C_{q_techo_ys} := -0.7$ Succión

Cálculo de las presiones de viento sobre superficies verticales:

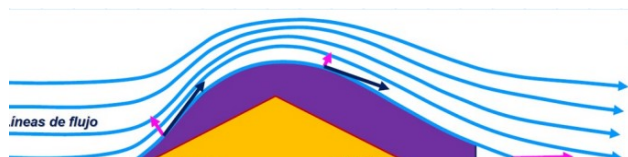
- Presión de la superficie a barlovento:

$$P_{z_ver_bar} := C_{ez} \cdot C_{q_ver_bar} \cdot q_s \cdot I_c = 8.52 \text{ psf} \quad \text{Empuje}$$



- Presión de la superficie a sotavento:

$$P_{z_ver_sot} := C_{ez} \cdot C_{q_ver_sot} \cdot q_s \cdot I_c = -5.325 \text{ psf} \quad \text{Succión}$$





Cálculo de las presiones de viento sobre el techo inclinado:

- Presión en X - Viento perpendicular a la cumbrera:

$$P_{x_techo_s} := C_{ez} \cdot C_{q_techo_xs_su} \cdot q_s \cdot I_c = -7.455 \text{ psf} \quad (\text{Succión})$$

$$q_{w_s} := P_{x_techo_s} \cdot s = -36.4 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

- Presión en Y - Viento paralelo a la cumbrera: (Succión)

$$P_{y_techo_s} := C_{ez} \cdot C_{q_techo_ys} \cdot q_s \cdot I_c = -7.455 \text{ psf}$$

$$q_{w_s_su_y} := P_{y_techo_s} \cdot s = -36.4 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

Carga mínima: $q_{w_s} := -8 \text{ psf} \cdot s = -39.059 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$

Distribución de fuerzas de viento verticales en la estructura:

$Ancho_{x1} := 6 \text{ m}$ Ancho tributario Eje X (central)

$Ancho_{x2} := 3 \text{ m}$ Ancho tributario Eje X (esquina)

$Ancho_{y1} := 2 \text{ m}$ Ancho tributario Eje Y (esquina)

$Ancho_{y2} := 4 \text{ m}$ Ancho tributario Eje Y (central)

$s := 1 \text{ m}$ Separación entre correas

Fuerzas de viento a barlovento:

$$W_{barlovento_x1} := P_{z_ver_bar} \cdot Ancho_{x1} = 249.6 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \quad \text{Empuje}$$

$$W_{barlovento_x2} := P_{z_ver_bar} \cdot Ancho_{x2} = 124.8 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \quad \text{Empuje}$$

$$W_{barlovento_y1} := P_{z_ver_bar} \cdot Ancho_{y1} = 83.2 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \quad \text{Empuje}$$

$$W_{barlovento_y2} := P_{z_ver_bar} \cdot Ancho_{y2} = 166.4 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} \quad \text{Empuje}$$

Fuerzas de viento a sotavento:

$$W_{sotavento_x1} := P_{z_ver_sot} \cdot Ancho_{x1} = -156 \frac{kgf}{m} \quad \text{Empuje}$$

$$W_{sotavento_x2} := P_{z_ver_sot} \cdot Ancho_{x2} = -78 \frac{kgf}{m} \quad \text{Empuje}$$

$$W_{sotavento_y1} := P_{z_ver_sot} \cdot Ancho_{y1} = -52 \frac{kgf}{m} \quad \text{Empuje}$$

$$W_{sotavento_y2} := P_{z_ver_sot} \cdot Ancho_{y2} = -104 \frac{kgf}{m} \quad \text{Empuje}$$

Fuerza de viento en X - Perpendicular a la cumbrera:

$$W_{x_techo_s} := P_{x_techo_s} \cdot s = -36.4 \frac{kgf}{m} \quad (\text{Aplica el mínimo})$$

