

MODELACIÓN, DISEÑO Y COMPARACIÓN DE HUELLA DE CARBONO, COSTOS POR M² Y TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN DE UN EDIFICIO EN ENTRAMADO LIGERO CONSTRUIDO EN SAN PEDRO DE LA PAZ.

M. Riquelme Rudolph¹, J. Padilla-Reyes², F. González Monsalve³

RESUMEN

Con el paso del tiempo, los desastres naturales por cambios climáticos han ido en aumento en cuanto a frecuencia y severidad, lo que los convierte en uno de los mayores desafíos que debe enfrentar la humanidad. Si bien es inevitable que esto suceda por los procesos naturales de la tierra, la contribución que tiene el hombre con las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las cuales son medidas con el indicador de huella de carbono, debe ser mitigada, y así ayudar al desafío climático. Es por esto que la construcción juega un papel fundamental en el desafío, ya que esta genera alrededor de un 30% del total de emisiones de gases de efecto invernadero, considerando una construcción tradicional de hormigón armado, por lo que aprovechar otro tipo de recursos, como la madera, ayuda a disminuir estas emisiones.

Este proyecto de investigación consta del levantamiento arquitectónico y estructural de un edificio de 4 pisos ubicado en la comuna de San Pedro de la Paz, Concepción, materializado en hormigón armado. A este edificio se le calcula la huella de carbono, costos por m² y tiempo de construcción de obra gruesa. A esta misma estructura se le hace su homólogo en entramado ligero de madera, la cual tiene la propiedad de retener CO₂ durante todo su ciclo de vida. Para esto se modela y diseña el edificio utilizando el método simplificado de modelación con software FEM de González y Vargas, 2019.

De los valores obtenidos se pudo identificar que el edificio de madera cumple con la resistencia requerida según las normativas nacionales vigentes, por lo que es totalmente viable su construcción. Además, presenta una huella de carbono negativa en comparación al edificio de hormigón armado, registrando -168,08 TonCO₂eq frente a los 9401,42 TonCO₂eq de este último, lo que significa una menor contaminación. Asimismo, se observó que el tiempo necesario para la construcción de obra gruesa del edificio de madera es menor que el del hormigón armado, con solo 2 semanas en comparación con 5 semanas. Por último, los costos por m² del edificio de madera son 3,81 Unidades de Fomento (UF) inferiores a los del edificio de hormigón armado.

PALABRAS CLAVE: Huella de Carbono, Entramado ligero, Madera.

¹Estudiante, Carrera Ingeniería Civil, Universidad Católica De la Santísima Concepción, mriquelmer@ing.ucsc.cl

²Profesora Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica De la Santísima Concepción, javiera.padilla@ucsc.cl

³Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica De la Santísima Concepción, fgonzalez@ucsc.cl

ABSTRACT:

Over time, natural disasters due to climate change have been increasing in terms of frequency and severity, making them one of the greatest challenges humanity must face. While it is inevitable due to the Earth's natural processes, the contribution of human activities through greenhouse gas emissions, measured by the carbon footprint indicator, must be mitigated to address the climate challenge. This is why construction plays a crucial role in this challenge, as it generates approximately 30% of total greenhouse gas emissions, considering traditional reinforced concrete construction. Utilizing alternative resources, such as wood, can help reduce these emissions.

This research project involves the architectural and structural assessment of a 4-story building located in the commune of San Pedro de la Paz, Concepción, constructed with reinforced concrete. The carbon footprint, costs per square meter, and construction time for the structural work are calculated for this building. An equivalent structure is designed using lightweight timber framing, which has the ability to sequester CO₂ throughout its entire lifecycle. This design is carried out using the simplified modeling method with FEM software by González and Vargas (2019).

The obtained values revealed that the wooden building meets the required strength according to current national regulations, making it entirely feasible for construction. Additionally, it has a negative carbon footprint when compared to the reinforced concrete building, recording -168.08 TonCO₂eq as opposed to the latter's 9401.42 TonCO₂eq, resulting in reduced pollution. Furthermore, the time required for the construction of the wooden building's structural work is shorter than that of reinforced concrete, with only 2 weeks compared to 5 weeks. Finally, the costs per square meter of the wooden building are 3.81 UF lower than those of the reinforced concrete building.

KEYWORDS: Carbon footprint, Light Framing, Timber.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, la construcción de edificios a nivel mundial ha adoptado ampliamente el uso del hormigón como material fundamental, debido a que este es un material altamente confiable por su resistencia estructural y desempeño en condiciones sísmicas y meteorológicas extremas ⁵. Sin embargo, la madera ha ganado popularidad los últimos años debido a sus diferentes propiedades tales como: huella de carbono negativa y aislación térmica. En el contexto de Chile, se destaca el predominio de estructuras de hormigón armado en los edificios.

El Instituto Nacional de estadísticas (INE) indica que la presencia del hormigón en las edificaciones a nivel nacional es de un 48% acumulado entre los años 2002 y 2019, en cambio otros materiales como la madera representan un 17% acumulado entre estos mismos años ⁴. La diferencia porcentual mencionada se origina en gran medida debido a la percepción generalizada de que la madera carece de fiabilidad como opción para la construcción de edificios en cuanto a resistencia estructural y desempeño sísmico.

En los últimos 20 años, la utilización de madera en la construcción en Chile ha experimentado un crecimiento significativo, representando un 20% del mercado. Es importante señalar que este porcentaje se concentra principalmente en viviendas de baja altura ⁵, por lo que aún existe una brecha significativa en relación con las edificaciones de gran altura.

Por otra parte, el sector de la construcción contribuye con el 39% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial, el cual es el principal gas de efecto invernadero (GEI) responsable del cambio climático, por lo que buscar alternativas que modifiquen el escenario actual es fundamental ⁶. Es importante mencionar que el indicador ambiental de la cantidad de gases de efecto invernadero expresada como CO₂ es la Huella de Carbono (HdeC).

Es en este escenario, donde la madera tiene un rol fundamental en la construcción, teniendo en cuenta que esta posee la particularidad de ser un material con carbono negativo, a diferencia del hormigón que es uno de los materiales con mayor factor de emisión de CO₂.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Comparar la huella de carbono, tiempo constructivo y costos por m² de obra gruesa de un edificio construido en hormigón armado de 4 pisos con su homólogo modelado y diseñado en entramado ligero de madera.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar un levantamiento arquitectónico y estructural de un edificio residencial de 4 pisos construido en San Pedro de la Paz.
- Modelar el edificio en entramado ligero con el programa ETABS, utilizando el método simplificado de modelación para software FEM de González y Vargas, 2019.

⁴ Méndez, D. (2021). Estadísticas de la edificación años 2002-2019. Centro UC de innovación en Madera (CIM).

⁵ CTEC INNOVACIÓN. (2021). Construcción en madera, desafíos y oportunidades para el sector construcción. cdt.cl. <https://www.cdt.cl/construccion-en-madera-desafios-y-oportunidades-para-el-sector-construccion/>

⁶ CTEC INNOVACIÓN. (2021). Construcción en madera, desafíos y oportunidades para el sector construcción. cdt.cl. <https://www.cdt.cl/construccion-en-madera-desafios-y-oportunidades-para-el-sector-construccion/>

- Diseñar los elementos estructurales del edificio de madera en el software C+T.
- Calcular y comparar huella de carbono de un edificio de hormigón armado y uno de madera.
- Comparar costos por m² y tiempo de construcción de obra gruesa de un edificio de hormigón armado y uno de madera.

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1 Diseño estructural de muros de corte en madera – SDPWS 2015

El conjunto de pies derechos formando marcos arriostrados por tableros de OSB o contrachapado, es denominado diafragma vertical o muro de corte. Este diafragma se compone por varios elementos (Figura 3.1) que determinan la capacidad y rigidez del muro (CIM UC, 2021).

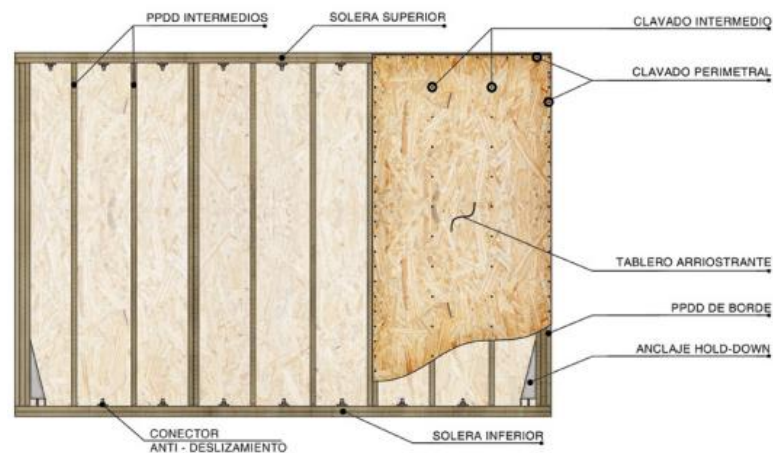


Figura 3.1: Ejemplo muro de corte con anclaje tipo Hold Down

Fuente: CIM UC, 2021

Pies Derechos: Es el soporte de cargas verticales. Se distinguen dos tipos: pies derechos de borde y pies derechos intermedios.

Soleras: Sirven para transmitir cargas homogéneas a los pies derechos y a los tableros arriostrantes.

Tablero arriostrante: Su función es otorgar resistencia y rigidez ante cargas horizontales. Pueden ser placas de OSB o Contrachapado.

Conectores anti-deslizamiento: Son uniones para transferir esfuerzos de cizalle en la base del muro.

Anclaje: Son dispositivo de acero que se instalan en los extremos de los muros de corte. Su función es evitar el volcamiento y evitar el levantamiento de la esquina traccionada de los muros debido a las cargas laterales.

