

3.7 Modelo de sistema de un edificio de marcos contraventeados de Madera Masiva

A continuación se explica la metodología empleada para realizar el modelo del sistema de un edificio de marcos contraventeados de madera masiva, se describen los resultados obtenidos y se hace una interpretación de los hallazgos aprovechables.

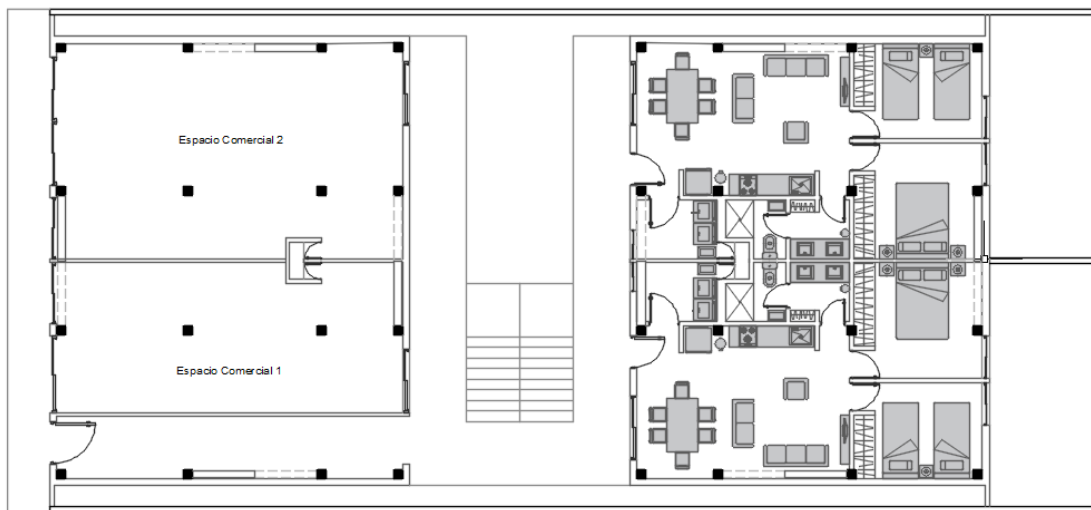
3.7.1 Metodología

Se diseñó un proyecto arquitectónico de un edificio de apartamentos tipo para el municipio de Zapopan, de 4 niveles con un total de 8 unidades. La tipología del edificio se diseñó a partir de las experiencias del trabajo realizado por Arana et. al (2017), donde se recomienda que las circulaciones de los departamentos sean abiertas en forma de pasillos viendo hacia un patio central, ya que esto brinda la sensación de salir directamente al espacio público, y reduce la percepción de inseguridad para los habitantes del conjunto de departamentos. La distribución consiste en una planta baja comercial para el edificio que da al frente de la calle y departamentos en el resto de los niveles. Se evitó proponer estacionamientos para incentivar el uso del transporte público. La configuración de plantas libres facilita que se puedan proponer varios tipos de viviendas en el mismo espacio, ofreciendo alternativas para los diferentes tipos de configuración familiar.

