

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial
15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de noviembre de 1976.

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano
MAESTRÍA EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES



Construcción con Madera Masiva. Propuesta para construir vivienda vertical sustentable en Zapopan.

Trabajo recepcional que para obtener el grado de
MAESTRO EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES

Presenta: Arq. Christian Hernández Cárdenas

Tutor: Dr. Nayar Cuitláhuac Gutierrez Astudillo

Tlaquepaque, Jalisco, mayo de 2018

Índice

Índice de Figuras, Tablas y Gráficos.....	5
Glosario de Acrónimos.....	10
Agradecimientos.....	12
Resumen.....	13
1. Introducción.....	14
1.1 Problemática y Justificación.....	16
1.2 Demandas Sectoriales.....	23
1.3 Estado del Arte del Sistema Constructivo de Madera Masiva.....	24
1.3.1 Surgimiento y descripción del sistema constructivo de Madera Masiva.....	24
1.3.2 Diseño estructural y reglamentos de construcción.....	28
1.3.3 Diseño para sismo.....	30
1.3.4 Diseño por resistencia al fuego.....	32
1.3.5 Diseño para durabilidad.....	34
1.3.6 Ejemplos construidos.....	37
1.3.8 Estudios previos sobre madera masiva en América Latina.....	46
1.4 Hipótesis.....	48
1.5 Objetivos.....	48
2. Metodología.....	49
2.1 Cuadro de operacionalización de variables.....	50
3. Viabilidad estructural del sistema constructivo de madera masiva con madera nacional certificada.....	52
3.1 Clasificación por densidad de Pinus spp. proveniente del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán.....	53
3.1.1 Metodología.....	53
3.1.2 Descripción de Resultados.....	55
3.1.3 Interpretación de Hallazgos.....	55
3.2 Características mecánicas estructurales de la muestra de madera de Pinus spp. proveniente del bosque del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán.....	56

3.2.1 Ensayos de flexión y compresión de acuerdo a la norma ASTM D-143.	56
3.2.1.1 Metodología.....	56
3.2.1.2 Descripción de Resultados.....	57
3.2.1.3 Interpretación de Hallazgos.....	58
3.2.2 Ensayos de compresión para determinar el MOEc con medición independiente del desplazamiento.....	60
3.2.2.1 Metodología.....	60
3.2.2.2 Descripción de Resultados.....	61
3.2.2.3 Interpretación de Hallazgos.....	61
3.2.3 Ensayos de flexión, compresión, tensión y cortante de acuerdo a la norma UNE EN-408.....	62
3.2.3.1 Metodología.....	62
3.2.3.2 Descripción de Resultados.....	65
3.2.3.3 Interpretación de Hallazgos.....	69
3.3 Determinación de los esfuerzos permisibles de diseño estructural para la muestra de madera de Pinus spp. proveniente del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán	70
3.3.1 Metodología.....	70
3.3.2 Descripción de Resultados.....	75
3.3.3 Interpretación de Hallazgos.....	76
3.4 Proceso de fabricación de los elementos estructurales de madera masiva.....	78
3.4.1 Metodología.....	78
3.4.2 Descripción de Resultados.....	82
3.4.3 Interpretación de Hallazgos.....	83
3.5 Validación de los esfuerzos permisibles.....	83
3.5.1 Metodología.....	83
3.5.2 Descripción de Resultados.....	86
3.5.2.1 Resultados del ensayo a compresión de probetas de muros de madera contralaminada.....	86

3.5.2.2 Resultados del ensayo a compresión de columnas de madera laminada encolada.....	87
3.5.2.3 Resultados del ensayo a flexión de una viga de madera laminada encolada.....	89
3.5.2.4 Resultados del ensayo a flexión de una losa de madera contralaminada y una de madera laminada clavada.....	90
3.5.3 Interpretación de Hallazgos.....	93
3.6 Estimación del costo por m ³ de madera masiva colocada en obra.....	93
3.6.1 Metodología.....	93
3.6.2 Descripción de Resultados.....	95
3.6.3 Interpretación de Hallazgos.....	96
3.7 Modelo de sistema de un edificio de marcos contraventeados de Madera Masiva.....	96
3.7.1 Metodología.....	97
3.7.2 Descripción de Resultados.....	99
3.7.3 Interpretación de Hallazgos.....	106
4. Perspectivas cualitativas y subjetivas de los actores sociales, en torno a la construcción de madera	107
4.1 Metodología.....	107
4.2 Descripción de Resultados.....	108
4.3 Interpretación de Hallazgos.....	112
5. Discusión y conclusiones.....	114
6. Fuentes consultadas.....	119
7. Anexos.....	130
7.1 Clasificación por densidades de la muestra de madera.....	131
7.2 Ensayos de compresión de acuerdo a la norma ASTM D-143.....	133
7.3 Ensayos de resistencia a la flexión de acuerdo a la norma ASTM D143.....	136
7.4 Ensayos de compresión para determinar el MOEc con medición independiente del desplazamiento de acuerdo a la norma ASTM D143.....	139
7.5 Ensayos de flexión, compresión, tensión y cortante de acuerdo a la norma EN:408.....	142

7.6 Validación de los esfuerzos permisibles.....	146
7.7 Estimación del costo por m ³ de madera masiva colocada en obra.....	155
7.8 Encuesta sobre la oferta de madera certificada, y la disponibilidad a aceptar el pago por servicios ambientales que beneficien a las comunidades forestales de México.....	161
7.9 Instrumento de la encuesta sobre la oferta de madera certificada, y la disponibilidad a aceptar el pago por servicios ambientales que beneficien a las comunidades forestales de México.....	164
7.10 Encuesta sobre el sistema constructivo de madera masiva y la disponibilidad de los compradores potenciales para pagar por proteger servicios ambientales en las comunidades forestales.....	175
7.11 Instrumento de la encuesta sobre el sistema constructivo de madera masiva y la disponibilidad de los compradores potenciales para pagar por proteger servicios ambientales en las comunidades forestales.....	177

Índice de Figuras, Tablas y Gráficos.

Figura 1. Tipos de paneles de madera masiva. (Mahadevan, 2017).....	27
Figura 2. Ensayo sísmico de un edificio de madera contralaminada en la plataforma E-Defense. (AlaTown, 2015).....	31
Figura 3. Ensayo de muros oscilantes postensados de madera contralaminada (Colorado School of Mines, 2017).....	31
Figura 4. Comportamiento de la resistencia al fuego de una viga. 1) Sección residual; 2) Línea de carbonización calculada; 3) Profundidad calculada de carbonización; 4) Perfil de la sección original; 5) Radio de redondeo. (Binational Softwood Lumber Council, 2017, p.29).....	32
Figura 5. Prueba de resistencia al fuego en un edificio de madera contralaminada (Bland, 2017).....	33
Figura 6. 312 Adelaide Street West, Toronto. (Koo, 2013, p.1).....	35

Figura 7. Apartamento Brick and Beam en renta (Airbnb, 2018).....	35
Figura 8. Estructura del mercado Pike Place Market, Seattle. (Elaboración Propia).....	36
Figura 9. Interior del Auditorio de la Reforma, Puebla (Milenio, 2014).....	36
Figura 10. Exterior del centro del Centro de Tecnología de la Construcción, en Graz. Fuente: (TuGraz, 2016).....	37
Figura 11. Fotografías de la construcción y el interior de Carlisle Lane Flats. (Ryan, Griffin, & Rice, 2015).....	37
Figura 12. Fotografías del edificio Stadhaus en Londres. (KLH, 2009).....	38
Figura 13. Fotografías del edificio Bridport House. (Ryan, Griffin, & Rice, 2015).....	39
Figura 14. Fotografías del edificio Forté. (Lend Lease, 2013).....	39
Figura 15. Fotografías de la escuela primaria Surrey. (STRUCTURE CRAFT, 2013)....	40
Figura 16. Fotografías del Centro para el Diseño e Innovación de la Madera. (Hooper, 2015).....	40
Figura 17. Fotografías de Wenlock Road en Londres. (BINDERHOLZ, 2015).....	41
Figura 18. Edificio Brock Commons. (ACTON OSTRY ARCHITECTS, 2016).....	41
Figura 19. Edificio Minneapolis T3. (MG ARCHITECTS, 2018).....	42
Figura 20. Edificio Albina Yard (LEVER ARCHITECTURE, 2018).....	42
Figura 21. Interior del edificio Albina Yard (Elaboración Propia).....	43
Figura 22. Edificio de apartamentos Carbon 12 (Carbon 12, 2018).....	43
Figura 23. Proyecto Framework, (LEVER ARCHITECTURE, 2017).....	44
Figura 24. Proyecto HAUT (HAUT, 2018).....	44
Figura 25. Proceso de fabricación de paneles de madera contralaminada en Uruguay. (FING, 2015).....	46
Figura 26. Ensayo de flexión en panel de CLT tipo losa en Chile (González et. al, 2015).	47
Figura 27. Primera casa de madera contralaminada en Chile (CORMA, 2015).....	47
Figura 28. Proceso de clasificación por densidad (Elaboración Propia).....	54
Figura 29. Configuración de los ensayos a flexión y compresión según la norma ASTM D-143 (Elaboración propia).....	57
Figura 30. Ensayo adaptado para obtener el MOEc (Elaboración propia).....	60

Figura 31. Ensayos para determinar el MOE y la capacidad de flexión (Elaboración propia).....	63
Figura 32. Probetas y configuración de ensayos a tensión.....	64
Figura 33. Ensayos a compresión paralela a las fibras (Elaboración propia).....	64
Figura 34. Ensayos a cortante (Elaboración propia).....	65
Figura 35. Preparación de las tablillas (Elaboración propia).....	79
Figura 36. Fabricación de muros de madera contralaminada (Elaboración propia).....	80
Figura 37. Fabricación de losas de madera contralaminada (Elaboración propia).....	80
Figura 38. Fabricación de losas de madera laminada clavada (Elaboración propia).....	81
Figura 39. Fabricación de columnas y vigas de madera laminada (Elaboración propia)..	82
Figura 40. Ensayo de compresión de muros de madera contralaminada (Elaboración propia).....	84
Figura 41. Ensayos a compresión de columnas de madera laminada encolada (Elaboración propia).....	84
Figura 42. Configuración del ensayo a flexión de una viga de madera laminada encolada (Elaboración propia).....	85
Figura 43. Configuración del ensayo a flexión de las losas (Elaboración propia).....	86
Figura 44. Aplastamiento de la columna 1 (Elaboración propia).....	88
Figura 45. Modo de falla de la viga de madera laminada encolada (Elaboración propia).....	90
Figura 46. Modo de falla de la losa de madera contralaminada (Elaboración propia).....	91
Figura 47. Modo de falla de la losa de madera laminada clavada (Elaboración propia)...	92
Figura 48. Planta tipo del proyecto arquitectónico (Elaboración propia).....	100
Figura 49. Geometría del modelo de elementos finitos (Elaboración propia).....	104
Tabla 1. Cuadro de operacionalización de variables (Elaboración Propia).....	51
Tabla 2. Clasificación por densidades Pinus spp. proveniente del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán (Elaboración Propia).....	55
Tabla 3. Resultados de los ensayos a flexión (Elaboración propia).....	57
Tabla 4. Resultados de los ensayos en compresión (Elaboración propia).....	58
Tabla 5. Resultados del MOEc.....	61

Tabla 6. Resultados de los ensayos a flexión y MOE (Elaboración propia).....	65
Tabla 7. Resultados de los ensayos a tensión (Elaboración propia).....	66
Tabla 8. Resultados de los ensayos a compresión (Elaboración propia).....	67
Tabla 9. Resultados de los ensayos a cortante (Elaboración propia).....	68
Tabla 10. Esfuerzos permisibles para madera aserrada de acuerdo a la norma EN 338 (2009).....	72
Tabla 11. Esfuerzos permisibles según las NTCM (2017).....	73
Tabla 12. Esfuerzos permisibles para la madera de Pinus spp. proveniente de la CISJNP (Elaboración propia).....	75
Tabla 13. Esfuerzos permisibles de la madera de Pinus spp. proveniente de la CISJNP, ubicados dentro de la normativa europea EN:338 (2009).....	76
Tabla 14. Esfuerzos permisibles de la madera de Pinus spp. proveniente de la CISJNP, ubicados dentro de la normativa europea EN:1192 (2009).....	77
Tabla 15. Resultados de los ensayos a compresión de muros de madera contralaminada (Elaboración propia).....	87
Tabla 16. Resultados del ensayo a compresión de las columnas (Elaboración propia)....	89
Tabla 17. Resultados del ensayo a flexión de las losas (Elaboración propia).....	91
Tabla 18. Resumen de costos y rendimientos de una línea de producción manual de madera masiva (Elaboración propia).....	95
Tabla 19. Comparación de secciones estructurales de madera y acero (Elaboración propia).....	102
Tabla 20. Generadores y costo estimado de la estructura de madera (Elaboración propia).....	105
Tabla 21. Generadores y costo estimado de la estructura de acero (Elaboración propia).	106
Tabla 22. Peso total de la estructura de acero (Elaboración propia).....	106
Gráfico 1. Crecimiento en la producción de madera contralaminada (Brandner, 2013)...	45
Gráfico 2. Evolución y proyección de ventas de madera contralaminada (Horx- Strathern, 2017).....	45
Gráfico 3. Comparación de resultados obtenidos con la norma ASTM D-143 y los publicados por Sotomayor et. al, (2003), (Elaboración Propia).....	59

Gráfico 4. Comparación de la densidad de las probetas y los publicados por Sotomayor et. al, (2003), (Elaboración Propia).....	59
Gráfico 5. Comparación de resultados con la medición independiente del desplazamiento, (Elaboración propia).....	62
Gráfico 6. Esfuerzo – Deformación, de los ensayos a flexión (Elaboración propia).....	66
Gráfico 7. Esfuerzo – Deformación, de los ensayos a tensión (Elaboración propia).....	67
Gráfico 8. Esfuerzo – Deformación, de los ensayos a compresión (Elaboración propia).	68
Gráfico 9. Esfuerzo – Deformación, de los ensayos de cortante (Elaboración propia)....	69
Gráfico 10. Comparación de resultados obtenidos con la norma UNE EN:408 y los resultados publicados por Sotomayor et. al (2003), (Elaboración Propia)...	70
Gráfico 11. Comparación de la densidad de las probetas ensayadas con la norma UNE EN:408 y los resultados publicados por Sotomayor et. al (2003), (Elaboración Propia).....	70
Gráfico 12. Fuerza desplazamiento muros de madera contralaminada (Elaboración propia).....	87
Gráfico 13. Fuerza desplazamiento de las columnas de madera laminada (Elaboración propia).....	89
Gráfico 14. Fuerza desplazamiento de la viga de madera laminada (Elaboración propia)	90
Gráfico 15. Fuerza desplazamiento de una losa de madera contralaminada y otra de madera laminada clavada (Elaboración propia).....	92
Gráfico 16. Resultados para la resistencia al fuego de la estructura de madera masiva (Elaboración propia).....	102
Gráfico 17. Resultados para el estado límite último de la estructura de madera masiva (Elaboración propia).....	103
Gráfico 18. Resultados para el estado límite de servicio de la estructura de madera masiva (Elaboración propia).....	103
Gráfico 19. Resultados para el estado límite último de la estructura de acero (Elaboración propia).....	103
Gráfico 20. Resultados para el estado límite de servicio de la estructura de acero (Elaboración propia).....	104

Gráfico 21. Percepciones de los productores de madera de pino sobre la certificación (Elaboración Propia).....	109
Gráfico 22. Disponibilidad para aceptar el pago para fomentar el desarrollo sustentable de las comunidades forestales (Elaboración propia).....	110
Gráfico 23. Comparación de las percepciones sobre las casas de madera y de material convencional por parte de los compradores potenciales (Elaboración propia).....	111
Gráfico 24. Percepciones de los compradores potenciales sobre el sistema constructivo de madera masiva (Elaboración propia).....	111
Gráfico 25. Preferencias de equipamiento de serie en vivienda nueva (Elaboración propia).....	112

Glosario de Acrónimos

ACI	Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute)
AISC	Instituto Americano de la Construcción en Acero (American Institute of Steel Construction)
AMG	Área Metropolitana de Guadalajara
ASCE	Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (American Society of Civil Engineers)
ASD	Diseño por esfuerzos admisibles (Allowable Strength Design)
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials)
AWC	Consejo Americano de la Madera (American Wood Council)
BSLC	Consejo Binacional de Maderas Suaves (Binational Softwood Lumber Council)
CFE	Comisión Federal de Electricidad
C.H.	Contenido de Humedad
CLT	Madera Contralaminada (Cross-laminated timber)
CNLT	Madera Contralaminada Clavada (Cross-nail laminated timber)
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ eq	Dióxido de carbono equivalente
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CONAVI	Comisión Nacional de Vivienda
CORMA	Corporación Chilena de la Madera
DLT	Madera Laminada Clavijada (Dowel-laminated timber)
FIT	Fondo de Innovación Tecnológica
FSC	Consejo de Administración Forestal (Forest Stewardship Council)
GEI	Gases de efecto invernadero
GLULAM	Madera laminada encolada (Glued laminated timber)
IBC	Código de Construcción Internacional (International Building Code)
ICLT	Madera Contralaminada Enclavada (Interlocking cross-laminated timber)
IEA	Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency)
IMEPLAN	Instituto Metropolitano de Planeación del AMG
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
LEED	Liderazgo en energía y diseño ambiental (Leadership in Energy & Environmental Design)
LRFD	Cargas y Factores de Resistencia para el Diseño (Load and Resistance factor design)
LSL	Madera Reconstituida Laminada (Laminated Strand Lumber)
LVL	Madera Microlaminada (Laminated Veneer Lumber)
NTCM	Normas Técnicas Complementarias para la Construcción con Madera
MiPyMEs	Micro, Pequeñas y Medianas Empresas
MOE	Módulo de elasticidad
MOEc	Módulo de elasticidad en compresión
MOEf	Módulo de elasticidad en flexión
MPP	Panel Contrachapado Masivo (Mass Plywood Panel)
NDS	Especificación de diseño nacional para la construcción de madera (National Design Specification for Wood Construction)
NLT	Madera Laminada Clavada (Nail-laminated timber)

NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
PAP	Proyecto de Aplicación Profesional
POTMET	Plan de Ordenamiento Territorial Metropolitano
PSL	Madera Reconstituida Paralela (Parallel Strand Lumber)
SC	Secretaría de Cultura
SCL	Madera compuesta estructural (Structural composite lumber)
SEI	Instituto de Ingeniería Estructural (Structural Engineering Institute)
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SHF	Sociedad Hipotecaria Federal
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente
WBCSD	Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por apoyarme durante el curso de la maestría, en especial a mi esposa Angelina, mis hijas Mariel y Marifer, así como a mis padres Ramón y Ma. de los Ángeles, ya que sin su apoyo y sacrificio hubiera sido más complicado y menos satisfactorio llegar hasta aquí.

De la misma manera quiero agradecer a mi tutor, el Dr. Nayar Cuitláhuac Gutiérrez Astudillo, por su apoyo y guía para realizar esta investigación. También agradezco a los equipos de los grupos de verano y otoño 2017 del PAP de Tecnología apropiada para la generación de sistemas constructivos, cuya ayuda fue muy valiosa para entender y realizar los procesos de fabricación de elementos estructurales, así como la investigación sobre los costos de las líneas automatizadas para la fabricación de los paneles que integran el sistema constructivo de madera masiva. De igual forma agradezco al personal técnico del taller de carpintería y del laboratorio de materiales, por brindarme su ayuda para la fabricación y los ensayos de las probetas y elementos estructurales estudiados en esta investigación.

Finalmente agradezco al ITESO y al CONACYT por haberme otorgado las becas con las cuales me fue posible cursar este posgrado en la modalidad de tiempo completo.

CONSTRUCCIÓN DE MADERA MASIVA

Propuesta para construir vivienda vertical sustentable en Zapopan.

Resumen

Palabras clave: madera masiva, marcos contraventeados de madera, edificios de usos mixtos de mediana altura, Zapopan.

El modelo de ciudad compacta se desarrolla a nivel global y local como respuesta al incremento de la población urbana. El reemplazó de las construcciones actuales por edificios de usos mixtos de mediana altura es un componente clave de este modelo para densificar las centralidades urbanas. Sin embargo, la construcción convencional genera una huella de carbono significativa porque la fabricación del cemento y el acero representan el 8% de las emisiones antropogénicas de CO₂. Debido a esto, el sistema constructivo de madera masiva se está posicionando en el mundo desarrollado como el más atractivo y sustentable, gracias a su calidad, versatilidad y a su huella de carbono positiva. Este sistema se podría desarrollar en Zapopan, aprovechando la disponibilidad de madera certificada nacional y que el reglamento de construcción local permite edificaciones de marcos contraventeados de madera de hasta trece metros de altura. Esta investigación pretende avanzar en la maduración tecnológica de este sistema constructivo empleando madera certificada nacional, para lo cual se obtuvieron y validaron los esfuerzos permisibles de una muestra de madera del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán, para demostrar mediante una simulación de sistema, que con este material es posible construir edificios de madera masiva que cumplen con el diseño por sismo, viento y resistencia al fuego necesarios. También se encontró que su costo sería similar al de un edificio de acero, pero con una captura de carbono de 377 kgCO₂/m². Paralelamente se exploró la viabilidad de su aceptación por parte de los usuarios potenciales, y la posibilidad de que el aumento en la demanda de madera certificada por el uso de este sistema constructivo propiciaría un manejo forestal sustentable, y derivaría en beneficios para las comunidades productoras.

1. Introducción

“La arquitectura es la voluntad de la época traducida al espacio”

(Ludwig Mies van der Rohe)

Durante el último siglo hemos construido una civilización con un nivel de prosperidad y bienestar nunca antes visto, desafortunadamente este modelo de desarrollo también ha provocado una crisis ambiental a escala planetaria, causada por las emisiones de gases de efecto invernadero, y la degradación ambiental, lo que demuestra que ya no es sustentable. Como respuesta vivimos una época donde en todos los sectores de la sociedad se están buscando alternativas para ser más sustentables. Las ciudades alrededor del mundo están migrando hacia modelos urbanos compactos, privilegiando la construcción de vivienda vertical con usos mixtos, densificando los distritos urbanos consolidados para acercar la vivienda a los centros de trabajo, estudio y esparcimiento con el objetivo de volverse más sustentables al disminuir las emisiones de CO₂ causadas por los largos desplazamientos, generar mayor sentido de comunidad y reduciendo los costos de sus servicios por la concentración de los mismos. Paradójicamente este reciclaje de las ciudades implica la generación de una gran huella de carbono con la construcción de nuevos edificios, haciendo necesario la aplicación de nuevos sistemas constructivos sustentables con los cuales se puedan construir edificios de una huella de carbono cero.

El municipio de Zapopan no es ajeno a esta tendencia, y lo ha plasmado en el POTMET, donde se propuso “densificar el área urbanizada y promover los usos mixtos” (IMEPLAN, 2016, p.136). Otra estrategia más ha sido la reducción del costo de las licencias de construcción para los proyectos inmobiliarios que tramitan la certificación de edificios sustentables LEED. Esta certificación es esencialmente un sistema de puntos que premia los edificios que promueven ciudades compactas y disminuyen el consumo energético durante la operación del mismo, ayudando a reducir las emisiones de CO₂. Si bien, del total de las emisiones de CO₂ que produce un edificio durante su vida útil, la mayoría es producto del consumo energético del mismo y no de la fase de construcción, el hecho es que con cada edificio nuevo se genera un impacto ambiental considerable aunque este tenga la certificación LEED, ya que como afirma Green (2013) la fabricación del cemento y el acero es responsable del 8% de las emisiones antropogénicas de CO₂.

Para reducir esta huella de carbono en la etapa de construcción deberíamos limitar el uso del concreto y el acero en la construcción, y buscar materiales estructurales que incluso secuestraran CO₂ en vez de emitirlo. Afortunadamente este material existe, y es la madera, la cual tiene bondades técnicas, ambientales, económicas y sociales que los constructores locales no han sabido aprovechar. Desde el 2003, el reglamento de construcción del municipio de Zapopan permite construir estructuras de hasta trece metros de altura con marcos contraventeados de madera. La madera es un material estructural que funciona a tensión y compresión, se desarrolla con la luz solar, y secuestra CO₂ durante su crecimiento, ayudando a mitigar el calentamiento global. Además, de acuerdo con Fernández (2015) en México el 95% de la superficie forestal certificada se encuentra en algún régimen de propiedad comunitaria, a diferencia del resto del mundo donde el 98% de los bosques productivos son propiedad privada. Esta particularidad es una oportunidad para generar una demanda de madera certificada mexicana que beneficie económica y socialmente a las comunidades forestales.

La construcción con madera se divide en dos tipos principales de estructuras, las ligeras y las masivas. Las estructuras ligeras son muy populares en Estados Unidos para construir viviendas unifamiliares, debido a que con elementos de 2" x 4" es posible formar rápidamente muros de carga, usando solamente clavos o tornillos para fijar los elementos. Sin embargo este sistema tiene limitantes de altura y poca resistencia al fuego.

En este trabajo se propone desarrollar en Zapopan el sistema constructivo de madera masiva, el cual de acuerdo a Green & Karsh (2013) se integra con paneles compuestos por varias capas madera laminada encolada o clavada, los cuales se unen entre sí mediante conexiones metálicas, y según su diseño pueden funcionar estructuralmente como vigas, columnas, losas y muros. Brandner (2013) menciona que la fabricación de estos paneles se puede llevar a cabo de forma semimecánica o en líneas de producción casi completamente automatizadas. Y Mayo (2015) afirma que las ventajas de su producción industrial, y sus cualidades estructurales y ecológicas lo convierten en una opción viable para fabricar edificios de vivienda vertical sustentables.

A través de las siguientes páginas se expondrán con más detalle los datos que sustentan la problemática y justificación de la investigación. Se mostrará una revisión del estado del arte sobre este sistema constructivo, incluyendo su diseño por sismo, resistencia al fuego, durabilidad, y algunos ejemplos construidos. Posteriormente se explicará la metodología empleada en la

recolección de la información necesaria para validar la factibilidad del desarrollo local de este sistema constructivo, para finalmente discutir los resultados.

2. Problemática y Justificación

Boff (2013) afirma que no se puede negar que vivimos una época de transición donde se está dando una búsqueda de la sustentabilidad, e identifica que actualmente operan ocho modelos de sustentabilidad, cinco de los cuales presentan la sustentabilidad de forma más simulada que real, intentando salvar el modelo imperante de desarrollo “imprimiéndole un cariz sostenible, aunque aparente” (Posición en Kindle 421-422). Estos cinco modelos son: el modelo estándar de desarrollo sostenible (la sustentabilidad retórica), el modelo del neocapitalismo (la ausencia de sustentabilidad), el modelo del capitalismo natural (la sustentabilidad débil), el modelo de la economía verde (la sustentabilidad ilusoria) y el modelo del ecosocialismo (la sustentabilidad insuficiente). La mayoría de las empresas constructoras e inmobiliarias que se promocionan como verdes, encajan en estos modelos, debido a que solo ofrecen la aplicación de ecotecnologías, contribuyendo únicamente a la dimensión ecológica de la sustentabilidad y olvidando las demás.

Un sistema constructivo sustentable necesita responder a una crisis compleja y multidimensional. Morales (2004) afirma que la sustentabilidad se trata de “una construcción social, compleja y dinámica” (p. 47), en la que “al menos siete dimensiones están estrechamente entrelazadas en los procesos hacia la sustentabilidad; la ecológica, la social, la cultural, la ética, la política, la económica y la epistemológica” (Morales, 2017, p.11). Además estos procesos “son complejos e implican la articulación de la sustentabilidad urbana, la sustentabilidad rural, la sustentabilidad industrial y la sustentabilidad natural” (Morales, 2017, p.11). Los tres modelos restantes de sustentabilidad que Boff (2013), refiere que sí parecen acercarnos a una sustentabilidad real son: el modelo del ecodesarrollo o de la bioeconomía (la sustentabilidad posible), el modelo de la economía solidaria (la sustentabilidad viable) y el buen vivir de los pueblos andinos (la sustentabilidad deseable). Sobre este último modelo explica que se basa en una cosmovisión que busca el equilibrio y vivir en comunión profunda con la energía universal. Además considera que representa de forma anticipada y a escala reducida lo que probablemente sea el futuro de la humanidad. Sin embargo, para esta investigación consideramos que es muy difícil que en occidente se adopten estos conceptos en el corto plazo y más bien habría que transitar hacia ellos de forma

gradual implementando la sustentabilidad posible del ecodesarrollo y la bioeconomía, y la sustentabilidad viable de la economía solidaria.

El concepto de bioeconomía se refiere a “un subsistema del sistema de la naturaleza, siempre limitada y, por consiguiente, objeto de cuidado permanente por parte del ser humano. La economía debe acompañar y atender a los niveles de preservación y regeneración de la naturaleza” (Boff, 2013, Posición en Kindle 783-784). Por su parte el concepto del ecodesarrollo se basa en “una sensible disminución de las desigualdades sociales, la incorporación de la ciudadanía como participación popular en el juego democrático, el respeto de las diferencias culturales y la introducción de unos valores éticos de respeto por toda forma de vida y de cuidado permanente del medio ambiente” (Boff, 2013, Posición en Kindle 795-798), buscando una equidad social que permita la nivelación de la brecha entre ricos y pobres.

La economía solidaria, es conocida también como cooperativismo. Este es un modelo económico holístico que integra las dimensiones humana, social, ética, espiritual y ambiental. Sus ejes son “el ser humano, no el capital; el trabajo como acción creadora, no como mercancía pagada por medio de un salario; la solidaridad, no la competitividad; la autogestión democrática, no la centralización del poder en manos de los amos; la mejora de la calidad de vida y del trabajo, no la maximización del lucro; la primacía del desarrollo local, no del global” (Boff, 2013, Posición en Kindle 821-824). Podemos ver la aplicación del mismo en las redes de comercio justo, en las cooperativas de producción y consumo, en los bancos de semillas criollas, en las incubadoras de nuevas tecnologías articuladas con universidades, en los fondos rotativos de crédito y en la recuperación de empresas fallidas mediante la gestión de los mismos trabajadores (Boff, 2013).

El sistema constructivo de madera masiva puede lograr la articulación de la sustentabilidad urbana, rural, industrial y natural, desarrollándose en los modelos sustentables de ecodesarrollo, bioeconomía y economía solidaria, abarcando consecuentemente varias dimensiones de la sustentabilidad. La sustentabilidad natural está presente en el uso de madera proveniente de bosques certificados donde la producción tiene límites basados en principios de bioeconomía, como los ciclos de regeneración natural de los recursos forestales y el cuidado de la biodiversidad. La sustentabilidad rural aparece en las cooperativas de comunidades rurales, donde se puede construir un modelo de ecodesarrollo y redes de comercio justo para asegurar que los beneficios por la venta de la madera lleguen a la mayor cantidad de población de sus comunidades. La sustentabilidad

industrial de la planta de madera masiva debe lograrse a través de un proceso industrial, laboral y comercial, bajo los principios de ecodesarrollo y comercio justo. Para finalmente contribuir a la sustentabilidad urbana al densificar las ciudades del siglo XXI con edificios de carbono cero.

La problemática actual de la sustentabilidad urbana de las ciudades mexicanas se debe principalmente al crecimiento descontrolado de las mismas, debido a la alta demanda de vivienda. A nivel nacional la SHF (2015) estima que del año 2015 al 2030, habrá un incremento aproximado de 8.5 millones de unidades de vivienda, de las cuales 7 millones se construirán en las zonas urbanas, principalmente en las áreas metropolitanas. A nivel local, Lara (2016) afirma que las tendencias en el crecimiento poblacional y el desarrollo inmobiliario del área metropolitana de Guadalajara, sugieren que para la próxima década el municipio de Zapopan superará a Guadalajara en población y superficie urbana. También explica que históricamente la expansión urbana de Zapopan se ha dado en forma de condominios horizontales asentados sobre tierras agrícolas, y de seguir esa tendencia se necesitarían 38 mil hectáreas más para satisfacer la demanda. Este tipo de crecimiento ha provocado que la clase media pierda tiempo en desplazarse grandes distancias a sus centros de trabajo, estudio y esparcimiento, aumentando el gasto familiar y las emisiones de gases de efecto invernadero por un mayor uso del automóvil, además ha reducido la cantidad de tierra dedicada a la producción de alimentos, y también ha obligado a las autoridades a invertir grandes cantidades de dinero en generar la infraestructura pública necesaria hacia los nuevos desarrollos. Ante este problema, de acuerdo con el IMEPLAN (2016) las nuevas políticas de desarrollo urbano de Zapopan buscan “densificar el área urbanizada y promover los usos mixtos” (p.136). Estas reglamentaciones se traducirán en un incremento en la construcción de vivienda vertical con plantas bajas dedicadas a servicios y comercio.