Fuerza de viento en Y - Paralelo a la cumbrera:

$$W_{y_techo_s} := P_{y_techo_s} \cdot s = -36.4 \frac{kgf}{m} \quad (\text{Aplica el mínimo})$$

Distribución de fuerzas a los marcos

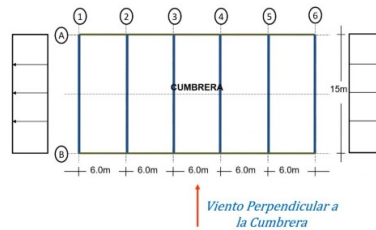
1) Viento perpendicular (Wx)

Columna esquina

$$W_{sotavento_x2} = -78 \frac{kgf}{m}$$

Columna medianera

$$W_{sotavento_x1} = -156 \frac{kgf}{m}$$



Columna esquina

$$W_{sotavento_x2} = -78 \frac{kgf}{m}$$

Columna esquina

$$W_{sotavento_x1} = -156 \frac{kgf}{m}$$

$$W_{x_techo_s} = -36.4 \frac{kgf}{m}$$

Columna medianera:

$$166.4 \frac{kgf}{m}$$

Columna esquina

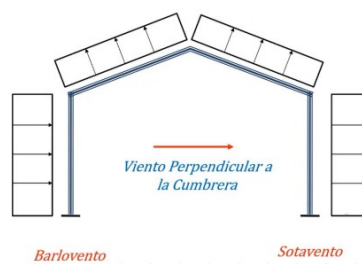
$$83.2 \frac{kgf}{m}$$

Columna medianera:

$$104 \frac{kgf}{m}$$

Columna esquina

$$52 \frac{kgf}{m}$$



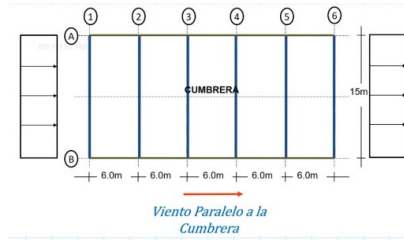
2) Viento paralelo a la cumbrera (W_v)

Columna esquina

$$W_{barlovento_x2} = 124.8 \frac{kgf}{m}$$

Columna medianera

$$W_{barlovento_x1} = 249.6 \frac{kgf}{m}$$



Columna esquina

$$W_{sotavento_x2} = -78 \frac{kgf}{m}$$

Columna esquina

$$W_{sotavento_x1} = -156 \frac{kgf}{m}$$

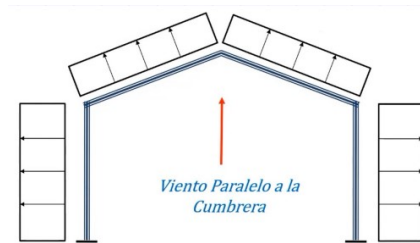
$$W_{y_techo_s} = -36.4 \frac{kgf}{m}$$

Columna medianera:

$$104 \frac{kgf}{m}$$

Columna esquina

$$52 \frac{kgf}{m}$$



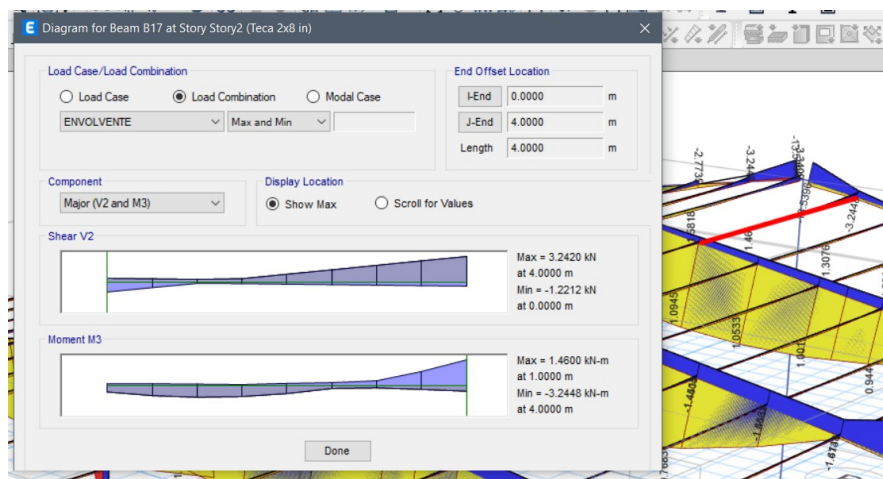
Columna medianera:

$$104 \frac{kgf}{m}$$

Columna esquina

$$52 \frac{kgf}{m}$$

Cálculos para el diseño de las costaneras acorde a EC5 con cargas del software:



• Chequeo de las vigas secundarias a flexión:

- Último:

$$W_{y.vs} := \frac{b_{vs} \cdot h_{vs}^2}{6} = (3.496 \cdot 10^{-4}) m^3$$

$$M_{max.vs.ETABS} := 3.2448 kN \cdot m$$

$$\sigma_{m.y.d.vs.ETABS} := \frac{M_{max.vs.ETABS}}{W_{y.vs}} = 9.282 \frac{N}{mm^2}$$

- Admisible:

$$f_{m.y.d.vs} = 44.45 \frac{N}{mm^2}$$

- Evaluando:

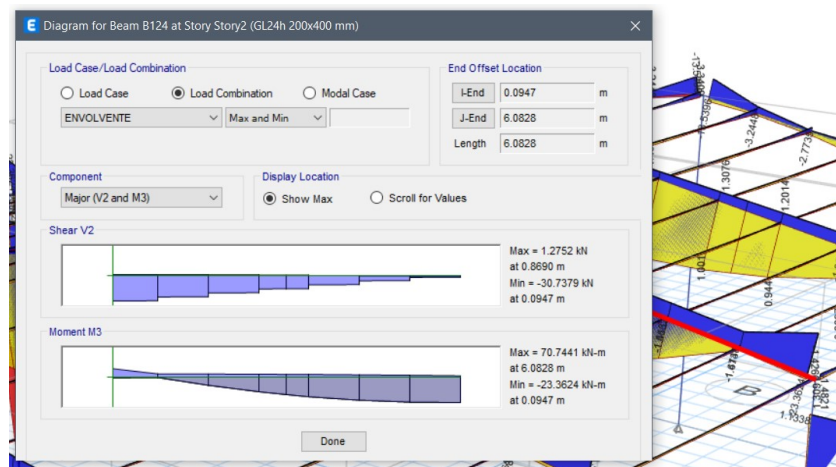
$\sigma_{flexión.vs} := \text{if} (\sigma_{m.y.d.vs.ETABS} \leq f_{m.y.d.vs}, \text{"Sí cumple"}, \text{"No cumple"})$

$$cap.flex_{vs} := \frac{\sigma_{m.y.d.vs.ETABS}}{f_{m.y.d.vs}} = 20.881\%$$

Por tanto:

$$\sigma_{flexión.vs} = \text{"Sí cumple"}$$

Cálculos para el diseño de las vigas principales acorde a EC5:



- **Chequeo de las vigas principales a flexión:**

- Último:

$$W_{y.vp} := \frac{b_{vp} \cdot h_{vp}^2}{6} = 0.005 \text{ m}^3 \qquad M_{max.vp.ETABS} := 70.7441 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_{m.y.d.vp.ETABS} := \frac{M_{max.vp.ETABS}}{W_{y.vp}} = 13.265 \frac{N}{mm^2}$$