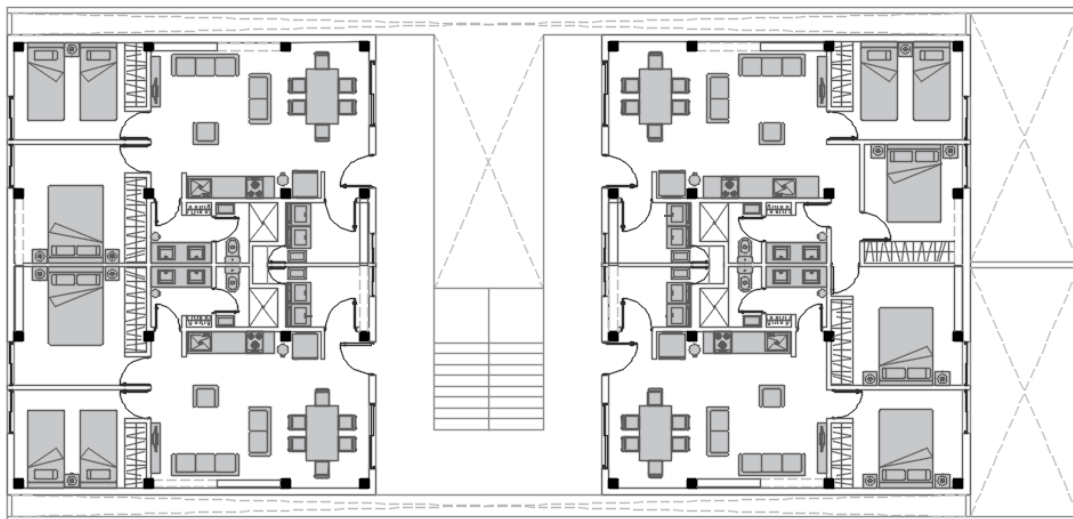
Para poder construir esta tipología es necesario utilizar un sistema constructivo de marcos. No es adecuado usar muros de carga porque estos ya no se pueden modificar en el transcurso de la vida útil del edificio sin causarle posibles daños. Se descartó el uso de marcos en planta baja y muros de carga en los pisos superiores, debido que esta configuración que se conoce como piso débil es propensa a sufrir daños y posibles colapsos durante sismos de gran intensidad.

Después de evaluar mediante el uso de imágenes aéreas las zonas urbanas del municipio de Zapopan que se encuentran alrededor de la nueva línea tres del tren ligero, y las principales vialidades que conectan a la ciudad, se observó que la tipología de terreno más abundante y que es susceptible de densificación son los terrenos alargados. Por esta razón el proyecto arquitectónico tipo se desarrolló pensando en un terreno de estas características.

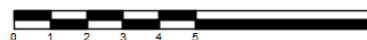
Para el proyecto se consideró un terreno tipo de 14.22 m de frente y 29.76 m de fondo, en el cual se colocaron dos bloques de departamentos separados por un patio central rodeado de las circulaciones. Con esta configuración un edificio tiene vista a la calle y al patio central, y el segundo al patio central y a un patio trasero. En la Figura 1 se muestran las plantas del proyecto arquitectónico.