De no actuar sustentablemente estos edificios se construirán convencionalmente, generando una importante huella de carbono. La UNEP (2009) indica que a nivel mundial los edificios consumen el 40% de la energía producida, y generan el 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Mediante varios análisis de ciclo de vida han comprobado que del total de emisiones de un edificio durante toda su vida útil, el 80% se producen por el consumo de energía en la fase de operación, mientras el 20% restante se emiten por la fabricación y transporte de los materiales de construcción, así como la construcción y demolición del mismo. Además pronostica que para el año 2030 los edificios de los países en desarrollo superaran en emisiones a los países desarrollados.

Con estos datos recomienda a los gobiernos a concentrarse en reducir las emisiones de la fase de operación porque es donde se puede tener un mayor impacto. Sin duda esta estrategia ayuda a reducir las emisiones totales durante el ciclo de vida de cada edificio, pero el problema del cambio climático seguirá sin solucionarse, porque la cantidad de gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera seguirá aumentando, a menos que se capturen más emisiones de las que se generen.

También la construcción convencional de concreto y acero usada masivamente por el sector de desarrollos inmobiliarios es responsable de una gran cantidad de emisión de gases de efecto invernadero. Según la IEA & WBCSD (2009) y Green (2013), la fabricación del cemento y el acero son responsables del 5% y 3% de las emisiones globales de CO₂. El diagnóstico nacional elaborado por CEARA (2013), indica que en el año 2011 las emisiones de gases de efecto invernadero del sector de la construcción mexicana fueron de 41.59 millones de toneladas de CO₂eq, de las cuales 32.4 provinieron de la fabricación del cemento, 8.2 de la fabricación del acero y 0.99 de los combustibles usados por el sector de la construcción. Esto es equivalente a que la fabricación del cemento y el acero son responsables del 4.33% y el 1.1% de las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero. También estima que para el año 2030 las emisiones por la fabricación del cemento y el acero crezcan 72.84% y 79.27% respectivamente, de igual manera las emisiones por el uso de combustibles en el sector aumentarían 216% con respecto al 2011. Esta tendencias alcistas son clara muestra de que las acciones de este sector son claves para combatir el cambio climático.

La evidencia científica muestra que a pesar de los acuerdos multinacionales alcanzados para combatir el cambio climático la cantidad de CO₂ en la atmósfera aumenta cada año en vez de reducirse. Las mediciones del NOAA (2017) indican que desde la publicación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1992, la concentración promedio anual de CO₂ aumentó de 356.45 ppm a 404.21 ppm en 2016. En el caso de México, el INECC (2013) calculó que las emisiones de GEI crecieron 33.4% de 1990 al 2010. En este año se emitieron 748 millones de toneladas de CO₂eq, y solo se capturó el 2.48% de las emisiones totales. Estas estadísticas muestran la clara tendencia de que tanto a nivel mundial como nacional no se están haciendo los esfuerzos suficientes para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y controlar el cambio climático.

Para lograr que los desarrolladores inmobiliarios se preocupen por lograr la estabilización de sus emisiones de gases de efecto invernadero sería necesario que el mercado demandara

edificios de carbono cero, y que existiera un marco legal con incentivos para la construcción de los mismos. Desgraciadamente México reaccionó veinte años tarde al pedido de la CMNUCC para elaborar los inventarios nacionales de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, y generar políticas y reglamentaciones que permitieran disminuirlas. Hasta el momento solo se ha aprobado la Ley General de Cambio Climático (2012), en la que se propone que los tres órdenes de gobierno establezcan dentro de sus ámbitos, medidas de adaptación y mitigación al cambio climático. Sin embargo, en el artículo 9° se les delegó a los municipios las disposiciones sobre desarrollo urbano, y al día de hoy en ningún reglamento de construcción municipal se establecen medidas obligatorias para estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero del sector, lo que provoca que la industria inmobiliaria no se preocupe por este tema.

Ante esta realidad, se pretende aprovechar la reglamentación del Municipio de Zapopan (2003, 2014) que permite la construcción de estructuras de marcos contraventeados de madera de hasta trece metros de altura, para desarrollar un sistema constructivo de madera masiva con el que se pueda construir vivienda vertical sustentable, que sea competitivo comercialmente con los sistemas convencionales de concreto acero, y que además pueda balancear las emisiones generadas en la construcción de un edificio con la cantidad de CO₂ capturado durante el crecimiento de la madera. Ordóñez et. al (2001) realizaron un estudio del potencial de captura de CO₂ del bosque de la comunidad michoacana de San Juan Nuevo, Michoacán. En el polígono analizado existen varias especies de coníferas pero predomina la especie de *Pinus pseudostrobus*, las cuales son aprovechadas en turnos de cultivo de 50 años. En su estudio analizaron de forma individual durante un periodo de 250 años tres partes del sistema forestal que pueden capturar CO₂, la biomasa, el suelo y los productos maderables. Y encontraron dos hallazgos importantes: el primero fue que el mejor escenario de captura de CO₂ se da cuando se considera que los productos maderables van a tener una vida útil de por lo menos 100 años, porque el CO₂ se mantiene dentro de la madera; el segundo indica que con cada poda solo se libera el CO₂ contenido en la biomasa, pero la cantidad de CO₂ capturado sigue aumentando con cada ciclo de poda hasta llegar a un total de 338 toneladas de CO₂ por hectárea en un periodo de 250 años, lo que nos da 1.352 toneladas de CO₂ por hectárea por año. Los resultados de este estudio son comparables con otros que se mencionan en el mismo trabajo, lo que demuestra que las coníferas capturan cantidades importantes de CO₂ durante su crecimiento, con las cuales se pueden compensar las emitidas durante la construcción de un edificio con estructura de madera. Además, ya existe la tecnología para que un edificio produzca mediante

fuentes renovables el total de la energía requerida para su operación. Combinando estas dos estrategias es posible construir edificios con una huella de carbono cero, lo que sin duda ayudaría a mitigar el cambio climático y estabilizar las emisiones antropogénicas de CO₂.

Se han realizado algunos estudios que reafirman la capacidad que tienen los edificios de madera para ser considerados como de carbono cero. Lyslo et. al (2016) realizaron análisis de ciclo de vida para comparar los impactos de varios edificios de concreto, acero y madera, y encontraron que bajo todos los escenarios la construcción con madera tienen menores impactos en potencial de cambio climático. El mejor escenario que encontraron es en el que los residuos de madera de la demolición del edificio, se usan como combustible para generar calor en lugar de gas natural, bajo este supuesto el potencial de cambio climático es negativo. Por su parte, Buchanan et. al (2013) argumentan que para un edificio bien diseñado, el consumo de energía por la operación y mantenimiento del mismo es prácticamente independiente del sistema estructural que se empleó. Es por esto que proponen incluir en las certificaciones para edificios sustentables el cálculo de la huella de carbono, enfocada en el potencial de cambio climático de la producción y disposición final de los materiales. De acuerdo a los análisis de ciclo de vida que realizaron las emisiones de CO₂ de la producción de materiales para un edificio de madera es balanceada casi en su totalidad por el CO₂ almacenado en la madera utilizada.

A pesar de las ventajas de usar este material, en México existen varios mitos populares alrededor del uso de la madera en la construcción, uno de ellos es que el país no cuenta con grandes cantidades de recursos forestales. Sin embargo, en México se encuentran 49 de las 120 especies del género *Pinus* del mundo. Las especies con la distribución latitudinal más amplia son “*Pinus oocarpa*... *Abies religiosa*, *Pinus devoniana*, *P. cembroides*, *P. douglasiana*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. teocote*, *Juniperus deppeana*, *J. 21ethink21* y *Taxodium mucronatum*” (Gernandt & Pérez-de la Rosa, 2013, p130). Además, de acuerdo con Chapela (2012) 67 de las 190 millones de hectáreas del país están cubiertas de bosques y selvas, es decir, más de la tercera parte del territorio nacional. También menciona que el volumen anual de producción sostenible potencial es de 28 millones de m³ rollo de madera. De acuerdo con la SEMARNAT (2016) en el 2015 la producción anual de madera en México fue de 6.12 millones de m³ rollo, es decir el 21.86% de la capacidad sostenible natural, lo que según Chapela (2012) ha provocado que las autorizaciones de corte estén disminuyendo debido a la falta de proyectos silvícolas viables. Este sub-

aprovechamiento de la madera en México es un claro indicador del potencial que tiene el desarrollo de una industria de la construcción con madera en el país.

El mercado potencial de unidades de vivienda que se podrían construir con el sistema constructivo de marcos contraventeados de masiva se limita a la producción potencial de madera aserrada de coníferas y sus porcentajes de rendimientos. La SEMARNAT (2016) especifica que la producción de madera aserrada de coníferas en 2015 fue de 3.8 millones de m³ rollo. Según Nájera et. al (2012) el rendimiento promedio de madera aserrada de pino respecto al volumen en rollo es de 61.64%. Además el rendimiento de la madera dimensionada es de aproximadamente 75% respecto a la madera aserrada. Haciendo los cálculos tenemos que la producción de madera dimensionada de coníferas en 2015 fue de alrededor de 1.76 millones de m³. La información proporcionada por StructureCraft (2017) indica que para la construcción de los 16,722.55 m² del edificio de marcos de madera masiva T3 en Minneapolis se utilizaron 3,600 m³ de madera, con lo cual podemos calcular que para construir un m² de este sistema constructivo se utilizaron aproximadamente 0.2153 m³ de madera dimensionada. Esto significa que con la producción de madera aserrada de coníferas en 2015 se pudieron haber construido casi 8.17 millones de m² con el sistema propuesto, y si consideramos que se solo se extrae el 21.86% de lo viable, entonces se podrían construir hasta 37.37 millones de m² de construcciones de marcos de madera masiva. Esto significa que con el recurso forestal disponible de manera sustentable en México se podría satisfacer el 100% de la demanda de vivienda nueva para los próximos años.

Otro estigma que tiene el uso de madera en México es la tala ilegal y el desconocimiento del público sobre los procedimientos y certificaciones que garantizan la procedencia legal y sustentable de la misma. De acuerdo con Chapela (2012) la deforestación producto de los sistemas de pastoreo, la expansión de la agricultura y la tala clandestina han moldeado la configuración de los bosques nacionales, haciendo que el volumen promedio de madera en rollo disponible por hectárea disminuyera de 73.15 m³ rollo en 1979 hasta 35.92 m³ rollo en 2010. Sin embargo, en regiones forestales certificadas donde existe un manejo comunitario, como en la comunidad de San Nuevo, Michoacán, el volumen de madera disponible por hectárea es de 73.22 m³ rollo, es decir el doble del promedio nacional. Además existen otras comunidades forestales que tienen mayores volúmenes de madera disponible por hectárea, como la región norte de Jalisco con 107.87 m³ rollo y la Sierra Norte de Oaxaca con 143.54 m³ rollo. Estos datos demuestran que los bosques que son

explotados de manera conjunta por las comunidades que los habitan mantienen varias veces más biomasa que los bosques donde no existe un programa silvícola activo.

Finalmente, no toda la madera legal es sustentable, ya que puede contar con sus permisos de explotación pero las prácticas pueden no ser las ideales. Para garantizar que estas prácticas cuiden la biodiversidad de los bosques, y aseguren que la extracción de madera este dentro de los ciclos de regeneración natural de la misma, es necesario utilizar solamente madera proveniente de bosques certificados. El Forest Stewardship Council es la certificadora más importante en nuestro país, y de acuerdo con Fernández (2015) las estadísticas del FSC en México indican que el 95% de la superficie certificada se encuentra en algún régimen de propiedad comunitaria, a diferencia del resto del mundo donde el 98% de los bosques productivos son propiedad privada. Chapela (2012) precisa que de las 67 millones de hectáreas de bosques y selvas que hay en el país, 20 millones están en territorios indígenas y otros 22 millones están en comunidades que no se reconocen como indígenas pero son propiedad ejidal o comunal. Esta situación brinda la oportunidad de desarrollar una industria forestal sustentable donde los beneficios sociales y económicos lleguen a un gran número de comunidades indígenas y rurales que cuentan con algún tipo de organización comunitaria.

1.2 Demandas Sectoriales

Este proyecto puede ser beneficiado por varios programas gubernamentales que buscan promover soluciones innovadoras a los problemas del país. Entre ellos destacan el Fondo de Desarrollo Científico y Tecnológico para el Fomento de la Producción y Financiamiento de Vivienda y el Crecimiento del Sector Habitacional CONAVI-CONACYT, el cual tiene como objetivo “apoyar proyectos de investigación científica y tecnológica que contribuyan a generar el conocimiento requerido por el sector para atender problemas, necesidades u oportunidades en materia de Vivienda” (CONAVI & CONACYT, 2016, p.1).

Un segundo programa es la Convocatoria de Proyectos de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales, la cual cuenta con varios temas prioritarios compatibles con este proyecto, como lo son la mitigación y adaptación al cambio climático, el aprovechamiento y protección de ecosistemas y de la biodiversidad, consumo sustentable de energía, ciudades y desarrollo urbano.

Existe un tercer programa, conocido como Fondo de Innovación Tecnológica (FIT), el cual tiene como objetivo “fomentar iniciativas de innovación de Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (MiPyMEs) de Base Tecnológica, así como de Start ups y personas físicas con actividad empresarial que realicen proyectos de innovación tecnológica significativos y con alto potencial de ser colocados en el mercado como innovaciones tecnológicas” (CONACYT, 2017, p.1).

Una cuarta posibilidad es el programa municipal Reto Zapopan, el cual es una incubadora de empresas para proyectos de emprendimiento que beneficien directa o indirectamente al municipio de Zapopan. El programa consiste en dar asesorías y consultorías para armar un plan de negocios, así como un financiamiento por parte de la tesorería municipal, de hasta un millón y medio de pesos a la tasa TIE. (RetoZapopan, 2018)

El desarrollo de un sistema constructivo sustentable de madera masiva encaja en los objetivos de estos programas, y además ya existe un antecedente donde se apoyó el desarrollo de otro sistema constructivo. En el 2011 el FIT apoyó con \$4,200,000.00 el desarrollo de un “sistema constructivo basado en módulos prefabricados de tabiques huecos hechos de plástico proveniente del reciclaje de botellas hechas de polietileno de alta densidad” (Fuentes, et, al, 2015, p.20).

1.3 Estado del Arte del Sistema Constructivo de Madera Masiva

En este apartado se describirán las características principales que componen el sistema constructivo de madera masiva, los estudios que se han hecho de su resistencia antes sismos e incendios, y finalmente se expondrán ejemplos representativos que han sido construidos en otras partes del mundo.

1.3.1 Surgimiento y Descripción del Sistema Constructivo de Madera Masiva

Existen tres tipos principales de estructuras de madera, el primero en utilizarse fue el sistema de poste y viga, para el cual se utilizan columnas y vigas de madera sólida. El segundo tipo es el entramado ligero de madera, para el cual se utilizan pies derechos de 2”x4” o 2”x6”, a cada 40 o 60 cm, dejando espacios de aire en medio, los cuales son recubiertos con paneles de madera contrachapada. Finalmente, el tercer tipo son las estructuras de madera masiva, las cuales pueden

ser de muros de carga o marcos, para los cuales se utilizan paneles de madera laminada de distintas tecnologías, la mayoría de las cuales tienen más de un siglo de haber sido inventadas.

De acuerdo con García et al. (2002), el primero en diseñar y construir un elemento laminado estructural fue el arquitecto Philibert Delorme, quien en 1561 diseñó un sistema que consistía en arcos formados por pequeñas piezas de madera unidas entre sí con cuñas de madera. Page (2011) describe que con este sistema se construyeron los castillos de Murette, Montceaux, y el Palacio de las Tullerías en París, entre otras obras hoy desaparecidas, así como la iglesia de la Compañía de Jesús de Córdoba, Argentina, construida en 1650, la cual aún sobrevive.

Koo (2013), muestra como en la era industrial, desde 1850 y hasta 1940 se construyeron en Canadá varios edificios conocidos como *Brick and Beam*, los cuales originalmente eran fábricas y bodegas de hasta nueve niveles, con muros de cortante perimetrales de ladrillo y marcos interiores de madera sólida, con entresijos de tablas de madera dispuestas de canto y clavadas entre sí, a este tipo de paneles de entresijo se le conoce como madera laminada clavada. Varios de estos edificios siguen en uso actualmente aunque han sido transformados en oficinas y departamentos. Sin embargo, como mencionan García et. al (2002) fue en Alemania en 1906 donde Karl-Friedrich-Otto Hetzer, hizo un avance significativo al reemplazar los pernos, clavos y las bridas metálicas por adhesivos a base de caseína, naciendo el concepto moderno de la madera laminada encolada, definido como “todo elemento estructural formado por la unión de piezas de madera con sus fibras prácticamente orientadas de forma paralela” (pp. 182-183). Esta solución fue aplicada en la sala de máquinas de la exposición de Bruselas de 1910, desarrollándose después en Suiza y Holanda, y más tarde, en 1934 se introdujo a los Estados Unidos para construir el edificio del Laboratorio de Productos Forestales en Madison. En México se utilizó esta tecnología para construir el Auditorio de la Reforma en Puebla en 1962, de acuerdo con la SC (2016) este edificio estuvo algunos años abandonado y fue renovado en el 2013, actualmente se encuentra nuevamente en funcionamiento y conserva su estructura de madera laminada.

Otro avance importante fueron los paneles de madera contralaminada, los cuales de acuerdo con Schickhofer & Hasewend (2000), fueron desarrollados en 1990 en la universidad de Graz, Austria. Este tipo de paneles se componen de varias capas de madera pegadas entre sí a 90 grados, y pueden ser utilizados indistintamente como muros o losas. Los primeros edificios en utilizar estos paneles se construyeron en Austria a partir de 1998, entre estos se encuentra el Centro de Tecnología de la Construcción de la universidad de Graz, el cual sigue en funcionamiento.

Sin embargo, fue hasta el 2007 cuando la preocupación por reducir la huella de carbono de los edificios llevó al despacho de arquitectura londinense Waugh Thistleton a proponer la torre Stadthaus en la capital británica. La construcción de este edificio residencial de nueve niveles marcó un antes y un después en el desarrollo del sistema constructivo de madera masiva, porque pudo demostrar la capacidad estructural de la madera de ingeniería para realizar edificios de varios niveles. A partir de la terminación de esta obra en el 2009 alrededor de Europa, Australia, Japón, Canadá y más recientemente Estados Unidos, universidades, arquitectos e ingenieros han desarrollado diferentes propuestas de cómo integrar todas las tecnologías disponibles de paneles de madera laminada para construir edificios que compitan con los de concreto reforzado y acero.

Este sistema constructivo es definido por Green & Karsh (2013) como “paneles sólidos de madera compuestos para ser resistentes mediante diferentes capas laminadas” (p.14). Ryan, Griffin & Rice (2015) clasifican estos paneles en sistemas encolados y no encolados:

Encolados:

- Madera Laminada Encolada (Glue-laminated timber – GLULAM). “Está compuesta de láminas de madera individuales (madera dimensionada), elegidas y posicionadas basándose en sus características de rendimiento, y luego unidas con pegamentos resistentes a la humedad.” (reThink Wood, 2016, p.3).
- Madera Compuesta Estructural (Structural composite lumber – SCL). “Es una familia de productos creados con chapas, virutas o escamas de madera estratificadas y unidas con adhesivos resistentes a la humedad” (reThink Wood, 2016, p.4). Se subdivide en tres productos relevantes para la categoría de madera masiva:
 - Madera Microlaminada (Laminated Veneer Lumber – LVL)
 - Madera Reconstituida Paralela (Parallel Strand Lumber – PSL)
 - Madera Reconstituida Laminada (Laminated Strand Lumber – LSL)
- Madera Contralaminada (Cross-laminated timber – CLT). “Se conforma con capas de madera dimensionada (típicamente tres, cinco, o siete) orientadas en ángulos rectos una a otra y luego encoladas para formar paneles estructurales con una fuerza, estabilidad dimensional y rigidez excepcionales” (reThink Wood, 2016, p.2).

- Panel Contrachapado Masivo (Mass Plywood Panel – MPP). Es prácticamente un panel de contrachapado con espesores de varias pulgadas, con capacidades similares a la madera contralaminada pero compuesto con un 20% menos de madera (Freres Lumber Co, 2018).

No encolados:

- Madera Laminada Clavijada (Dowel-laminated timber – DLT). “Estos paneles estas hechos con tableros de maderas suaves (2”x4”, 2”x6”, 2x8”, etc.) apilados como los tableros de Madera Laminada Clavada pero fijados con clavijas de madera” (reThink Wood, 2016, p.4).
- Madera Laminada Clavada (Nail-laminated timber – NLT). “Está creada de miembros de madera dimensionada individuales, apilados de canto y pegadas con clavos o tornillos para crear un elemento estructural más grande” (reThink Wood, 2016, p.2).
- Madera Contralaminada Clavada (Cross-nail laminated timber – CNLT). Es igual a la madera contralaminada, pero unida con clavos o tornillos y no con adhesivos.
- Madera Contralaminada Enclavada (Interlocking cross-laminated timber – ICLT). Es igual a la madera contralaminada, pero se ensambla con uniones tipo macho y hembra, en lugar de usar clavos, tornillos o adhesivos.

En la Figura 1 se puede apreciar la composición de los principales paneles.



Figura 1. Tipos de paneles de madera masiva. (Mahadevan, 2017).

Como se puede ver en el punto 1.3.6 de este trabajo, la tipología más conveniente para construir edificios de vivienda vertical con usos mixtos es la de marcos de madera laminada, y entrepisos de madera contralaminada o madera laminada clavada, debido a la versatilidad que brindan para configurar plantas libres que puedan ser usadas como comercios, oficinas y viviendas. Por esta razón son estos tres tipos de paneles de madera de ingeniería los que se estudiaron en el presente trabajo.

1.3.2 Diseño estructural y reglamentos de construcción.

Debido a que el uso del sistema constructivo de madera masiva es relativamente nuevo, no es posible encontrar aun un código de construcción con sus respectivas normas técnicas que abarque todos los diferentes paneles de madera laminada de ingeniería que integran este sistema. Esta falta de información obliga a usar los diferentes métodos de cálculo publicados para cada tipo de panel e integrar los resultados adecuadamente a la reglamentación local. Por ejemplo, a pesar de que la mayoría de los proyectos de madera masiva construidos a la fecha se han realizado en Europa con madera contralaminada, el eurocódigo 5, que es la normativa europea sobre construcción con madera describe solamente los métodos de diseño estructural para madera laminada encolada, y madera microlaminada.

Para diseñar madera contralaminada existen publicaciones realizadas por los mismos fabricantes de los paneles, como el manual de la empresa austriaca proHolz, elaborado por Wallner-Novak et. al (2013), en el cual describen el método de diseño estructural adecuado a los requerimientos del eurocódigo 5. En Norteamérica Gagnon & Pirvu (2011), publicaron la versión canadiense de un manual de madera contralaminada, en el cual explican a detalle todo sobre esta tecnología, incluyendo los diferentes métodos de diseño estructural. Dos años después Karacaibely & Douglas (2013) publicaron la versión estadounidense del manual de madera contralaminada, el cual contiene los métodos de diseño estructural del estándar estadounidense NDS (National Design Specification for Wood Construction), adecuados para ambas filosofías de diseño, la ASD (Diseño por Esfuerzos Admisibles), y la LRFD (Cargas y Factores de Resistencia para el Diseño). En el estándar NDS (2015) se describen las ecuaciones generales de diseño y los distintos factores de carga, sin embargo el manual de Karacaibely & Douglas (2013) contiene modificaciones a estas ecuaciones para hacerlas más adecuadas a la madera contralaminada.

Sobre la madera laminada clavada solo se tiene la guía de diseño publicada por el BSLC (2017), en el cual se describen las diferentes combinaciones posibles de este tipo de paneles, así como sus ecuaciones de diseño y factores específicos para cada tipo. Respecto a las filosofías de diseño ASD Y LRFD solo se menciona como hacer el cálculo de la resistencia al fuego, el resto de los factores y combinaciones de carga aplicables a cada filosofía se deben de seguir de acuerdo a las consideraciones generales del NDS y del ASCE 7, lo mismo es aplicable a la madera laminada y contralaminada.

Para los valores de diseño se debe consultar el suplemento del estándar NDS, en el cual AWC (2018) describe los valores de diseño para las diferentes calidades visuales de las especies de madera disponibles en los Estados Unidos. En Europa, en lugar de tener una guía de valores de diseño dividida en calidades visuales de cada especie, cuentan con las normas EN-338 y EN-1194 donde se establecen clases resistentes para madera aserrada y madera laminada encolada respectivamente. La madera europea se puede adquirir ya clasificada por clase resistente, independientemente de su especie o calidad visual. Lamentablemente aún no se cuenta con una guía de valores de diseño de madera de especies mexicanas, lo que existe son algunas pocas publicaciones de ensayos de varias especies mexicanas, tanto de coníferas como latifoliadas, pero en los cuales se exponen solamente los resultados de laboratorio y no su procesamiento estadístico para convertirlos en esfuerzos permisibles válidos.

Los únicos valores de diseño para coníferas y maderas latifoliadas disponibles en alguna norma mexicana se encuentran en las normas técnicas para construcción con madera de la capital del país. De acuerdo con las NTCM (2017), muestran una clasificación visual estructural en tres clases, A, B y C de acuerdo a la NMX-C-239-ONNCCE-2014. En el caso de la madera laminada encolada, también se publicó una tabla con valores de diseño, pero estos son una copia de una parte de la Tabla 5^a contenida en el suplemento del estándar NDS (2018). Sin embargo estos valores de diseño son muy conservadores respecto a los valores observados en la normatividad europea y el resto de la normatividad estadounidense, así como de los resultados de ensayos de características mecánicas estructurales de maderas mexicanas publicados por la CONAFOR (2013), Sotomayor (2015), Sotomayor et. al (2003) y Sotomayor et. al (2015).

En el caso del Reglamento de Construcción del Municipio de Zapopan (2012), aun cuando se permite la construcción de estructuras de madera, no se especifican cuáles son sus normas

técnicas complementarias, pero para las estructuras de acero y concreto se establece que las normas técnicas son las publicadas por el Instituto Americano de la Construcción en Acero (AISC), y el Instituto Americano del Concreto (ACI). De esta manera se decidió emplear los estándares NDS publicados por el Consejo Americano de la Madera (AWC) como las normas técnicas para estructuras de madera.

1.3.3 Diseño para sismo.

Un sismo produce fuerzas laterales que deben ser resistidas por los edificios, de lo contrario se produce el colapso de las estructuras provocando pérdida de vidas, daño de contenidos y costos de reconstrucción. Para diseñar un edificio resistente a los sismos Bazán & Meli (2002) señalan que las estructuras deben poseer

“una rigidez adecuada para limitar sus desplazamientos laterales y para proporcionarle características dinámicas que eviten amplificaciones excesivas de la vibración; que posea resistencia a carga lateral suficiente para absorber las fuerzas de inercia inducidas por la vibración; y que tenga alta capacidad de disipación de energía mediante deformaciones inelásticas lo que se logra proporcionándole ductilidad” (p.30)

Siguiendo los pasos descritos por Bazán & Meli (2002) lo primero es definir el sistema estructural adecuado, seguido de realizar un análisis sísmico de acuerdo a la reglamentación local, después se realiza el dimensionamiento de las secciones, y finalmente se detallan las conexiones de la estructura.

En los últimos años se han realizado varias pruebas a escala real en mesas de vibración para evaluar la resistencia sísmica de los edificios de madera masiva, destacando una prueba de un edificio de madera contralaminada y una más de un sistema de marcos con un sistema de muros de cortante oscilantes postensados hechos de madera contralaminada. Ivanoff (2015) describe el primer estudio realizado en julio del 2009, donde se llevó a cabo una prueba de resistencia sísmica, simulando un terremoto de 7.2 grados en la escala 30think para un edificio de 6 plantas construido con madera contralaminada, en la plataforma E-Defense del Instituto Nacional Japonés de Ciencias de la Tierra y Prevención de Desastres. Después de la prueba se revisó el edificio y este no presentó daños estructurales. En la Figura 2 se puede apreciar la prueba.



Figura 2. Ensayo sísmico de un edificio de madera contralaminada en la plataforma E-Defense.
(AlaTown, 2015).

El segundo trabajo dirigido por Pei (2017), el cual sigue en proceso actualmente, busca generar tipologías de edificios de madera masiva que sean resilientes ante los eventos sísmicos, para esto se están realizando diversas pruebas de una estructura de dos niveles construida con marcos de madera laminada, losas de madera contralaminada, y un sistema de muros oscilantes postensados de madera contralaminada, unidos mediante diferentes conexiones metálicas las cuales absorbe la mayoría de las fuerzas laterales. En la siguiente Figura 3 se puede apreciar este ensayo.



Figura 3. Ensayo de muros oscilantes postensados de madera contralaminada (Colorado School of Mines, 2017)

1.3.4 Diseño por resistencia al fuego.

La madera tiene la característica de quemarse a una tasa predecible y de manera uniforme, de acuerdo con el AWC (2015) las caras expuestas al fuego de cualquier miembro estructural deben de sobredimensionarse el espesor suficiente para soportar el tiempo de incendio para el cual se está diseñando. El diseño para resistencia de incendios incluye tres tiempos principales, una hora, una hora y media, y dos horas. Para una resistencia al fuego de dos horas, la profundidad efectiva de carbonización está calculada en 81.28 mm, para madera sólida y madera laminada, en el caso de la madera contralaminada esta profundidad depende del espesor de sus láminas, por ejemplo, para un espesor de láminas de una pulgada y media, la profundidad de carbonización calculada para una resistencia al fuego de dos horas es de 91.44 mm. En la Figura 4 se puede apreciar el fenómeno de carbonización.



Figura 4. Comportamiento de la resistencia al fuego de una viga. 1) Sección residual; 2) Línea de carbonización calculada; 3) Profundidad calculada de carbonización; 4) Perfil de la sección original; 5) Radio de redondeo. (BSLC, 2017, p.29)

De acuerdo con Karacaibely & Douglas (2013), la resistencia al fuego de la estructura de un edificio está determinada en el IBC (2018) por el tipo de construcción y su clasificación de uso y ocupación. Los edificios de madera pertenecen al tipo IV, en el cual se especifica que cuando un edificio residencial cuenta con un sistema automático de rociadores en caso de incendio la altura máxima permitida es de cinco niveles, y la superficie construida máxima es de 21,426.69 m². En

caso de que el edificio no cuente con un sistema automático de rociadores la altura máxima se reduce a cuatro niveles y la superficie máxima a 1,904.51 m². Así mismo la resistencia al fuego de las paredes exteriores debe ser de dos horas, y de la estructura interior de una hora.

Con el objetivo de comprobar la resistencia al fuego de un edificio de madera masiva en condiciones lo más cercanas a la realidad, se han realizado algunas pruebas a escala real. La más representativa hasta el momento es la publicada por el AWC (2017), en la cual se analizaron 5 escenarios diferentes en un mismo edificio de madera contralaminada. En el primer escenario se incendió una habitación totalmente protegida por tableros de yeso, después de terminado el fuego no hubo carbonización significativa en la madera protegida. El segundo ensayo se configuro como el primero, pero se dejó expuesta un área de la madera contralaminada y se aumentó la cantidad de material combustible en la habitación, para la madera protegida el resultado fue igual que en el primer escenario, y el fuego de la madera expuesta se auto extinguió al formarse la capa de carbonización. En el tercer caso se dejaron dos paredes de madera contralaminada expuestas, en las cuales el fuego también se auto extinguió una vez formada la capa de carbonización. Para el cuarto y el quinto escenario se instalaron rociadores para extinguir el fuego, en un escenario se activó de manera automática al detectar el fuego, y en el otro se activó con un retraso de 23 minutos, en ambos casos el fuego se extinguió rápidamente y no hubo daños a la madera. En la Figura 5 se puede apreciar la prueba a escala real.