Actualmente en Chile, los muros de corte se pueden diseñar según la metodología de la normativa norteamericana SDPWS 2015 y el método de muro segmentado.

El American National Standards Institute (ANSI) y el American Wood Council (AWC), en su documento Special Design Provisions for Wind and Seismic (SDPWS-2015), propone una deformación lateral de tres componentes: flexión, corte y volcamiento del anclaje (Figura 3.2).

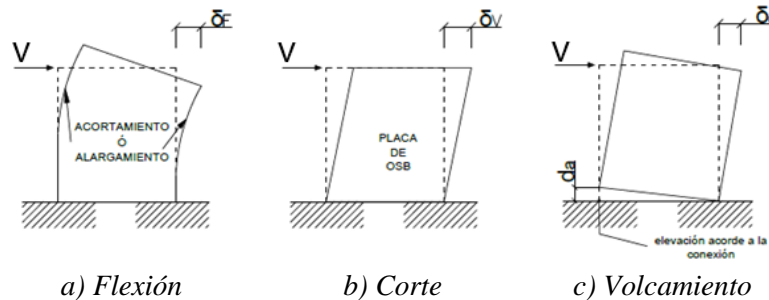


Figura 3.2. Comportamiento estructural de un muro de corte con respecto a 3 términos

Fuente: Fuentes et al., 2023

La ecuación que determinar la deformación lateral de un muro de corte se expresa en la Ecuación 1.

$$\delta_{SW} = V \cdot \left(\frac{2H^3}{3EA_{ext}L^2} \right)_{Flexión} + V \cdot \left(\frac{H}{LG_a} \right)_{Corte} + T \cdot \left(\frac{H}{LK_{Anclaje}} \right)_{Volcamiento} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- V : Solicitación al corte [kg]
- H : Altura del muro [cm]
- E : Módulo de elasticidad de los pies derechos de borde [kg/cm²]
- A_{ext} : Área de la sección transversal total de los pies derechos de borde [kg/cm²]
- L : Largo total del muro [m]
- G_a : Módulo de corte aparente [kg/cm]
- K_{Anclaje} : Rigidez del anclaje [kg/cm]
- T : Tracción de los pies derecho de borde [kg]

3.2 Método simplificado de modelación con software FEM

Una modelación simplificada utiliza coeficientes de modificación para la rigidez en elementos tipo área. Estos coeficientes vienen especificados en cada programa computacional y afectan básicamente a la rigidez en el plano y fuera de este⁷.

En el estudio realizado por Cárcamo⁸, se ha observado que la metodología más sencilla para desarrollar un modelo simplificado implica igualar la rigidez lateral total del sistema entramado ligero, representada por la ecuación 2, y la rigidez lateral total de un muro en voladizo, representada por la ecuación 3.

⁷ González, I., & Vargas, J. (2019). MÉTODO SIMPLIFICADO PARA MODELACIÓN DE EDIFICIOS EN MEDIA ALTURA TIPO MARCO-PLATAFORMA DE MADERA UTILIZANDO UN PROGRAMA COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS FINITOS. XII Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2019.

⁸Cárcamo, S. I. (Julio de 2017). Modelo de muros marco plataforma para un programa de elementos finitos mediante elementos área. Universidad Técnica Federico Santa María, Obras Civiles, Valparaíso.

A continuación, se muestran las fórmulas mencionadas anteriormente y los factores de modificación de rigidez que se obtienen de dicha igualdad.

$$\frac{1}{K_{SDPWS}} = \frac{2h^3}{2EAL^2} + \frac{h}{G_{\alpha}L} + \frac{h^2}{K_{HD}LL'} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- L' : Distancia entre anclaje traccionado y el centroide de los pies derechos de borde
- A : Área de la sección transversal
- E : Módulo de elasticidad
- K_{HD} : Rigidez del anclaje

$$\frac{1}{K} = \frac{h^3}{3EI} + \frac{\alpha h}{GA} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

α : Factor de forma de Timoshenko.

La obtención de coeficientes de modificación se realiza igualando las distintas rigideces del muro de corte, es decir, igualando la rigidez vertical y horizontal del sistema SDPWS con la rigidez total de un muro en voladizo⁹. Con el fin de lograrlo, se establecen 3 coeficientes que deben ser obtenidos.

Ψ : Coeficiente de modificación que se aplica a la rigidez en dirección x e y del elemento tipo área, en ETABS está representado por f11 y f22.

λ : Coeficiente de modificación que se aplica a la rigidez por cortante del elemento tipo área, en el programa ETABS está representado por f12.

ρ : Coeficiente de modificación que se aplica a la masa y peso del elemento tipo área.

3.3 Cálculo de Huella de Carbono y análisis de ciclo de vida

La medición de huella de carbono es una herramienta que evalúa las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con una actividad, proceso, producto o entidad, expresadas en equivalentes de dióxido de carbono (CO₂eq).

Su objetivo es evaluar el impacto ambiental que produce una actividad u organización específica en términos de cambio climático¹⁰. Por lo que conocer esta cuantificación de impacto ambiental sirve para la gestión de conductas o acciones que contribuyen a aumentar estas emisiones y así poder mejorarlas.

Para medir la huella de carbono de una actividad u organización, es necesario realizar un análisis de ciclo de vida (ACV), este se describe en las normas internacionales ISO 14040 e ISO 14044. Este análisis, permite de manera objetiva, estimar y evaluar los impactos que un producto o servicio puede tener sobre el

⁹ González, I., & Vargas, J. (2019). MÉTODO SIMPLIFICADO PARA MODELACIÓN DE EDIFICIOS EN MEDIA ALTURA TIPO MARCO-PLATAFORMA DE MADERA UTILIZANDO UN PROGRAMA COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS FINITOS. XII Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2019.

¹⁰ Huella de Carbono. (s. f.). mma.gob.cl. <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/cc-02-7-huella-de-carbono>.

medio ambiente durante todas las etapas de su vida, esto quiere decir desde la adquisición de materias primas hasta la gestión de los residuos del material¹¹. A continuación, en la Figura 3.3 se muestran las etapas antes señaladas.



Figura 3.3: Etapas del ciclo de vida del producto

Fuente: <https://knauf-industries.es/analisis-ciclo-vida-acv/>.

En Chile, aun no existe una gran cantidad de estudios sobre los factores de emisión de materiales que son utilizados comúnmente en la construcción, por lo que para este proyecto se han utilizado los factores de emisión de los materiales que componen la obra gruesa de ambas estructuras, en este caso del edificio de hormigón armado y el de madera, estos factores fueron obtenidos de la Tesis “Medición y análisis de la Huella de Carbono asociado a la Construcción del nuevo edificio de Ingeniería de la Universidad Católica de la Santísima Concepción”, escrita por Jhon Isaac Muñoz Silva¹². A continuación, se muestra una tabla con dichos factores.

Tabla 3.1: Factores de emisión, materiales de obra gruesa

Tipo	Material	Factor de Emisión	Unidad
Elementos de hormigón	Hormigón	296,3	(kgCO ₂ eq/m ³)
Enfierradura	Acero	4,6	(kgCO ₂ eq/kg)
Elementos de Madera	Madera	-1,53	(kgCO ₂ eq/kg)

Fuente: Elaboración propia, 2023.

¹¹ Área Metropolitana valle de Aburra. (2018). Análisis de ciclo de vida. metropol.gov.com.

<https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/analisis-de-ciclo-de-vida.aspx#:~:text=%E2%80%8BE1%20An%C3%A1lisis%20del%20Ciclo,las%20etapas%20de%20su%20vida>

¹² Muñoz, J. (2019). Medición y análisis de la Huella de Carbono asociado a la Construcción del nuevo edificio de Ingeniería de la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Universidad Católica de la Santísima Concepción.

4. ANTECEDENTES DE LA ESTRUCTURA

4.1 Arquitectura

El edificio al cual se le realizó el levantamiento arquitectónico y estructural para este proyecto se encuentra ubicado en la calle Los Maños de San Pedro de la Paz (Figura 4.3), Chile. Es un edificio de 4 plantas, con 4 departamentos en cada una de ellas, todos con la misma distribución. La superficie total del edificio es de 968,32 m².

La estructura original es de hormigón armado y fue construido en el año 1979 por la empresa constructora Dolmen. A continuación, se muestra un extracto de los planos arquitectónicos del edificio (Figura 4.1), los cuales fueron proporcionados por la municipalidad de San Pedro de la Paz. En la Figura 4.2 se muestra una foto reciente del edificio.

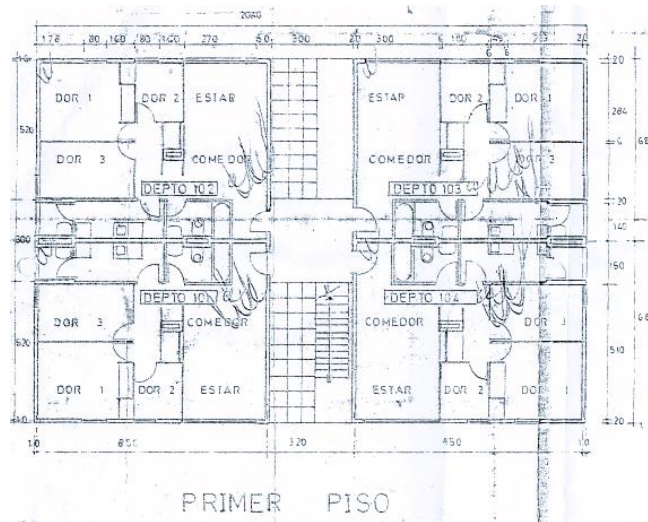


Figura 4.1: Vista en planta, primer piso del edificio de HA.
 Fuente: Municipalidad de San Pedro de la Paz, Chile.