- Admisible:

$$f_{m.y.d.vp} = 14 \frac{N}{mm^2}$$

- Evaluando:

$$\sigma_{flexión.vp} := \mathbf{if} (\sigma_{m.y.d.vp.ETABS} \leq f_{m.y.d.vp}, \text{“Sí cumple”}, \text{“No cumple”})$$

$$cap.flex_{vp} := \frac{\sigma_{m.y.d.vp.ETABS}}{f_{m.y.d.vp}} = 94.773\%$$

Por tanto:

$$\sigma_{flexión.vp} = \text{“Sí cumple”}$$

Revisión de costos:

Para madera laminada:

Costo de referencia:	$C_{ref} := 36500$	Quetzales
Pieza de 300x600x8000:	$V_{ref} := 300 \text{ mm} \cdot 600 \text{ mm} \cdot 8000 \text{ mm} = 1.44 \text{ m}^3$	
Densidad pieza:	$\gamma_{w.gl24h} = 380 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$	
Costo por metro cúbico:	$C_{m.cub} := \frac{C_{ref}}{V_{ref}} = (2.535 \cdot 10^4) \frac{1}{\text{m}^3}$	Quetzales por metro cúbico
Costo por kg:	$C_{kg.gl24h} := \frac{C_{m.cub}}{\gamma_{w.gl24h}} = 66.703 \frac{1}{\text{kgf}}$	Quetzales por kilogramo

Peso total por piezas:

$$V_{pieza1} := 12 \cdot (200 \text{ mm} \cdot 400 \text{ mm} \cdot 6100 \text{ mm}) = 5.856 \text{ m}^3$$

$$V_{pieza2} := 14 \cdot (200 \text{ mm} \cdot 200 \text{ mm} \cdot 4000 \text{ mm}) = 2.24 \text{ m}^3$$

$$P_{total.gl24h} := (V_{pieza1} + V_{pieza2}) \cdot \gamma_{w.gl24h} = (3.076 \cdot 10^3) \text{ kgf}$$

Costo total:

$$C_{gl24h} := C_{kg.gl24h} \cdot P_{total.gl24h}$$

$$C_{gl24h} = 205211.11 \quad \text{Quetzales}$$

Para madera Teca:

Costo de referencia:	$C_{ref} := 50$	Quetzales
Pieza de 300x600x8000:	$V_{ref} := 2 \text{ in} \cdot 5 \text{ in} \cdot 7 \text{ ft} = 0.014 \text{ m}^3$	
Peso específico pieza:	$\gamma_{w.teca} = (2.442 \cdot 10^3) \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$	
Costo por metro cúbico:	$C_{m.cub} := \frac{C_{ref}}{V_{ref}} = (3.632 \cdot 10^3) \frac{1}{\text{m}^3}$	Quetzales por metro cúbico
Costo por kgf:	$C_{kg.teca} := \frac{C_{m.cub}}{\gamma_{w.teca}} = 1.487 \frac{1}{\text{kgf}}$	Quetzales por kilogramo

Peso total por piezas:

$$V_{pieza1} := 75 \cdot (2 \text{ in} \cdot 6 \text{ in} \cdot 4000 \text{ mm}) = 2.323 \text{ m}^3$$

$$P_{total.teca} := (V_{pieza1}) \cdot \gamma_{w.teca} = (5.672 \cdot 10^3) \text{ kgf}$$

Costo total:

$$C_{teca} := C_{kg.teca} \cdot P_{total.teca}$$

$$C_{teca} = 8436.45 \quad \text{Quetzales}$$

Costo total por materiales:

$$C_{madera} := C_{gl24h} + C_{teca} = 213647.56 \quad \text{Quetzales}$$

Para madera Teca:

Costo por kgf:

$$C_{kg.acero} := 16.931 \cdot \frac{1}{\text{kgf}}$$

Quetzales por kilogramo

Peso total en kgf:

$$P_{total.acero} := 9876.47 \text{ kgf}$$

Precio total:

$$P_{acero} := C_{kg.acero} \cdot P_{total.acero}$$

$$P_{acero} = 167218.51 \quad \text{Quetzales}$$