Figura 5. Prueba de resistencia al fuego en un edificio de madera contralaminada (Bland, 2017).

1.3.5 Diseño para durabilidad

Uno de los temores más comunes de quien no está familiarizado con la construcción con madera es la durabilidad de este material. Ante condiciones naturales a la intemperie es normal que la madera se deteriore y pierda su capacidad estructural en unos pocos meses, ya que es un material orgánico. Turbi (2015) indica que los factores que afectan la durabilidad de la madera son “la humedad, la luz solar, calor / frío, la abrasión causada por el viento o agentes biológicos, que pueden actuar solos o en combinación” (p.7).

Existen dos tipos de protección para la madera, la activa y la pasiva. La protección activa consiste en aplicar productos que crean una capa protectora interna o externa contra los factores que deterioran la madera. Estos aditivos deben cumplir con la norma ASTM D 1758, la cual evalúa su efectividad para proteger a la madera comparándola con una muestra sin protección. La protección pasiva consiste en diseñar el edificio de forma que la envolvente proteja la estructura de madera evitando el contacto con los factores que la deterioran. Sin embargo, la forma más efectiva de garantizar la durabilidad de una estructura de madera es diseñarla con ambos tipos de protección.

Es indispensable usar madera estufada para garantizar que el contenido de humedad sea menor al 12%, y no cubrir la madera con materiales que no permitan la transpiración, ya que de suceder esto el contenido de humedad se incrementa, permitiendo el crecimiento de los hongos xilófagos que causan la pudrición de la madera. Por ejemplo, la madera no se debe ahogar en concreto ya que este material no le permite transpirar adecuadamente. De igual modo, en la interface entre la cimentación y la estructura de madera se debe tener la precaución de no tener un contacto directo entre ambos materiales ya que la humedad puede subir por capilaridad, deteriorando las bases de las columnas o muros. Esto se puede lograr mediante el uso de conexiones metálicas que eleven en pocos milímetros los elementos estructurales de madera, evitando un contacto directo con la base.

En Norteamérica existen varios edificios de madera que tienen muchos de antigüedad y siguen aún en uso gracias a que fueron construidos con estos principios. En la Figura 6 se muestra un edificio de Toronto, el cual según Koo (2013), fue construido en 1895 con el sistema constructivo Brick and Beam.



Figura 6. 312 Adelaide Street West, Toronto. (Koo, 2013, p.1)

En el sitio Airbnb (2018) podemos encontrar fotografías de apartamentos en renta, que nos muestran el buen estado en el que aún se encuentran algunas de estas construcciones de la ciudad de Toronto, como la mostrada en la Figura 7.



Figura 7. Apartamento Brick and Beam en renta (Airbnb, 2018)

Otro ejemplo de este sistema constructivo es el mercado Pike Place Market de la ciudad de Seattle en los Estados Unidos, el cual se fundó en 1906 y su construcción quedó completada en 1922 (Pike Place Market Preservation and Development Authority, 2018). Cabe mencionar que esta estructura se encuentra enfrente del mar, por lo que ha estado expuesta por un siglo a la humedad ambiental y salinidad características de las costas, y aun así se preserva en funcionamiento hasta nuestros días. En la Figura 8 se puede apreciar el sistema constructivo de este mercado.



Figura 8. Estructura del mercado Pike Place Market, Seattle. (Elaboración Propia)

A nivel nacional, en Puebla se encuentra el auditorio de la Reforma, construido por el Arq. Abraham Zabludovsky en 1962 para conmemorar el centenario de la batalla de Puebla. Este edificio es un domo construido con vigas curvas de madera laminada. Durante algunos años el edificio estuvo abandonado pero recientemente se remodeló conservando su estructura de madera laminada, y ahora se usa para albergar eventos importantes del gobierno estatal (SC, 2016). En la Figura 9 se pueden apreciar el interior de este edificio.



Figura 9. Interior del Auditorio de la Reforma, Puebla (Milenio, 2014)

1.3.6 Ejemplos construidos

Uno de los primeros edificios de madera contralaminada fue el construido a finales del siglo XX en la universidad de Graz en Austria, lugar donde se inventó este tipo de paneles. Este edificio alberga el Centro de Tecnología de la Construcción (Schickhofer & Hasewend, 2000).



Figura 10. Exterior del centro del Centro de Tecnología de la Construcción, en Graz. Fuente: (TuGraz, 2016).

Un ejemplo de vivienda vertical a pequeña escala es el proyecto de madera contralaminada Carlisle Lane Flats, construido en el barrio céntrico de Waterloo en Londres, por el cual la oficina de arquitectura londinense Pringle Richards Sharratt, recibió el premio inglés Wood Award 2005. Se trata de un edificio de dos niveles, con cuatro departamentos de una habitación cada uno, diseñados por los arquitectos titulares del despacho para dos de sus hijos en edad universitaria. El otro par de departamentos fue construido para venta o renta, actividad muy lucrativa en Londres (PRS ARCHITECTS, 2005).



Figura 11. Fotografías de la construcción y el interior de Carlisle Lane Flats. (Ryan, Griffin, & Rice, 2015).

Este dinámico mercado inmobiliario de la capital británica, fue el escenario del nacimiento del primer desarrollo vertical de vivienda de más de 4 niveles construido con madera masiva, se trata de la torre Stadthaus en la calle Murray Grove, que cuenta con 9 pisos y 29 departamentos. El edificio fue propuesto en el 2007 por el despacho de arquitectos londinense Waugh Thistleton y completado en el 2009. La estructura tardó 7 semanas en ensamblarse y se utilizaron 926 m³ de paneles de Madera Contralaminada importados de Austria. La realización de esta obra, que rompió los límites preconcebidos de las construcciones de madera, generó un impulso global para el desarrollo de nuevos proyectos de Madera Masiva (WAUGH THISTLETON ARCHITECTS, 2009).



Figura 12. Fotografías del edificio Stadhaus en Londres. (KLH, 2009).

Fue así como el consejo de Hackney, en Londrés, le encargó en el año 2010 al despacho Karakusevic Carson Architects, un proyecto de vivienda social en renta, conocido como Bridport House, en el cual se utilizaron 1,578 m³ de paneles de madera contralaminada para construir dos

edificios adyacentes, de 8 y 5 niveles respectivamente. Este conjunto que alberga 41 departamentos, fue levantado en 14 semanas y concluido en el año 2011 (Karakusevic Carson Architects, 2016).



Figura 13. Fotografías del edificio Bridport House. (Ryan, Griffin, & Rice, 2015).

En el 2012 en Melbourne, Australia, se construyó el edificio Forté, de 10 niveles y 23 departamentos, en el que se emplearon 759 paneles de madera contralaminada importados de Austria, por vía marítima en 25 contenedores. Con 32.17 metros de altura se convirtió en el edificio más alto del mundo construido con madera contralaminada (Lend Lease, 2013).



Figura 14. Fotografías del edificio Forté. (Lend Lease, 2013).

Un año más tarde, en 2013, el despacho de Vancouver KMBR Architects, edificó una escuela primaria en Surrey, Canadá, en la cual, para la fabricación de losas, rescataron la técnica de madera laminada clavada, usada más de cien años atrás en edificios industriales de Vancouver,

como The Landing de 1905. Para el resto de la estructura, que se levantó en cinco días, usaron postes y vigas de madera laminada (STRUCTURE CRAFT, 2013).



Figura 15. Fotografías de la escuela primaria Surrey. (STRUCTURE CRAFT, 2013).

Cerca de ahí, en la Universidad de Prince George, British Columbia, en el año 2014, el arquitecto originario de Vancouver, Michael Green diseñó y construyó el edificio que alberga el Centro para el Diseño e Innovación de la Madera, en el cual pudo aplicar los resultados de varias de sus investigaciones sobre la construcción con Madera Masiva. El edificio tiene 8 niveles y 29.26 metros de altura, cuenta con una estructura mixta, los postes y vigas son de madera laminada, las losas y los muros se fabricaron con madera contralaminada y en los parteluces emplearon madera microlaminada (Hooper, 2015).



Figura 16. Fotografías del Centro para el Diseño e Innovación de la Madera. (Hooper, 2015)

En 2015, de nueva cuenta en Londres, el despacho Hawkins/Brown, terminó la construcción de Wenlock Road, un edificio de usos mixtos, con 10 plantas y 6,750 m², de los cuales 1,190 m² son para comercio y el resto contiene 50 departamentos. El desarrollo con una estructura híbrida

de acero, un núcleo de concreto y 1,400 m³ de paneles de madera contralaminada, importados desde Austria (BINDERHOLZ, 2015).



Figura 17. Fotografías de Wenlock Road en Londres. (BINDERHOLZ, 2015)

En noviembre del 2015, en el campus de Vancouver de la Universidad de British Columbia, la oficina de arquitectura vancouverense Acton Ostry Architects, y el despacho Architekten Hermann Kaufmann de Austria comenzaron la construcción del edificio de residencias estudiantiles Brock Commons, de 18 plantas con capacidad para 404 de sus estudiantes. Se trata de una estructura mixta, con la planta baja y los núcleos de las circulaciones verticales construidos con concreto, el resto de las 17 plantas se armó con columnas de madera laminada y losas de madera contralaminada. (ACTON OSTRY ARCHITECTS, 2016).



Figura 18. Edificio Brock Commons. (ACTON OSTRY ARCHITECTS, 2016).

En 2016, Michael Green comenzó la construcción del edificio comercial y de oficinas Minneapolis T3. Esta obra consta de 7 niveles y 20,438 m², está siendo edificada con postes y vigas de Madera Laminada y losas de Madera Laminada Clavada. Actualmente es el edificio de Madera masiva más grande en volumen de madera de los Estados Unidos (MG ARCHITECTS, 2018).



Figura 19. Edificio Minneapolis T3. (MG ARCHITECTS, 2018).

En Portland, Oregón, se están desarrollando varios proyectos de madera masiva, en 2016 se construyó el edificio Albina Yard, el cual es un espacio de oficinas con comercio en planta baja. La estructura consta de marcos de madera laminada y losas de madera contralaminada (LEVER ARCHITECTURE, 2018).



Figura 20. Edificio Albina Yard (LEVER ARCHITECTURE, 2018)



Figura 21. Interior del edificio Albina Yard (Elaboración Propia)

También en Portland, Oregón, en 2018 se terminó la construcción del edificio Carbon 12. Se trata de un conjunto de departamentos con una planta baja comercial, y en total consta de ocho niveles, con lo que actualmente es el edificio de madera masiva más alto del continente. Su estructura contiene un núcleo de marcos de acero contraventeados, rodeado de una segunda estructura de marcos de madera laminada, y sus losas son de madera contralaminada (Carbon 12, 2018).



Figura 22. Edificio de apartamentos Carbon 12 (Carbon 12, 2018).

Entre los proyectos futuros de Portland, Oregón, se encuentra el edificio de doce niveles Framework, su construcción está planeada para comenzar en el primer semestre de 2018, y una vez terminado se convertirá en el edificio más alto de madera masiva del continente. La característica principal de este proyecto es que toda su estructura será de madera, además será un espacio de usos mixtos, con comercio en planta baja, oficinas en los siguientes niveles, y sesenta unidades de vivienda social (LEVER ARCHITECTURE, 2017).



Figura 23. Proyecto Framework, (LEVER ARCHITECTURE, 2017).

Otro proyecto que está a punto de empezar a construirse es el edificio de 20 niveles y usos mixtos, conocido como HAUT en la ciudad de Ámsterdam, Holanda. Este edificio está diseñado por la firma Team V Architects y la empresa ARUP. La estructura de este proyecto consta de marcos de madera laminada con losas y muros de cortante de madera contralaminada. Una vez terminado tendrá una altura de 73 metros y se convertirá en el edificio más alto del mundo construido con madera masiva. En la Figura 24 se puede apreciar el proyecto HAUT.



Figura 24. Proyecto HAUT (HAUT, 2018).

Esta evolución de proyectos de madera masiva, coincide con el diagnóstico de Brandner (2013), según el cual la producción mundial de madera contralaminada crece a tasas del 15% a 20% anual. En Gráfico 1 se puede apreciar la gráfica del crecimiento de madera contralaminada

asociada a las investigaciones realizadas, en la cual se aprecia como entre el 2007 y el 2009 se encuentra el punto de inflexión donde la producción se incrementa rápidamente. Este quiebre se debe principalmente al edificio Stadhaus en Londres, el cual sirvió como inspiración para los demás edificios construidos después.

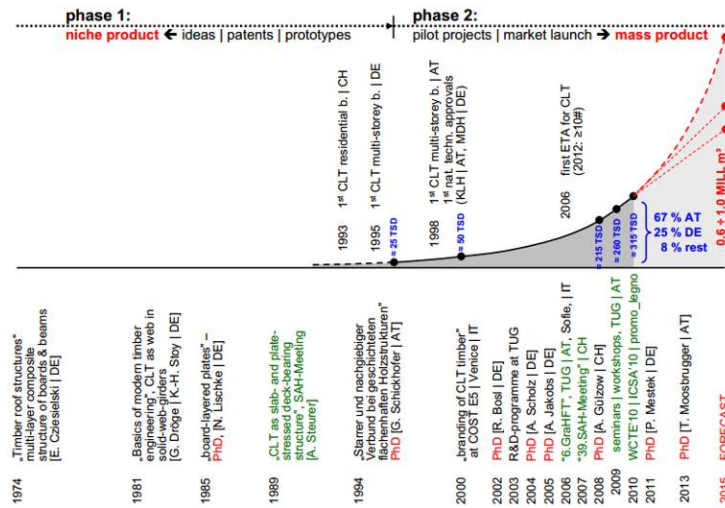


Gráfico 1. Crecimiento en la producción de madera contralaminada (Brandner, 2013).

De acuerdo con Horx-Strathern et. al (2017) los edificios residenciales de tres a seis niveles serán el motor de crecimiento de estos sistemas constructivos, gracias a los beneficios ecológicos y financieros, así como a que es este sector donde se está realizando la mayor parte de la investigación y desarrollo. En el Gráfico 2 se puede apreciar el crecimiento histórico en las ventas de madera contralaminada, así como las proyecciones a futuro.

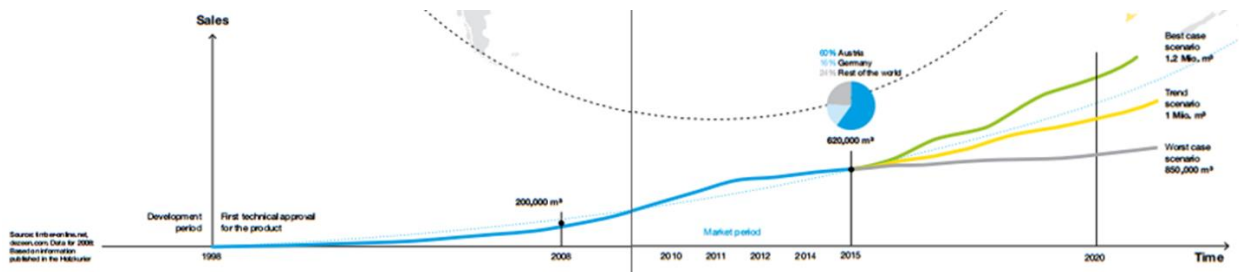


Gráfico 2. Evolución y proyección de ventas de madera contralaminada (Horx-Strathern, 2017).

1.3.8 Estudios previos sobre madera masiva en América Latina

En el Instituto de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, en Uruguay, como parte de los trabajos de una tesis doctoral, se han fabricado algunos paneles de madera contralaminada con madera de pino de una clase resistente menor a la C14. El objetivo de este estudio es aprovechar la madera que actualmente no se usa en la industria del Uruguay (FING, 2015). En la Figura 25 se pueden ver estos paneles.



Figura 25. Proceso de fabricación de paneles de madera contralaminada en Uruguay. (FING, 2015)

Un trabajo más completo es el que realizó un grupo de investigadores del Departamento de Ingeniería en Obras Civiles de la Universidad de Santiago de Chile, titulado Sistema Constructivo en Madera Contralaminada para Edificios. El objetivo de este trabajo es proponer “una tipología de edificación de mediana altura utilizando CLT, la que tiene carácter de innovación tecnológica, pues aún no se ha utilizado en nuestro país” (González et. al, 2015). Para este trabajo se fabricaron varios paneles de madera contralaminada tipo muro y tipo losa utilizando madera de pino radiata, los cuales fueron sometidos a ensayos de cargas laterales, compresión y flexión. Además, la publicación incluye un manual para fabricación de este tipo de paneles, algunas metodologías para realizar los cálculos estructurales, y una propuesta de normatividad para la fabricación de los mismos. Como conclusiones de este estudio se menciona que “el sistema constructivo estudiado es de alta rigidez y gran capacidad para resistir solicitaciones horizontales y verticales, hecho que permite ratificar su característica sismoresistente ya informada en estudios realizados en el extranjero empleando otras especies forestales” (González et. al, 2015, p.247). En la Figura 26 se puede ver un ensayo a flexión de este estudio.



Figura 26. Ensayo de flexión en panel de CLT tipo losa en Chile. (González et. al, 2015)

De acuerdo con CORMA (2015), un grupo de investigadores de la Universidad del Bío Bío en Chile, desarrollaron la primera vivienda de madera contralaminada con un diseño pasivo en la localidad de San Pedro de la Paz. Según Madera 21 (2017), además de esta vivienda, ya se han construido otros tres edificios con madera contralaminada, y esperan construir para el 2020 un edificio de seis niveles con este sistema constructivo. En la Figura 26 se puede ver la primera casa de madera contralaminada de Latinoamérica.



Figura 27. Primera casa de madera contralaminada en Chile (CORMA, 2015).

1.4 Hipótesis

El sistema constructivo de madera masiva tiene altas posibilidades de desarrollarse en Zapopan y competir comercialmente con los sistemas constructivos convencionales, si se puede validar que un edificio de usos mixtos de mediana altura construido con madera masiva cumple al menos con los siguientes criterios:

- Se puede fabricar con madera nacional legal y certificada.
 - Cumpliendo con el diseño por sismo y viento requerido en la normativa aplicable.
 - Cumpliendo con la resistencia al fuego indicada en la normativa aplicable.
 - Resultando en un costo similar a una estructura convencional.

Y si se puede evaluar positivamente la aceptación y el posible impacto social del sistema constructivo de madera masiva explorando la viabilidad de que:

- El mercado potencial lo acepte después de que conoce su funcionamiento.
- Su uso propicie un manejo forestal sustentable por parte de los productores de la madera.
- Pueda generar beneficios económicos en las comunidades productoras forestales.

1.5 Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es avanzar en la maduración tecnológica de los paneles de madera laminada, madera contralaminada y madera laminada clavada, fabricados con madera certificada mexicana, a partir de estudios realizados sobre la madera de San Juan Nuevo, demostrando que satisface teóricamente los siguientes objetivos particulares

- Se pueden fabricar con la madera certificada del bosque de San Juan Nuevo.
 - Cumpliendo con el diseño por sismo y viento requerido en la normativa aplicable.
 - Cumpliendo con la resistencia al fuego indicada en la normativa aplicable.

- Resultando en un costo similar a una estructura convencional.

Y evaluar la aceptación y el posible impacto social del sistema constructivo de madera masiva explorando la viabilidad de que:

- El mercado potencial lo acepte después de que conoce su funcionamiento.
- Su uso propicie un manejo forestal sustentable por parte de los productores de la madera.
- Pueda generar beneficios económicos en las comunidades productoras forestales.

2. Metodología

Este trabajo de obtención de grado se dividió en dos partes para poder evaluar los criterios planteados en la hipótesis y objetivo. La primera es una investigación cuantitativa con un enfoque descriptivo que busca demostrar la viabilidad estructural de un edificio de vivienda vertical de madera masiva construido con madera nacional legal y certificada, que cumpla con el reglamento de construcción de Zapopan. A su vez, esta primer parte se dividió en siete subtemas. Para los puntos 1, 3 y 4 se contó con la ayuda de dos equipos de alumnos de licenciatura del Proyecto de Aplicación Profesional (PAP) sobre Tecnología apropiada para la generación de sistemas constructivos, durante los periodos de verano y otoño 2017.

3. El primer paso fue clasificar la muestra de madera por su densidad en dos clases resistentes, para poder compararlas con las clases resistentes para coníferas de la NTCM (2004) vigentes al inicio de la investigación.
4. Después se realizó una serie de ensayos de laboratorio para obtener las características mecánicas estructurales de una muestra de madera obtenida por conveniencia del aserradero certificado por FSC de San Juan Nuevo, Michoacán, comparando los resultados con la información disponible en la bibliografía, en base a la densidad de las probetas.
5. El tercer subtema consistió en procesar la información obtenida de las características mecánicas estructurales de la muestra de madera para obtener los esfuerzos permisibles de cada clase resistente.

6. El cuarto paso involucró trabajo manual en taller para fabricar con las herramientas disponibles comercialmente elementos estructurales de madera masiva.
7. Posteriormente se utilizaron los elementos estructurales realizar ensayos de laboratorio con el objetivo de validar los valores de diseño obtenidos en el paso 3 mediante los métodos de cálculo de la normativa estadounidense.
8. Con el aprendizaje del proceso de fabricación se cotizó el equipo necesario para producir de manera comercial los elementos estructurales de madera masiva elegidos, para posteriormente calcular cual sería el costo directo del m³ de estos.
9. Después, se procesó toda esta información en el software de elementos finitos RFEM para definir la geometría de un edificio de vivienda vertical de madera masiva, diseñado estructuralmente para cumplir con el diseño por sismo, viento y resistencia al fuego de la normatividad aplicable. Finalmente, se diseñó en el mismo software un edificio igual pero en acero, para tener una primera aproximación comparativa del costo de un edificio de madera masiva en comparación con los sistemas constructivos convencionales.

La segunda parte de la investigación consistió en explorar mediante el Paradigma Interpretativo-Construccionista cuales son los factores cualitativos y subjetivos que se tienen en torno a la construcción con madera, como son las ideas preconcebidas, opiniones, inquietudes y miedos, que se tienen desde la perspectiva de los productores forestales, y los clientes potenciales. Esta información se procesó para conocer la aceptación y el posible impacto social del sistema constructivo de madera masiva.

La resultante metodológica es un abordaje mixto que combina estrategias complementarias de aproximación a los objetos de investigación de este proyecto.

2.1 Cuadro de operacionalización de variables.

En la Tabla 1 se muestra el cuadro de operacionalización de variables, donde se explica la estructura de las dos partes que componen esta investigación, con sus variables e indicadores, así como las técnicas de investigación con las cuales se recopiló la información.

Categoría	Variables	Indicadores	Revisión documental	Cuestionario	Análisis inferencial	Experimento
Viabilidad estructural del sistema constructivo de madera masiva con madera nacional certificada	Clasificación por densidad de Pinus spp. proveniente del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán.	Densidad mínima (kg/m ³)				
		Densidad media (kg/m ³)				
		Densidad máxima (kg/m ³)				
	Características mecánicas estructurales de Pinus spp. proveniente del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán	Módulo de elasticidad (N/mm ²)				
		Resistencia a la flexión perpendicular a las fibras (kg/mm ²)				
		Resistencia a la tensión paralela a las fibras (N/mm ²)				
		Resistencia a la compresión paralela a las fibras (N/mm ²)				
		Resistencia al cortante (N/mm ²)				
	Determinación de los esfuerzos permisibles de diseño estructural para la muestra de Pinus spp. proveniente del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán	Flexión (N/mm ²)				
		Tensión paralela (N/mm ²)				
		Tensión perpendicular (N/mm ²)				
		Compresión paralela (N/mm ²)				
		Compresión perpendicular (N/mm ²)				
		Cortante (N/mm ²)				
		Módulo de elasticidad paralelo medio (N/mm ²)				
		Módulo de elasticidad paralelo 5°-percentil (N/mm ²)				
		Módulo de elasticidad perpendicular medio (N/mm ²)				
		Módulo transversal medio (N/mm ²)				
		Densidad característica (kg/m ³)				
		Densidad media (kg/m ³)				
	Validación de los esfuerzos permisibles	Capacidad de carga de un muro de madera contralaminada (N)				
		Capacidad de carga de una columna de madera laminada encolada (N)				
		Esfuerzo máximo de flexión de una viga de madera laminada encolada (N/mm ²)				
		Esfuerzo máximo de cortante de una viga de madera laminada encolada (N/mm ²)				
		Esfuerzo máximo de flexión de una losa de madera laminada clavada (N/mm ²)				
		Esfuerzo máximo de cortante de una losa de madera laminada clavada (N/mm ²)				
		Esfuerzo máximo de flexión de una losa de madera contralaminada (N/mm ²)				
		Esfuerzo máximo de cortante de una losa de madera contralaminada (N/mm ²)				

Perspectivas cualitativas y subjetivas de los actores sociales, en torno a la construcción de madera	Estimación del costo por m ³ de madera masiva colocada en obra.	Maquinaria necesaria para el taller (Precio)				
		Costo diario de operación del taller (Costo/jor)				
		Rendimiento diario de producción de madera laminada clavada (m ³ /jor)				
		Rendimiento diario de producción de madera laminada encolada (m ³ /jor)				
		Costo de producción de madera laminada clavada (Costo/m ³)				
		Costo de producción de madera laminada encolada (Costo/m ³)				
		Costo directo de madera laminada clavada puesto en obra (Costo/m ³)				
		Costo directo de madera laminada encolada puesto en obra (Costo/m ³)				
	Modelo de sistema de un edificio de marcos contraventeados de Madera Masiva	Volumen de losas de madera laminada clavada (m ³)				
		Volumen de columnas y vigas de madera laminada encolada (m ³)				
		Costo de la estructura de madera (Precio)				
		Área de losas de concreto reforzado (kg)				
		Peso de la estructura de acero (kg)				
		Costo de la estructura de acero (Precio)				
	Expectativas sociales y económicas de los proveedores forestales	Oferta de madera certificada en México				
		Precios por pt (pesos)				
		Proceso de estufado				
		Logística de pedidos y fletes				
		Proceso de certificación				
		Disposición a implementar programas de desarrollo sustentables en la comunidad				
Percepciones, miedos y aspiraciones de los usuarios potenciales		Percepciones sobre las construcciones de madera				
		Impresiones sobre el sistema constructivo de madera masiva				
		Espacios necesarios para vivienda nueva				
		Equipamiento necesario para vivienda nueva				
	Disponibilidad a pagar por servicios ambientales en las comunidades forestales					

Tabla 1. Cuadro de operacionalización de variables (Elaboración propia).

3. Viabilidad estructural del sistema constructivo de madera masiva con madera nacional certificada.

Este capítulo se divide en siete subcapítulos necesarios para demostrar la viabilidad estructural del sistema constructivo de madera masiva, empleando madera nacional certificada y

cumpliendo los requerimientos de diseño del reglamento de construcción de Zapopan. En cada uno de los subcapítulos se explica la metodología particular empleada para obtener la información, después se describen los resultados obtenidos y finalmente se hace una interpretación de los hallazgos aprovechables.

3.1 Clasificación por densidad de Pinus spp. proveniente del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán.

A continuación se explican la metodología empleada para clasificar por densidad la muestra de madera nacional certificada, se describen los resultados obtenidos y se hace una interpretación de los hallazgos aprovechables.

3.1.1 Metodología

Se eligió por conveniencia usar una muestra de madera de Pinus spp. de esta comunidad por tres razones, la primera es el amplio reconocimiento del manejo sustentable de los bosques de esta comunidad, así como la información científica disponible al respecto. La segunda razón fue que tanto en la revisión bibliográfica como a decir de los directivos del aserradero no se había realizado ningún estudio sobre las características mecánicas estructurales de la madera de la comunidad. Finalmente, la logística del envío de la madera resultó muy factible gracias a que en la ciudad se encuentra un distribuidor de madera de la comunidad, lo que ayudo a reducir el costo del flete, aprovechando los envíos programados. Además de conseguir la madera para las probetas de madera, también se encargó el material necesario para fabricar los elementos estructurales que serían ensayados después. En total se obtuvieron 30 tablas de 1 ½" x 4" x 8' y 55 tablas de 1" x 4" x 8', las cuales fueron cepilladas en el taller del distribuidor, entregándonos espesores reales de 33.63 mm y 20 mm respectivamente.

El reglamento de construcción de Zapopan no define cuales son las normas técnicas para construcción con madera que se deben usar. Sin embargo, tanto para acero como para concreto reforzado pide usar los reglamentos estadounidenses. Por esta razón se obvió que había que utilizar los estándares estadounidenses para este trabajo. De esta manera inicialmente se planeó caracterizar la madera de acuerdo a la norma ASTM D-143 la cual establece los procedimientos de ensayo

necesarios para tal fin. Siguiendo las indicaciones del ASTM (2000) las probetas necesarias para los ensayos de flexión y compresión necesitan ser de 2" x 2" x 30", y 2" x 2" x 8" respectivamente. Para fabricar estas probetas se pidieron 3 polines de 3" x 3" x 8'.

El único documento oficial mexicano que contiene valores de diseño para coníferas mexicanas son las NTCM. Al momento de iniciada la investigación la última versión de estas normas era la publicada por el Gobierno del Distrito Federal (2004), en la cual se clasifica la madera de coníferas en dos clases resistentes, clase alta y clase baja. Por esta razón se procedió a clasificar de igual manera la muestra de madera de San Juan Nuevo. Para esto se numeraron todos los elementos, se midieron sus dimensiones y se pesaron para obtener la densidad de cada uno de ellos. De igual manera se verifico con el uso de un higrómetro que todos los elementos tuvieran un contenido de humedad menor al 12%. Una vez condensados los datos en una hoja de cálculo se determinó cual era el promedio de densidad, ubicando los elementos con una densidad menor en la clase baja y los de una densidad mayor en la clase alta. En la Figura 28 se puede apreciar el proceso de clasificación por densidad. Para consultar los detalles metodológicos ver el Anexo 1.



Figura 28. Proceso de clasificación por densidad (Elaboración propia).

3.1.2 Descripción de Resultados

El promedio de la densidad de las tablas fue de 567.87 kg/m³, 49% de estos elementos fueron ubicados en la clase baja y 51% en la clase alta. En el caso de los polines se observó que ninguno tenía una densidad menor a 595.98 kg/m³, por lo que se decidió ubicarlos todos en la clase alta, como parte del total de la muestra de madera. En la Tabla 2 se pueden apreciar los demás datos de la clasificación por densidad de la muestra de madera.

Tipo	Piezas 4"	Espesor	Densidad 55ethin (kg/m ³)	Densidad máxima (kg/m ³)	Densidad promedio (kg/m ³)	Clase baja	Clase alta
Tablas	85	20 a 32 mm	421.33	844.42	567.86	49%	51%
Polines	3	50 mm	595.98	845.18	712.89	0%	100%

Tabla 2. Clasificación por densidades Pinus spp. proveniente del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán (Elaboración Propia).

3.1.3 Interpretación de Hallazgos

Debido a la poca cantidad de polines no se tuvo la misma distribución de densidades que se logró con las tablas. El realizar la caracterización mecánica estructural con estos elementos no representaría el comportamiento del total de la muestra, sin embargo se decidió utilizar el material para realizar ensayos preliminares. Otra desventaja identificada fue el desconocimiento de a que especie pertenecían cada uno de los elementos, ya que una vez aserrada la madera es casi imposible su identificación visual.

No obstante, de acuerdo con Esteban López, gerente del aserradero de San Juan Nuevo, especies que producen son solamente de las especies Pinus pseudostrobus, P. leiophylla y P. montezumae (López, 2017, Comunicación personal).

3.2 Características mecánicas estructurales de Pinus spp. proveniente del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán.

A continuación se explican la metodología empleada para obtener las características mecánicas estructurales de la muestra de madera nacional certificada, se describen los resultados obtenidos y se hace una interpretación de los hallazgos aprovechables.