Figura 4.2: Fotografía actual Edificio de HA.
 Fuente: Elaboración propia. 2023.

Para el diseño del edificio de entramado ligero en madera, se adoptó la misma distribución arquitectónica. Es importante destacar que solo se consideraron como muros estructurales aquellos que tenían una relación altura: base mayor a 2:1, por requerimientos normativos en madera.

Cabe mencionar que la altura de entre pisos de cada uno de los muros que conforman el edificio de entramado ligero es de 2,5 metros, y la ubicación del edificio de madera en la Av. 4 norte, en San Pedro de la Paz, Chile (Figura 4.3).



Figura 4.3: Ubicación proyecto en hormigón armado y en entramado ligero.
 Fuente: Google Maps. 2023.

4.2 Mecánica de suelos

Se consideró un caso desfavorable, suelo tipo E emplazado en zona sísmica 3.

4.3 Materiales

4.3.1 Hormigón

La estructura contempla hormigón para las fundaciones, grado G20 con las siguientes características:

Tabla 4.1: Características hormigón de fundaciones

Resistencia de diseño ($f'c$)	200 kg/cm ²
Módulo de elasticidad E	213546 kg/cm ²
Poisson (ν)	0,25
Peso específico (γ)	2500 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia. 2023.

4.3.2 Acero de refuerzo

El acero de refuerzo empleado para el hormigón armado es calidad A630-420H de alta resistencia con las siguientes propiedades.

Tabla 4.2: Características Acero de refuerzo

Resistencia de diseño (f_y)	4200 kg/cm ²
Módulo de elasticidad (E)	2100000 kg/cm ²
Resistencia a la rotura (f_u)	6300 kg/cm ²
Peso específico (γ)	7800 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia, 2023

4.3.3 Madera maciza

Para el diseño de elementos estructurales se consideró madera maciza de pino radiata C24, según la denominación de la norma NCh1198 Of.2014, con una humedad de servicio de 12%, con las siguientes propiedades.

Tabla 4.3: Propiedades mecánicas de madera de Pino Radiata

Grado estructural	Tensiones admisibles de:					Módulo de elasticidad en flexión	Índice de aplastamiento en compresión normal
	Flexión ¹⁾	Compresión paralela	Tracción paralela ¹⁾	Compresión normal	Cizalle		
	F_f MPa	F_{cp} MPa	F_{tp} MPa	F_{cn} MPa	F_{cz} MPa		
a) Visuales							
GS	11,0	8,5	6,0	2,5	1,1	10 500	5,65
G1	7,5	7,5	5,0	2,5	1,1	10 000	
G1 y mejor	9,5	7,8	5,5	2,5	1,1	10 100	
G2	5,4	6,5	4,0	2,5	1,1	8 900	
b) Mecánicos							
C24	9,3	8,0	4,7	2,5	1,1	10 200	5,65
C16	5,2	7,5	3,5	2,5	1,1	7 900	
MGP 10	8,4	10	4,0	2,5	1,3	10 000	
MGP 12	13,5	15,5	6,0	2,5	1,3	12 700	
1) Valores aplicables sobre piezas de altura de sección transversal ≤ 90 mm, excepto en los Grados Mecánicos MGP 10 y MGP 12, para los que el límite se incrementa hasta 160 mm. 2) Valores aplicables sobre piezas de altura de sección transversal ≥ 180 mm, excepto en los Grados Mecánicos MGP 10 y MGP 12, cuyos valores son aplicables sobre cualquier altura de sección transversal. El módulo de elasticidad característico inherente al percentil del 5%, E_{fk} , se puede estimar como $0,60 E_f$.							

Fuente: NCh1198 Of.2014, 2014

4.3.4 Tableros OSB

Para el diseño se consideraron tableros de OSB de 11,1 mm de espesor con las siguientes propiedades.

Tabla 4.4: Características OSB

Densidad tablero (ρ)	600 kg/m ³
-----------------------------	-----------------------

Fuente: Elaboración propia, 2023

4.4 Cargas de diseño

4.4.1 Peso Propio

Las cargas muertas que se consideran en los cálculos estructurales del proyecto son las correspondientes a los pesos propios de los materiales de obra gruesa que componen la edificación. En la Tabla 4.5 se muestran los materiales que fueron considerados para el cálculo del peso propio de envigado de piso.

Tabla 4.5: Materiales considerados para el cálculo de cargas muertas

Materiales	Peso Propio (kgf/m²)
Cerámica de piso	15
Piso de hormigón e= 5 cm	120
Base de contrachapado	6
Vigas dobles de 2x8	17
Placa yeso cartón	10,5
Aislación	1,2
Extras	20
TOTAL	190

Fuente: Elaboración propia, 2023

4.4.2 Sobrecargas

Las sobrecargas consideradas para este diseño se ajustan a la norma NCh1537 Of.1986 la cual indica:

Tabla 4.6: Resumen sobrecargas según norma NCh1537 Of.1986.

Sobrecarga de uso en losas (Lf)	200 kg/m ²
Sobrecarga de uso en techo (Lr)	100 kg/m ²

Fuente: Elaboración propia. 2023.

4.4.3 Sismo

El análisis sísmico se establece considerando el uso y la ubicación de la estructura. Se utilizó el método modal espectral bajo la norma NCh433 Of.1996 y su DS61, que indican los siguientes factores y parámetros:

Tabla 4.7: Valores de los factores de modificación de la respuesta

Parámetros de la estructura	
Tipo de Suelo	E
Zona sísmica	3
Categoría de Importancia	II
Factor de modificación de respuesta (R)	5.5
R*x	3,20
R*y	3,38
Periodo en la dirección de análisis x (T*x) [s]	0,38
Periodo en la dirección de análisis y (T*y) [s]	0,43

Fuente: Elaboración propia, 2023

4.5 Combinaciones de carga

En la determinación de los esfuerzos de diseño, compatibles con la normativa NCh3171Of.2010, se tiene lo siguiente:

- I. D
- II. D + L
- III. D + Lr
- IV. D + 0.75 L + 0.75 Lr
- V. D + E
- VI. D + 0.75 E + 0.75 L + 0.75 Lr
- VII. 0.6 D + E

Donde:

D : Peso propio de la estructura

L : Sobrecarga de uso

Lr : Sobrecarga de techo

E : Sismo en ambas direcciones del plano

5. DISEÑO ESTRUCTURAL EN MADERA

5.1 Modelo estructural

Para el modelo estructural se utilizó el software FEM Etabs. En este software se utilizaron 2 distintos tipos de elementos:

- **Elementos tipo Frame:** Se consideraron estos elementos para el modelamiento de vigas y columnas presentes en la estructura considerando estos como elementos rotulados en sus dos extremos, siendo estos lineales y elásticos con 2 nodos.

- **Elementos tipo Shell:** Se consideraron estos elementos para el modelamiento de muros y losas, los que poseen 4 nodos. Las losas fueron modeladas como un elemento tipo placa que descarga hacia las vigas con un espesor de 18mm, esto fue considerado para distribuir las cargas estáticas a los elementos mencionados, considerando también estas como diafragma rígido.

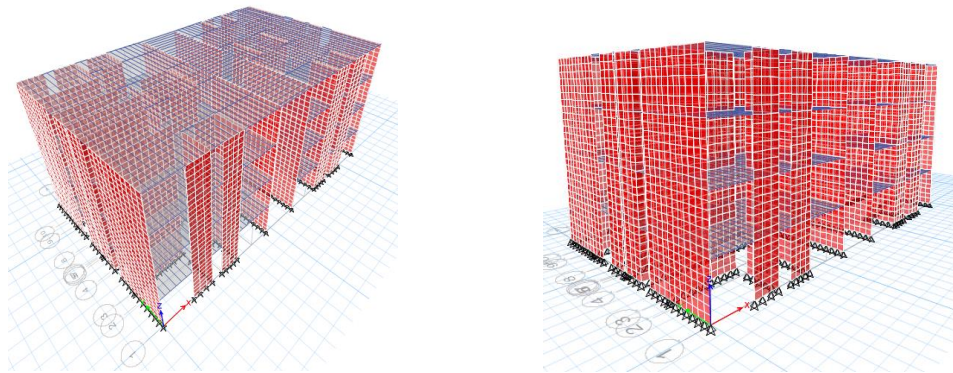


Figura 5.1: Modelo en ETABS edificio de madera.
 Fuente: Elaboración propia, 2023

5.2 Análisis modal espectral

La fuerza sísmica según el análisis modal espectral se basa en encontrar la masa equivalente que participa en la vibración correspondiente a cada uno de los modos, lo cual se especifica en la NCh433 Of.1996 mod.2009.

A continuación, en la tabla 5.1 se presentan los periodos de vibración obtenidos para la estructura en ambos ejes, así como su respectiva participación de masa correspondiente a cada modo de vibración.

Tabla 5.1: Periodos de vibración del edificio de madera.

Case	Mode	Periodo	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Modal	1	0,479	0,004	0,3673	0	0,004	0,3673	0
Modal	2	0,432	0,0087	0,4929	0	0,0127	0,8602	0
Modal	3	0,386	0,8592	0,0009	0	0,8719	0,8611	0

Fuente: Elaboración propia, 2023

5.3 Verificación de deformaciones sísmicas

Para cumplir con la normativa NCh433 Of.1996 mod.2009, la deformación del centro de masa no debe exceder el 0,002% en relación con la altura de cada piso del edificio¹³.

En las figuras 5.2 y 5.3, se presentan las deformaciones por piso de la estructura, comparadas con el valor máximo de deformación permitida según la normativa.