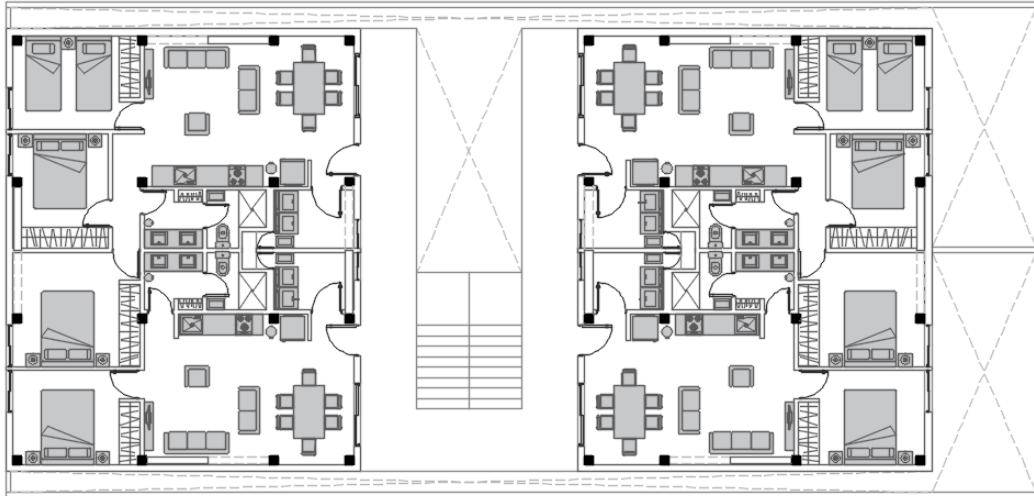


Planta Baja

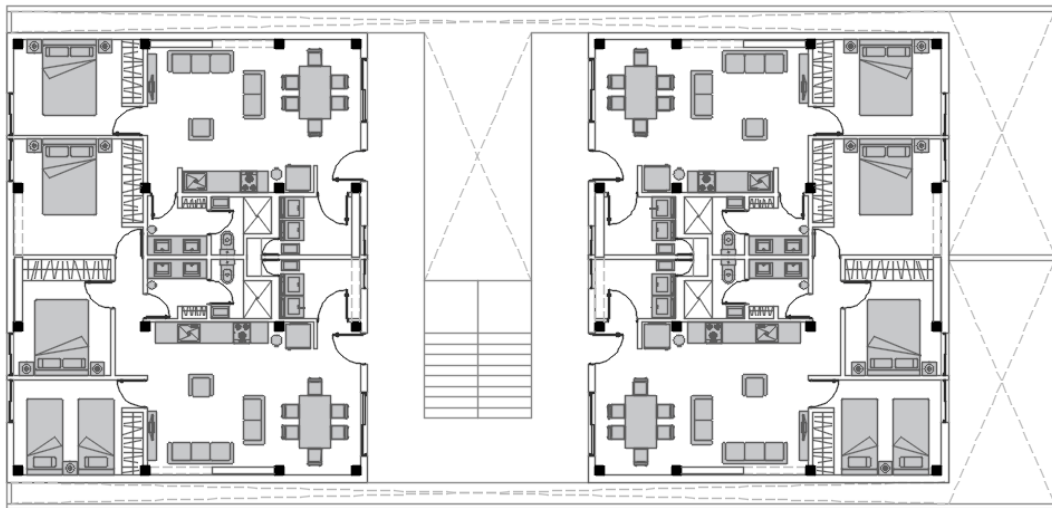


Primer Piso





Segundo Piso



Tercer Piso



Figura 1. Plantas tipo del proyecto arquitectónico (Elaboración propia).

Se diseñó estructuralmente solamente uno de los edificios ya que prácticamente son iguales y solo se encuentran espejados. Para diseñar la geometría de la estructura se siguieron las recomendaciones de Bazán & Meli (2002) para el diseño por sismo. Cada fachada se estructuró con tres marcos y los contravientos se diseñaron como diagonales en fachada, ubicadas en el marco central de cada fachada.

Para hacer el cálculo del diseño estructural se empleó el software computacional de origen alemán RFEM de Dlubal. Este software de elementos finitos se eligió porque es el único en el mercado que permite el cálculo de estructuras de madera masiva de acuerdo a la normativa estadounidense NDS (2015), la cual como se explicó en el capítulo 1.3.2 de este trabajo, es considerada como las normas técnicas para construcción con madera en el reglamento de construcción de Zapopan.

La filosofía de diseño empleada para el edificio de madera masiva fue la ASD, debido a que esta permite calcular la resistencia al fuego y la LRFD no lo hace. Dentro del software se configuraron los materiales de madera con los resultados obtenidos en el punto 3.3 de este trabajo.

Para lograr que el centro de rigidez y el centro de masas coincidieran se creció la sección de los contravientos ubicados hacia las circulaciones exteriores que son pasillos en voladizos, moviendo la rigidez hacia el centro de la masa. En la Figura 2 se puede apreciar cómo se verificó mediante el software que ambos centros coincidieran en el mismo punto.

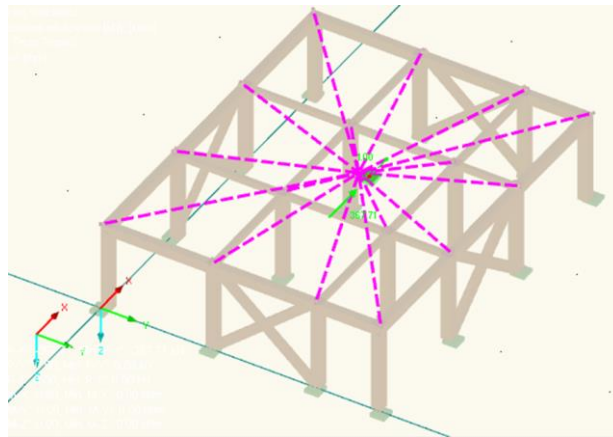


Figura 2. Centro de Masas y Centro de Rigidez (Elaboración Propia).