3.2.1 Ensayos de flexión y compresión de acuerdo a la norma ASTM D-143.

A continuación se explican la metodología empleada para realizar los ensayos a flexión perpendicular a las fibras y compresión paralela a las fibras de acuerdo a la norma ASTM D-143, se describen los resultados obtenidos y se hace una interpretación de los hallazgos aprovechables.

3.2.1.1 Metodología

Se destinaron los polines de 3" x 3" x 8" para obtener las probetas de madera necesarias para realizar las pruebas preliminares de flexión perpendicular a las fibras y compresión paralela a las fibras de acuerdo a la norma ASTM D-143. En este estándar el ASTM (2000) pide probetas libres de defectos de 2" x 2" x 30" para las pruebas de flexión, y de 2" x 2" x 8" para las pruebas de compresión. De acuerdo con esta norma los desplazamientos de las probetas deben medirse con un extensómetro, pero debido a que el laboratorio no contaba con esta herramienta se decidió usar los valores arrojados por la prensa. Las probetas se extrajeron de los polines cortándolos longitudinalmente en una sierra circular y transversalmente en una sierra tronadora. Se obtuvieron un total de quince probetas, seis para flexión y ocho para compresión. Se detectó que tres probetas de cada grupo contenían algún tipo de defecto, pero se decidió ensayar todos los especímenes de flexión y seis de compresión, incluyendo los que contenían defectos para poder comparar su comportamiento. Para realizar los ensayos se usó una prensa universal de cien toneladas. En la Figura 29 se muestra la configuración de los ensayos. Para consultar los detalles metodológicos ver los Anexos 2 y 3.



Figura 29. Configuración de los ensayos a flexión y compresión según la norma ASTM D-143 (Elaboración propia).

3.2.1.2 Descripción de Resultados

En ambos ensayos se pudo observar la relación que existe entre la densidad con los valores de resistencia a la flexión y compresión obtenidos, también fue notorio como las probetas que presentaban defectos tuvieron valores de resistencia más bajos que las que eran libres de defectos. En las Tablas 3 y 4 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos.

Probeta	C.H. %	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a la flexión (N/mm ²)	Módulo de elasticidad (N/mm ²)
Grupo con defectos				
Probeta 2	7.90%	583.077	42.59	6,197.75
Probeta 5	8.00%	666.095	65.99	10,523.58
Probeta 1	9.60%	713.124	93.18	11,336.07
Grupo sin defectos				
Probeta 3	8.50%	595.28	64.75	6,618.88
Probeta 4	7.70%	672.55	87.80	10,391.50
Probeta 6	7.40%	691.93	92.78	11,314.16

Tabla 3. Resultados de los ensayos a flexión (Elaboración propia).

Probeta	Densidad natural (kg/m ³)	CH %	Resistencia a la Compresión Paralela (N/mm ²)	MOE en Compresión Paralela (N/mm ²)
Grupo con defectos				
Probeta 5	608.47	7.40%	34.65	4349.51
Probeta 1	845.18	8.70%	48.00	7045.98
Probeta 4	822.45	6.40%	49.19	7184.21
Grupo sin defectos				
Probeta 2	595.98	7.00%	44.82	5657.97
Probeta 6	693.10	6.00%	55.78	7841.20
Probeta 3	712.13	9.20%	58.74	7196.88

Tabla 4. Resultados de los ensayos en compresión (Elaboración propia).

Sin embargo, en cuanto al módulo de elasticidad no se presentaron diferencias significativas en el grupo con defectos, pero sí por la densidad de las probetas. También fue evidente que los valores obtenidos del módulo de elasticidad en compresión fueron significativamente menores que los obtenidos para el módulo de elasticidad en flexión.

3.2.1.2 Interpretación de hallazgos

Los valores obtenidos de resistencia a flexión y compresión se muestran congruentes con la información disponible en la bibliografía, sin embargo los resultados inusuales del módulo de elasticidad en compresión indicaron que algo podría estar fallando en la prueba. En los Gráficos 3 y 4 se puede apreciar la comparación de los valores obtenidos con la información publicada por Sotomayor et. al (2003) para las especies que probablemente conforman la muestra de madera obtenida del bosque de San Juan Nuevo.

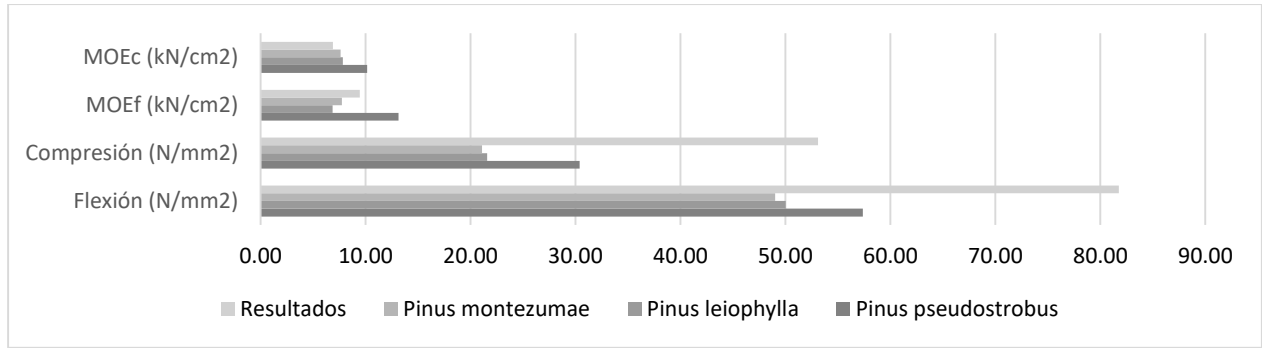


Gráfico 3. Comparación de resultados obtenidos con la norma ASTM D-143 y los publicados por Sotomayor et. al, (2003), (Elaboración Propia).

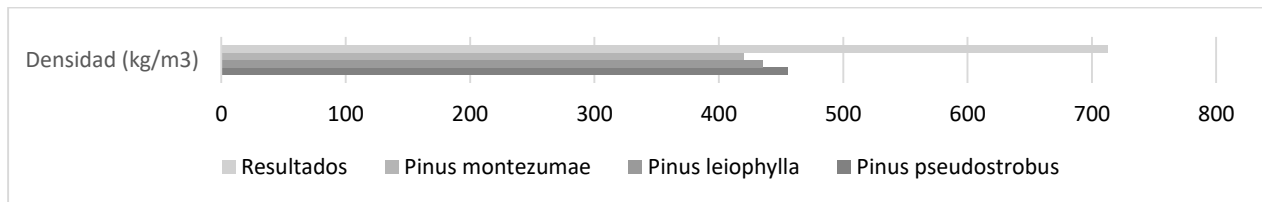


Gráfico 4. Comparación de la densidad de las probetas y los publicados por Sotomayor et. al, (2003), (Elaboración Propia).

En estos gráficos se puede apreciar como los resultados obtenidos en los ensayos son superiores a lo reportado por Sotomayor et. al (2003), esta diferencia se explica probablemente porque las probetas que empleamos eran de una densidad más alta al promedio de la muestra de madera, y seguramente en los otros ensayos hubo una mayor variedad de densidades. También podemos ver que no es congruente que ambos módulos de elasticidad sean menores a los publicados, siendo que se obtuvieron resistencias a flexión y compresión mayores que las publicadas. Esto se puede deber a que los polines probablemente pertenecían solamente a la especie *Pinus pseudostrobus*, y a que hubiera una diferencia significativa entre las lecturas de desplazamiento de la prensa y las que se hubieran obtenido con el uso de los extensómetros requeridos por la norma. Por esta razón se decidió utilizar las probetas de compresión en un nuevo ensayo donde se midiera el desplazamiento de forma independiente para averiguar donde se encontraba el error.

3.2.2 Ensayos de compresión para determinar el MOEc con medición independiente del desplazamiento.

A continuación se explican la metodología empleada para el ensayo de compresión para obtener el módulo de elasticidad en compresión midiendo el desplazamiento en forma independiente a la prensa, de acuerdo a la norma ASTM D-143, se describen los resultados obtenidos y se hace una interpretación de los hallazgos aprovechables.

3.2.2.1 Metodología

El primer paso fue realizar un ensayo a compresión con las mismas características que los anteriores pero añadiendo un dispositivo de medición externo, dispuesto de tal manera que se pudiera videografiar de forma simultanea los resultados de este y los arrojados por la prensa universal, con el objetivo de establecer si había alguna diferencia. Posteriormente se realizaron dos ensayos más, donde se clavaron a las probetas dos guías de madera a una distancia de una pulgada de cada uno de los extremos, esto con el objetivo de medir solamente la deformación del segmento central, tal como lo marca la norma ASTM D-143. En la Figura 30 se muestra la configuración de ambos pasos. Para consultar los detalles metodológicos ver el Anexo 4.



Figura 30. Ensayo adaptado para obtener el MOEc (Elaboración propia).

3.2.2.1 Descripción de resultados

En la videograbación se observó que la medición independiente del desplazamiento coincidió con la reportada por la prensa universal hasta los 2.5 mm correspondientes a una fuerza aplicada de 150 kg, a partir de ahí el desplazamiento arrojado por la prensa aumentó más rápido que el medido independientemente. En la medición independiente de 3 mm la prensa mostró un desplazamiento de 3.44 mm.

Los resultados del módulo de elasticidad en compresión fueron significativamente mayores a los calculados con el desplazamiento arrojado por la prensa universal. En la Tabla 5 se muestran los resultados del módulo de elasticidad en compresión.

Probeta	Fc (N/mm ²)	MOEc (N/mm ²)
1	55.96	12341.11
2	41.99	17031.42

Tabla 5. Resultados del MOEc.

3.2.2.1 Interpretación de Hallazgos

Con la evidencia de la videograbación se comprobó que había una diferencia significativa en las mediciones del desplazamiento que afectaban el cálculo de los módulos de elasticidad. Los nuevos resultados del MOEc fueron coincidentemente mayores que los publicados por Sotomayor et. al (2003) para la especie *Pinus pseudostrobus*, considerando que se utilizaron probetas de alta densidad y que los resultados de la resistencia a la compresión también fueron mayores a los publicados en el estudio referido. En el Gráfico 5 se pueden apreciar los nuevos resultados.

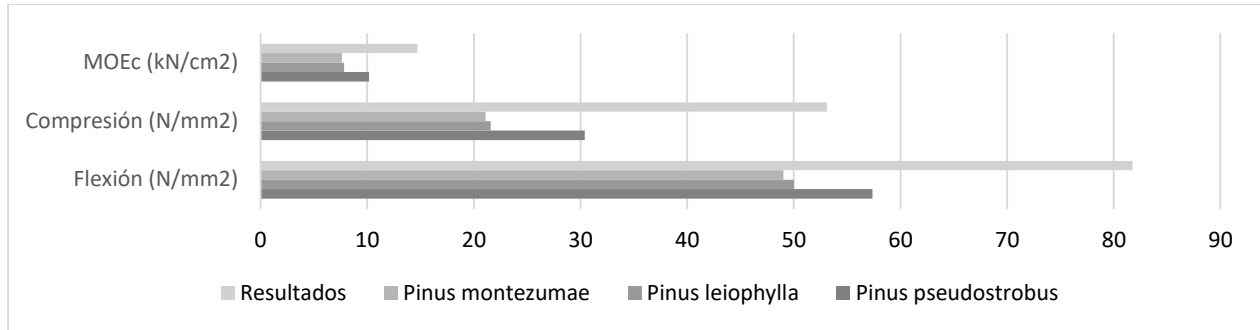


Gráfico 5. Comparación de resultados con la medición independiente del desplazamiento, (Elaboración propia).

3.2.3 Ensayos de flexión, compresión, tensión y cortante de acuerdo a la norma UNE EN-408.

A continuación se explican la metodología empleada para realizar los ensayos a flexión perpendicular a las fibras, tensión paralela a las fibras, compresión paralela a las fibras y cortante de acuerdo a la norma UNE EN-408, se describen los resultados obtenidos y se hace una interpretación de los hallazgos aprovechables.

3.2.3.1 Metodología

Se tomó la decisión de realizar una segunda ronda de ensayos para caracterizar la muestra de madera empleando la normativa europea UNE EN-408, debido a las siguientes dos razones. La primera fue que la norma europea permite usar probetas de diferentes medidas siempre que se guarden las relaciones indicadas en la misma, esto facilitó el empleo de las tablas de 33.63 mm de espesor y evitó la compra de nuevo material. Y la segunda se debió a que ya teníamos la clasificación por densidades de la muestra y podíamos seleccionar fácilmente de entre las tablas una muestra similar para los ensayos.

De entre las tablas de 33.63 mm de espesor que sobraron de la fabricación de los elementos estructurales se eligieron especímenes que representaran en la medida de lo posible la variabilidad de las densidades de la muestra, con el objetivo de obtener las características mecánicas estructurales de cada clase resistente, usando las ecuaciones que especifica la norma UNE EN-408.

Para los ensayos a flexión se fabricaron 10 probetas de 33.63 mm x 95.04 mm x 620.18 mm. La norma UNE EN-408 especifica que se deben aplicar dos cargas distribuidas a los tercios del claro, a diferencia de una carga central con la norma ASTM D-143. Esta configuración resulto más adecuada para medir el módulo de elasticidad ya que permitió colocar el dispositivo de medición del desplazamiento de forma sencilla, para esto se fabricó un marco metálico que tuviera una altura mayor a la del dispositivo de manera que se pudiera medir el centro de la capa de compresión de la probeta.

Cada probeta se ensayó primero hasta una fuerza de entre 1800 N y 2000 N, midiendo de forma independiente el desplazamiento, con el objetivo de calcular el módulo de elasticidad en flexión. Posteriormente se retiraron el dispositivo y la carga, volviéndose a ensayar por segunda vez hasta la ruptura para obtener el valor de resistencia de flexión. En la Figura 31 se muestra la configuración de estos ensayos.



Figura 31. Ensayos para determinar el MOE y la capacidad de flexión (Elaboración propia).

Para los ensayos a tensión se fabricaron 10 probetas con dimensiones libres entre mordazas de 26.4 mm x 33.31 mm x 21.95 mm, las cuales tenían un par de topes en los extremos para garantizar que se atoraran en las mordazas y así evitar un desplazamiento sin esfuerzo. En la Figura 32 se muestran las probetas y la configuración del ensayo.



Figura 32. Probetas y configuración de ensayos a tensión (Elaboración propia).

En los ensayos a compresión se utilizaron 11 probetas de 33.63 mm x 95.04 mm x 202.58 mm. En la Figura 33 se muestra la configuración del ensayo a compresión. Cabe mencionar que no se realizó la medición del módulo de elasticidad en compresión debido que en la revisión bibliográfica de la norma UNE EN-338 (2009) se especifica que el valor característico del módulo de elasticidad de la clase resistente es el obtenido en el ensayo de flexión.



Figura 33. Ensayos a compresión paralela a las fibras (Elaboración propia).

Finalmente, se hicieron dos probetas para los ensayos de cortante de 32 mm x 55 mm x 300 mm. Este ensayo fue el más complicado porque se necesita una preparación más sofisticada que los anteriores, la norma UNE EN-408 requiere que a la probeta se le peguen con un adhesivo epóxico dos placas de metal biseladas y que se disponga como si se fuera a realizar un ensayo a compresión, pero en un ángulo de 14 grados, por lo que además fue necesario fabricar dos placas con un biselado longitudinal de 14 grados, de madera que se pudiera colocar correctamente la probeta. En la Figura 34 se muestra como se configura este ensayo. Para consultar los detalles metodológicos ver el Anexo 5.



Figura 34. Ensayos a cortante (Elaboración propia).

3.2.3.2 Descripción de Resultados

Los resultados de los ensayos a flexión también muestran la existencia de una relación entre la densidad de la probeta y la resistencia a la flexión. En la Tabla 6 y el Gráfico 6 se puede observar como el valor de resistencia a la flexión pertenece a la segunda probeta menos densa, y el mayor valor a la más densa. En este caso se observó además de una gran resistencia la capacidad de seguir manteniendo la carga.

Ensayo	Densidad (kg/m ³)	C.H. %	MOE (N/mm ²)	Fm (N/mm ²)
5	463.07	8.9	13863.83	86.45
3	471.29	6.6	11769.04	62.90
10	478.50	6.5	14693.09	94.62
7	512.10	7.1	11262.70	78.52
1	537.73	9.5	11138.33	84.28
2	589.24	6.2	10163.05	72.01
8	614.82	7.8	11007.01	88.94
6	617.24	7.4	10604.04	75.65
4	629.80	8.4	10817.41	92.51
9	677.07	8.4	22261.20	127.10

Tabla 6. Resultados de los ensayos a flexión y MOE (Elaboración propia).

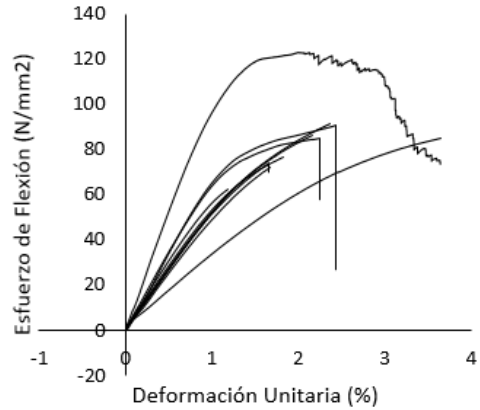


Gráfico 6. Esfuerzo – Deformación, de los ensayos a flexión (Elaboración propia).

La relación entre densidad y resistencia fue notoria también en los ensayos tensión, tal como se puede ver en la Tabla 7. Además en el Gráfico 7 podemos ver como la deformación por tensión es significativamente mayor a la observada en los demás ensayos. En este caso se observaron probetas que llegaron a la falla catastrófica y otras que mantuvieron la capacidad de carga, sin embargo no se aprecia una relación clara de este fenómeno con la densidad.

Ensayo	Densidad (kg/m ³)	C.H. %	Ft (N/mm ²)
6	464.22	8.0	25.16
9	481.45	8.5	21.20
1	510.16	8.2	37.19
3	526.06	8.4	24.22
5	541.07	8.0	33.18
8	574.79	8.4	37.29
2	603.94	7.2	36.96
10	623.08	7.0	37.59
4	656.36	7.8	48.90
7	674.02	7.7	65.06

Tabla 7. Resultados de los ensayos a tensión (Elaboración propia).

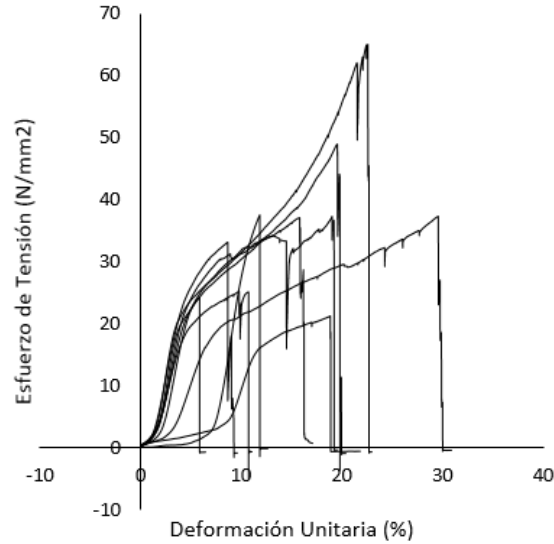


Gráfico 7. Esfuerzo – Deformación, de los ensayos a tensión (Elaboración propia).

En los ensayos a compresión también se observa la misma relación entre la densidad y la característica resistente analizada. En este caso el comportamiento de 9 probetas fue muy similar, solamente se distinguió como una de las probetas menos densas tuvo una ligera falla y se recuperó para alcanzar una resistencia mayor a la compresión. En la Tabla 8 se pueden apreciar los resultados de la resistencia a la compresión, y en el Grafico 8 se puede apreciar su comportamiento.

Ensayo	Densidad (kg/m ³)	C.H. %	Resistencia a la compresión (N/mm ²)
2	462.56	7.5	44.60
3	470.13	6.7	44.73
1	477.69	7.6	51.42
7	481.56	8.1	47.04
10	525.42	6.4	47.97
5	540.55	7.2	55.86
9	551.83	6.9	57.23
4	586.27	7.1	58.18
6	602.79	6.1	55.90
11	621.17	6.3	64.21
8	635.54	7	50.19

Tabla 8. Resultados de los ensayos a compresión (Elaboración propia).

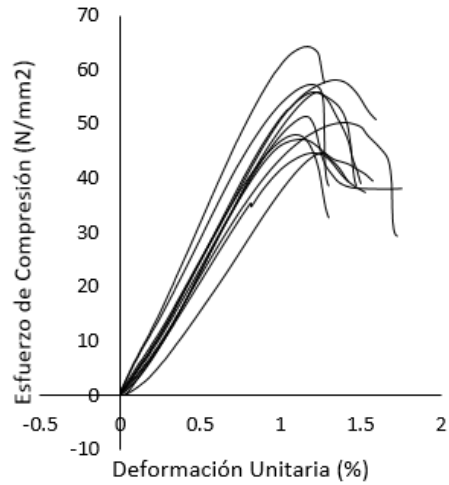


Gráfico 8. Esfuerzo – Deformación, de los ensayos a compresión (Elaboración propia).

Los ensayos de cortante no se pudieron realizar exitosamente debido a que en ambos casos se produjo la falla de la interface entre la probeta y la placa de acero. En ambos casos se usó un pegamento epóxico distinto, el segundo ensayo resistió más que el primero, pero la falla fue la misma. En la Tabla 9 se pueden apreciar los resultados y el comportamiento se puede ver en el Gráfico 9, de igual manera en la Figura 33 se puede apreciar como fue el pegamento el que falló primero.

Ensayo	Resistencia al cortante (N/mm ²)
1	0.99
2	3.15

Tabla 9. Resultados de los ensayos a cortante (Elaboración propia).

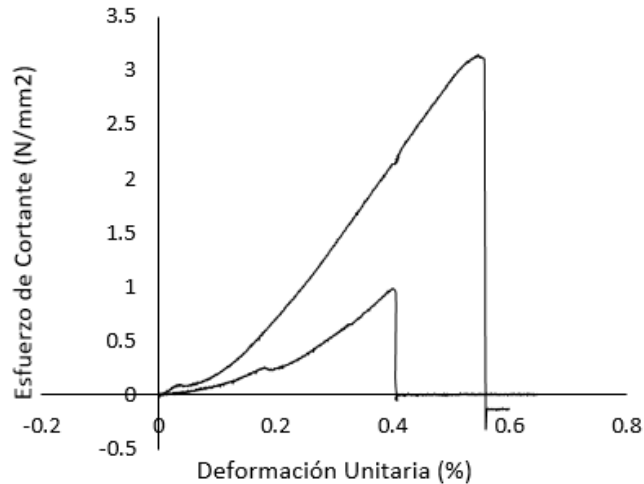


Gráfico 9. Esfuerzo – Deformación, de los ensayos de cortante (Elaboración propia).

3.2.3.3 Interpretación de Hallazgos

A excepción de los ensayos de cortante, las demás pruebas se comportaron dentro de los parámetros esperados, a mayor densidad mejor la característica resistente. Llama la atención los resultados más altos para la resistencia a la flexión y la resistencia a la tensión, ya que además de la gran resistencia, en las Gráficas 4 y 5, se puede apreciar como presentaron una capacidad de recuperación, y pudieron seguir soportando la carga. Por la densidad de ambas probetas probablemente se traten de especímenes de la más alta densidad de la especie *Pinus pseudostrobus*. En cuanto a las pruebas de cortante, a pesar de que no se pudo realizar exitosamente los resultados son positivos, ya que en el segundo ensayo se tuvo una resistencia de 3.15 N/mm², mientras que las NTCM (2004) indican que se debe tomar para cortante un valor de diseño de 1.8 N/mm². Finalmente, los valores del módulo de elasticidad en flexión se presentan acordes a las resistencias, y más altos que en las pruebas realizadas en el punto 3.2.1. En los Gráficos 10 y 11 se presenta la comparación de los resultados obtenidos con la información publicada por Sotomayor et. al, (2003).

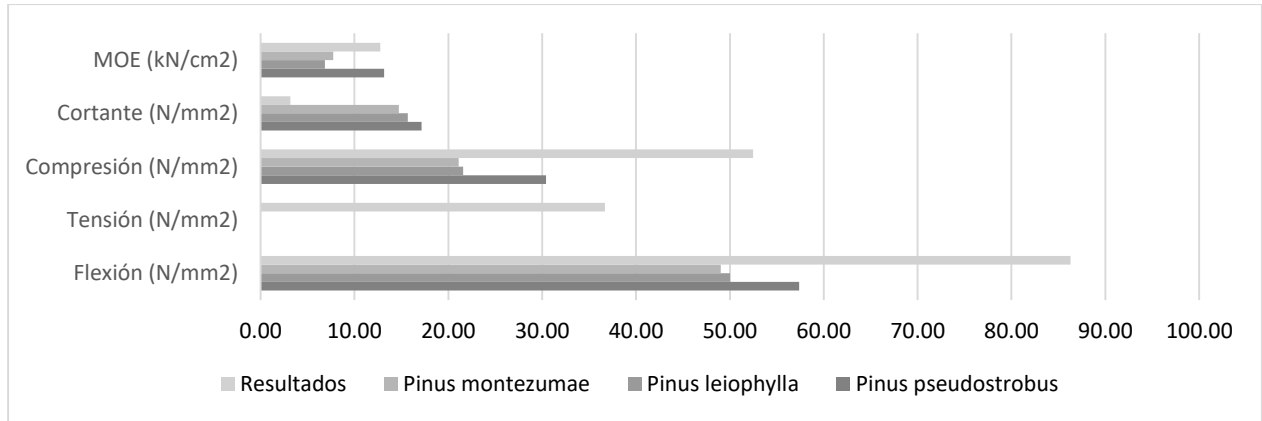


Gráfico 10. Comparación de resultados obtenidos con la norma UNE EN:408 y los resultados publicados por Sotomayor et. al (2003), (Elaboración Propia).

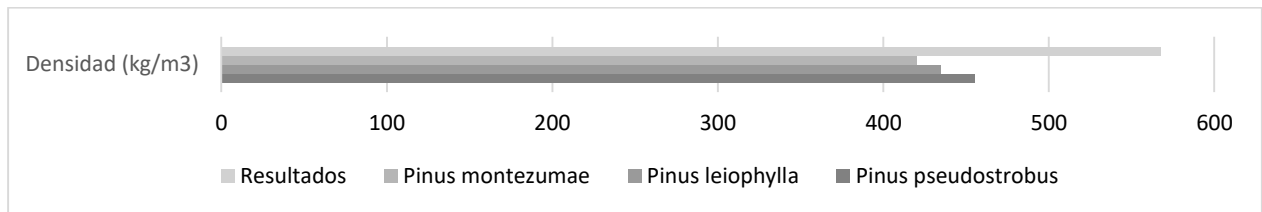


Gráfico 11. Comparación de la densidad de las probetas ensayadas con la norma UNE EN:408 y los resultados publicados por Sotomayor et. al (2003), (Elaboración Propia).

3.3 Determinación de los esfuerzos permisibles de diseño estructural para la muestra de madera Pinus spp. proveniente del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán.

A continuación se explican la metodología empleada para determinar los valores de diseño de la muestra de madera de Pinus spp., proveniente del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán, de acuerdo a la norma EN 384 (2004), se describen los resultados obtenidos y se hace una interpretación de los hallazgos aprovechables.

3.3.1 Metodología

Tanto la normativa estadounidense NDS (2018), como la europea EN 1194 (1999) presentan una clasificación de clases resistentes para madera laminada, para la cual es necesario

hacer ensayos de cada característica resistente si la madera laminada no es homogénea, lo cual resulta útil en elementos principalmente sometidos a flexión, ya que se pueden ubicar tablillas más resistentes a flexión en la parte inferior de las vigas, y ahorrar dinero colocando tablillas menos resistentes donde está el eje de compresión. Sin embargo para madera laminada homogénea no es indispensable realizar ensayos con probetas laminadas, ya que se pueden tomar los valores de la madera aserrada con la cual se van a fabricar. Por esta razón se decidió ensayar madera aserrada, en el entendido que el modelo del sistema consideraría el uso de madera laminada homogénea.

Existe una diferencia crucial en como abordan las normativas estadounidense y europeas los esfuerzos permisibles de diseño para la madera aserrada de coníferas. La normativa estadounidense a través del suplemento del estándar NDS (2018) maneja los esfuerzos permisibles por especie de madera, y por clasificación estructural. Este enfoque lleva a que el diseñador se incline por elegir las especies más resistentes, lo cual no es sustentable, ya que se corre el riesgo de hacer una selección artificial sobre cuales especies de árboles se siguen cultivando. Como resultado de este enfoque, en el oeste de los Estados Unidos la madera que se usa principalmente en la construcción es el abeto Douglas, y en el este el Pino del Sur, a pesar de que el NDS (2018) contiene los valores de diseño para 33 especies diferentes.

Por su parte, la normativa europea de acuerdo a la norma EN 338 (2009), especifica que se puede clasificar cualquier especie de coníferas de acuerdo a su resistencia a la flexión, el requisito es que iguale o supere la resistencia indicada en una de columnas de la tabla y para las demás características resistentes se pueden tomar los valores de la de la misma columna sin necesidad de realizar más ensayos. De esta manera los productores de madera pueden brindar certeza a los diseñadores estructurales sobre la resistencia estructural del material, al clasificar fácilmente sus productos de acuerdo a una clase resistente independientemente de a que especie pertenecen. Este enfoque nos parece el adecuado ya que no ejerce una presión en los ecosistemas forestales para privilegiar el desarrollo de una especie sobre otras, con lo cual se protege la biodiversidad. A continuación se presenta la Tabla 10 con las clases resistentes de coníferas de la norma EN 338 (2009).

Clases resistentes. Valores característicos. (EN 338:2004)												
Propiedades	Clase Resistente											
Resistencia (característica) en N/mm^2	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Flexión f_m, k	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	27.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
Tracción paralela $f_t, 0, k$	8.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	16.0	18.0	21.0	24.0	27.0	30.0
Tracción perpendicular. $F_t, 90, k$	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Compresión paralela $f_c, 0, k$	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	25.0	26.0	27.0	29.0
Compresión perpendicular $f_c, 90, k$	2.0	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2
Cortante f_v, k	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4	2.5	2.8	3.0	3.4	3.8	3.8	3.8
<i>Rigidez, en N/mm^2</i>												
Módulo de elasticidad paralelo medio $E_0, medio$	7000	8000	9000	9500	10000	11000	12000	12000	13000	14000	15000	16000
Módulo de elasticidad paralelo 5°-percentil E_0, k	4700	5400	6000	6400	6700	7400	8000	8000	8700	9400	10000	11000
Módulo de elasticidad perpendicular medio $E_{90}, medio$	230	270	300	320	330	370	400	400	430	470	500	530
Módulo transversal medio G_{medio}	440	500	560	590	630	690	750	750	810	880	940	1000
<i>Densidad, en kg/m^3</i>												
Densidad característica ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Densidad media ρ_{medio}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Tabla 10. Esfuerzos permisibles para madera aserrada de acuerdo a la norma EN 338 (2009).

La única normativa mexicana que presenta valores de diseño para coníferas son las NTCM (2017), en las cuales se presentan tres clases resistentes, correspondientes a la clasificación visual para madera estructural explicada en la norma NMX-C-239-ONNCCE-2014. Cabe destacar que no especifica que se trate de coníferas mexicanas, pero se entiende que así es. Como se puede apreciar en la Tabla 11, los valores de diseño de estas tres clases resistentes son mucho más bajos que los que se presentan en la norma EN 338 (2009). El más alto, de acuerdo a la norma EN 338 (2009) correspondería a la más baja de la norma, y los otros dos ni siquiera serían considerados como estructurales. Paradójicamente, las NTCM (2017) ofrecen la posibilidad de usar madera estructural proveniente de los Estados Unidos, específicamente las especies de abeto Douglas y

Pino del Sur, para los cuales ofrece también valores de diseño, con módulos de elasticidad y resistencia al cortante más altos que los que presenta para las coníferas.