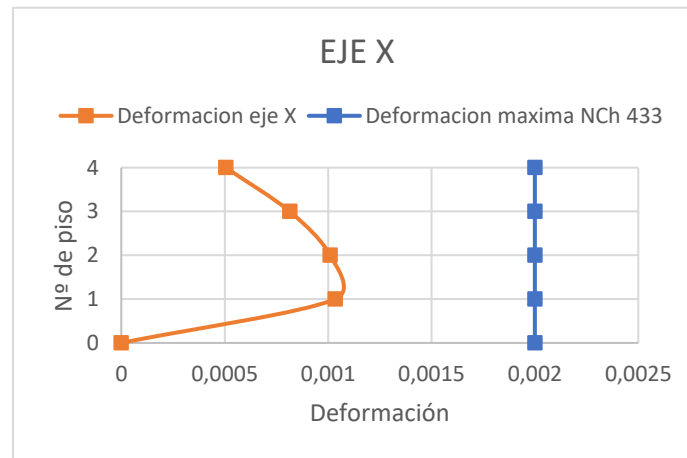


Figura 5.2: Deformación por piso eje X
 Fuente: Elaboración propia, 2023

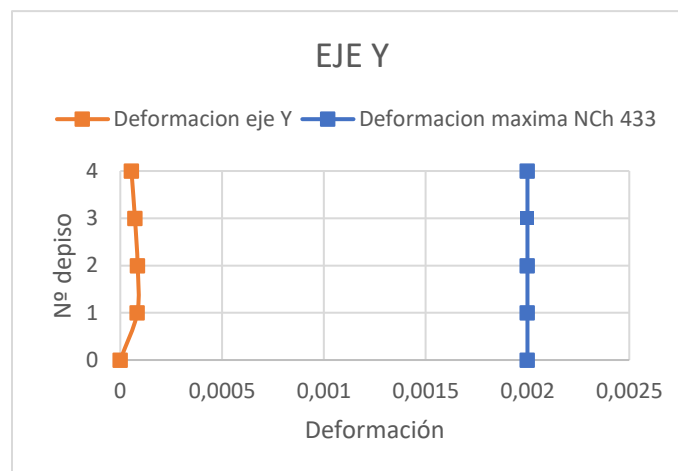


Figura 5.3: Deformación por piso eje Y
 Fuente: Elaboración propia 2023

¹³ Nch433.Of96, Diseño sísmico de edificios.

5.4 Diseño de elementos en madera

5.4.1 Vigas

El diseño de elementos estructurales como vigas se realizó utilizando el software C+T de diseño estructural de la empresa Eligemadera SpA, el cual tiene una normativa de cálculo compatible con la norma NCh1198 Of.2014.

Se consideraron las vigas más desfavorables del envigado de techo y piso del edificio para los cálculos de diseño de estos elementos. Se asume que las vigas se encuentran simplemente apoyadas en ambos extremos.

Dada las solicitaciones de carga del edificio se requiere utilizar **2P 2x8** para las vigas de techo de todas las plantas del edificio.

5.4.2 Pies derechos

El diseño de elementos estructurales como pies derechos se realizó utilizando el software C+T de diseño estructural de la empresa Eligemadera SpA, el cual tiene una normativa de cálculo compatible con la norma NCh1198 Of.2014.

De forma conservadora se asumió que los pies derechos se encuentran simplemente apoyados en ambos extremos.

Dada las solicitaciones de carga del edificio se requiere utilizar **1P 2x6@40 cm** para los pies derechos de todo el edificio.

5.4.3 Muros

Con el objetivo de facilitar la identificación de cada uno de los muros del edificio de madera, se empleó una nomenclatura específica. Como se mencionó anteriormente, la simetría presente en la arquitectura de todas las plantas del edificio resulto de gran ayuda en este proceso. De este modo, se logró separar los muros según su longitud. En la Figura 5.4 se muestra la nomenclatura utilizada.

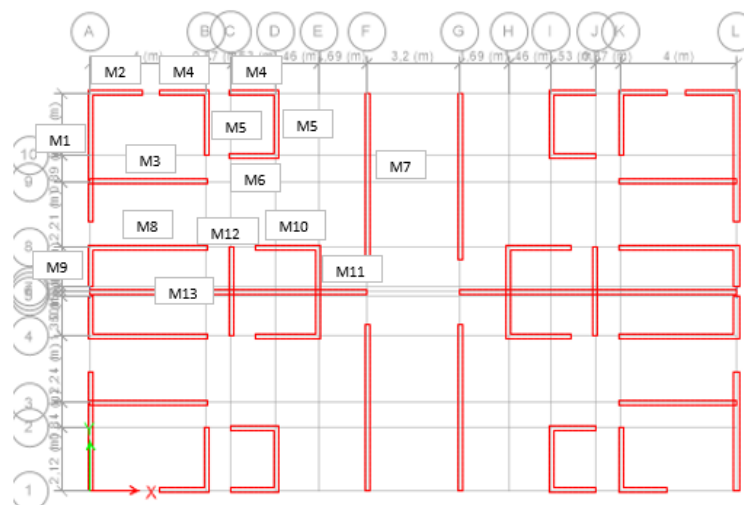


Figura 5.4: Nomenclatura muros edificio de madera.

Fuente: Elaboración propia, 2023

A continuación, se detallan las consideraciones utilizadas para cada muro del edificio según su longitud y el eje donde se encuentran.

Tabla 5.2: Diseño de muros de corte edificio de madera.

Eje	Muro	Largo (m)	Tipo de anclaje	Placa arriostrante	PD de borde	Clavado
EJE A	M1	4,3	HD19_4 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
	M9	1,35	HD19_4 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE B	M5	2,1	HD19_4 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE C	M12	3	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE D	M5	2,1	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE E	M11	3	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE F	M7	5,6	HD19_4 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE G	M7	5,6	HD19_4 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE H	M11	3	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE I	M5	2,1	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE J	M12	3	HD19_4 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE K	M5	2,1	HD19_4 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE L	M1	4,3	Doble anclajeHD19_4	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
	M9	1,35	HD19_4 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE 1	M4	1,6	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE 2	M6	1,6	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE 3	M8	4	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE 4	M8	4	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
	M10	2,2	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE 6	M13	9,6	Doble anclajeHD12_3	OSB 11,1 mm 8d	6	@5
EJE 8	M8	4	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
	M10	2,2	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE 9	M8	4	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE 10	M6	1,6	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
EJE 11	M4	1,6	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10
	M2	1,78	HD12_3 Anclaje simple	OSB 11,1 mm 8d	6	@10

Fuente: Elaboración propia, 2023.

El diseño realizado en el software C+T junto a los diagramas de esfuerzo y verificación estructural se encuentran en el apartado de anexos 10.3.3.

6. CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO

Para calcular la huella de carbono del edificio materializado en hormigón y en madera, es necesario conocer la cantidad de material utilizada en la obra gruesa de ambas estructuras, para posteriormente multiplicar estas cantidades por los factores proporcionados en la tabla 3.1, estas cantidades son obtenidas mediante la cubicación de ambos edificios.

Es importante destacar que, debido a la falta de planos estructurales del edificio de hormigón armado ya construido en San Pedro de La Paz, Chile, se han tomado consideraciones adicionales para su cubicación. Estas consideraciones cumplen con la norma NCh353.Of 2018 y la ACI 318S-14, y se detallan en el apartado de anexos del proyecto.

Cabe mencionar que algunos elementos estructurales, como el radier, escaleras y todas las terminaciones de los edificios, no se consideraron en la cubicación, ya que están compuestos por la misma cantidad y tipo de material en ambos edificios. Por lo tanto, su comparación resulta irrelevante.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del cálculo de la Huella de Carbono para ambos edificios, con el objetivo de realizar la comparativa entre las emisiones generadas por cada tipo de construcción.

Tabla 6.1: Cubicación y factores de emisión de CO₂.

Tipo	Unidad	Cantidad de material	Factor de Emisión	Unidad
Elementos de Hormigón	m ³	1084,58	296,3	(kgCO ₂ eq/m ³)
Enfierradura	kg	78276,40	116	(kgCO ₂ eq/kg)
Elementos de Madera	kg	109857,28	-1,53	(kgCO ₂ eq/kg)

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Tabla 6.2: Resultados, cantidad de CO₂ liberado a la atmósfera.

Tipo	Cantidad de CO ₂ liberado a la atmosfera (kgCO ₂ eq)
Elementos de Hormigón	321361,29
Enfierradura	9080058,21
Elementos de Madera	-168081,64

Fuente: Elaboración propia. 2023.

Considerando que, los elementos de hormigón y enfierradura corresponden al edificio de hormigón armado y los elementos de madera corresponden al edificio de madera, se tiene lo siguiente.

Tabla 6.3: Resultados, cantidad de CO₂ liberado a la atmósfera según tipo de edificio.

Edificio	Cantidad de CO ₂ liberado a la atmosfera (TonCO ₂ eq)
Hormigón Armado	9401,42
Entramado ligero- Madera	-168,08

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Se observa que la construcción de la obra gruesa del edificio de hormigón armado, que involucra hormigonado y enfierradura para este proyecto, genera una liberación de 9401,42 toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera, contribuyendo significativamente a la contaminación ambiental.

En cambio, al materializar el mismo edificio utilizando madera, se constata una liberación de -168,08 toneladas de dióxido de carbono. Esto se debe a la propiedad de la madera de ser carbono negativo, es decir, actúa como un sumidero de carbono, capturando más dióxido de carbono del que libera, lo que resulta en una contribución positiva para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Estos resultados destacan la importancia de considerar materiales más sostenibles y de baja huella de carbono en la construcción de edificaciones, como la madera, como una estrategia para mitigar el impacto ambiental y reducir las emisiones de gases contaminantes.

La cubicación detallada de cada una de las estructuras se encuentra en el anexo 10.5.