Se consideraron las cargas muertas debido al peso propio, muros fachada, pisos, y un techo verde en la azotea. Las cargas vivas fueron las de sobreuso y sobreuso de cubierta que marca el reglamento de construcción Zapopan. El diseño por viento se realizó de acuerdo a la normatividad de CFE 2007 en la forma que lo permite el reglamento de construcción de Zapopan.

Para el diseño por sismo se realizó un análisis dinámico modal en el cual se utilizó el espectro de diseño del manual de CFE 1993, el cual es más conservador que el propuesto por el reglamento de construcción de Zapopan. Se obtuvieron un total de 5 modos de vibración natural en “x” y “y”, con los cuales se sumó una participación de más del 95% de la masa del edificio. Como la dirección z no se tomó en cuenta, se aplicó una carga vertical en los elementos en voladizo para simular los efectos verticales del sismo de acuerdo al reglamento de construcción de Zapopan. Una vez obtenidos los modos de vibración natural de la estructura, se utilizó una función del software que permite convertir estos modos de vibración natural en cargas equivalentes ubicadas en cada nodo de la estructura.

Una vez completadas las cargas se procedió a elaborar las combinaciones de las mismas de acuerdo las indicaciones del estándar ASCE/SEI 7 (2010) para la filosofía ASD, las cuales también cumplen con lo dispuesto en el reglamento de construcción de Zapopan.

Con las combinaciones de cargas completadas, y todas las cargas aplicadas en el modelo, se utilizó la función del software para optimizar las secciones en incrementos compatibles con los espesores y anchos en que se producirían normalmente los elementos estructurales de madera masiva. En la Figura 3 se pueden apreciar un ejemplo de combinaciones de carga aplicadas a cada una de las estructuras de acero y madera.

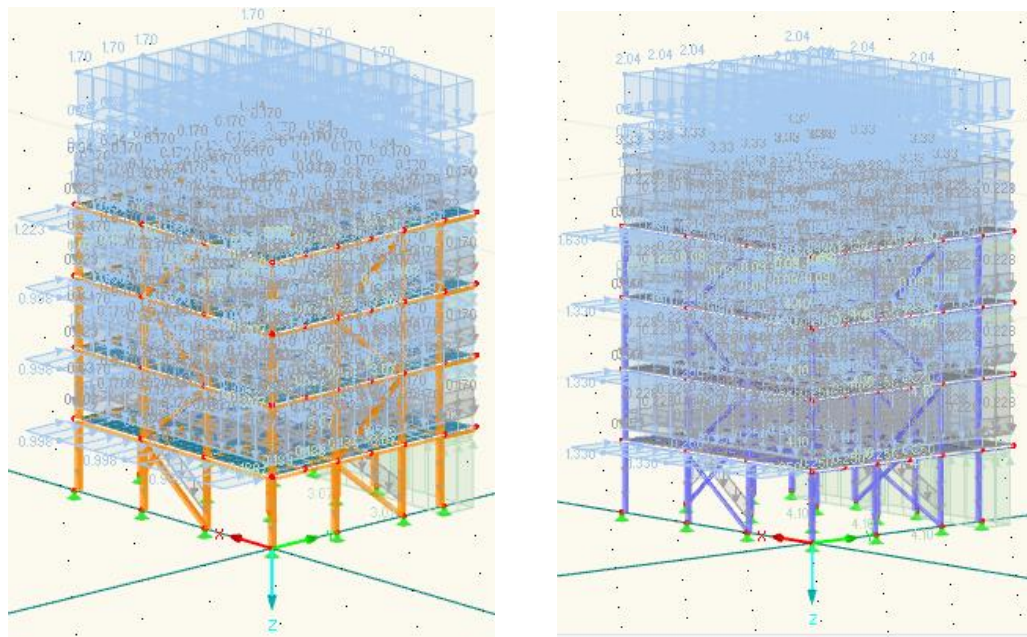


Figura 3. Combinaciones de carga (Elaboración Propia).