Valores de las propiedades asociadas a cada Clase Resistente. Normas Técnicas complementarias para Madera.			
Propiedades	Clase Resistente		
<i>Resistencia (característica) en N/mm²</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>
Flexión fm,k	4.4	9.8	15.2
Tracción paralela ft,0,k	5.4	6.9	11.3
Compresión paralela fc,0,k	5.8	9.3	11.8
Compresión perpendicular fc,90,k	3.9	3.9	3.9
Cortante fv,k	1.18	1.18	1.18
<i>Rigidez, en N/mm²</i>			
Módulo de elasticidad paralelo medio E0,medio	6375	7848	9810
Módulo de elasticidad paralelo 5°-percentíl E0,k	4520	4905	6376

Tabla 11. Esfuerzos permisibles según las NTCM (2017).

Si además tomamos en cuenta que ningún aserradero mexicano ha realizado estudios para determinar los valores de diseño de su madera, y que solamente clasifican la madera visualmente en primera, segunda y tercera, de acuerdo a la cantidad de nudos y no con la norma NMX-C-239-ONNCCE-2014, es claro que cuando un diseñador estructural tenga incertidumbre sobre la resistencia de la madera nacional, va a preferir usar madera importada que si venga clasificada, la cual además resultará en un diseño más económico que si se usan los bajos valores de diseño de coníferas. Esta es una de las razones principales por las cuales era necesario definir los esfuerzos permisibles de la muestra de madera de Pinus spp. proveniente del bosque de San Juan Nuevo.

Como los ensayos de caracterización mecánica estructural se llevaron a cabo con la norma europea UNE EN-408 (2004), se decidió definir los esfuerzos permisibles con el estándar europeo correspondiente. Este estándar EN 384 (2004) indica que para cumplir con la norma se necesitan los resultados de por lo menos una muestra de 40 ensayos para cada característica resistente realizados de acuerdo a la norma UNE EN-408 (2004). También menciona que el número ideal

serían 5 muestras de diferentes árboles de la misma especie, es decir un total de 200 ensayos para cada característica resistente. En esta investigación no se contó con los recursos suficientes para realizar el número mínimo de ensayos requeridos, sin embargo se decidió usar la metodología del estándar EN 384 (2004) para determinar los esfuerzos permisibles de la muestra de madera conseguida.

El análisis de la información comenzó clasificando cada probeta por su densidad, dentro de la clase resistente baja o alta de acuerdo al punto 3.1 de este trabajo.

Los esfuerzos permisibles de flexión y tensión paralela a la fibra se obtuvieron dividiendo el percentil 5 entre un factor de ajuste a las dimensiones de referencia de acuerdo al punto 5.3.4.3 de la norma EN 384 (2004), y posteriormente multiplicando este valor por un factor de reducción de tamaño de la muestra 0.75 descrito en el punto 5.4 de la norma.

Los esfuerzos de tensión perpendicular se obtuvieron de acuerdo a la correlación que existe con la densidad característica, de acuerdo a la expresión del punto 7.2.3 de la norma EN 384 (2004).

Los esfuerzos permisibles de compresión paralela a la fibra se obtuvieron ajustando los valores de resistencia a la compresión dependiendo del contenido de humedad de la probeta, de manera que la resistencia a la compresión decrece un 3% por cada punto en el porcentaje de humedad que se tiene que aumentar para llegar a la condición de referencia que es de un 12%. Posteriormente este valor se multiplicó por el factor de reducción de tamaño de la muestra 0.75 descrito en el punto 5.4 de la norma EN 384 (2004).

Los esfuerzos de compresión perpendicular se obtuvieron de acuerdo a la correlación que existe con la densidad característica, de acuerdo a la expresión del punto 7.2.4 de la norma EN 384 (2004).

Los esfuerzos permisibles de cortante se obtuvieron de acuerdo a la correlación que existe con la resistencia a la flexión, de acuerdo a la expresión del punto 7.2.2 de la norma EN 384 (2004).

Los esfuerzos permisibles del módulo de elasticidad se obtuvieron ajustando los valores del MOEf dependiendo del contenido de humedad de la probeta, de manera que el MOEf decrece 2% por cada punto en el porcentaje de humedad que se tiene que aumentar para llegar a la condición de referencia que es de un 12%. Posteriormente la media de los valores ajustados del MOEf se ajustaron con la ecuación del punto 5.3.2 de la norma EN 384 (2004).

Los esfuerzos permisibles del percentil 5 del módulo de elasticidad se obtuvieron de acuerdo a la correlación que existe con el MOEf, de acuerdo a la expresión del punto 7.2.5 de la norma EN 384 (2004).

Los esfuerzos permisibles del módulo de elasticidad perpendicular medio se obtuvieron de acuerdo a la correlación que existe con el MOEf, de acuerdo a la expresión del punto 7.2.6 de la norma EN 384 (2004).

Los esfuerzos permisibles del módulo de cortante medio se obtuvieron de acuerdo a la correlación que existe con el MOEf, de acuerdo a la expresión del punto 7.2.7 de la norma EN 384 (2004).

La densidad característica se obtuvo ajustando los valores de la densidad de cada probeta de los ensayos de flexión, tensión y compresión, incrementando en un 0.5% por cada punto en el contenido de humedad hasta llegar a la condición de referencia del 12%. Posteriormente estos valores se calcularon con la expresión del punto 6 de la norma EN 384 (2004).

3.3.2 Descripción de Resultados

En la Tabla 12 se presentan los resultados obtenidos para los esfuerzos permisibles de las dos clases resistentes definidas en el punto 3.1 de este trabajo.

Esfuerzos permisibles para la madera aserrada de Pinus spp. proveniente de la CIJSNP. Valores de las propiedades asociadas a cada Clase Resistente.		
Propiedades	Clase Resistente	
Resistencia (característica) en N/mm ²	<i>Clase Baja</i>	<i>Clase Alta</i>
Flexión fm,k	36.72	40.45
Tracción paralela ft,0,k	12.21	20.61
Tracción perpendicular. Ft,90,k	0.60	0.60
Compresión paralela fc,0,k	28.43	32.38
Compresión perpendicular fc,90,k	3.24	4.11
Cortante fv,k	3.57	3.80
<i>Rigidez, en N/mm²</i>		
Módulo de elasticidad paralelo medio E0,medio	12213.07	12751.91
Módulo de elasticidad paralelo 5°-percentil E0,k	8182.75	8543.78

Módulo de elasticidad perpendicular medio E90,medio	407.10	425.06
Módulo transversal medio Gmedio	763.32	796.99
<i>Densidad, en kg/m³</i>		
Densidad característica ρ_k	462.77	587.22
Densidad media ρ_{medio}	510.58	636.31

Tabla 12. Esfuerzos permisibles para la madera de Pinus spp. proveniente de la CISJNP
(Elaboración propia).

3.3.3 Interpretación de Hallazgos

Al comparar los valores de diseño asignados a las clases resistentes definidas en el punto 3.1 de este trabajo, con las tablas de las normas europeas EN 408 (2004) y EN 1194 (1999), podemos notar que los módulos de elasticidad se encuentran un poco bajos en relación con sus características resistentes. Valdría la pena realizar ensayos similares pero usando dispositivos electrónicos de alta precisión para la medición de los desplazamientos, que pudieran conectarse con la prensa universal y ver si estos resultados son una constante o un error de medición. También llama la atención la resistencia a la tensión, cuyos resultados son bajos en relación a las demás características resistentes. Estas dos tendencias de resultados en el módulo de elasticidad y en la tensión son opuestas a los valores dados en las NTCM (2017), para lo cual se deberían hacer ensayos más precisos y ver si son una constante o una coincidencia en este estudio. En la Tablas 13 y 14 se puede apreciar en que clases resistentes de la norma EN 338 (2009) y EN 1194 (2009) se ubican los valores de diseño obtenidos de la muestra de madera analizada.

Clases resistentes. Valores característicos. (EN 338:2004)												
Propiedades	Clase Resistente											
<i>Resistencia (característica) en N/mm²</i>	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Flexión fm,k	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracción paralela ft,0,k	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tracción perpendicular. Ft,90,k	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

Compresión paralela fc,0,k	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compresión perpendicular fc,90,k	2	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2
Cortante fv,k	1.7	1.8	2	2.2	2.4	2.5	2.8	3	3.4	3.8	3.8	3.8
<i>Rigidez, en N/mm²</i>												
Módulo de elasticidad paralelo medio E0,medio	7000	8000	9000	95000	10000	11000	12000	12000	13000	14000	15000	16000
Módulo de elasticidad paralelo 5°-percentil E0,k	4700	5400	6000	6400	6700	7400	8000	8000	8700	9400	10000	11000
Módulo de elasticidad perpendicular medio E90,medio	230	270	300	320	330	370	400	400	430	470	500	530
Módulo transversal medio Gmedio	440	500	560	590	630	690	750	750	810	880	940	1000
<i>Densidad, en kg/m³</i>												
Densidad característica pk	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Densidad media pmedio	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Clase resistente baja	
Clase resistente alta	
Valor compartido	

Tabla 13. Esfuerzos permisibles de la madera de Pinus spp. proveniente de la CISJNP, ubicados dentro de la normativa europea EN:338 (2009).

Tabla E.1 Madera aserrada de Pinus spp. proveniente de la CIJSNP. Valores de las propiedades asociadas a cada Clase Resistente comparado con la normativa europea.				
Propiedades				
	<i>GL24h</i>	<i>GL28h</i>	<i>GL32h</i>	<i>GL36h</i>
Resistencia (característica) en N/mm ²				
Flexión fm,k	24	28	32	36
Tracción paralela ft,0,k	16.5	19.5	22.5	26
Tracción perpendicular. Ft,90,k	0.4	0.5	0.5	0.6
Compresión paralela fc,0,k	24	26.5	29	31

Compresión perpendicular $f_{c,90,k}$	2.7	3	3.3	3.6
Cortante $f_{v,k}$	2.7	3.2	3.8	4.3
<i>Rigidez, en N/mm²</i>				
Módulo de elasticidad paralelo medio $E_{0,medio}$	11600	12600	13700	14700
Módulo de elasticidad paralelo 5°-percentíl $E_{0,k}$	9400	10200	11100	11900
Módulo de elasticidad perpendicular medio $E_{90,medio}$	390	420	460	490
Módulo transversal medio G_{medio}	720	780	850	910
<i>Densidad, en kg/m³</i>				
Densidad característica ρ_k				
Densidad media ρ_{medio}	380	410	430	450

Clase resistente baja	
Clase resistente alta	
Valor compartido	

Tabla 14. Esfuerzos permisibles de la madera de Pinus spp. proveniente de la CISJNP, ubicados dentro de la normativa europea EN:1192 (2009).

Esta comparación de los valores de diseño obtenidos con la aplicación de la norma EN 384 (2004) son un indicativo que las NTCM (2017) son demasiado conservadoras, e incluso pueden desincentivar el uso de la madera para la construcción, ya que diseñar con valores tan bajos implica proponer secciones estructurales más grandes, lo que se traduce en estructuras más costosas.

3.4 Proceso de fabricación de los elementos estructurales de madera masiva

A continuación se explica la metodología empleada para fabricar los elementos estructurales de madera masiva, se describen los resultados obtenidos y se hace una interpretación de los hallazgos aprovechables.

3.4.1 Metodología

El primer paso fue la preparación de las tablillas que son el elemento básico de las piezas estructurales. Para su fabricación primero se cantearon las tablas por un lado, y se cortaron por el otro con una sierra circular para tener un acho dimensionado. Posteriormente se cortaron con una

sierra tronadora para tener los largos requeridos para cada elemento estructural. En la Figura 35 se puede apreciar el proceso de obtención de las tablillas.



Figura 35. Preparación de las tablillas (Elaboración propia).

Para la fabricación de las probetas de muros y losas de madera contralaminada se dispusieron las tablillas para formar un tablero de las dimensiones deseadas, el cual se encoló con un pegameto Tipo II, posteriormente se colocó en un ángulo de 90 grados la siguiente capa, y se repitió el proceso para la tercera capa. Posteriormente se aplicó presión durante 24 horas con la ayuda de prensas G. En la Figuras 36 y 37 se puede ver el proceso de fabricación de las probetas de muros y losas de madera contralaminada.

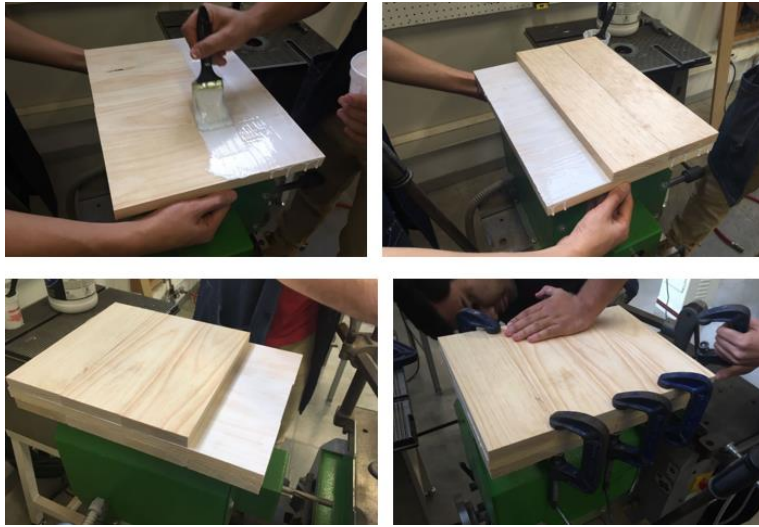


Figura 36. Fabricación de muros de madera contralaminada (Elaboración propia).



Figura 37. Fabricación de losas de madera contralaminada (Elaboración propia).

Para fabricar la probeta de la losa de madera laminada clavada se pusieron tres tablillas en una superficie plana donde se clavaron, posteriormente se colocaron las demás tablillas hasta lograr el ancho deseado, clavando cada una de las capas. Finalmente se cortó el extremo irregular en la sierra tronzadora para alinear el borde. En la Figura 38 se puede apreciar el proceso de fabricación de la probeta de losa laminada clavada.



Figura 38. Fabricación de losas de madera laminada clavada (Elaboración propia).

El proceso de fabricación de vigas y columnas de madera laminada encolada es el mismo. Primero se hicieron las uniones finger joint en los extremos de las tablillas, luego se colocó el adhesivo y se unieron con presión durante unos minutos hasta que la unión tuvo la resistencia suficiente para manipular el elemento sin que se despeguen las tablillas. El largo de cada capa depende de las dimensiones que tenga el elemento estructural que se quiera fabricar. Posteriormente se encolaron las caras de las capas para lograr las secciones deseadas, y se colocaron dos tablas en los extremos para que la presión de las prensas G no dañaran el elemento fabricado. La presión se mantuvo por 24 horas, tras las cuales se cepillaron los elementos y se cortaron los extremos. En la Figura 39 se puede apreciar el proceso de fabricación de las vigas y columnas de madera laminada encolada.

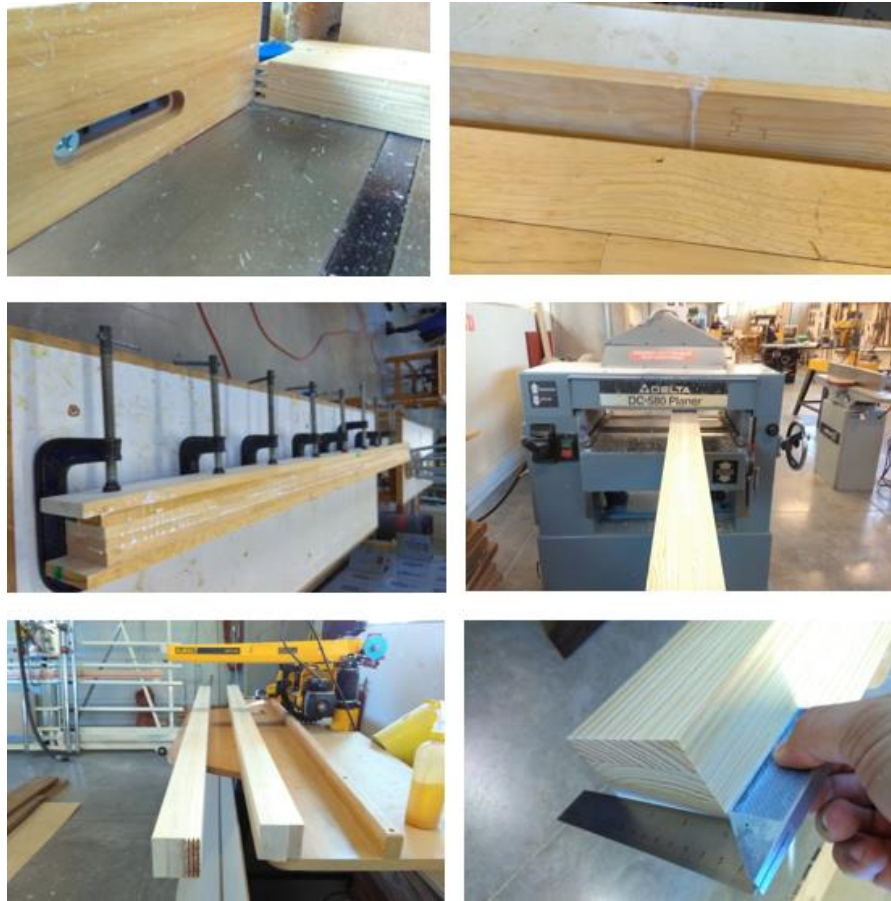


Figura 39. Fabricación de columnas y vigas de madera laminada (Elaboración propia).

3.4.2 Descripción de Resultados

Durante el proceso de fabricación se observó una constante en los procesos de canteado, cepillado, cortado, y elaboración de las uniones finger joint, donde los elementos más largos de 1.20 metros se colgaban por la falta de un soporte que mantuviera toda la pieza al mismo nivel de la maquinaria usada. También en el proceso de pegado de las capas de las columnas y vigas laminadas fue evidente que estas presentaban una ligera curvatura, la cual se debió a que las mesas de trabajo estaban flexionadas hacia abajo aparentemente por el uso intensivo que se les da en el taller. La suma de estas condiciones del taller provocaron que no todas las caras adyacentes de los elementos estructurales estuvieran a 90 grados una de otra como debería ser. Sin embargo, la calidad visual de los elementos estructurales fabricados es excelente, ya que se logró que sean agradables a la vista y el tacto.

3.4.3 Interpretación de Hallazgos

Después de este proceso de fabricación se hace evidente que para garantizar la seguridad estructural de los elementos fabricados es necesario que una línea comercial de fabricación de madera masiva cuente con todas el equipo y herramientas de trabajo que garanticen una nivelación perfecta en todos los procesos, con el objetivo de producir elementos estructurales dimensionados y sin imperfecciones.

3.5 Validación de los esfuerzos permisibles.

A continuación se explica la metodología empleada para validar los esfuerzos permisibles obtenidos en el punto 3.3 de este trabajo, se describen los resultados obtenidos y se hace una interpretación de los hallazgos aprovechables.

3.5.1 Metodología

Para validar los esfuerzos permisibles obtenidos en el punto 3.3 de este trabajo, se procedió a realizar ensayos con las probetas de elementos estructurales fabricadas en el punto 3.4 de este trabajo. Para cada uno de los ensayos se realizó un modelo matemático usando los métodos de cálculo revisados en la bibliografía, correspondientes a la norma estadounidense NDS (2015), la cual se considera como las Normas Técnicas Complementarias para Construcción con Madera para el municipio de Zapopan, de acuerdo a lo explicado en el punto 1.3.2 de este trabajo.

Primero se realizaron cuatro ensayos a compresión con las probetas de muros de madera contralaminada en una prensa universal. Los resultados arrojados por la prensa universal se compararon con un modelo matemático que emplea la fórmula modificada para el factor de estabilidad de columna propuesta por Ross et. al (2013) para conocer la capacidad de carga del muro. En este modelo matemático no se empleó ningún factor de reducción de la resistencia a la compresión de la madera. En la Figura 40 se puede ver la configuración del ensayo de compresión de una probeta de muro de madera contralaminada.



Figura 40. Ensayo de compresión de muros de madera contralaminada (Elaboración propia).

Después se realizaron dos ensayos a compresión de columnas de madera laminada encolada. Las pruebas se hicieron en el laboratorio de estructuras mayores, fijando un marco de reacción en un extremo de las columnas y un gato hidráulico en el otro extremo. Se midió el desplazamiento en dirección de la carga axial y se tomaron las lecturas de la presión ejercida por el gato hidráulico para formar las curvas de esfuerzo deformación. Los resultados obtenidos se compararon con el modelo matemático para conocer la capacidad de carga de una columna publicado en estándar estadounidense NDS (2015). En el cálculo no se usó ningún factor de reducción para la resistencia a la compresión de la madera. En la Figura 41 se puede apreciar la configuración del ensayo a compresión de columnas de madera laminada encolada.



Figura 41. Ensayos a compresión de columnas de madera laminada encolada (Elaboración propia).

La tercera ronda de ensayos consistió en probar a flexión una viga de madera laminada encolada. Para realizar el ensayo se fijó un gato hidráulico contra un marco de reacción para aplicar una carga central a la viga de madera laminada encolada. Los apoyos de la viga se colocaron contra dos varillas roscadas, fijadas en el piso del laboratorio de estructuras mayores, con dos contravientos también de varillas roscadas, para evitar la flexión de las primeras. Se midió el desplazamiento del cabezal del gato hidráulico para conocer la deflexión. Con un inclinómetro se midieron varias veces durante los ángulos de las varillas para poder verificar si se estaban flexionando. Los resultados se compararon con un modelo matemático para verificar la capacidad de flexión de la viga, así como su deflexión. No se usó ningún factor de reducción para la resistencia a flexión de la madera. Es necesario mencionar que aunque la densidad de la viga la ubicaba dentro de la clase resistente alta, las láminas que se colocaron en el eje sometido a flexión eran de baja densidad, por lo que en este caso se usaron los valores de diseño para la clase resistente baja. En la Figura se puede apreciar la configuración del ensayo de flexión para vigas de madera laminada encolada. En la Figura 42 se observa el proceso del ensayo a flexión de la viga de madera laminada encolada.



Figura 42. Configuración del ensayo a flexión de una viga de madera laminada encolada (Elaboración propia).

Para las losas de madera laminada clavada y de madera contralaminada se uso un espécimen de cada una con una longitud menor a los 80 cm para que cupiera en la prensa universal. En ambos casos se colocaron dos bases de metal que sirvieron como apoyos, y el ensayo consistió en aplicar una carga puntual al centro del claro. Los resultados se compararon con un modelo matemático específico para cada tipo de losa. Debido al desconocimiento del modo de falla se decidió no medir el desplazamiento de forma independiente para no poner en riesgo los instrumentos. En la Figura 43 se puede apreciar la configuración de ambos ensayos. Para consultar los detalles metodológicos ver el Anexo 6.



Figura 43. Configuración del ensayo a flexión de las losas (Elaboración propia).

3.5.2 Descripción de Resultados

A continuación se muestran los resultados de los ensayos de elementos estructurales de madera masiva.

3.5.2.1 Resultados del ensayo a compresión de probetas de muros de madera contralaminada

La aplicación de la carga de los dos primeros ensayos se llevo a cabo con un perfil hueco metálico cuadrado, el cual se deformó al no resistir la carga aplicada. Además, el primer ensayo se llevo a cabo con la probeta en contacto directo con la base de la prensa universal, la cual tiene unos huecos circulares, por lo que la lectura del ensayo no fue correcta, ya que se deformó la base de la probeta. A partir del segundo ensayo se colocó una placa en la base de la prensa universal para evitar esa deformación, sin embargo, al aplicarse más carga en esta segunda prueba, el perfil hueco

se deformó aún más. Para los ensayos tres y cuatro se colocaron dos placas metálicas, una para transmitir la carga y otra en la base de la prensa. En la Tabla 15 y el Gráfico 12 se muestran los resultados y el comportamiento de las probetas.

Ensayo	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Esfuerzo de Compresión (N/mm ²)
1	3.26	473.74	1672.14
2	2.58	502.91	2606.17
3	2.66	504.59	3006.38
4	2.5	483.15	2869.03

Tabla 15. Resultados de los ensayos a compresión de muros de madera contralaminada (Elaboración propia).

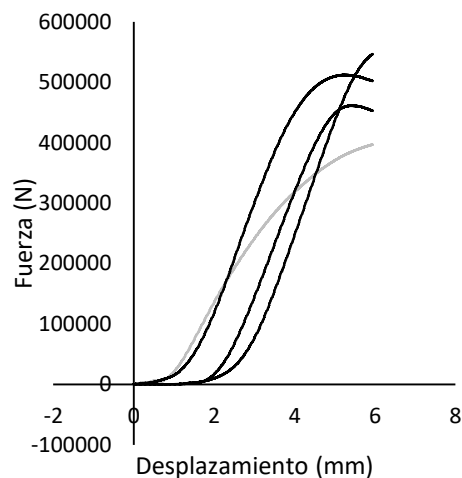


Gráfico 12. Fuerza desplazamiento muros de madera contralaminada (Elaboración propia).

3.5.2.2 Resultados del ensayo a compresión de columnas de madera laminada encolada.

En ambos casos se detectó que debido a que el corte en los extremos de las columnas no estaba a 90 grados, la primera parte del desplazamiento corresponde al aplastamiento por compresión de la superficie de contacto.

En el primer ensayo, el desplazamiento se midió de forma manual cada cierta carga y se dejó de medir a los 21,500 N por precaución ante una rotura del elemento. Se detectó que el marco de reacción se movió ligeramente al principio de la prueba debido a que no estaba bien fijado a la plataforma del laboratorio. El primer ensayo se tuvo que detener a los 112,600.30 N debido a que la placa ubicada contra el marco de reacción se empezó a inclinar, provocando un aplastamiento en la esquina de un extremo del elemento, el cual se puede apreciar en la Figura 44.



Figura 44. Aplastamiento de la columna 1 (Elaboración propia).

Para el segundo ensayo se modificó la configuración para garantizar que no se repitiera la inclinación de la placa en el marco de reacción, y se aseguró que este estuviera bien fijado a la plataforma del laboratorio. En este caso el desplazamiento se videograbó con un celular para evitar acercarse al elemento. Este ensayo se detuvo cuando se alcanzó la presión máxima de seguridad que marca el manómetro de la bomba de presión.

En ambos casos la capacidad de carga fue excedida y no se llegó a la falla. Al retirar la fuerza aplicada ambas columnas regresaron a su forma original, y no se presentó ninguna falla en las laminaciones ni en las uniones finger joint. En la Tabla 16 se pueden ver los resultados obtenidos, y en el Gráfico 13 se puede ver el comportamiento de cada ensayo.

Columna	Densidad (kg/m ³)	Fuerza max (N)	Desplazamiento max (mm)	Capacidad de carga (N)
1	603.26	112600.30	más de 24.5	52614.84
2	658.48	131953.48	17.50	105321.60

Tabla 16. Resultados del ensayo a compresión de las columnas (Elaboración propia).

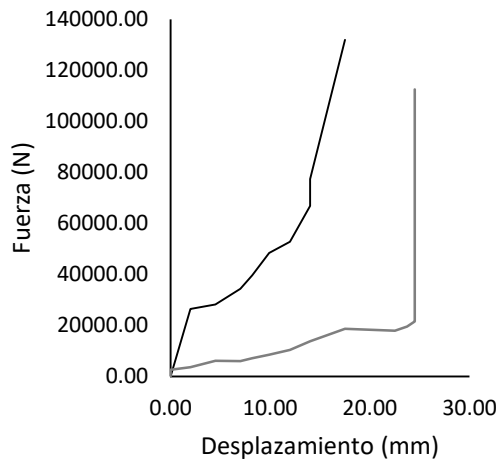


Gráfico 13. Fuerza desplazamiento de las columnas de madera laminada (Elaboración propia).

3.5.2.3 Resultados del ensayo a flexión de una viga de madera laminada encolada.

Se detectó que las varillas fijadas como marco de reacción tuvieron una inclinación menor a un grado respecto al inicio del ensayo, tomando esta inclinación se debe corregir el valor de los desplazamientos (pendiente). La viga falló con una carga aplicada de 17,593.80 N, al 98.53% del valor de resistencia a la flexión calculado con el modelo matemático, según el cual era de 17,856 N. Como se puede apreciar en la Figura 45, la falla de la viga se dio en el pegamento de las uniones finger joint, mientras que en las laminaciones la falla se dio en las fibras y no en el pegamento. En el Gráfico 14 se puede apreciar el comportamiento del ensayo.



Figura 45. Modo de falla de la viga de madera laminada encolada (Elaboración propia).

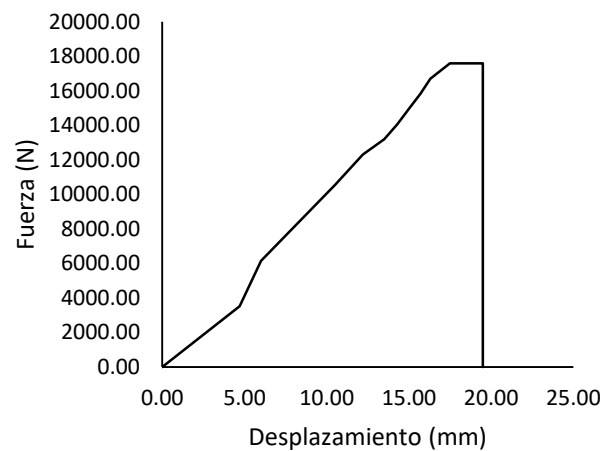


Gráfico 14. Fuerza desplazamiento de la viga de madera laminada (Elaboración propia).

3.5.2.4 Resultados del ensayo a flexión de una losa de madera contralaminada y una de madera laminada clavada.

En la Tabla 17 se muestran las diferencias en las dimensiones de los especímenes ensayados, y la fuerza máxima de flexión resistida. Se puede apreciar como la losa de madera contralaminada tiene una sección más grande y es más densa que la losa de madera laminada clavada. En el punto 3.1 de este trabajo se definió que una densidad menor a 567.87 kg/m^3 correspondería a la clase resistente baja, y una densidad superior a la clase resistente alta. De esta manera en el modelo matemático se especificaron diferentes valores de diseño para cada losa.

Losa	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Claro (mm)	Densidad (kg/m ³)	Fmax (N)
CLT	768.00	284.00	95.50	622.00	563.62	81653.10
NLT	752.50	297.00	98.00	622.00	588.07	136050.00

Tabla 17. Resultados del ensayo a flexión de las losas (Elaboración propia).

La losa de madera contralaminada falló al llegar a una fuerza aplicada de 81,653.10 N. De acuerdo con el modelo matemático a esa fuerza la revisión por cortante estaba en 134.40%, y la revisión por flexión en 83.97%. El modo de falla se presentó en las capas transversales y no en las longitudinales. En la Figura 46 se puede apreciar que este modo de falla fue por cortante, y además por desprendimiento y desplazamiento del pegamento.



Figura 46. Modo de falla de la losa de madera contralaminada (Elaboración propia).

Por su parte, la losa de madera laminada clavada llegó hasta una fuerza de 136,050.00 N. El modelo matemático de este espécimen indica que para esa fuerza la revisión por cortante es de 107.70% y la revisión por flexión es de 94.76%. En la Figura 47 se puede apreciar como el modo de falla se presentó por cortante.



Figura 47. Modo de falla de la losa de madera laminada clavada (Elaboración propia).

Es importante mencionar que ambos ensayos la pieza metálica que se usó para transferir la carga central se hundió por compresión dentro de los especímenes, por lo que las medidas del desplazamiento son superiores a la deflexión real. Para ambos tipos de losa se presentó una recuperación de la capacidad de carga. En el caso de la losa de madera contralaminada este fenómeno se obtuvo en un ciclo antes de fallar, y en el caso de la losa de madera laminada clavada este fenómeno se presentó tres veces antes de fallar, y lo volvió a hacer una vez más pero con una capacidad de carga menor a los tres primeros ciclos, pero significativamente mayor que la máxima capacidad de carga de la losa de madera contralaminada. En el Gráfico 15 se puede apreciar este fenómeno.