7. COMPARACIÓN TIEMPO CONSTRUCTIVO DE OBRA GRUESA

Para realizar la comparación entre ambos edificios, se obtuvieron los tiempos de construcción aproximados a partir de dos fuentes. Primero, se consultó la tesis "Análisis de los plazos de construcción de edificios en Chile y su relación con los métodos constructivos utilizados" escrita por Daniela Ruano Peña el año 2010, la cual indica que el avance promedio máximo de la obra gruesa para un edificio de hormigón armado es de 4 pisos por mes, basado en visitas a terreno de la obra Edificio Urbano plus¹⁴.

Para el caso de la construcción de un edificio de madera, se consultó a una empresa local ubicada en San Pedro de la Paz, camino a Coronel, que se dedica a la construcción industrializada de viviendas de madera con tecnología alemana de última generación. Según la información proporcionada por la empresa, pueden construir 47,95 metros lineales de paneles (muros) en 9 horas. Al hacer una relación con los 629,24 metros lineales que componen el edificio, se obtuvo el resultado presentado en la tabla 7.1 que se muestra a continuación.

Tabla 7.1: Tiempo de construcción obra gruesa edificio de madera

Edificio de madera		
Tipo de construcción	Entramado ligero	Tipo
Pies derechos	2X6	Tipo
Vigas	V.D 2x8	Tipo
Cantidad pie derecho de borde	6	Cantidad
separación Pie derechos	400	mm
Placas arriostrantes	OSB 11,1 mm	Tipo
Metros lineales de muro viviendas	47,951	ml
Tiempo construcción de viviendas según ml	9	Horas
Metros lineales de muro Edificio	629,24	ml
Tiempo de construcción edificio madera según ml	118	horas

¹⁴ Ruano, D. V. (2010). *Análisis de los plazos de construcción de edificios en Chile y su relación con los métodos constructivos utilizados*. Universidad de Chile.

Fuente: Elaboración propia, 2023

Tomando en cuenta que el tiempo de construcción incluye la construcción de muros, losas y el montaje de los paneles, se estima que el edificio podría ser construido en poco más de 2 semanas si se trabaja 45 horas semanales. La ubicación propuesta para el proyecto sería cercana a la fábrica, como se menciona en el apartado 4.1 del proyecto.

Para trasladar el edificio desde la fábrica hasta el lugar de emplazamiento, es necesario dividirlo en módulos para que puedan ser transportados sin problemas en un camión y luego montados con una grúa. A continuación, se muestra la solución propuesta para separar el edificio en módulos.

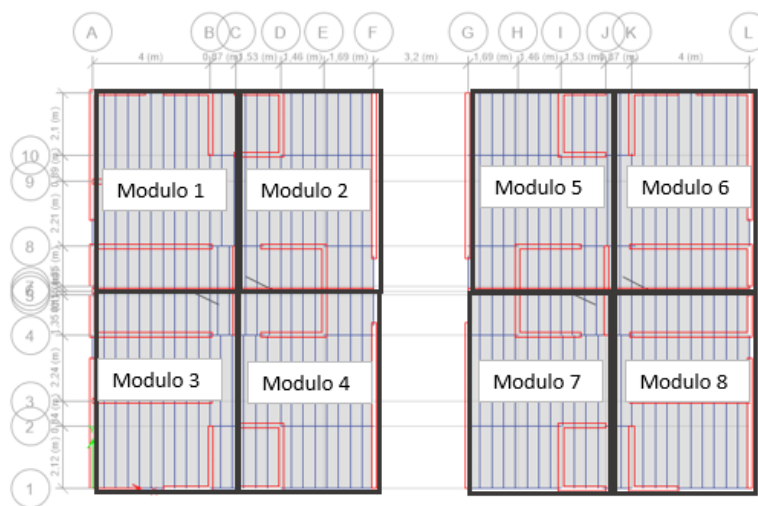


Figura 7.1: Separación por módulos edificio de madera, primera planta.

Fuente: Elaboración propia, 2023.

Con lo anterior se divide cada una de las plantas del edificio de madera en 8 módulos de $32,76 \text{ m}^2$, lo que facilita el transporte en camión, y luego el montaje en obra. Dado lo anterior, a continuación, se muestra en la tabla 7.2 la comparación entre ambos tiempos de construcción.

Tabla 7.2: Comparación tiempo constructivo según cantidad de piso de ambos edificios

Edificio	Cantidad de pisos	Tiempo constructivo
Hormigón armado	4	5 semanas
Madera	4	2 semanas

Fuente: Elaboración propia, 2023

8. COMPARACIÓN DE COSTOS POR M² DE CONSTRUCCIÓN DE OBRA GRUESA DE AMBOS EDIFICIOS

Para la comparación de costos por m² de construcción tanto del edificio de hormigón como el de madera se utilizaron las mismas fuentes mencionadas en el apartado anterior, la empresa local dedicada a la construcción industrializada de viviendas modulares de madera proporcionó los costos asociados al montaje, mano de obra y materiales que tienen al momento de construir los paneles, en la tabla 8.1 se puede apreciar dicho valor, además en la misma tabla se muestran los costos incluyendo los mismos ítems del edificio de hormigón armado analizado en la tesis referenciada en el apartado anterior el cual en cuanto a componentes estructurales y materiales de obra gruesa se asemeja al edificio analizado en este proyecto.

Tabla 8.1: Comparación costos por m² de obra gruesa de ambos edificios

Tipo	Costo Unit	Unidad
Edificio de hormigón armado	11,7	UF/m ²
Edificio de Madera	7,89	UF/m ²

Fuente: Elaboración propia, 2023

Además de la información entregada por la tesis mencionada, se consideró la información entregada por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo sobre los costos unitarios por m² de construcción del segundo trimestre del 2023, para así poder tener dos fuentes de información respecto al costo constructivo del edificio de hormigón armado considerando una categoría tipo 1-C según las características del edificio de este proyecto, a continuación, se muestra la tabla obtenida de la página oficial del Ministerio.

Tabla 8.2: Tabla de costos unitarios por metro cuadrado de construcción.

**TABLAS DE COSTOS UNITARIOS POR METRO CUADRADO DE CONSTRUCCION
2º TRIMESTRE 2023**

(En pesos Moneda Nacional, Base Enero 2023)

I.- OBRAS DE EDIFICACION

CATEGORIA	TIPO DE EDIFICACION								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	424.532	484.238	424.532	424.532	301.787	-	-	-	-
2	315.111	358.190	315.111	315.111	225.501	159.217	225.501	205.638	248.766
3	232.174	265.331	232.174	232.174	165.810	116.078	165.810	149.223	182.488
4	165.810	188.998	165.810	165.810	119.297	82.857	119.297	106.164	129.302
5	-	101.498	89.540	89.540	89.540	62.969	96.150	86.224	102.755

Fuente: Ministerio de Viviendas y Urbanismo, 2023.

De lo anterior se puede desprender que los costos por m² de un edificio de hormigón armado con categoría 1-C son de \$424.532 pesos chilenos lo que se traduce actualmente con fecha 28/07/2023 en 11,77 UF, lo cual coincide con la información entregada por la tesis referenciada anteriormente.

9. CONCLUSIONES

En cuanto a los resultados derivados del modelado y diseño de un edificio de 4 pisos de entramado ligero de madera, utilizando el método simplificado para software FEM de González & Vargas (2019), verificando los elementos estructurales con todas las normativas nacionales vigentes, se concluye:

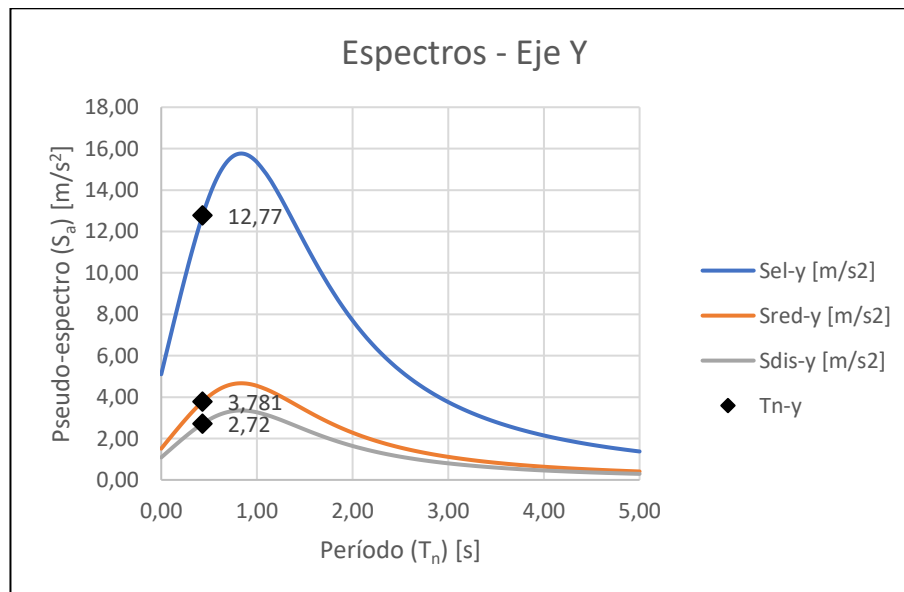
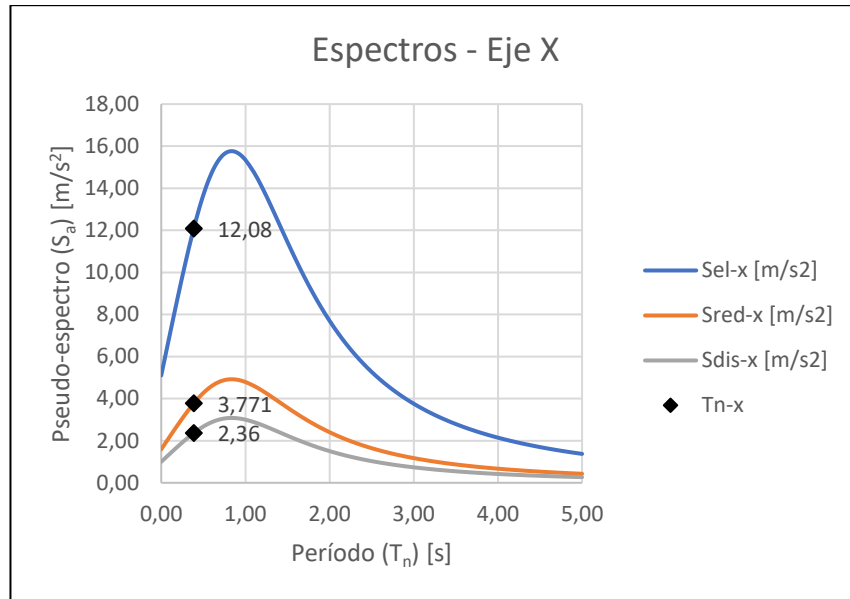
- La factibilidad de diseñar edificios en madera, cumpliendo con todas las normativas nacionales, por medio del método simplificado de modelación utilizando softwares comerciales FEM. Se evidenció que la utilización del método optimiza el tiempo de modelación y diseño de los muros de corte del proyecto, lo que finalmente incentiva el desarrollo de proyectos con este sistema constructivo.
- La distribución geométrica de los muros estructurales en planta para estructuras de entramado ligero es un factor determinante para el diseño, dada la flexibilidad intrínseca del sistema constructivo. Se deben privilegiar configuraciones en planta simétricas y regulares, para lograr una densidad de muros lo más homogénea posible y evitar direcciones débiles.