Una vez optimizadas las secciones se cuantificó la volumetría de las mismas y se hizo un presupuesto de la estructura utilizando los precios unitarios obtenidos en el punto 3.6 de este trabajo. También se hizo una estimación del potencial de captura de carbono que tendría la construcción de este edificio considerando la información sobre el potencial de captura de carbono de la investigación de Ordóñez et. al (2001). Para ello se cuantificó a cuanta madera en rollo corresponde el volumen de madera masiva del edificio y con ese dato se estimó el potencial de captura de carbono.

El mismo proceso se repitió para diseñar un edificio de acero con el mismo proyecto arquitectónico y las mismas cargas, excepto las del peso propio. Los precios unitarios se obtuvieron de CYPE (2018) y se actualizaron los precios mediante cotizaciones telefónicas. Posteriormente se compararon los presupuestos y pesos de cada una de las estructuras.

3.7.2 Descripción de Resultados

El proyecto arquitectónico resultante brinda la posibilidad de contar con tres tipologías de departamentos, de una, dos y tres recámaras. Así como un par de locales comerciales en planta baja en el edificio que da a la calle. Los departamentos de una recámara son de 38.96 m², los de dos recámaras son de 64.71 m² y los de tres recámaras son de 90.46 m². Cada tipología cuenta con un espacio abierto común que contiene la sala, el comedor y la cocina. También cuentan con baño propio y cuarto de servicio. Las instalaciones hidráulicas y sanitarias se concentran al centro del edificio compartiendo el mismo ducto de instalaciones.

El diseño estructural del edificio de madera indica que las columnas necesitan una sección de 250 x 256 mm, las vigas principales son de 175 x 192 mm, las vigas secundarias son de 150 x 160 mm, los contravientos ubicados junto al pasillo voladizo son de 224 x 258 mm, y los otros contravientos son de 200 x 192 mm. Las losas de entrepiso son de 125 mm y las losas de azotea son de 150 mm. Para las columnas se consideró que las cuatro caras estaban expuestas al fuego. El diseño por fuego se consideró de acuerdo a las caras de los elementos que quedarían aparentes. Para las vigas solo se consideraron las caras laterales y

la inferior como expuestas al fuego, y para las losas solo se consideró la capa inferior como expuesta al fuego

Las secciones del edificio de acero resultaron más pequeñas que las de madera, sin embargo el peso total de la estructura fue más alto, debido a que en este caso se utilizaron losas de concreto reforzado de 125 mm. En las Tablas 1 se presenta una comparación de las secciones para las estructuras de madera masiva y acero.

Secciones	Secciones
1: M-Rectángulo 250/256; Clase Alta (Pinus spp.) Laminada	1: OR 203x6.4 IMCA; Acero B-254 (ASTM A36)
2: M-Rectángulo 175/192; Clase Baja (Pinus spp.) Laminada	2: IR 102x19.4 IMCA; Acero B-254 (ASTM A36)
3: M-Rectángulo 175/192; Clase Baja (Pinus spp.) Laminada	3: IR 152x24.0 IMCA; Acero B-254 (ASTM A36)
4: M-Rectángulo 200/192; Clase Alta (Pinus spp.) Laminada	4: IR 152x18.0 IMCA; Acero B-254 (ASTM A36)
5: M-Rectángulo 224/258; Clase Alta (Pinus spp.) Laminada	5: IR 152x24.0 IMCA; Acero B-254 (ASTM A36)
6: M-Rectángulo 150/160; Clase Baja (Pinus spp.) Laminada	6: IR 152x13.6 IMCA; Acero B-254 (ASTM A36)
7: M-Rectángulo 250/256; Clase Baja (Pinus spp.) Laminada	7: OR 203x4.8 IMCA; Acero B-254 (ASTM A36)

Tabla 1. Comparación de secciones estructurales de madera y acero (Elaboración propia).

En los Gráficos 1 al 5 se pueden observar los porcentajes de esfuerzo para cada caso de carga de ambas estructuras.