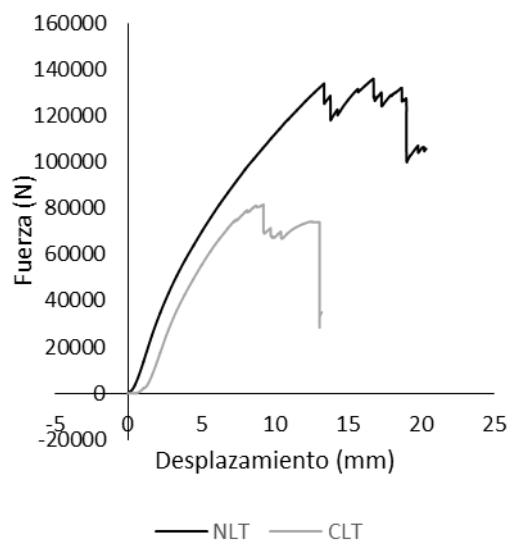


Gráfico 15. Fuerza desplazamiento de una losa de madera contralaminada y otra de madera laminada clavada (Elaboración propia).

3.5.3 Interpretación de Hallazgos

El aplastamiento que sufrieron las columnas al no tener un corte perfecto a 90, y la inclinación que sufrió la placa de apoyo en la columna 1 muestran que es indispensable contar con un proceso de manufactura que garantice tolerancias de error menores a 1 mm, para evitar que este tipo de fenómenos afecten la integridad de una estructura.

Otro hallazgo evidente es la necesidad de fabricar las laminaciones con ranuras de finger joint de mayor longitud, ya que en la falla de la viga se puede apreciar que estas uniones se despegaron sin cortar las fibras de la madera, lo cual es un indicativo que faltó superficie de contacto para distribuir los esfuerzos y provocar la falla en las fibras de la madera y no en las uniones, lo cual hubiera elevado la resistencia a flexión de la viga.

En el caso de las losas de madera es bastante obvio el mejor comportamiento que presentan las losas de madera laminada clavada por encima de las losas de madera contralaminada, ya que la primera a pesar de tener una menor sección, densidad y esfuerzos permisibles, resistió 66.62% más, y presentó un mejor comportamiento para seguir presentando capacidad de carga.

La validación de los esfuerzos permisibles usando los métodos de cálculo de la normativa estadounidense NDS (2015) es positiva, al haberse comprobado que los elementos estructurales de madera masiva tienen una mayor capacidad de carga que la calculada con los procedimientos de cálculo de la norma.

3.6 Estimación del costo por m³ de madera masiva colocada en obra.

A continuación se explica la metodología empleada para cotizar una línea de producción local y estimar el costo del m³ de madera masiva colocado en obra, se describen los resultados obtenidos y se hace una interpretación de los hallazgos aprovechables.

3.6.1 Metodología

Se decidió dejar fuera de la propuesta a los paneles de madera contralaminada debido a los siguientes cuatro factores:

- 1) Las losas de madera laminada clavada presentaron un mejor comportamiento que las de madera contralaminada. Esto implica que se necesitan secciones de menor espesor para cumplir con la demanda de carga y a su vez resulta en un menor uso de madera y un costo más bajo.
- 2) El sistema constructivo permitido por el reglamento de construcción de Zapopan es el de marcos contraventeados de madera, y no el de muros de carga de madera contralaminada. Al usar el sistema constructivo que ya está aprobado en la normativa se evita el riesgo de no obtener el permiso de construcción.
- 3) Para tener edificios con una planta baja comercial y los demás niveles de departamentos es necesario contar con una estructura que permita tener plantas libres para poder generar las diferentes configuraciones de plantas arquitectónicas. Las plantas bajas libres con niveles superiores configurados con muros de carga se consideran estructuras de piso débil, las cuales están prohibidas en el reglamento de construcción de Zapopan debido al alto riesgo que conlleva esta tipología durante eventos sísmicos. De esta manera se elimina la necesidad de contar con muros de madera contralaminada.
- 4) En el trabajo realizado por Rizo et. al (2017), perteneciente al PAP que colaboró con esta investigación en el periodo de otoño 2017 se hizo una investigación sobre el costo de establecer una planta semi-automatizada para la producción de madera laminada encolada y madera contralaminada, el cual en el caso más económico resultó ser de más de 23 millones de pesos. De este presupuesto, la mayor parte corresponde a la línea de madera contralaminada. Un monto de dinero tan alto para establecer una línea de producción le resta viabilidad al proyecto, por lo que se buscó reducir el costo inicial.

De esta manera se decidió hacer un presupuesto de un taller manual, de mucho menor costo que una planta automatizada, aunque el volumen de producción disminuyera. El procedimiento fue simple, se cotizaron las herramientas comerciales de mayor volumen de producción que se encuentra disponibles en el mercado, siguiendo la lógica de fabricación del punto 3.4 de este trabajo. Las cotizaciones se hicieron en el sitio de Mercado Libre (2018) y con fabricantes de maquinaria local (Medina, Comunicación personal. Mayo 3, 2017). Se estimó un periodo de vida útil de la maquinaria de 10 años, con un 15% de costo de mantenimiento. Se consideró que se necesitan 4 operadores y un responsable para operar la línea de producción. Todos estos costos más

la energía, administrativos y otros se estimaron de manera anual, y se dividieron entre 306 días laborales para obtener el costo diario de operación de la planta.

De forma separada se estimaron los rendimientos de cada maquinaria y proceso necesario, a través de videos de su funcionamiento y la experiencia de trabajo en el taller, con esta información se pudo obtener un estimado de la producción diaria para la madera laminada encolada y para la madera laminada clavada. Dividiendo el costo diario de operación de la fábrica entre el rendimiento diario para cada tipo de material se obtuvo el costo de fabricación de cada uno.

Al costo de fabricación se le sumaron los costos de la materia prima, fletes y una utilidad del 15% y así se obtuvo el precio de venta por m³. Con este precio se elaboró un análisis de precios unitarios, basado en los precios y rendimientos para madera laminada encolada publicados por CYPE (2018), en el cual se consideró la mano de obra para su instalación, herramienta y equipo. Con este procedimiento se logró obtener el precio del m³ de madera laminada encolada y madera laminada clavada, montado en obra. Para consultar los detalles metodológicos ver el Anexo 7.

3.6.2 Descripción de Resultados

En la Tabla 18 podemos ver el resumen del análisis de costos y rendimientos que sirvieron para calcular el costo directo de un metro cúbico de madera laminada clavada y un metro cúbico de madera laminada. Para ver el análisis específico de cada concepto favor de consultar el Anexo 8.

Concepto	Cantidad	Unidad
Costo de la maquinaria	\$ 807,930.80	m.n.
Costo diario de operación (306 días laborables/año)	\$ 4,993.18	m.n./jor
Rendimiento diario de NLT	3.96	m ³
Rendimiento diario de GLULAM	1.88	m ³
Precio de venta de NLT	\$ 10,250.60	m.n./m ³
Precio de venta de GLULAM	\$ 13,451.75	m.n./m ³
Costo directo de NLT	\$ 10,797.58	m.n./m ³
Costo directo de GLULAM	\$ 13,998.74	m.n./m ³

Tabla 18. Resumen de costos y rendimientos de una línea de producción manual de madera masiva (Elaboración propia).

3.6.3 Interpretación de Hallazgos

En la aplicación en línea de precios unitarios del CYPE (2018) el precio unitario para el m³ de vigas de madera laminada encolada de hasta 5 ml puesta en obra es de \$13,210.94. Nuestro precio unitario para el mismo concepto es un 5.97% mayor y el precio unitario para madera laminada clavada es un 18.27% menor. Esta similitud de precios nos indica que la estimación de producción en el taller es factible. Del análisis realizado para obtener estos precios se desprende que los factores que más afectan el precio final son:

- El costo de la madera aserrada.
- El costo de los fletes.
- El costo de los adhesivos.
- El costo de los productos protectores.
- El costo de la mano de obra
- El rendimiento diario de la fábrica.

Para mejorar los costos de adquisición de los insumos se pueden hacer compras en volumen para conseguir precios más bajos. En cuanto al costo de los fletes se tendría que contar con un transporte propio para poder disminuirlo. Y finalmente el costo de la mano de obra y el rendimiento diario de la fábrica se encuentran íntimamente ligados, por lo que incentivar a los trabajadores con un volumen mínimo de producción y un pago extra por el excedente podría funcionar para aumentar la producción con menores costos, haciendo bajar el precio de producción.

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.

Para el diseño estructural se consideró 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. 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.

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.

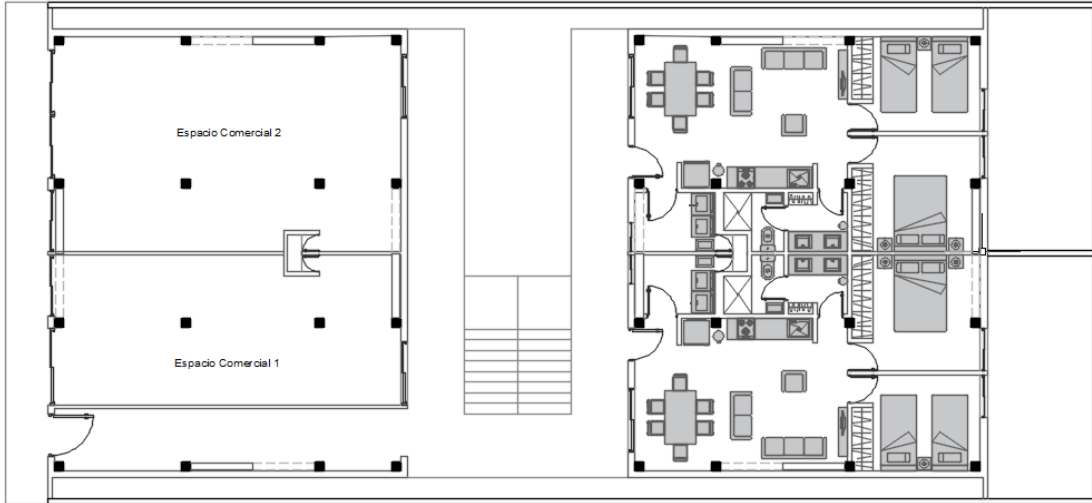
Con las combinaciones de cargas completadas, y todas las cargas aplicadas en el modelo, se utilizó la función del software para optimizar las secciones en incrementos compatibles con los

espesores y anchos en que se producirían normalmente los elementos estructurales de madera masiva. 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 cuanto madera en rollo corresponde el volumen de madera masiva del edificio y con ese dato se estimó el potencial de captura de carbono.

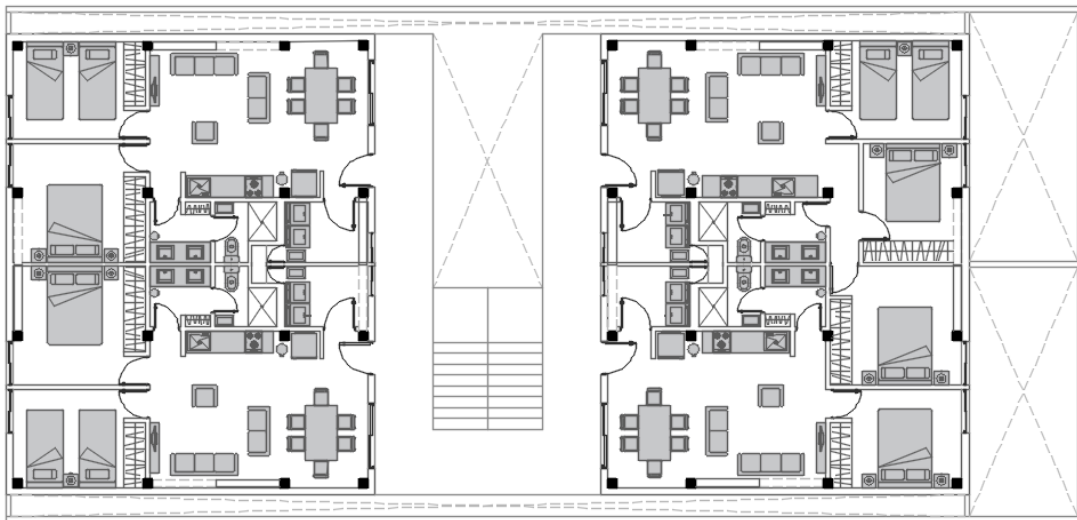
El mismo proceso se repitió para diseñar un edificio de acero con el mismo proyecto arquitectónico y las mismas cargas, excepto las del peso propio. Los precios unitarios se obtuvieron de CYPE (2018) y se actualizaron los precios mediante cotizaciones telefónicas. Posteriormente se compararon los presupuestos 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. En la Figura 48 se pueden ver las plantas del edificio.

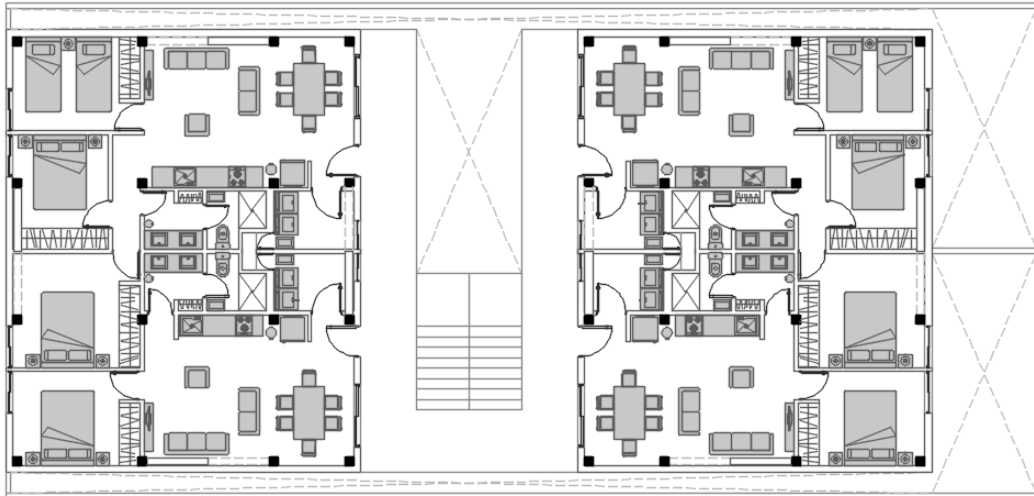


Planta Baja

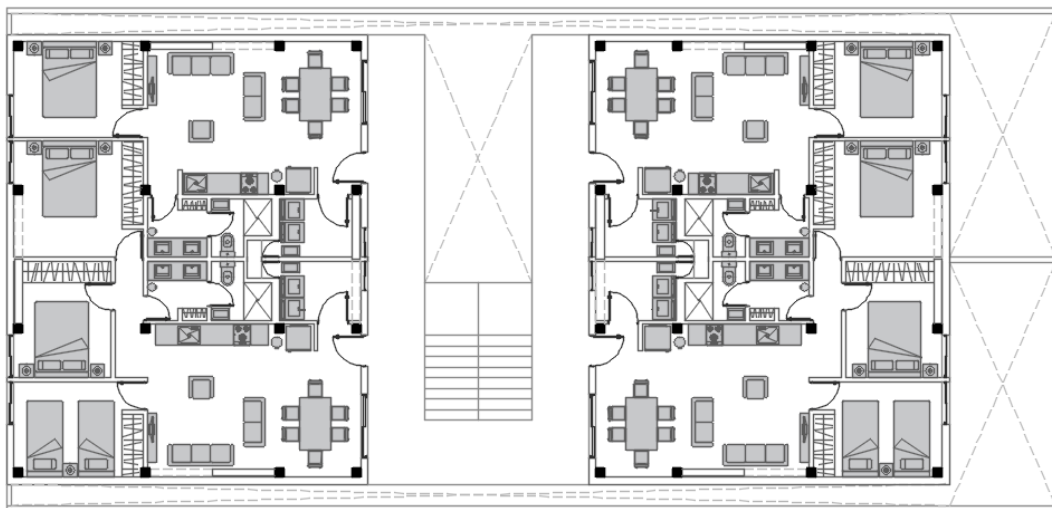


Primer Piso





Segundo Piso



Tercer Piso

Figura 48. Plantas tipo del proyecto arquitectónico (Elaboración propia).

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

En los Gráficos 16 al 20 se pueden observar los porcentajes de esfuerzo para cada caso de carga de ambas estructuras.

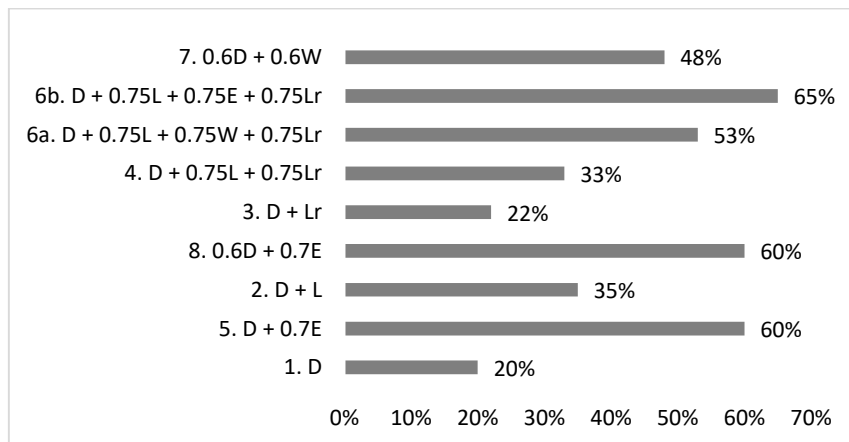


Gráfico 16. Resultados para la resistencia al fuego de la estructura de madera masiva (Elaboración propia).

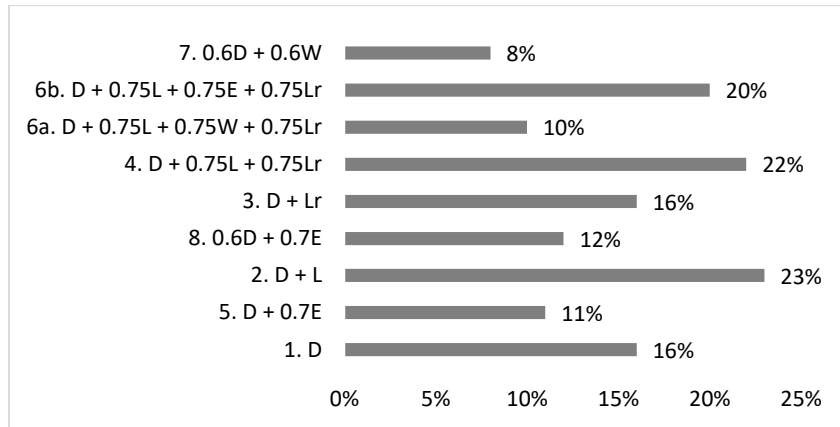


Gráfico 17. Resultados para el estado límite último de la estructura de madera masiva (Elaboración propia).

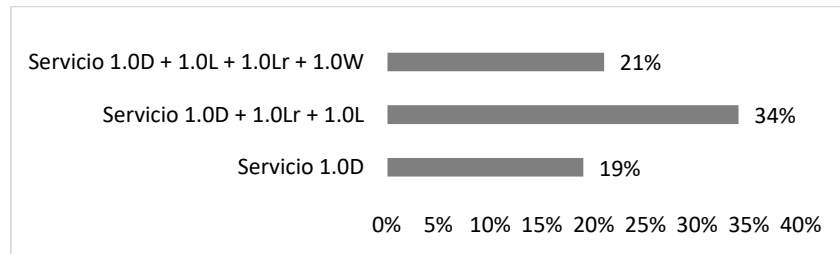


Gráfico 18. Resultados para el estado límite de servicio de la estructura de madera masiva (Elaboración propia).

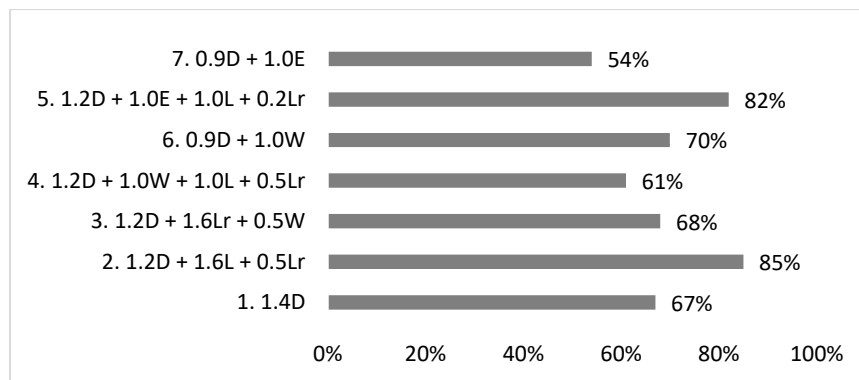


Gráfico 19. Resultados para el estado límite último de la estructura de acero (Elaboración propia).

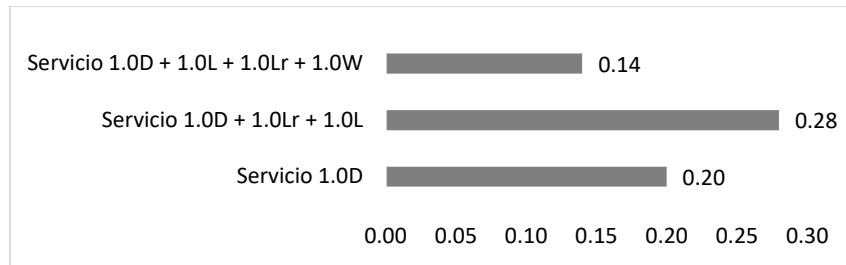


Gráfico 20. Resultados para el estado límite de servicio de la estructura de acero (Elaboración propia).

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 49 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.

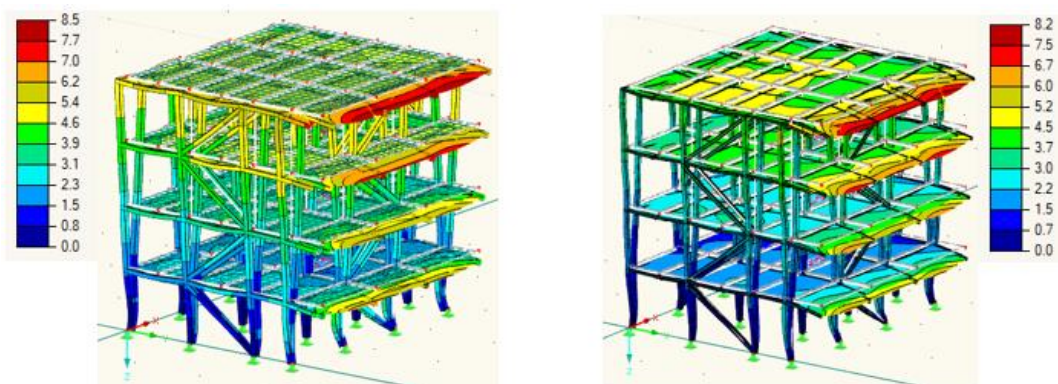


Figura 49. Resultados de desplazamientos para el caso de carga que involucra las fuerzas sísmicas (Elaboración propia).

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.

4. Perspectivas cualitativas y subjetivas de los actores sociales, en torno a la construcción de madera.

Este apartado pretende evaluar la aceptación y el posible impacto social del sistema constructivo de madera masiva, desde la perspectiva de los productores forestales certificados y los compradores potenciales.

4.1 Metodología

Para obtener la información necesaria se diseñaron dos instrumentos. El primero fue un censo sobre la oferta de madera certificada, y la disponibilidad a aceptar el pago por servicios ambientales que beneficien a las comunidades forestales de México. El procedimiento consistió en enviar por correo electrónico una invitación para responder un cuestionario en la plataforma Google Forms, además se confirmó vía telefónica que la invitación llegó con los representantes de los 73 productores forestales certificados en México por el Forest Stewardship Council (FSC). En el caso de la comunidad indígena de San Juan Nuevo, Michoacán se aplicó el cuestionario personalmente a manera de pilotaje. Con este instrumento se recabó información sobre las características cualitativas y cuantitativas sobre la producción de madera certificada en México, los procesos de compra y flete, así como la disponibilidad a aceptar el pago para fomentar el desarrollo sustentable de la comunidad forestal.

El segundo instrumento fue una encuesta sobre el sistema constructivo de madera masiva y la disponibilidad de los compradores potenciales para pagar por proteger servicios ambientales en las comunidades forestales. Para la cual se aplicó un cuestionario a una muestra de compradores potenciales de unidades de vivienda fabricadas con madera masiva, para recabar sus percepciones sobre las construcciones de madera, las impresiones generadas sobre el sistema constructivo de madera masiva y conocer que espacios y equipamiento de serie consideran los necesarios para una vivienda nueva. También se evaluó la disponibilidad a pagar por una vivienda de madera masiva y por servicios ambientales en las comunidades forestales. Para consultar los detalles metodológicos ver los Anexo 8, 9, 10 y 11.

4.2 Descripción de Resultados

Con los datos recabados mediante la encuesta sobre la oferta de madera certificada, y la disponibilidad a aceptar el pago por servicios ambientales que beneficien a las comunidades forestales de México encontramos que del universo total de predios certificados por FSC, el 83.3% son empresas comunitarias, pero haciendo un filtro con productores que su madera principal es el pino este porcentaje se reduce al 75%. Todos los productores de pino cuentan con proceso de estufado, y el precio por pt de la madera de pino estufada que se requiere para fabricar los paneles de madera masiva es de \$13.46 m.n. (IVA incluido). Ante la pregunta de cuanto podrían aumentar su producción si la demanda de la madera se disparará por las construcciones con madera masiva, encontramos que en promedio se podría aumentar un 70%.

También podemos observar que en general los productores de madera certificada de pino perciben muy altos los costos y trámites necesarios para obtener la certificación, y al mismo tiempo los beneficios económicos obtenidos por la misma y la demanda de madera certificada es muy baja actualmente. Lovera (Comunicación personal), gerente del aserradero Conjunto Predial Potrero de Mulas I, II, III Y IV, ubicado en Mascota, Jalisco, reportó que el costo de la certificación es de \$200,000.00 m.n. por certificar el origen sustentable de la madera en el bosque, y a parte otros \$200,000.00 m.n. para poder certificar el proceso de aserrío de la madera, el cual es necesario si se quiere vender piezas aserradas de madera certificada. También comentó que han solicitado el apoyo a la CONAFOR para poder certificar este segundo proceso y que no han salido beneficiados por el programa, lo cual los desalienta de continuar con el proceso porque además no hay una demanda significativa de madera certificada con la cual pudieran recuperar los gastos de la inversión.

Por su parte Luis Alberto Moreno, responsable técnico del ejido La Selva de Veracruz, informó en las observaciones del cuestionario, que el principal beneficio de la certificación que se puede percibir actualmente es la aplicación de las buenas prácticas de manejo y protección para el mismo personal del ejido, sin embargo comentó que ante la escalada de precios que se percibe actualmente se ha comentado en el ejido que una manera de bajar costos es evitar continuar con el proceso de certificación, ya que no les ha dejado beneficios económicos. Mencionó también que ni al propio gobierno federal le interesa promover el uso de la madera certificada, agregó que han intentado ofrecer la madera certificada dentro de las obras públicas federales y se han encontrado con que no hay ningún tipo de candado para que en estas obras se introduzca madera ilegal, es más,

menciona que por los precios unitarios que están manejando en la adquisición de madera es muy probable que su origen no sea legal. En el Gráfico 21 se pueden apreciar las percepciones de los productores de madera de pino sobre la certificación.

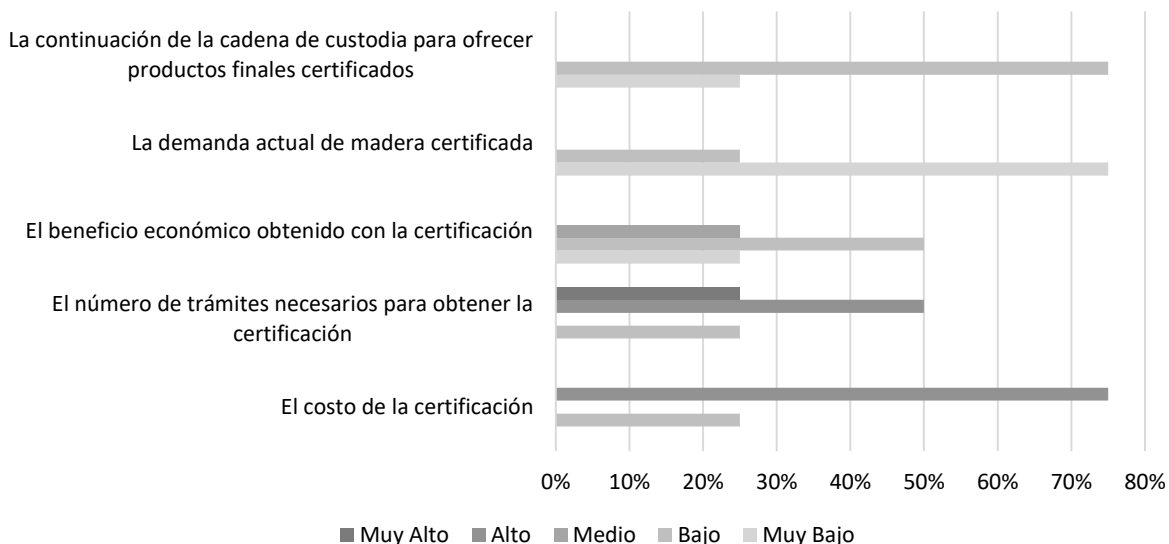


Gráfico 21. Percepciones de los productores de madera de pino sobre la certificación
(Elaboración Propia).

Respecto al proceso de estufado todos los aserraderos usan leña o aserrín como combustible, sin embargo ninguno de los encuestados conoce cuánto combustible se usa para estufar 1 m³ de madera. Los porcentajes de humedad obtenidos después del proceso de estufado varían entre un 5% y un 15%. El tiempo para tener listo un pedido de 50m³ equivalente a un tráiler completo varía entre 8 días y 1 mes, con un costo promedio del flete de \$28,000.00 m.n. Por último respecto a la sección sobre la disponibilidad a aceptar el pago para fomentar el desarrollo sustentable de la comunidad forestal, evaluando aspectos referentes a cada dimensión de la sustentabilidad se encontró que la dimensión política es donde hay menos disponibilidad a actuar, y por el contrario los temas ecológicos son donde existe mayor disponibilidad. En el Gráfico 22 se puede apreciar los resultados sobre la disponibilidad para aceptar el pago para fomentar el desarrollo sustentable de las comunidades forestales.

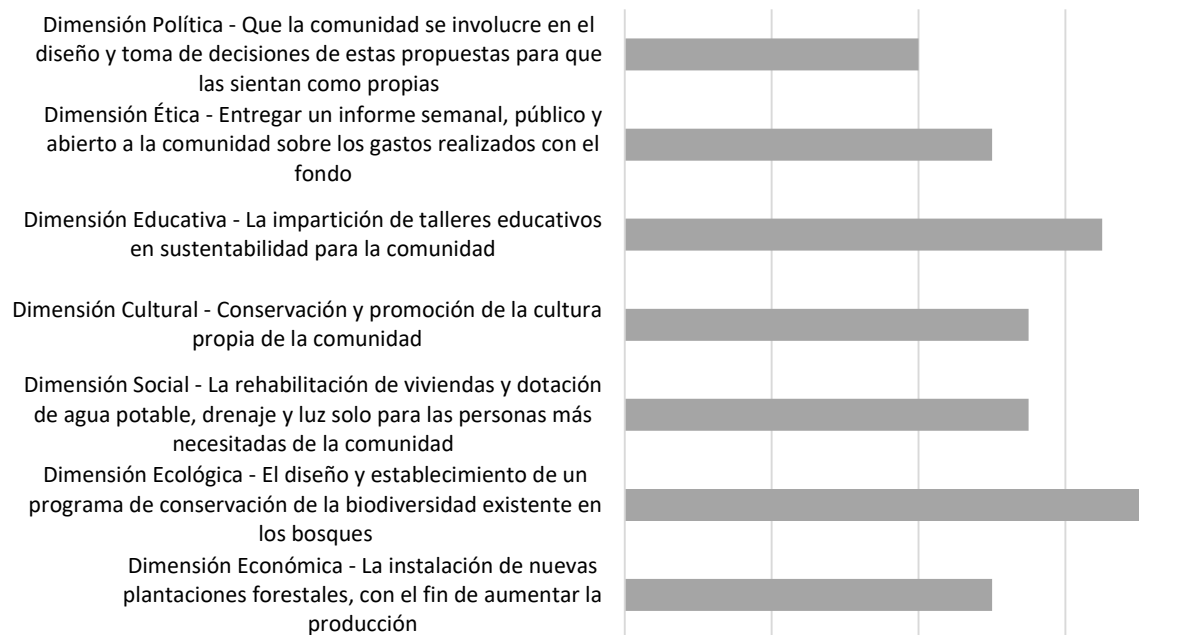


Gráfico 22. Disponibilidad para aceptar el pago para fomentar el desarrollo sustentable de las comunidades forestales (Elaboración propia).