En tanto al cálculo y comparación de huella de carbono, tiempo constructivo y costos de obra gruesa por metro cuadrado entre los edificios de madera y hormigón, se concluye lo siguiente:

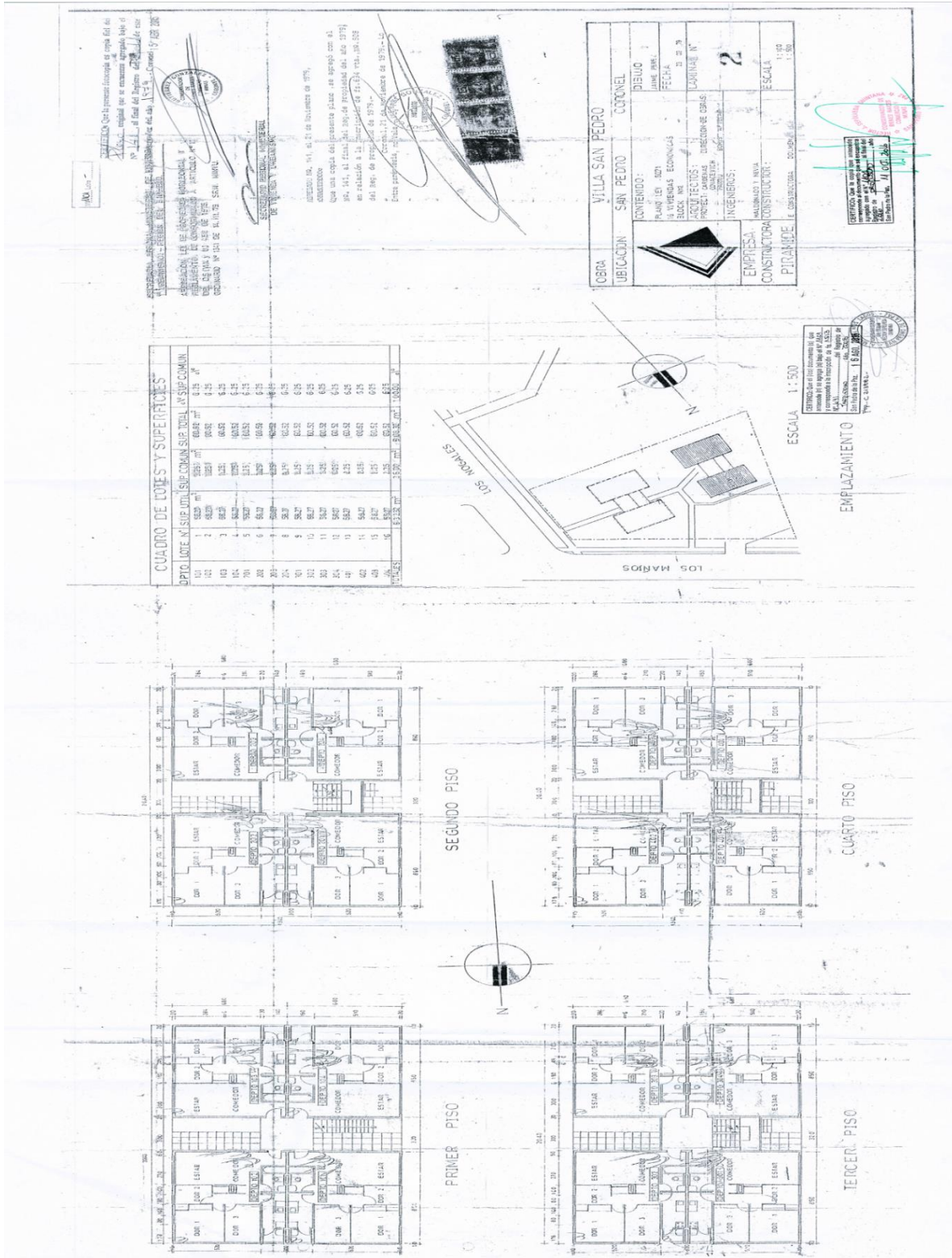
- La evidencia de una huella de carbono negativa en el edificio de madera, debido a su capacidad de retener más dióxido de carbono del que emite, subraya su ventaja ambiental sobre la estructura de hormigón. Asimismo, el menor tiempo constructivo del edificio de madera, potenciado por la prefabricación y la reducción de errores humanos en terreno, junto con el menor costo por metro cuadrado, enfatiza su atractivo económico y eficiencia en comparación con el edificio de hormigón.
- Si consideramos la cantidad de CO₂ liberada durante el transporte de los módulos al lugar de construcción del edificio de madera, sin duda, se incrementaría la huella de carbono del edificio. Sin embargo, es importante destacar que el edificio de hormigón armado también implica el traslado de materiales como hormigón y enfierradura. Por lo tanto, a pesar de que el edificio de madera pueda estar ubicado a una distancia considerable de la ubicación de prefabricación, seguiría manteniendo una ventaja significativa sobre el edificio de hormigón armado en términos de su impacto ambiental.
- En consecuencia, la construcción en madera se erige como una elección más beneficiosa en términos de tiempo, impacto ambiental y costos, particularmente cuando se considera la prefabricación de paneles estructurales. Es imperativo que tanto en Chile como en el ámbito global se fomente y promueva la construcción en madera como una alternativa para las generaciones venideras, acelerando la edificación y reduciendo la contaminación de manera significativa.

BIBLIOGRAFIA

- Méndez, D. (2021). Estadísticas de la edificación años 2002-2019. Centro UC de innovación en Madera (CIM).
- González, I., & Vargas, J. (2019). MÉTODO SIMPLIFICADO PARA MODELACIÓN DE EDIFICIOS EN MEDIA ALTURA TIPO MARCO-PLATAFORMA DE MADERA UTILIZANDO UN PROGRAMA COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS FINITOS. XII Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2019.
- Cárcamo, S. I. (Julio de 2017). Modelo de muros marco plataforma para un programa de elementos finitos mediante elementos área. Universidad Técnica Federico Santa María, Obras Civiles, Valparaíso.
- Muñoz, J. (2019). Medición y análisis de la Huella de Carbono asociado a la Construcción del nuevo edificio de Ingeniería de la Universidad Católica de la Santísima Concepción. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Nch433.Of96, Diseño sísmico de edificios.
- NCh1198 Of.2014, Construcciones en madera.
- NCh1537 Of.1986, Diseño estructural de edificios.
- Ruano, D. V. (2010). Análisis de los plazos de construcción de edificios en Chile y su relación con los métodos constructivos utilizados. Universidad de Chile.
- Fuentes, G., Padilla-Reyes J., Maureira-Carsalade, N. (2023): "Diseño estructural de una casa de entramado ligero testeando el método simplificado de modelación para software FEM mediante la variación del tamaño y forma de la malla". Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.