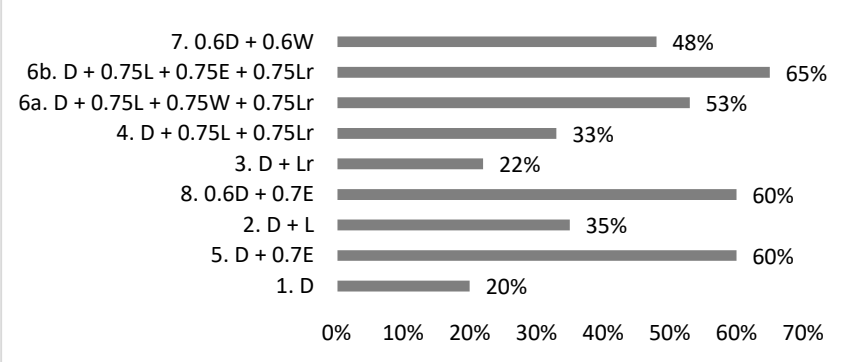


Gráfico 1. Resultados para la resistencia al fuego de la estructura de madera masiva (Elaboración propia).

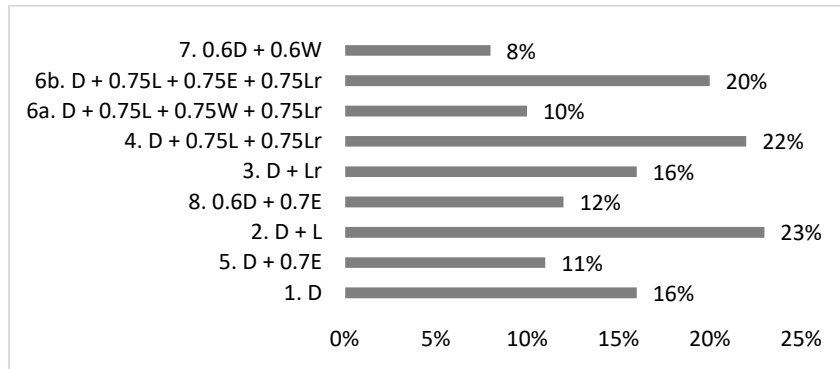


Gráfico 2. Resultados para el estado límite último de la estructura de madera masiva (Elaboración propia).

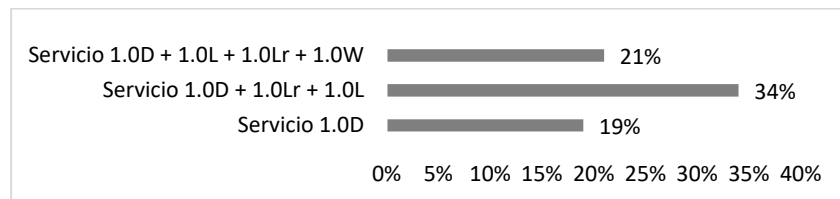


Gráfico 3. Resultados para el estado límite de servicio de la estructura de madera masiva (Elaboración propia).

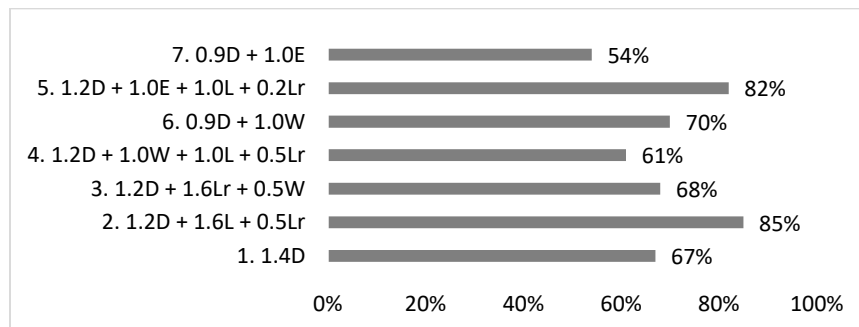


Gráfico 4. Resultados para el estado límite último de la estructura de acero (Elaboración propia).