Por medio de la encuesta sobre el sistema constructivo de madera masiva y la disponibilidad de los compradores potenciales para pagar por proteger servicios ambientales en las comunidades forestales, se recopilaron los siguientes datos. Los encuestados refieren que la percepción más negativa de las casas de madera sobre las de material convencional es el riesgo de que sufran un incendio, le sigue la menor durabilidad, y en menor medida un precio más elevado. En cambio, la percepción más positiva de las casas de madera sobre las casas de material convencional es el confort térmico, seguido del potencial ecológico de la vivienda, la calidad de los acabados y en menor medida la resistencia frente a los sismos. En el Gráfico 23 se puede apreciar la comparación de las percepciones sobre las casas de madera y de material convencional por parte de los compradores potenciales

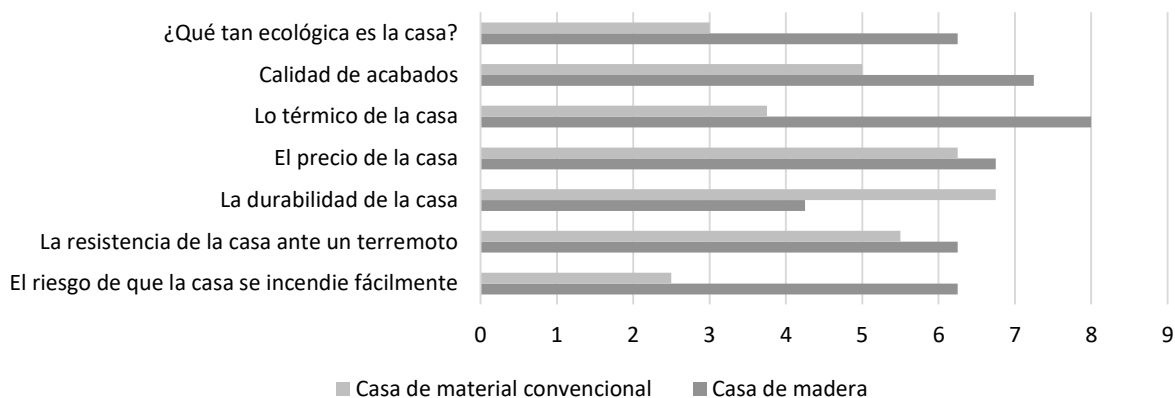


Gráfico 23. Comparación de las percepciones sobre las casas de madera y de material convencional por parte de los compradores potenciales (Elaboración propia).

En general las primeras impresiones de los encuestados frente al sistema constructivo de madera masiva son positivas, obteniendo valores altos en el siguiente orden. Primero la calidad de los acabados, seguido por el potencial ecológico del sistema constructivo, después se encuentra la disposición a comprar o rentar alguna vivienda de este tipo si tuvieran el dinero, y un poco más abajo la posibilidad de que este sistema constructivo se desarrolle en Guadalajara. También el nivel de riesgo general percibido en estas construcciones presenta valores bajos. En el Gráfico 24 se pueden apreciar las percepciones de los compradores potenciales sobre el sistema constructivo de madera masiva.

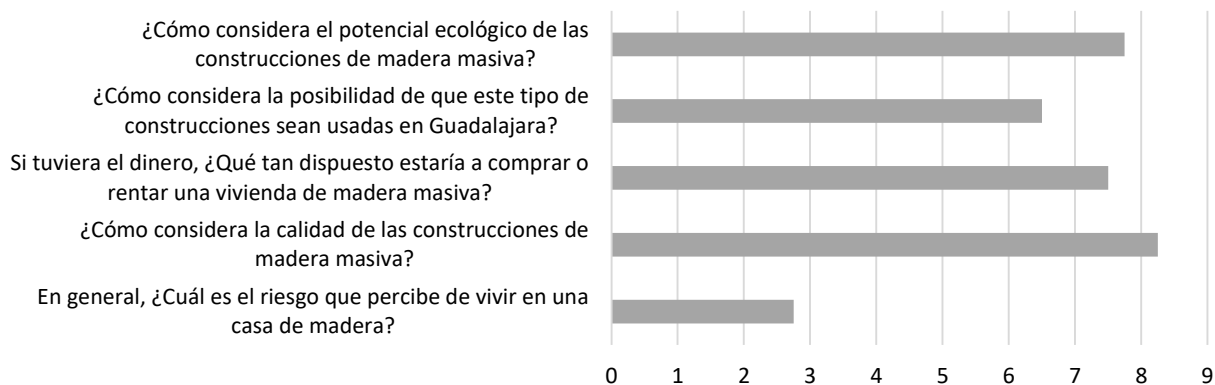


Gráfico 24. Percepciones de los compradores potenciales sobre el sistema constructivo de madera masiva (Elaboración propia).

En cuanto a las preferencias de equipamiento de serie en viviendas nuevas, los encuestados muestran mucho interés en los temas ecológicos, tanto el calentador solar y los paneles solares comparten el primer puesto de las preferencias, seguido por contar con un huerto comunitario para producir vegetales orgánicos. En cuanto a los espacios necesarios en la vivienda, los encuestados prefieren 3 recámaras y 2 cajones de estacionamiento, y solo el 66% reduciría su preferencia a un cajón de estacionamiento si su desarrollo se ubicara cerca del tren ligero. Además solo el 28% preferiría comprar un departamento dentro de la ciudad, el resto prefiere vivir en un coto fuera de periférico. Finalmente en cuanto a la disponibilidad a pagar por proteger servicios ambientales, el promedio de los encuestados nos da un valor de \$14,700.00 m.n. por unidad de vivienda comprada. En el Gráfico 25 se pueden apreciar las preferencias de equipamiento de serie en vivienda nueva.

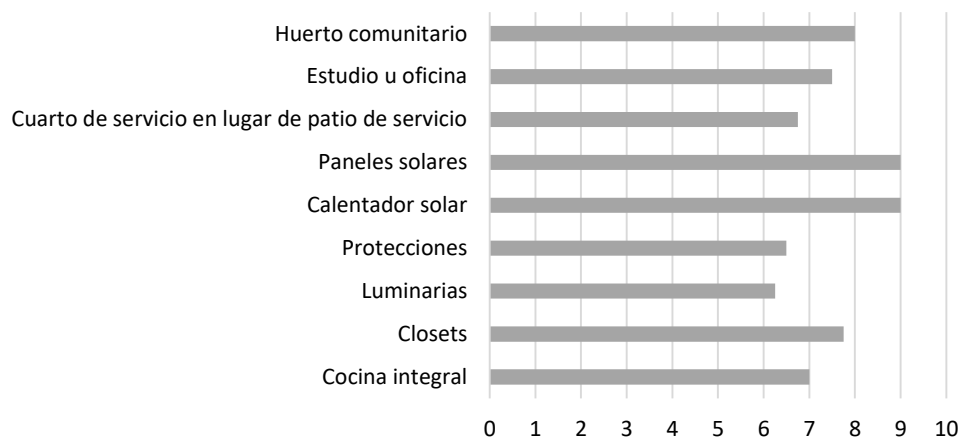


Gráfico 25. Preferencias de equipamiento de serie en vivienda nueva (Elaboración propia).

4.3 Interpretación de Hallazgos

Aceptación del mercado potencial

Se observó que los encuestados tenían unas primeras impresiones negativas sobre la construcción con madera. Sin embargo después de explicarles que es el sistema constructivo de madera masiva y mostrarles imágenes de la calidad de los interiores de este tipo de departamentos, esta percepción se transformó en una aceptación general para rentar o comprar una vivienda de este tipo. De la misma manera la percepción del riesgo que implicaría vivir en un edificio así fue baja.

Esta evolución en la percepción de los encuestados después de conocer solo mediante fotografías el sistema constructivo de madera masiva nos indica que es muy viable la aceptación por parte del mercado potencial.

Promoción del manejo forestal sustentable y generación de beneficios económicos para las comunidades productoras

Sobre los beneficios de la certificación forestal sustentable, Fernández (2015) menciona que “lo que se ha hecho desde el gobierno es cubrir los costos de la certificación, aunque sin generar mercados para ella” (p.2). Con los cuestionarios de la encuesta sobre la oferta de madera certificada respondidos hasta el momento tenemos que la mayoría de los encuestados reportan beneficios económicos bajos y muy bajos derivados de la certificación. Incluso comentan que ante la inflación en otros costos se han planteado el dejar de renovar la certificación con el fin de mantener sus costos de producción. Otra encuesta realizada por Martínez & Colín (2003) concluye “que los beneficios resultado de la certificación, en términos de mejores ingresos, han sido escasos para la mayoría” (p.46). También Gerez & Alatorre (2007) afirman que para los aserraderos certificados “las ventas de madera certificada han sido de poco volumen y no han recibido precios más elevados” (p.110). Por su parte el Ing. Medina comentó en la entrevista que si hay demanda de madera certificada pero no hay disponibilidad de los empresarios para pagar lo que cuesta. Esto genera un círculo vicioso donde se le regatea el precio al productor, y este a su vez compensa la falta de ingreso enviando madera de menor calidad, sobre todo con alabeos, los cuáles a su vez generan grandes porcentajes de desperdicios en las industrias. (Medina, Comunicación personal, 3 de mayo de 2017)

A esta crisis se le suma la suposición recabada en la encuesta de que dado el bajo precio unitario con que se cotiza la madera en los contratos de obra pública federal lo más probable es que estas obras estén contribuyendo a la compra de madera ilegal. Fernández (2015) indica que

el Congreso de la Unión incluyó en la Ley de Adquisiciones, Arrendamientos y Servicios del Sector Público la provisión de que “tratándose de adquisiciones de madera, muebles y suministros de oficina fabricados con madera, deberán requerirse certificados otorgados por terceros previamente registrados ante la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, que garanticen el origen y el manejo sustentable de los aprovechamientos forestales de donde proviene dicha madera” Sin embargo, este mandato legal no se ha cumplido a cabalidad, y las compras de productos certificados

por parte de las entidades públicas se da rara vez. Muchas veces, además, si bien se trata de productos certificados, estos son importados. (pp.1-2).

Una pregunta de la encuesta sobre la oferta de madera certificada evalúa la capacidad de incrementar la producción de madera certificada si la demanda se incrementara gracias a las construcciones de madera masiva. Las respuestas indican que en promedio los aserraderos podrían aumentar en un 70% su producción. Este dato coincide con la encuesta de Martínez & Colín (2003) que afirma que “la certificación tampoco ha dado lugar a un aumento de su producción forestal, pues afirman mantener sus niveles de producción constantes y en algunos casos por debajo de las hectáreas autorizadas para su aprovechamiento comercial” (p.67). Además concluyen que el no conseguir un sobreprecio probablemente se deba a la “poca capacidad de los productores para conseguirlo y por el escaso desarrollo de este tipo de mercado, principalmente en nuestro país” (p.69). En opinión del Ing. Medina, México cuenta con mucha madera, pero las comunidades indígenas que son las dueñas de la misma, no reciben por parte de CONAFOR los apoyos suficientes para adquirir la maquinaria necesaria para producir piezas de madera de calidad, siendo la corrupción presente en los programas de apoyo, mediante precios inflados la principal causa de esto (Medina, Comunicación personal, 3 de mayo de 2017).

Con base en los hallazgos anteriores podemos tener unos primeros indicios de que un incremento en la demanda de madera certificada debido a la construcción con madera masiva, resultaría en una mayor producción de madera certificada respaldando la conservación de la biodiversidad mediante el pago extra realizado por los compradores potenciales y traduciendo en mayores beneficios económicos para las comunidades productoras.

5. Discusión y conclusiones

Aun cuando se obtuvieron resultados positivos en la encuesta y el censo para conocer la percepciones cualitativas y subjetivas de los usuarios potenciales y de los aserraderos certificados, es necesario mencionar que no se pudieron hacer las suficientes encuestas para contar con una muestra con validez estadística, por lo que sería conveniente diseñar nuevos y mejores métodos para recabar esta información en futuros estudios.

De igual manera, en este estudio se tuvo la limitante de no contar con extensómetros que nos ayudaran a medir el desplazamiento de las probetas durante los ensayos con la mayor precisión posible, lo que probablemente causó que los módulo de elasticidad obtenidos estén más bajos en relación con la resistencia a la flexión, a diferencia de la relación apreciada en la tabla de clases resistente de la norma EN 338 (2009). Debido a que el módulo de elasticidad es una de las propiedades que más influyen en el comportamiento estructural de la madera es recomendable que están pruebas se realicen con la mayor precisión posible para obtener los resultados más exactos.

Tampoco se contó con los recursos suficientes para realizar el número de ensayos mínimos que requiere la norma EN 384 (2004) para la obtención de los esfuerzos permisibles, por lo para futuras investigaciones es necesaria consideran los recursos suficientes para que los resultados tengan una mayor validez estadística.

Los esfuerzos permisibles obtenidos para la muestra de madera de *Pinus* spp. nos indican que por lo menos la madera certificada del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán, presenta las características estructurales adecuadas para la fabricación de elementos estructurales de madera masiva. Paradójicamente vemos que las NTCM (2017), las cuales son la única norma mexicana que presenta valores de diseño para maderas de coníferas, presentan valores de diseño muy por debajo de los obtenidos en este trabajo, incluso ubica a dos de tres clases resistentes fuera de la clases estructurales mínimas de la norma europea EN 338 (2009). Esta condición desincentiva el uso de la madera nacional, y peor aún, promueve el uso de maderas importadas, al publicar en la mismas NTCM (2017) mejores valores de diseño para estas especies.

Mediante los ensayos de elementos estructurales de madera masiva se pudo validar los esfuerzos permisibles obtenidos en esta investigación. Para la viga de madera laminada se observó que las uniones finger joint sometidas a flexión pueden fallar antes del máximo esfuerzo de flexión si estas no tienen el largo adecuado. Se observó también que las capacidades de carga calculadas para los muros, columnas y losas de resultaron muy conservadoras. En el caso de las losas de madera laminada clavada y madera contralaminada, se pudo observar que su modo de falla les permite mantener su capacidad de carga después de varias fallas parciales. Estas observaciones son un indicativo de la confiabilidad estructural de este sistema constructivo, si se cumple con los requerimientos mínimos de fabricación.

Con estos resultados fue posible modelar el sistema de la estructura de un edificio de madera masiva, demostrando que por lo menos con la madera certificada proveniente del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán, se pueden construir edificios de madera masiva, cumpliendo con el diseño por sismo, viento y resistencia al fuego exigidos por la normatividad aplicable.

Además se encontró que este edificio de madera masiva tendría un costo similar a uno construido con acero, pero con dos ventajas principales, la primera es su calidez visual en acabados, y la segunda su potencial de captura de carbono de 214.88 toneladas de CO₂. Este número a su vez se convierte en una meta, ya que si se logrará construir el resto del edificio con materiales que en suma no superen esta barrera, y que además el edificio fuera capaz de generar su propia energía mediante paneles solares, estaríamos ante un edificio de carbono cero, algo imposible de lograr con acero y concreto reforzado.

También se pudo observar que existe una tendencia a la disposición de vivir en una vivienda de madera masiva una vez que se les explican a los posibles compradores de una vivienda el funcionamiento y las ventajas que tiene la construcción con madera. De igual manera se constató con los representantes de algunos aserraderos certificados que existe el potencial de incrementar la producción de madera sustentable, pero que no hay el suficiente mercado para hacerlo, por lo que es posible que el desarrollo de este sistema constructivo pueda impactar positivamente en las comunidades que manejan los bosques certificados en México.

Con los resultados de esta investigación y la revisión del estado del arte, resulta evidente que el sistema constructivo de madera masiva se presenta como la solución más viable para conseguir edificios bajos en carbono que provean la vivienda vertical y usos mixtos que se requieren para densificar las ciudades y mejorar la calidad de vida de la creciente población urbana. Vemos como la adopción de este sistema constructivo por parte de Europa y Norteamérica se va dando de forma casi natural gracias a la gran tradición que tienen en construcción con madera.

En México por el contrario, a pesar de contar con grandes recursos forestales, se identificó que no se ha construido casi ningún edificio de madera, debido a la desvinculación entre la academia, la industria de la construcción, los aserraderos certificados y los responsables de la elaboración de los reglamentos municipales de construcción. Esta desvinculación se deriva en la nula producción de información técnica sobre los esfuerzos permisibles de la madera nacional certificada, y en la ausencia de preparación en estructuras de madera por parte de las universidades

hacia los profesionales de la industria de la construcción mexicana. En este contexto es fácil que se generen creencias equivocadas del público en general, el cual percibe a la madera como un material débil, fácil de incendiarse, poco durable, de origen no siempre legal y cuyo uso genera impactos ecológicos negativos.

Al momento ningún aserradero certificado del país ha publicado los esfuerzos permisibles de sus productos, y tampoco ofrecen estos con alguna clasificación estructural. Esta situación brinda la oportunidad de generar desde la academia un proyecto que vincule a estos aserraderos, y la industria de la construcción para elaborar un estándar nacional de construcción con madera, en el cual se aborden todos los productos de madera masiva. Obteniendo los esfuerzos permisibles para los productos de cada aserradero nacional certificado. Este trabajo debe incluir también un análisis específico del factor Q para las estructuras de madera masiva, ya que es evidente que cuando se definió que este valor fuera de 1.5 se estaba pensando en estructuras de madera maciza, la cual contiene nudos e imperfecciones propias de la naturaleza de material, responsables de presentar modos de falla catastróficos. Sin embargo estas imperfecciones son prácticamente eliminadas en la fabricación de los paneles de madera masiva, provocando que puedan superar las capacidades de carga calculadas como se observó en los ensayos de los elementos estructurales. Un trabajo científico de este alcance y calidad daría la certeza necesaria para que sea adoptado como las normas técnicas complementarias para construcción con madera por cada municipio del país, promocionando el uso de la madera nacional certificada y resultando en estructuras más económicas comparadas con el uso de la normativa actual.

Como otras investigaciones futuras se propone el análisis de los modos de falla de los elementos estructurales de madera masiva, específicamente estudiar la posibilidad de provocar en cada tipo de elemento estructural el mismo modo de falla que el observado en las losas de madera laminada clavada y madera contralaminada, ya que esto aumentaría la confiabilidad estructural de este sistema constructivo.

Otra investigación necesaria es el diseño y desarrollo de maquinaria automatizada para fabricar los distintos elementos estructurales que conforman este sistema constructivo. Este tipo de maquinaria se produce en varios países de Europa y en Estados Unidos, pero a precios muy elevados, por lo que una investigación en este sentido es un área de oportunidad. De la misma manera el desarrollo de conexiones metálicas y dispositivos que absorban las fuerzas laterales es

otra área con gran potencial de investigación, la cual se está desarrollando en varias universidades y empresas privadas de Estados Unidos y Europa.

6. Fuentes consultadas

- ACTON OSTRY ARCHITECTS. (2016). Brock Commons Phase 1. Octubre 25, 2016, de ACTON OSTRY ARCHITECTS Sitio web: http://www.hermann-kaufmann.at/pdfs/14_26_TWR%20Media%20Kit%20FINAL.pdf
- AlaTown. (2015). E-Defense, World's Largest Earthquake Seismic Testing Table. Octubre 6, 2016, de AlaTown Sitio web: <http://www.alatown.com/testing-buildings-destruction/>
- Airbnb. (2018). 1,100 sq/ft Brick & Beam Loft Parkdale. Abril 12, 2018, de Airbnb Sitio web: <https://www.airbnb.mx/rooms/11096725>
- Arana, R., Briceño, I., Hernández, C., Uribe, S., Vargas, R. & Yoe, J., (2017). Propuesta de Tipología de Vivienda Sustentable en Guadalajara, Morelos + Aguazul. ITESO.
- ASTM. (2000). ASTM D 143 – 94. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. Estados Unidos: ASTM.
- AENOR. (2004). UNE-EN 408. Estructuras de madera, Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural, Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Madrid, España: AENOR.
- ASCE. (2010). ASCE/SEI 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Reston, Virginia: ASCE.
- AWC. (2015). NDS National Design Specification for Wood Construction 2015 Edition. Marzo 6, 2017, de American Wood Council Sitio web: <http://www.awc.org/codes-standards/publications/nds-2015>
- AWC. (2017). Fire testing completed on full-scale mass timber building. Noviembre 26, 2017, de AWC Sitio web: <http://www.awc.org/news/2017/07/13/fire-testing-completed-on-full-scale-mass-timber-building>
- AWC. (2017). NDS Supplement, Design Values for Wood Construction. Diciembre 14, 2017, de American Wood Council Sitio web: <http://www.awc.org/codes-standards/publications/nds-2018>
- Bazán, E. & Meli, R.. (2002). Diseño Sísmico de Edificios. México: Limusa.

- Beikircher, W., Lux, C. & Flach, M. (2013). MECHANICAL PROPERTIES OF PICEA ABIES AFTER VACUUM AND ATMOSPHERIC MICROWAVE DRYING. PRO LIGNO, Vol. 9, pp.642-649.
- BSLC. (2017). NLT Design and Construction Guide. Octubre 25, 2017, de ThinkWood Sitio web: <https://research.thinkwood.com/resource/nlt-design-construction-guide>
- BINDERHOLZ. (2015). WENLOCK ROAD. Octubre 25, 2016, de BINDERHOLZ Sitio web: <http://www.binderholz.com/es/soluciones-de-construccion/vivienda/wenlock-road-london-grossbritannien/>
- Bland, K. (2017). Fire Testing Completed on Full-Scale Mass Timber Building with Promising Results. Abril 4, 2018, de Wood Design Building Sitio web: <http://www.wooddesignandbuilding.com/fire-testing-completed-on-full-scale-mass-timber-building-with-promising-results-2/>
- Boff, L. (2013). Modelos actuales de sostenibilidad y crítica de los mismos. En LA SOSTENIBILIDAD. Qué es y qué no es. (Posición en Kindle 393-888). España: Sal Terrae. Edición de Kindle.
- Brandner, R. (2013). Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report. Mayo 9, 2017, de Graz University Sitio web: https://www.researchgate.net/publication/261884030_Production_and_Technology_of_Cross_Laminated_Timber_CLT_A_state-of-the-art_Report
- Buchanan, A., John, S. & Love, S. (2013, febrero). Life cycle assessment and carbon footprint of timber buildings compared with steel and concrete buildings. NZ Journal of Forestry, 57(4), pp.9-18.
- Carbon 12. (2018). Carbon 12. Abril 12, 2018, de Carbon 12 Sitio web: <https://carbon12pdx.com/gallery/>
- Chapela, F. (2012). Estado de los bosques de México. noviembre 9, 2017, de CCMSS Sitio web: http://www.ccmss.org.mx/descargas/Estado_de_los_bosques_en_Mexico_final.pdf
- CFE (1993). Diseño por Sismo. En Manual de Diseño de Obras Civiles (pp. 1-60). México: CFE.

- CFE (2008). Diseño por Viento. En Manual de Diseño de Obras Civiles (pp. 1-170). México: CFE.
- CONAFOR. (2013). Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México. julio 1, 2017, de CONAFOR Sitio web: <http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/ver.aspx?articulo=32>
- CREARA. (2013). Diagnóstico de emisiones de GEI en el sector de la construcción en México. noviembre 6, 2017, de INECC Sitio web: http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2012_estudio_cc_mitgef14.pdf
- Colorado School of Mines. (2017). Task 4b Plan. Marzo 3, 2017, de Colorado School of Mines Sitio web: <http://nheritallwood.mines.edu/task4b.html>
- CONACYT. (2017). Fondo de Innovación Tecnológica (FIT). Marzo 3, 2017, de CONACYT Sitio web: <http://www.conacyt.mx/index.php/fondos-sectoriales-constituidos2/item/fondo-de-innovacion-tecnologica-fit>
- CONAVI & CONACYT. (2016). FONDO DE DESARROLLO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO PARA EL FOMENTO DE LA PRODUCCIÓN Y FINANCIAMIENTO DE VIVIENDA Y EL CRECIMIENTO DEL SECTOR HABITACIONAL. Noviembre 27, 2016, de CONACYT Sitio web: <http://conacyt.gob.mx/index.php/el-conacyt/convocatorias-y-resultados-conacyt/convocatorias-fondos-sectoriales-constituidos/convocatoria-conavi-conacyt/convocatorias-abiertas-conavi-conacyt/convocatoria-2016-conavi-conacyt/12755-bases-de-la-convocatoria-conavi-2016/file>
- CORMA. (2015). En madera construyen primera vivienda chilena capaz de obtener aire y calor del suelo. Abril 12, 2018, de CORMA Sitio web: <http://www.corma.cl/corma-al-dia/biobio/en-madera-construyen-primera-vivienda-chilena-capaz-de-obtener-aire-y-calor-del-suelo>
- CYPE. (2018). Presupuesto m³ de Viga de Madera Laminada. Abril 6, 2018, de CYPE Ingenieros Sitio web: [http://www.mexico.generadordeprecios.info/remote.asp?Command=0,browse,idioma:13\[apartado:EMV110\[n:6701\[](http://www.mexico.generadordeprecios.info/remote.asp?Command=0,browse,idioma:13[apartado:EMV110[n:6701[)

- ENR. (2016). Mass-Timber Assembly Passes Two-Hour Fire Test. En Engineering News-Record. Pp. 24-25, 2016, 122ethink122 1. Retrieved from EbscoHost database.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (2009). EN 338:2009 Structural timber – Strength classes. Bruselas: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (2004). EN 384:2004 Structural timber — Determination of characteristic values of mechanical properties and density. Bruselas: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.
- Fernández, E. (2015). EL FSC EN MÉXICO: Retos y oportunidades de la certificación de buen manejo forestal en el marco de la silvicultura comunitaria. Octubre 25, 2016, de Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible Sitio web: <http://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2015/11/FSC-Mexico-General.pdf>
- FING. (2015). TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN CON MADERA EN URUGUAY. ESTADO DEL ARTE Y PERSPECTIVAS. Febrero 3, 2017, de Universidad de la República Sitio web: <https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2016/25086/2015-II%20CBCTEM.pdf>
- Freres Lumber Co. (2018). Mass Plywood Panel. Recuperado el 26 de abril de 2018, a partir de <https://frereslumber.com/products-and-services/mass-plywood-panel/>
- Fuentes, H., Carrillo, A., Soto, J. Mendoza, J., Espinosa, J. & Rodríguez, M. (2015). Innovación para el desarrollo: 13 casos del Fondo de Innovación Tecnológica. Marzo 3, 2017, de CONACYT Sitio web: <http://www.conacyt.mx/index.php/el-conacyt/convocatorias-y-resultados-conacyt/convocatorias-fondos-sectoriales-constituidos/convocatoria-se-conacyt-innovacion-tecnologica/casos-de-exito-fit/10824-innovacion-para-el-desarrollo-13-casos-del-fit/file>
- Gagnon, S. & Pirvu, C. (2011). CLT Handbook – Canadian Edition. Enero 18, 2017, de FPInnovations Sitio web: <https://fpinnovations.ca/Pages/CltForm.aspx>
- García, E. & Lindig, R. (2011, julio 1). BARRERAS E INCENTIVOS ECONÓMICOS PARA LA RESTAURACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD. Acta Biológica Colombiana, 16, pp.269-280.

- García, L., Guinedo, A., Peraza, C. & de Palacios, P. (2002). La madera y su tecnología. Madrid: Fundación Conde del Valle de Salazar y Ediciones Mundi-Prensa.
- Gernandt, D. & Pérez-de la Rosa, J. (2013, marzo 25). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, pp.126-133.
- Green, M. (febrero, 2013). Michael Green: Por qué debemos construir rascacielos de madera. Octubre 19, 2016, de TED Ideas worth spreading Sitio web: https://www.ted.com/talks/michael_green_why_we_should_build_wooden_skyscrapers?language=es
- Green, M. & Karsh, J. (2013). THE CASE FOR Tall Wood BUILDINGS. Septiembre 20, 2016, de MG ARCHITECTURE Sitio web: <http://mg-architecture.ca/work/the-case-for-tall-wood/>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2017, diciembre 15). NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA. *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, pp. 567-613.
- Gobierno del Distrito Federal. (2004, octubre 6). NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MADERA. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, pp.54-87.
- González, P., Saavedra, E., Perez, E., Burgos, C., Piña, F. & Wagner, M. (2015). SISTEMA CONSTRUCTIVO EN MADERA CONTRALAMINADA PARA EDIFICOS. Santiago: Universidad de Santiago de Chile.
- HAUT. (2018). HAUT. Recuperado el 24 de abril de 2018, a partir de <https://hautamsterdam.nl/en/building/>
- Hermoso, E., Fernández-Golfín, J., Conde, M., Troya, M., Mateo, R., Cabrero, J. & Conde, M. (2015). CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA ASERRADA DE *Pinus radiata* MODIFICADA TÉRMICAMENTE. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, Vol. 17, pp.493-504.
- Hooper, E. (2015). Innovative Detail: Wood Innovation and Design Centre. Septiembre 30, 2016, de THE JOURNAL OF THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS Sitio web:

http://www.architectmagazine.com/technology/detail/innovative-detail-wood-innovation-and-design-centre_o

Horx-Strathern, O., Varga, C. & Guntchnig, G. (2017). The future of Timber Construction. CLT – Cross Laminated Timber. A study about changes, trends and technologies of tomorrow. Marzo 11, 2018, de Stora Enso Sitio web: <http://www.clt.info/wp-content/uploads/2017/06/Stora-Enso-The-future-of-timber-construction-EN.pdf>

ICC. (2018). International Building Code. USA: ICC.

IEA & WBCSD. (2009). Cement Technology Roadmap 2009. Septiembre 30, 2016, de Internacional Energy Agency & World Business Council for Sustainable Development Sitio web: http://www.wbcsc.org/web/projects/Cement/Cement_TechnologyRoadmap_Update.pdf

IMEPLAN. (2016, Julio 18). POTmet Plan de Ordenamiento Territorial Metropolitano del AMG. Periódico Oficial del Estado de Jalisco, p. 13.