ANEXOS
10.1 Espectros de sismo


10.2 Planos arquitectónicos edificio de hormigón armado construido en San Pedro de la Paz



10.3 Diseños de muro, esfuerzos y factores de rigidez

10.3.1 Posición de los muros respecto a ejes de ETABS

EJES	MUROS
A	M1-M9
B	M5
C	M12
D	M5
E	M11
F	M7
G	M7
H	M11
I	M5
J	M12
K	M5
L	M1-M9
1	M4
2	M6
3	M8
4	M8-M10
5	N/A
6	M13
7	N/A
8	M8-M10
9	M8
10	M6
11	M4-M2

10.3.2 Largo de Muros según nomenclatura utilizada

Tipo de Muro	Largo
M1	4,3
M2	1,78
M3	4
M4	1,6
M5	2,1
M6	1,6
M7	5,6
M8	4
M9	1,35

M10	2,2
M11	3
M12	3
M13	9,6

10.3.3 Esfuerzos de muros y factores de rigidez

EJE A	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO	f12	f11, f22	fpeso
M1	4,3	3,9	28,3	HD19_4 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10	0,009765	0,254158	0,465422
M9	1,35	0,7	2,8	HD19_4 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10	0,006669	0,509711	0,711118
EJE B	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO	f12	f11, f22	fpeso
M5	2,1	1,3	6,3	HD19_4 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10	0,008096	0,385496	0,591694
EJE C	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO	f12	f11, f22	fpeso
M12	3	2,06	11,8	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10	0,007842	0,310324	0,519421
EJE D	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO	f12	f11, f22	fpeso
M5	2,1	1,3	4,6	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10	0,006738	0,385496	0,591694
EJE E	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO	f12	f11, f22	fpeso
M11	3	1,9	6,4	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10	0,007842	0,310324	0,519421
EJE F	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO	f12	f11, f22	fpeso
M7	5,6	4,4	35,6	HD19_4 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10	0,010201	0,224069	0,436493
EJE G	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO	f12	f11, f22	fpeso
M7	5,6	4,5	35,3	HD19_4 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10	0,010201	0,224069	0,436493
EJE H	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO	f12	f11, f22	fpeso
M11	3	1,9	6,4	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10	0,007842	0,310324	0,519421
EJE I	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO	f12	f11, f22	fpeso
M5	2,1	1,32	4,7	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10	0,006738	0,385496	0,591694
EJE J	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO	f12	f11, f22	fpeso
M12	3	2,12	11,83	HD19_4 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10	0,009023	0,310324	0,519421
EJE K	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO	f12	f11, f22	fpeso
M5	2,1	1,32	6,43	HD19_4 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10	0,008096	0,385496	0,591694
EJE L	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO	f12	f11, f22	fpeso
M1	4,3	4,05	29,84	DOBLE ANCLAJE HD19_4 CLAVOS CADA 10	0,010781	0,254158	0,465422
M9	1,35	0,73	2,56	HD19_4 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10	0,006669	0,509711	0,711118

EJE 1	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO
M4	1,6	0,6	3,02	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10
EJE 2	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO
M6	1,6	0,52	2,27	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10
EJE 3	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO
M8	4	2,26	12,7	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10

EJE 4	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO
M8	4	2,3	13,9	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10
M10	2,2	0,92	4,09	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10
EJE 6	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO
M13	9,6	12,6	65,7	DOBLE ANCLAJE HD12_3 CLAVOS CADA 5
EJE 8	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO
M8	4	2,3	12,2	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10
M10	2,2	0,94	4,3	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10
EJE 9	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO
M8	4	2,4	12	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10
EJE 10	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO
M6	1,6	0,6	2,54	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10
EJE 11	MEDIDA	CORTE	MOMENTO	DISEÑO NUEVO
M4	1,6	0,63	2,5	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10
M2	1,78	0,75	2,5	HD12_3 ANCLAJE SIMPLE CLAVOS CADA 10

10.4 Consideraciones para cubicación edificio de hormigón armado

10.4.1 Pesos nominales para cubicación de enfierradura

Diámetro (mm)	Peso (kg/m)
φ6	0.222
φ8	0.391
φ10	0.617
φ12	0.879
φ16	1,563
φ18	1,978
φ20	2,441

Tabla 1.

10.4.2 Consideración NCh 353 Of 2018 para cubicación de enfierradura

La NCh 353 dice:

6.2.4 Los elementos adicionales que se indican a continuación se deben tomar en cuenta con un 5% de aumento del peso nominal medido de las armaduras, y corresponde al detalle siguiente:

- 4% para el conjunto de trabas entre mallas, patas para armaduras de losas, guías, elementos de posición y despuntes.
- 1% para las mayores dimensiones en diámetro y/o longitud de las barras respecto de las nominales consideradas en la mensura.

10.4.3 Consideración ACI 3182-14 para cubicación de columnas de hormigón

292

REQUISITOS DE REGLAMENTO PARA CONCRETO ESTRUCTURAL (ACI 318S-14) Y COMENTARIO (ACI 318SR-14)

REGLAMENTO

(b) El ancho b_w debe ser al menos igual al menor de **0.3 h** y **250 mm**.

(c) La proyección del ancho de la viga más allá del ancho de la columna soportante a cada lado no debe exceder el menor de e_2 y $0.75c_1$.

COMENTARIO

comportamiento de miembros relativamente esbeltos. Las reglas de diseño derivadas de la experiencia con miembros relativamente esbeltos no son directamente aplicables a miembros con relaciones luz-altura menores que cuatro, especialmente con respecto a la resistencia al cortante.

Las restricciones geométricas indicadas en 18.6.2.1(b) y (c) se derivaron de la práctica e investigación (ACI 352R-02) con pórticos de concreto reforzado resistentes a fuerzas inducidas por sismo. Los límites en 18.6.2.1(c) definen el ancho máximo de la viga que puede transferir efectivamente las fuerzas al nudo viga-columna. La figura R18.6.2 muestra un ejemplo del ancho efectivo máximo de una viga.

18.7 — Columnas de pórticos especiales resistentes a momento
18.7.1 Alcance

18.7.1.1 Esta sección aplica a columnas de pórticos especiales resistentes a momento que forman parte del sistema de resistencia ante fuerza sísmica y que se diseñan principalmente para resistir flexión, cortante y fuerzas axiales.

18.7.2 Límites dimensionales

18.7.2.1 Las columnas deben cumplir con (a) y (b):

(a) La dimensión menor de la sección transversal, medida en una línea recta que pasa a través del centroide geométrico, debe ser al menos 300 mm.

(b) La relación entre la dimensión menor de la sección transversal y la dimensión perpendicular debe ser al menos 0.4.

18.7.3 Resistencia mínima a flexión de columnas

18.7.3.1 Las columnas deben satisfacer 18.7.3.2 ó 18.7.3.3.

18.7.3.2 Las resistencias a flexión de las columnas deben cumplir con

$$\Sigma M_{nc} \geq (6/5)\Sigma M_{nb} \quad (18.7.3.2)$$

donde

R18.7 — Columnas en pórticos especiales resistentes a momento

R18.7.1 Alcance Esta sección se refiere a columnas de pórticos especiales resistentes a momentos independientemente de la magnitud de la fuerza axial. Con anterioridad a 2014 el Reglamento permitía que las columnas con bajos niveles de esfuerzo axial fueran detalladas como vigas.

R18.7.2 Límites dimensionales Las limitaciones geométricas de estos requisitos se derivan de la práctica anterior (Seismology Committee of SEAOC 1996).

R18.7.3 Resistencia mínima a flexión de columnas — El propósito de 18.7.3.2 es reducir la posibilidad de fluencia de las columnas que forman parte del sistema de resistencia ante fuerzas sísmicas. Si las columnas no son más resistentes que las vigas que llegan a un nudo, existe una mayor posibilidad de acción inelástica en ellas. En el peor caso de columnas débiles se puede producir fluencia por flexión en ambos extremos de todas las columnas en un piso dado ocasionando un mecanismo de falla de columnas que puede conducir al colapso.

10.5 Cubicación edificio de hormigón armado y edificio de madera

10.5.1 hormigón

MUROS hormigón						
TIPO DE MURO	CANTIDAD P.LADO	X AMBOS LADOS	LARGO (m)	ESPESOR (m)	ALTURA (m)	Volumen m ³
MA	2	2	4,3	0,2	2,5	8,6
MB	2	2	5,4	0,2	2,5	10,8
MC	2	2	5,6	0,2	2,5	11,2
MD	4	2	2,1	0,1	2,5	4,2
ME	2	2	1,6	0,1	2,5	1,6
MF	2	2	4	0,05	2,5	2
MG	2	2	1,7	0,2	2,5	3,4
MH	2	2	2,3	0,1	2,5	2,3
MI	2	2	1,7	0,1	2,5	1,7

MJ	2	2	2,2	0,1	2,5	2,2
MK	2	2	1,5	0,1	2,5	1,5
ML	2	2	1,2	0,2	2,5	2,4
MM	1	2	9,78	0,2	2,5	9,78

ZAPATAS CORRIDAS (FUNDACIONES)							
TIPO	HORIZON (LARGO)	VERTICAL (LARGO)	ANCHO	CANTIDAD POR LADO	X AMBOS LADOS	ESPESOR	VOLUMEN
CORRIDAS H25	19,56	0	0,3	1	2	0,3	3,5208
CORRIDAS H25	0	26,8	0,3	1	2	0,3	4,824
VIGAS DE FUNDACION HORIZ	9,78	0	0,3	5	2	0,3	8,802
VIGAS DE FUNDACION VERT	0	3,2	0,3	6	2	0,3	3,456

COLUMNAS						
TIPO	LARGO	ANCHO	ALTO	CANTIDAD X LADO	X AMBOS LADOS	VOLUMEN
COLUMNAS 30X30 CM	0,3	0,3	2,5	40	2	18

LOSA						
TIPO	LARGO	ANCHO	POR LADO	POR PISO	ESPESOR	VOLUMEN
HORMIGON H25	13,4	9,78	2	4	0,3	78,6

10.5.2 Enfierradura

TIPO DE MURO	CANTIDAD	LADOS	Tipo de fierro	separación	L.util (Lu)	L.cubrir (Lc)	Cantidad	MI
MA	2	2						
Doble Malla Vertical			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,5	4,3	23	115

Doble Malla Horizontal			Ø12 cada 20 cm	0,2	4,3	2,5	14	120,4
MB	2	2						
Doble Malla Vertical			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,5	5,4	28	140
Doble Malla Horizontal			Ø12 cada 20 cm	0,2	5,4	2,5	14	151,2
MC	2	2						
Doble Malla Vertical			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,5	5,6	29	145
Doble Malla Horizontal			Ø12 cada 20 cm	0,2	5,6	2,5	14	156,8
MD	4	2						
Doble Malla Vertical			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,5	2,1	12	60
Doble Malla Horizontal			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,1	2,5	14	58,8
ME	2	2						
Doble Malla Vertical			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,5	1,6	9	45
Doble Malla Horizontal			Ø12 cada 20 cm	0,2	1,6	2,5	14	44,8
MF	2	2						
Doble Malla Vertical			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,5	4	21	105
Doble Malla Horizontal			Ø12 cada 20 cm	0,2	4	2,5	14	112
MG	2	2						
Doble Malla Vertical			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,5	1,7	10	50
Doble Malla Horizontal			Ø12 cada 20 cm	0,2	1,7	2,5	14	47,6
MH	2	2						
Doble Malla Vertical			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,5	2,3	13	65
Doble Malla Horizontal			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,3	2,5	14	64,4
MI	2	2						
Doble Malla Vertical			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,5	1,7	10	50
Doble Malla Horizontal			Ø12 cada 20 cm	0,2	1,7	2,5	14	47,6
MJ	2	2						