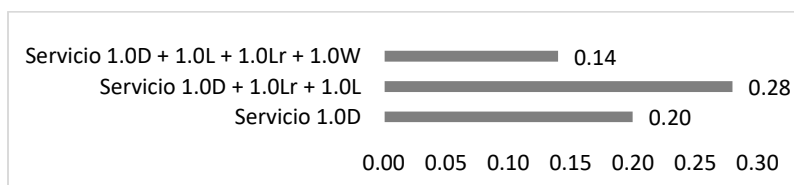


Gráfico 5. Resultados para el estado límite de servicio de la estructura de acero (Elaboración propia).

Como se puede apreciar en los gráficos anteriores, la estructura de madera masiva presenta los porcentajes de esfuerzo más altos en los casos de carga de resistencia al fuego y no en el estado límite último como el acero. Además, los desplazamientos observados para el estado límite último son ligeramente mayores en la estructura de madera en comparación con la estructura de acero. Ambas estructuras presentan desplazamientos similares para cada caso de carga equivalente, sin embargo, el edificio de acero presento los esfuerzos más demandantes para el caso de carga LRFD número 2, el cual incluye solamente peso propio y cargas vivas, mientras que los esfuerzos más demandantes de la estructura de madera de masiva estuvieron en el caso de carga ASD número 6b, el cual incluye el peso propio, las cargas vivas y las cargas sísmicas. En la Figura 4 se muestran los resultados de desplazamientos para el caso de carga que involucra las fuerzas sísmicas en cada estructura, a la izquierda el caso 6b de la resistencia al fuego de la estructura de madera masiva y a la derecha el caso 5 del estado límite último de la estructura de acero.

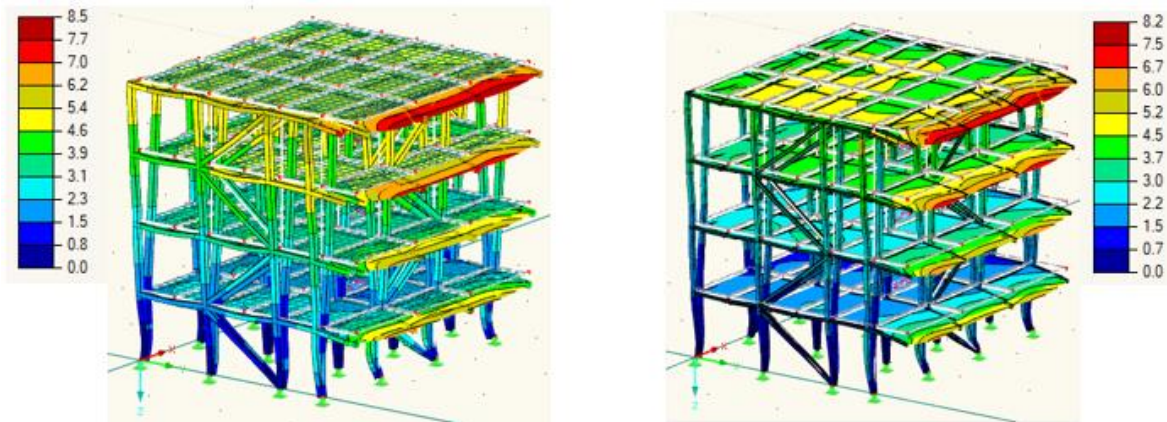


Figura 4. Resultados de desplazamientos para el caso de carga que involucra las fuerzas sísmicas (Elaboración propia).

El presupuesto de la estructura de madera masiva se obtuvo utilizando los precios unitarios generados en el punto 3.6 de esta trabajó, y resultó en \$1,491,967.31 m.n. En la Tabla 20 se puede apreciar la cuantificación de los volúmenes de madera del edificio, así como el cálculo del presupuesto de la estructura y su potencial de captura de carbono explicado en la metodología de este capítulo.

Concepto	Área (m ²)	Volumen (m ³)	Peso (Ton)	Costo directo (m.n.)	Subtotal (m.n.)	Emisiones GEI (ton CO ² eq/m ³)	Captura GEI (ton CO ² eq)
Planta Baja – Columnas	66.55	4.03	2.580	\$ 13,998.74	\$ 56,414.91	-2.00	-8.05
Planta Baja – Vigas	85.43	3.77	1.960	\$ 13,998.74	\$ 52,775.24	-2.00	-7.53
Planta Baja – Losas NLT	284.49	18.34	9.855	\$ 10,797.58	\$ 198,038.42	-2.00	-36.63
Primer Piso – Columnas	66.53	4.02	2.179	\$ 13,998.74	\$ 56,274.93	-2.00	-8.03
Primer Piso – Vigas	85.43	3.77	1.96	\$ 13,998.74	\$ 52,775.24	-2.00	-7.53
Primer Piso – Losas NLT	284.49	18.34	9.855	\$ 10,797.58	\$ 198,038.42	-2.00	-36.63
Segundo Piso – Columnas	66.53	4.02	2.18	\$ 13,998.74	\$ 56,274.93	-2.00	-8.03
Segundo Piso – Vigas	85.43	3.77	1.96	\$ 13,998.74	\$ 52,775.24	-2.00	-7.53
Segundo Piso – Losas NLT	284.49	18.34	9.855	\$ 10,797.58	\$ 198,038.42	-2.00	-36.63
Tercer Piso – Columnas	66.53	4.02	2.18	\$ 13,998.74	\$ 56,274.93	-2.00	-8.03
Tercer Piso – Vigas	85.43	3.77	1.96	\$ 13,998.74	\$ 52,775.24	-2.00	-7.53
Tercer Piso – Losas NLT	285.36	21.40	13.695	\$ 10,797.58	\$ 231,111.41	-2.00	-42.75
Conexiones Columna- Columna	64.00			\$ 1,440.00	\$ 92,160.00		
Conexiones Viga-Columna	192.00			\$ 720.00	\$ 138,240.00		
Total	1746.69	107.60	60.22		\$ 1,491,967.31		- 214.88

Tabla 19. Generadores y costo estimado de la estructura de madera (Elaboración propia)

El precio de la estructura de acero es un 27.82% más económico que la estructura de madera masiva. En este caso la estructura de acero se optimizó hasta los 30.63 kg de acero por m². La estructura de acero es 118.27 toneladas más pesada que la de madera masiva. En las Tablas 21 y 22 se pueden observar los componentes del costo y peso de la estructura de acero.

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Directo (m.n.)	Subtotal (m.n.)
Acero Estructural	17436.00	kg	\$ 29.92	\$ 521,685.12
Losa de 12.5 cm de espesor	569.40	m ²	\$ 975.18	\$ 555,270.70
			Total	\$ 1,076,955.82

Tabla 21. Generadores y costo estimado de la estructura de acero (Elaboración propia).

Descripción	Cantidad	Unidad
Acero Estructural	17.44	ton
Concreto	161.05	ton
Total	178.49	ton

Tabla 22. Peso total de la estructura de acero (Elaboración propia).

3.7.3 Interpretación de Hallazgos

En cuanto al comportamiento estructural podemos inferir que ambos materiales son muy parecidos, y que las diferencias entre el área de las secciones se deben principalmente al sobredimensionamiento de los elementos estructurales de madera masiva para cumplir con la resistencia al fuego.

A pesar de que el costo de la estructura de acero es un 27.82% más económica que la de madera, se puede inferir que el edificio de madera tendría algunos ahorros en su construcción en comparación con el de acero, haciendo que los costos finales no difieran tanto. Por una parte se tendría un ahorro en la cimentación ya que se cuenta con un diferencial de 118.27 toneladas de peso. Además, el costo de los acabados de las columnas, vigas y losas ya está incluido en el costo de la estructura de madera, porque estos elementos serían aparentes.

La diferencia de costos entre ambas estructuras es de \$728.85 m.n. por m². Este monto es probable que se acerque al costo que representaría la cimentación más grande del edificio de acero, y los recubrimientos con tableros de yeso de las columnas de acero y los plafones de las losas de concreto.