Doble Malla Vertical			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,5	2,2	12	60
Doble Malla Horizontal			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,2	2,5	14	61,6
MK	2	2						
Doble Malla Vertical			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,5	1,5	9	45
Doble Malla Horizontal			Ø12 cada 20 cm	0,2	1,5	2,5	14	42
ML	2	2						
Doble Malla Vertical			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,5	1,2	7	35
Doble Malla Horizontal			Ø12 cada 20 cm	0,2	1,2	2,5	14	33,6
MM	1	2						
Doble Malla Vertical			Ø12 cada 20 cm	0,2	2,5	9,78	50	250
Doble Malla Horizontal			Ø12 cada 20 cm	0,2	9,78	2,5	14	273,8

COLUMNAS						
TIPO	T.FIERRO	L.UTIL	CANTIDAD X PILAR	C.Pilares	X AMBOS LADOS	MI m
COLUMNAS 30X30 CM	4Ø16	2,5	4	40	2	800

ESTRIBOS DE COLUMNAS						
TIPO	T.FIERRO	separación	L.util (Lu) m	L.cubrir (Lc) m	Cantidad (Fe)	MI m
E.C1	eØ8 cada 20 cm	0,2	1,2	2,5	14	1344

E. LOSAS							
orientación Fierro	T.FIERRO	separación	L.util (Lu) m	L.cubrir (Lc) m	Cantidad (Fe)	X Ambos lados (Fe)	MI m
Vertical	Ø12 cada 20 cm	0,2	13,4	9,78	50	100	2680
Horizontal	Ø12 cada 20 cm	0,2	9,78	13,4	68	136	2660,16

ESTRIBOS DE LOSAS						
TIPO	T.FIERRO	separación	L.util (Lu) m	L.cubrir (Lc) m	Cantidad (Fe)	MI m
VERTICAL	Ø8 cada 20 cm	0,2	19,86	13,4	68	2700,96
HORIZONTAL	Ø8 cada 20 cm	0,2	19,86	9,78	50	1986

ZAPATAS CORRIDAS (FUNDACIONES)						
TIPO	T.FIERRO	L.UTIL	CANTIDAD POR VIGA	CANTIDAD POR LADO	X AMBOS LADOS	MI m
CORRIDAS H25	4Ø16	19,56	4	1	2	156,48
CORRIDAS H25	4Ø16	26,8	4	1	2	214,4
VIGAS F . HORIZONTAL	4Ø16	9,78	4	5	2	391,2
VIGAS F . VERTICAL	4Ø16	3,2	4	6	2	153,6

ESTRIBOS DE VIGAS FUNDA							
TIPO	T.FIERRO	separación	L.util (Lu) m	L.cubrir (Lc) m	Cantidad (Fe)	X AMBOS LADOS	MI m
CORRID HORIZONTAL	eØ8 cada 20 cm	0,2	1,2	19,56	99	2	237,6
CORRID VERTICAL	eØ8 cada 20 cm	0,2	1,2	26,8	135	2	324
VIGAS F . HORIZONTAL	eØ8 cada 20 cm	0,2	1,2	9,78	50	2	600

VIGAS F . VERTICAL	eØ8 cada 20 cm	0,2	1,2	3,2	17	2	244,8
-----------------------	-------------------	-----	-----	-----	----	---	-------

TIPO DE ANTEPECHO-DINTEL	CANTIDAD P.LADO	LADOS	LARGO (m)	ESPESOR (m)	ALTURA (m)	Volumen m3
T1	4	2	2,7	0,2	1,67	7,2
T2	12	2	0,8	0,2	1,67	6,4

10.5.3 Madera

MUROS P.Derechos Internos								
TIPO DE MURO	CANTIDAD P.LADO	LADOS	Tipo de Madera	separación	L.util (Lu)	L.cubrir (Lc)	Cantidad (P.derechos)	MI
M1	2	2	P. Radiata C24 2x6	0,3	2,5	4,3	14	143,33
M2	1	2	P. Radiata C24 2x6	0,3	2,5	1,78	6	29,67
M3	2	2	P. Radiata C24 2x6	0,3	2,5	4	13	133,33
M4	4	2	P. Radiata C24 2x6	0,3	2,5	1,6	5	106,67
M5	4	2	P. Radiata C24 2x6	0,3	2,5	2,1	7	140,00
M6	2	2	P. Radiata C24 2x6	0,3	2,5	1,6	5	53,33
M7	2	2	P. Radiata C24 2x6	0,3	2,5	5,6	19	186,67
M8	2	2	P. Radiata C24 2x6	0,3	2,5	4	13	133,33
M9	2	2	P. Radiata C24 2x6	0,3	2,5	1,35	5	45,00
M10	2	2	P. Radiata C24 2x6	0,3	2,5	2,2	7	73,33
M11	1	2	P. Radiata C24 2x6	0,3	2,5	3	10	50,00
M12	1	2	P. Radiata C24 2x6	0,3	2,5	3	10	50,00
M13	1	2	P. Radiata C24 2x6	0,3	2,5	9,6	32	160,00

MUROS P.Derechos De Borde						
TIPO DE MURO	CANTIDAD P.LADO	LADOS	Tipo de Madera	Cantidad P.D BORDE	LARGO P.D BORDE	TOTAL, ML X PISO
M1	2	2	P. Radiata C24 2x6	6	2,5	60
M2	1	2	P. Radiata C24 2x6	6	2,5	30
M3	2	2	P. Radiata C24 2x6	6	2,5	60
M4	4	2	P. Radiata C24 2x6	6	2,5	120
M5	4	2	P. Radiata C24 2x6	6	2,5	120
M6	2	2	P. Radiata C24 2x6	6	2,5	60
M7	2	2	P. Radiata C24 2x6	6	2,5	60
M8	2	2	P. Radiata C24 2x6	6	2,5	60
M9	2	2	P. Radiata C24 2x6	6	2,5	60
M10	2	2	P. Radiata C24 2x6	6	2,5	60
M11	1	2	P. Radiata C24 2x6	6	2,5	30
M12	1	2	P. Radiata C24 2x6	6	2,5	30
M13	1	2	P. Radiata C24 2x6	6	2,5	30

MUROS SOLERAS						
TIPO DE MURO	CANTIDAD P.LADO	LADOS	Tipo de Madera	Cantidad de soleras	LARGO SOLERAS	TOTAL, ML X PISO
M1	2	2	P. Radiata C24 2x6	4	4,3	68,8
M2	1	2	P. Radiata C24 2x6	4	1,78	14,24
M3	2	2	P. Radiata C24 2x6	4	4	64

M4	4	2	P. Radiata C24 2x6	4	1,6	51,2
M5	4	2	P. Radiata C24 2x6	4	2,1	67,2
M6	2	2	P. Radiata C24 2x6	4	1,6	25,6
M7	2	2	P. Radiata C24 2x6	4	5,6	89,6
M8	2	2	P. Radiata C24 2x6	4	4	64
M9	2	2	P. Radiata C24 2x6	4	1,35	21,6
M10	2	2	P. Radiata C24 2x6	4	2,2	35,2
M11	1	2	P. Radiata C24 2x6	4	3	24
M12	1	2	P. Radiata C24 2x6	4	3	24
M13	1	2	P. Radiata C24 2x6	4	9,6	76,8

MUROS PANELES							
TIPO DE MURO	CANTIDAD P.LADO	LADOS	Tipo de Madera	Cantidad	Largo	Ancho	TOTAL, X PISO ml
M1	2	2	OSB 11,1 mm	2	2,5	4,3	28,89
M2	1	2	OSB 11,1 mm	2	2,5	1,78	5,98
M3	2	2	OSB 11,1 mm	2	2,5	4	26,87
M4	4	2	OSB 11,1 mm	2	2,5	1,6	21,50
M5	4	2	OSB 11,1 mm	2	2,5	2,1	28,22
M6	2	2	OSB 11,1 mm	2	2,5	1,6	10,75
M7	2	2	OSB 11,1 mm	2	2,5	5,6	37,62
M8	2	2	OSB 11,1 mm	2	2,5	4	26,87
M9	2	2	OSB 11,1 mm	2	2,5	1,35	9,07
M10	2	2	OSB 11,1 mm	2	2,5	2,2	14,78

M11	1	2	OSB 11,1 mm	2	2,5	3	10,08
M12	1	2	OSB 11,1 mm	2	2,5	3	10,08
M13	1	2	OSB 11,1 mm	2	2,5	9,6	32,25

VIGAS							
TIPO	LADOS	LUZ	Tipo de madera	Espaciamiento	CANTIDAD	LARGO	TOTAL, ML
VIGAS A-F (VERTICAL)	2	9,78	P. Radiata C24 2x8	0,4	25	13,4	670

TIPO	X AMBOS LADOS	CANTIDAD	LARGO	Tipo de madera	TOTAL, ML
VIGAS D-F (HORIZONTAL)	2	5	3,15	P. Radiata C24 2x8	31,5
VIGAS E-F (HORIZONTAL)	2	4	1,69	P. Radiata C24 2x8	13,52
VIGAS B-C (HORIZONTAL)	2	7	0,87	P. Radiata C24 2x8	12,18