INECC. (2013). Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010. Febrero 6, 2017, de INECC Sitio web: http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/inf_inegei_public_2010.pdf

INEGI. (2017). Extensión territorial de México. noviembre 9, 2017, de INEGI Sitio web: <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/extension/default.aspx?tema=T>

Ivanoff, J. (2015). CLT Shake Table Test in Japan. Octubre 6, 2016, de BC Wood Sitio web: <http://www.bcwood.com/2015/04/clt-shake-table-test-in-japan/>

Karakusevic Carson Architects. (2016). Bridport House. Octubre 20, 2016, de Karakusevic Carson Architects Sitio web: <http://karakusevic-carson.com/work/bridport-house>

Karacaibely, E. & Douglas, B.. (2013). CLT-Handbook US Edition. Abril 4, 2016, de ThinkWood Sitio web: https://www.thinkwood.com/wp-content/uploads/2017/12/CLT_USA-Complete-document-Think_Wood.pdf

KLH. (2009). Stadthaus, Murray Grove. Noviembre 12, 2016, de KLH Sitio web: <http://www.klhuk.com/portfolio/residential/stadthaus,-murray-grove.aspx>

- Koo, K. (2013). A Study on Historical Tall-Wood Buildings in Toronto and Vancouver. Octubre 17, 2016, de FP Innovations Sitio web: <https://fpinnovations.ca/Extranet/Assets/ResearchReportsWP/E4813.pdf>
- Lara J. (2016, mayo 3). El corredor urbano Nuevo México-Tesistán en Zapopan, Jalisco: un nuevo rompecabezas inmobiliario. Revista Transporte y Territorio, vol. 15, pp.323-347.
- Lend Lease. (2013). Forté – Building Australia’s First Timber Highrise. Octubre 20, 2016, de The Wood Products Council Sitio web: <http://www.woodworks.org/wp-content/uploads/2013-WSF-ATL-Collins.pdf>
- Ley General de Cambio Climático. Diario Oficial de la Federación, México, 19 de abril de 2012.
- LEVER ARCHITECTURE. (2017). Projects. Abril 12, 2018, de LEVER ARCHITECTURE Sitio web: <https://leverarchitecture.com/projects>
- Lyslo, J., André, R. & Lohne, J. (2016, octubre). High-Rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure – A Comparative LCA of Structural System Alternatives. Energy Procedia, 96, pp 112-123.
- Madera 21. (2017). QUÉ PASA CON EL CLT EN CHILE. Abril 12, 2017, de Madera 21 Sitio web: <http://www.madera21.cl/?p=7139>
- Mahadevan, S. (2017, noviembre 17). MASS TIMBER: A PRIMER AND TOP 5. Recuperado el 26 de abril de 2018, a partir de <http://blog.perkinswill.com/mass-timber-a-primer-and-top-5/>
- Martínez, A. & Colín, S. (2003, junio). La certificación ambiental de los bosques en México: reporte preliminar. Gaceta Ecológica, 67, pp.45-60.
- Mayo, J. (2015). Solid Wood: Case Studies in Mass Timber Architecture, Technology and Design. Taylor and Francis. Edición de Kindle.
- Medina, C., Comunicación personal. Mayo 3, 2017.
- Mercado Libre. (2018). Mercado Libre. Marzo 12, 2018, de Mercado Libre Sitio web: <https://www.mercadolibre.com.mx/>
- MGA. (2016). T3 Minneapolis. Abril 12, 2018, de MG ARCHITECTS Sitio web: <http://mg-architecture.ca/work/t3-minneapolis/>

- Milenio. (2014). Auditorio de la Reforma, listo para informe de RMV. Abril 12, 2018, de Milenio Sitio web: http://www.milenio.com/region/Auditorio-Reforma-listo-informe-RMV_0_226177914.html
- Morales, J. (2004). Sociedades rurales y naturaleza: en busca de alternativas hacia la sustentabilidad. Tlaquepaque, Jalisco: ITESO.
- Morales, J. (2017). La sustentabilidad y sus dimensiones: construyendo alternativas desde la complejidad, a la crisis civilizatoria. Febrero 11, 2017, de ITESO Sitio web: http://cursos.iteso.mx/pluginfile.php/992299/mod_resource/content/1/HABITATMAESTRIA2017.pdf
- Municipio de Zapopan. (2003). REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES Y DESARROLLO URBANO DEL MUNICIPIO DE ZAPOPAN. Noviembre 3, 2017, de SMIE Sitio web: <http://www.smie.org.mx/layout/reglamentos-construccion/jalisco-reglamento-construccion-municipal-zapopan.pdf>
- Municipio de Zapopan. (2014). REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES Y DESARROLLO URBANO DEL MUNICIPIO DE ZAPOPAN, JALISCO Y NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO POR SISMO. Noviembre 3, 2017, de SMIE Sitio web: <http://www.smie.org.mx/layout/reglamentos-construccion/jalisco-reglamento-construccion-municipal-zapopan-2014.pdf>
- Nájera J., Adame G., Méndez J., Vargas B., Cruz F., Hernández F. & Aguirre C. (2012). Rendimiento de la madera aserrada en dos aserraderos privados de El Salto, Durango, México. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, num. 55, pp.11-23.
- NOAA. (2017). ESRL Global Monitoring Division. Noviembre 5, 2017, de NOAA Sitio web: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>
- ONU. (1992). CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO. Febrero 16, 2017, de UNFCCC Sitio web: http://unfccc.int/essential_background/convention/items/6036.php

- Ordóñez J., H. J. de Jong B. & Masera O. (otoño 2001). Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques*, vol. 7, num. 2, pp.27-47.
- Page, C. (2011). La cubierta y pinturas de la iglesia de la Compañía de Jesús en la ciudad de Córdoba (Argentina). *Artigrama: Revista del Departamento de Historia del Arte de la Universidad de Zaragoza*, Vol. 26, pp. 625-648. 2016, octubre 24, De Dialnet Base de datos.
- Pei, S. (2017). Development and Validation of a Resilience-based Seismic Design Methodology for Tall Wood Buildings: Phase I Test. Abril 3, 2018, de NHERI UC San Diego Sitio web: <http://nheri.ucsd.edu/projects/2017-development-validation-seismic-design/>
- Pike Place Market Preservation and Development Authority. (2018). One of the Greatest Days in the History of Seattle. Abril 12, 2018, de Pike Place Market Preservation and Development Authority Sitio web: <http://pikeplacemarket.org/history>
- PRS ARCHITECTS. (2005). Carlisle Lane Flats – Wood Award. Octubre 20, 2016, de PRSArchitects Sitio web: <http://www.prsarchitects.com/news/publications/carlisle-lane-flats-wood-award>
- 127ethink Wood. (2016). Mass Timber in North America. Octubre 1, 2016, de 127ethink Wood Sitio web: http://www.rethinkwood.com/sites/default/files/reThink_Wood_Mass_Timber_in_North_America_BNPCEU_September_2016.pdf
- RetoZapopan (2018). 7ta Convocatoria Reto Zapopan 2018. Gobierno de Zapopan. Sitio web: <http://www.retozapopan.com.mx/pics/convocatoria/2018012409014803000000-convocatoriareto2018-compressed.pdf>
- Rizo, D., Navarro, A., Rodríguez, E., Vázquez, Z. & Díaz, G. (2017). Edificación de viviendas con sistemas constructivos de madera masiva. Tlaquepaque: ITESO.
- Robinson, T., Hallova, A., Spiritos, J. & Roelofs, M. (octubre 19, 2016). New Heights for Renewables: The US Tall Wood Building Competition. *CTBUH Journal*, Vol. I, pp.26-31. Sitio web: <http://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2699-new-heights-for-renewables-the-us-tall-wood-building-competition.pdf>

- Ross, L., Gagnon, S. & Keith, E. (2013). Structural design of cross-laminated timber elements. En CLT handbook: cross laminated timber U.S. ed(pp 1-19). Quebec: FpInnovations.
- Ryan, E., Griffin, G. & Rice, T. (2015). Solid Timber Construction. Octubre 20, 2016, de University of Utah Sitio web:
https://c.ymcdn.com/sites/www.nibs.org/resource/resmgr/OSCC/OffSite_Studies_STC.pdf
- SC. (2016). Auditorio de la Reforma. Octubre 6, 2016, de Secretaria de Cultura Sitio web:
<http://www.mexicoescultura.com/recinto/52711/auditorio-de-la-reforma.html>
- Schickhofer, G. & Hasewend, B. (2000). Solid Timber Construction – A construction system for residential houses, office and industrial buildings. Octubre 20, 2016, de Graz University of Technology Sitio web:
http://www.holzbauforschung.at/fileadmin/products_online/bsp_online/COST_2000_engl.pdf
- SEMARNAT. (2016). Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2015. México: Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos.
- Silva, J., Fuentes, F., Rodríguez, R., Torres, P., Lomelí, M., Ramos, J., Waitkus, C. & Georg, H. (2010). Fichas de Propiedades Tecnológicas y Usos de Maderas Nativas de México e Importadas. Guadalajara, México: Amaya Ediciones.
- SHF. (2015). Estado Actual de la Vivienda en México 2015. Septiembre 1, 2016, de Sociedad Hipotecaria Federal Sitio web:
<http://www.shf.gob.mx/estadisticas/EstadVivInformaAvaluos/Paginas/default.aspx>
- Sotomayor, J. (2015). Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas Mexicanas. Morelia, México: Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Sotomayor, J., Carmona, I., Cervantes, I., Garduño, D., Zaír, D., Lemus, R., Maldonado, D., Pérez, A., Vaca, M. & Valdez, O. (2015, diciembre 15). Madera laminada de Pinus pseudostrobus. Caracterización dinámica con métodos no destructivos. Investigación e Ingeniería de la Madera, Vol. 11, pp.1-35.

Sotomayor, J., Herrera, M. & Cruz, J. (2003). CLASIFICACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA DE 1 00 ESPECIES MEXICANAS. XII World Forestry Congress, Quebec, Canadá.

STRUCTURE CRAFT. (2013). Surrey Christian School Primary. Octubre 22, 2016, de StructureCraft Sitio web: <http://structurecraft.com/projects/surrey-christian-school-primary>

StructureCraft. (2017). T3 Minneapolis Office Building. Noviembre 11, 2017, de StructureCraft Sitio web: <https://structurecraft.com/projects/t3-minneapolis>

TUGraz. (2018). LIGNUM – Home. Recuperado el 20 de abril de 2018, a partir de <https://www.tugraz.at/en/institutes/lignum/home/>

Turbi, M. (2015). TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE MÁSTER TECNOLOGÍA DE LA ARQUITECTURA. DEGRADACIÓN ACELERADA EN CÁMARA CLIMÁTICA DE SUPERFICIES DE MADERA CON DIFERENTES TRATAMIENTOS Y COMPARACIÓN CON LA DEGRADACIÓN NATURAL A LARGO PLAZO. Barcelona: UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA.

UNEP. (2009). Buildings and Climate Change: Summary for Decision-Makers . febrero 22, 2017, de UNEP Sitio web: <http://www.unep.org/sbci/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf>

Wallner-Novak, M., Koppelhuber, J. & Pock, K.. (2013). Cross-Laminated Timber Structural Design. Abril 4, 2018, de proHolz Sitio web: https://www.binderholz.com/fileadmin/PDF/Basisprodukte/Brettsperrholz_BBS/201411_proHolz_Cross-Laminated_Timber_Structural_Design.pdf

WAUGH THISTLETON ARCHITECTS. (2009). Murray Grove – The Original Timber Tower. Octubre 21, 2016, de WAUGH THISTLETON ARCHITECTS Sitio web: <http://waughthistleton.com/murray-grove/>

10. Anexos

A continuación se presentan los anexos del trabajo.

ANEXO 1

Construcción de Madera Masiva

Propuesta para construir vivienda vertical sustentable

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables

Christian Hernández Cárdenas

Clasificación por densidades de la muestra de madera.

Objetivo

Clasificar la muestra de madera en dos clases resistentes de acuerdo a su densidad.

Variables

1. Variables de entrada
 - 1.1. Dimensiones
 - 1.2. Peso
2. Variables no controladas
 - 2.1. Contenido de Humedad
 - 2.2. Capacidad del personal de realizar la prueba
3. Variables de respuesta
 - 3.1. Densidad mínima (kg/m^3)
 - 3.2. Densidad media (kg/m^3)
 - 3.3. Densidad máxima (kg/m^3)

Unidad experimental

En este caso la unidad experimental fueron las tablas y polines provenientes del bosque de San Juan Nuevo, Michoacán.

Detalles operativos

- Lugar: Laboratorio de Ingeniería Civil, Edificio H del ITESO.
- Responsable: Christian Hernández Cárdenas.
- Fecha: Lunes 19 de junio al viernes 23 de junio del 2017.
- Supervisor: Dr. Nayar Gutiérrez Astudillo.

Equipo

Para realizar la medición de la humedad se utilizó un higrómetro y para pesar las tablas se utilizó una báscula. Ambos equipos estuvieron limpios, calibrados, y completos en todas sus partes.

Proceso de información

La información se procesó en una hoja de cálculo.

Procedimiento de la prueba

1. La muestra de madera se separó por espesor.
2. Se numeró cada elemento.
3. Se tomaron sus dimensiones.
4. Se verificó el contenido de humedad.
5. Se pesó cada elemento.
6. Finalmente se procesó la información en una hoja de cálculo.

Precauciones

Para evitar errores en el procedimiento se cuidará que la báscula este condiciones de operación y debidamente calibrada.

ANEXO 2

Construcción de Madera Masiva

Propuesta para construir vivienda vertical sustentable

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables

Christian Hernández Cárdenas

Ensayos de compresión de acuerdo a la norma ASTM D-143.

Objetivo

Conocer la resistencia a la compresión de la muestra de madera.

Variables

4. Variables de entrada
 - 4.1. Densidad
5. Variables no controladas
 - 5.1. Maquinaria de prueba
 - 5.2. Capacidad del personal de realizar la prueba
 - 5.3. Porcentaje de humedad
6. Variables de respuesta
 - 6.1. Resistencia a la compresión paralela a las fibras (N/mm²)
 - 6.2. Módulo de elasticidad (N/mm²)

Unidad experimental

En este caso la unidad experimental fue la determinada en la prueba ASTM D 143 para compresión paralela a la fibra. Se trató de una probeta de madera limpia con una sección de 2" x 2", y un largo de 8".

Factor

El factor es la densidad de la probeta y la presencia de defectos.

Detalles operativos

- Lugar: Laboratorio de Ingeniería Civil, Edificio H del ITESO.
- Responsable: Christian Hernández Cárdenas.
- Supervisor: Dr. Nayar Gutiérrez Astudillo.

Tipo de experimento

Diseño completamente al azar.

Tratamiento Experimental

Se ensayaron aleatoriamente cada una de las probetas de madera para medir su resistencia a la compresión paralela a la fibra, se tomaron los datos de carga/deformación en el límite proporcional para poder calcular el módulo de elasticidad.

Equipo

Prensa universal de 100 toneladas.

Proceso de información

La información se procesó mediante una hoja de cálculo.

Procedimiento de la prueba

1. Antes de colocar las probetas en la prensa, se limpiaron las superficies de las placas superior e inferior.
2. Se colocó la probeta por ensayar sobre la placa inferior, procurando que su eje estuviera alineado respecto del centro de la placa de carga.
3. La placa superior bajó haciendo un contacto uniforme y suave con la probeta aplicando la carga con una velocidad uniforme y continua, sin producir impacto ni pérdida.
4. Se registraron los datos de las cargas aplicadas y las deformaciones observadas, para determinar el límite proporcional y la falla última.
5. Dividiendo la diferencia de carga aplicada entre la diferencia de desplazamiento en un punto del rango elástico se obtuvo el módulo de elasticidad en N/mm^2 .

6. Dividiendo la carga aplicada al momento de la falla última entre el área de la probeta se obtuvo la resistencia a la compresión paralela a las fibras en N/mm².

Precauciones

Se verificó por medio de un higrómetro que las probetas de madera ensayadas contuvieran menos de un 12% de humedad.

Validación del proyecto y principio de diseño

Se ensayaron 6 probetas, 3 limpias y 3 con defectos.

ANEXO 3

Construcción de Madera Masiva

Propuesta para construir vivienda vertical sustentable

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables

Christian Hernández Cárdenas

Ensayos de resistencia a la flexión de acuerdo a la norma ASTM D143.

Objetivo

Obtener la resistencia a la flexión perpendicular a las fibras de la muestra de madera.

Variables

7. Variables de entrada
 - 7.1. Densidad
 - 7.2. Presencia de defectos
8. Variables no controladas
 - 8.1. Maquinaria de prueba
 - 8.2. Capacidad del personal de realizar la prueba
 - 8.3. Porcentaje de humedad
9. Variable de respuesta
 - 9.1. Resistencia a la compresión paralela a las fibras (N/mm²)
 - 9.2. Módulo de elasticidad (N/mm²)

Unidad experimental

En este caso la unidad experimental fue la determinada en la prueba estándar ASTM D143 para flexión perpendicular a la fibra. Se trata de una probeta de madera con una sección de 2" x 2", y un largo de 30".

Factor

El factor fue la densidad y la presencia de defectos

Detalles operativos

- Lugar: Laboratorio de Ingeniería Civil, Edificio H del ITESO.
- Responsable: Christian Hernández Cárdenas.
- Supervisor: Dr. Nayar Gutiérrez Astudillo.

Tipo de experimento

Diseño completamente al azar.

Tratamiento Experimental

Se ensayaron aleatoriamente cada una de las probetas de madera para medir su resistencia a la flexión perpendicular a la fibra, se tomaron los datos de carga/deformación para poder calcular el módulo de elasticidad.

Equipo

Se utilizó una prensa universal de 100 toneladas.

Proceso de información

La información se procesó en una hoja de cálculo.

Procedimiento de la prueba

7. Antes de colocar las probetas en la prensa, se limpiaron las superficies de las placas superior e inferior.
8. Se colocó la probeta por ensayar sobre las placas inferiores, procurando que su eje estuviera alineado respecto del centro de la placa de carga.
9. La placa superior bajó haciendo un contacto uniforme y suave con el centro de la probeta aplicando la carga con una velocidad uniforme y continua, sin producir impacto ni pérdida.
10. Dividiendo la diferencia de carga aplicada entre la diferencia de desplazamiento en un punto del rango elástico se obtuvo el módulo de elasticidad en N/mm^2 .
11. Para obtener el esfuerzo de flexión máximo, conocido como módulo de ruptura, se utilizó la carga máxima, P_{max} y la siguiente expresión:

$$\sigma_{\max} = MR = 1.5 \frac{P_{\max} l}{bd^2}$$

Precauciones

Se verificó por medio de un higrómetro que las probetas de madera ensayadas contuvieran menos de un 12% de humedad.

Validación del proyecto y principio de diseño

Se realizarán 6 ensayos, 3 con probetas limpias y 3 con defectos.

ANEXO 4

Construcción de Madera Masiva

Propuesta para construir vivienda vertical sustentable

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables

Christian Hernández Cárdenas

Ensayos de compresión para determinar el MOEc con medición independiente del desplazamiento de acuerdo a la norma ASTM D143.

Objetivo

Verificar si la lectura de desplazamiento de la prensa es correcta, y obtener el módulo de elasticidad en compresión de manera precisa.

Variables

10. Variables de entrada

10.1. Densidad

11. Variables no controladas

11.1. Maquinaria de prueba

11.2. Capacidad del personal de realizar la prueba

11.3. Porcentaje de humedad

12. Variables de respuesta

12.1. Módulo de elasticidad (N/mm²)

Unidad experimental

En este caso la unidad experimental fue la prevista en la norma ASTM D 143 para compresión paralela a la fibra. Se trató de una probeta de madera limpia con una sección de 2" x 2", y un largo de 8".

Factor

El factor fue la densidad

Detalles operativos

- Lugar: Laboratorio de Ingeniería Civil, Edificio H del ITESO.
- Responsable: Christian Hernández Cárdenas.
- Supervisor: Dr. Nayar Gutiérrez Astudillo.

Tipo de experimento

Diseño completamente al azar.

Tratamiento Experimental

Se ensayaron aleatoriamente cada una de las probetas de madera.

Equipo

Para aplicar la fuerza se utilizó una prensa universal de 100 toneladas, para medir el desplazamiento de forma independiente se utilizaron micrómetros, y se videograbó la prueba con un celular.

Proceso de información

La información se procesó en una hoja de cálculo.

Procedimiento de la prueba

12. Antes de colocar las probetas en la prensa, se limpiaron las superficies de las placas superior e inferior.
13. Se colocó la probeta por ensayar sobre la placa inferior, procurando que su eje estuviera alineado respecto del centro de la placa de carga.
14. La placa superior bajó haciendo un contacto uniforme y suave con la probeta aplicando la carga con una velocidad uniforme y continua, sin producir impacto ni pérdida.
15. Para el primer ensayo se colocó un micrómetro que midiera el desplazamiento de la prensa para verificar si había diferencias con la lectura de la prensa.
16. En los dos ensayos posteriores se fijaron a las probetas dos extensiones de madera de forma perpendicular a la aplicación de la carga.

17. Luego se colocó un micrómetro en cada extensión para medir la deformación en el centro de las probetas y así descartar el aplastamiento de los extremos.
18. Dividiendo la carga aplicada entre la deformación dentro de un tramo del rango elástico se obtuvo el módulo de elasticidad en N/mm².

Precauciones

Se verificó por medio de un higrómetro que las probetas de madera ensayadas contuvieran menos de un 12% de humedad.

Validación del proyecto y principio de diseño

Se realizarán 3 ensayos.

ANEXO 5

Construcción de Madera Masiva

Propuesta para construir vivienda vertical sustentable

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables

Christian Hernández Cárdenas

Ensayos de flexión, compresión, tensión y cortante de acuerdo a la norma EN:408.

Objetivo

Obtener las resistencias de flexión, tensión, compresión, cortante y módulo de elasticidad de la muestra de madera.

Variables

13. Variables de entrada

- 13.1. Densidad
- 13.2. Dimensiones de las probetas

14. Variables no controladas

- 14.1. Maquinaria de prueba
- 14.2. Capacidad del personal de realizar la prueba
- 14.3. Porcentaje de humedad

15. Variables de respuesta

- 15.1. Módulo de elasticidad (N/mm²)
- 15.2. Resistencia a la flexión (N/mm²)
- 15.3. Resistencia a la tensión (N/mm²)
- 15.4. Resistencia a la compresión (N/mm²)
- 15.5. Resistencia al cortante (N/mm²)

Unidad experimental

En este caso las unidades experimentales fueron las probetas con la relación de dimensiones permitida dentro de la norma EN 408, para los diferentes tipos de ensayo:

- Flexión: 33.63 mm x 95.04 mm x 620.18 mm
- Tensión: 26.4 mm x 33.31 mm x 21.95 mm
- Compresión: 33.63 mm x 95.04 mm x 202.58 mm
- Cortante: 32 mm x 55 mm x 300 mm

Factor

El factor fue la densidad

Detalles operativos

- Lugar: Laboratorio de Ingeniería Civil, Edificio H del ITESO.
- Responsable: Christian Hernández Cárdenas.
- Supervisor: Dr. Nayar Gutiérrez Astudillo.

Tipo de experimento

Diseño completamente al azar.

Tratamiento Experimental

Se ensayaron aleatoriamente cada una de las probetas de madera, completando cada tipo de prueba antes de pasar a la otra.

Equipo

Para aplicar la fuerza se utilizó una prensa universal de 100 toneladas, para medir el desplazamiento de forma independiente se utilizaron micrómetros, y se videograbaron algunas pruebas con un celular.

Proceso de información

La información se procesó en una hoja de cálculo y se aplicaron las ecuaciones previstas en la norma EN 408 para obtener los valores buscados.

Procedimiento de la prueba

19. Módulo de elasticidad y flexión.

- a. Para los ensayos de flexión y módulo de elasticidad se colocaron las probetas sobre una base para vigas que permite que el elemento se flexione sin tocar la base de la prensa.
- b. Para cada probeta primero se realizó un ensayo con una fuerza limitada entre los 1800 N y 2000 N, con el objetivo de medir el desplazamiento con un micrómetro al centro del eje de compresión.
- c. Después se retiró el micrómetro y la prueba se repitió con un desplazamiento uniforme hasta llegar a la ruptura por flexión.

20. Tensión.

- a. Para los ensayos a tensión las probetas se fijaron en sus extremos con un par de mordazas a la prensa, de manera que al estirar cada probeta solo hubiera desplazamientos en la longitud libre de mordazas.
- b. Se aplicó un desplazamiento uniforme hasta llevar las probetas a la ruptura por tensión.

21. Compresión

- a. Se colocó la probeta por ensayar sobre la placa inferior, procurando que su eje estuviera alineado respecto del centro de la placa de carga.
- b. Se aplicó un desplazamiento uniforme hasta llevar la probeta a la ruptura por compresión.

22. Cortante

- a. Primero se pegaron con pegamento epóxico dos placas de acero biseladas en los costados de las probetas.
- b. Después se colocaron las probetas en un ángulo de 14 grados respecto al eje z, fijándose con dos placas de acero preparadas para mantener esa inclinación.
- c. Se aplicó un desplazamiento uniforme de forma idéntica al ensayo de compresión.

Precauciones

Se verificó por medio de un higrómetro que las probetas de madera ensayadas contuvieran menos de un 12% de humedad.

Validación del proyecto y principio de diseño

Se realizarán 10 ensayos de módulo de elasticidad y flexión, 10 ensayos de tensión, 11 ensayos de compresión y 2 ensayos de cortante.

ANEXO 6

Construcción de Madera Masiva

Propuesta para construir vivienda vertical sustentable

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables

Christian Hernández Cárdenas

Validación de los esfuerzos permisibles.

Objetivo

Ensayar los elementos estructurales fabricados y comparar los resultados con los modelos matemáticos disponibles en la bibliografía para validar los esfuerzos permisibles obtenidos de la muestra de madera.

Variables

16. Variables de entrada

- 16.1. Módulo de elasticidad (N/mm²)
- 16.2. Resistencia a la flexión (N/mm²)
- 16.3. Resistencia a la compresión (N/mm²)
- 16.4. Resistencia al cortante (N/mm²)
- 16.5. Dimensiones de los especímenes
- 16.6. Peso de los especímenes
- 16.7. Densidad de los especímenes

17. Variables no controladas

- 17.1. Maquinaria de prueba
- 17.2. Capacidad del personal de realizar la prueba
- 17.3. Porcentaje de humedad

18. Variables de respuesta

- 18.1. Capacidad de carga de muros de madera contralaminada (N)

- 18.2. Capacidad de carga de las columnas de madera laminada encolada (N)
- 18.3. Esfuerzo máximo de flexión de una viga de madera laminada encolada (N/mm²)
- 18.4. Esfuerzo máximo de cortante de una viga de madera laminada encolada (N/mm²)
- 18.5. Esfuerzo máximo de flexión de una losa de madera contralaminada (N/mm²)
- 18.6. Esfuerzo máximo de cortante de una losa de madera contralaminada (N/mm²)
- 18.7. Esfuerzo máximo de flexión de una losa de madera laminada clavada (N/mm²)
- 18.8. Esfuerzo máximo de cortante de una losa de madera laminada clavada (N/mm²)

Unidad experimental

En este caso las unidades experimentales fueron los especímenes, para los diferentes tipos de ensayo:

- Muros de madera contralaminada:
 - 290 mm x 389 mm x 61 mm
 - 290 mm x 290 mm x 61 mm
 - 290 mm x 298 mm x 61 mm
 - 290 mm x 292.5 mm x 61 mm
- Columnas de madera laminada encolada
 - 96.52 mm x 74.95 mm x 2296 mm
 - 88.36 mm x 96.96 mm x 2237 mm
- Viga de madera laminada encolada
 - 93.51 mm x 131 mm x 2343.5 mm
- Losa de madera laminada clavada
 - 95.5 mm x 238 mm x 768 mm
- Losa de madera contralaminada
 - 98 mm x 297 mm x 752.5 mm

Factor

El factor fue la clase resistente definida por la densidad de los especímenes, la cual determinó que valores de diseño se tomaron para el modelo matemático.

Detalles operativos

- Lugar: Laboratorio de Ingeniería Civil, Edificio H del ITESO.
- Responsable: Christian Hernández Cárdenas.
- Supervisor: Dr. Nayar Gutiérrez Astudillo.

Tipo de experimento

Diseño completamente al azar.

Tratamiento Experimental

Se ensayaron aleatoriamente cada una de las probetas de madera, completando cada tipo de prueba antes de pasar a la otra.

Equipo

Para los ensayos de los muros de madera contralaminada y las dos losas se usó la prensa universal de 100 toneladas para aplicar la fuerza. En el caso de las columnas y la viga se usó un gato hidráulico de 25 toneladas para aplicar la fuerza. En el caso de las columnas y la viga se midió el desplazamiento con un vernier fijado con imanes. Se videograbaron las pruebas con celular.

Proceso de información

La información de dimensiones y pesos se procesó en una hoja de cálculo para obtener la densidad y las fuerzas aplicadas. Los modelos matemáticos se realizaron en Matlab de acuerdo las ecuaciones disponibles en la literatura y normatividad aplicable.

Procedimiento de la prueba

23. Muros de madera contralaminada

- a. Los especímenes se colocaron en la prensa universal procurando que estuvieran alineados con el eje de la aplicación de la carga.
- b. Se aplicó un desplazamiento uniforme para aplicar la carga hasta la ruptura.

24. Columnas de madera laminada encolada

- a. Las columnas se fijaron entre un marco de reacción y el gato hidráulico.
- b. Se aplicó una fuerza de compresión hasta el límite de seguridad percibido.

25. Viga de madera laminada encolada

- a. Se fijó el espécimen entre dos marcos de reacción y el gato hidráulico para poder llevar a cabo la aplicación de la fuerza central.
- b. Se aplicó una fuerza central hasta llevar al elemento a la ruptura por flexión.

26. Losas de madera contralaminada y madera laminada clavada

- a. Se colocaron los especímenes en la prensa universal encima de dos apoyos metálicos en sus extremos.
- b. Después se colocó una pieza longitudinal de metal para transmitir la fuerza central a las losas.
- c. Se aplicó un desplazamiento uniforme de hasta llevar a las losas a la ruptura por flexión

Precauciones

Se tomaron las medidas de seguridad pertinentes para evitar que otras personas ajenas a las pruebas entraran al momento de los ensayos para evitar cualquier posible accidente.

Validación del proyecto y principio de diseño

A continuación se puede ver el código de cada método de cálculo.

Capacidad de carga de muros de madera contralaminada.

```
%% Este script es para calcular la capacidad de carga de un muro de CLT
%% Aquí se introducen las dimensiones
clear;
clc;
h1=20;% Espesor de las lámina superior (mm)
h2=20;% Espesor de lámina intermedia (mm)
h3=20;% Espesor de lámina inferior (mm)
b=290;% Ancho del panel (mm)
L=389;% Largo o altura del muro (mm)
% zi es la distancia entre el punto central de cada lámina y el eje neutro del panel.
z1=20;% Lámina superior (mm)
z2=0;% Lámina central (mm)
z3=20;% Lámina inferior (mm)
% Áreas de las capas (mm2)
```

```

A1=h1*b;% Área de lámina superior (mm2)
A2=h2*b;% Área de lámina intermedia (mm2)
A3=h3*b;% Área de lámina inferior (mm2)
Aparallel=A1+A3;% Área de las laminas paralelas a la fibra (mm2)
%% Aquí se especifican las propiedades del material
Fc0=28.43;% Resistencia a la compresión paralela (N/mm2)
E0=12213.07;% Módulo de elasticidad paralelo (N/mm2)
E90=407.1;% Módulo de elasticidad perpendicular (N/mm2)
G0=763.32;% Módulo de cortante paralelo (N/mm2)
G90=G0/10;% Módulo de cortante perpendicular (N/mm2)
%% Con este procedimiento se encuentra el EIEff (Fórmula [24], USA CLT HANDBOOK)
EIEff=(E0*b*h1^3/12)+(E0*A1*z1^2)+(E90*b*h2^3/12)+(E90*A2*z2^2)+(E0*b*h3^3/12)+(E0*A3*z3^2);
%% Con este procedimiento se encuentra el GAeff (Fórmula [25], USA CLT HANDBOOK)
GAeff=(5.5^2)/(h1/2*G0*b)+(h2/G90*b)+(h3/2*G0*b);
%% Con este procedimiento se encuentra el EIapp (Fórmula [36], USA CLT HANDBOOK)
Ks=11.8;% Factor de condiciones de apoyo Ks Tabla 2
EIapp=EIEff/(1+((Ks*EIEff)/(GAeff*L^2)));
EIappmin=0.5184*EIapp;
%% Con este procedimiento se encuentra el Factor Cp (Fórmula [40], USA CLT HANDBOOK)
PcE=(3.1416*EIappmin)/L^2;
Pc=Fc0*(h1+h3)*b;
c=0.9;% Factor CLT
Cp=((1+(PcE/Pc))/(2*c))-sqrt((((1+(PcE/Pc))/(2*c))^2)-((PcE/Pc)/c));
%% Finalmente se checa la capacidad de carga del muro CLT
FcAparallel=Fc0*Cp*Aparallel;

```

Capacidad de carga de columnas de madera laminada encolada.

```

%% Este script es para calcular la capacidad de carga de una columna de madera laminada
%% Aquí se introducen las dimensiones de la columna
clear;
clc;
b=93.8;% Base en mm
d=95.3;% Altura en mm
L=2237;% Longitud en mm
%% Aquí se verifica la relación de esbeltez de la columna
RE=L/d;% Relación de esbeltez
aRevRE=(RE/50)*100;% Porcentaje de uso
%% Aquí se introducen los valores de diseño de la madera
Fc=32.38;% Capacidad de compresión paralela a la fibra en N/mm2
Emin=8543.78;% Módulo de elasticidad en N/mm2
c=0.9;% Este valor es para madera laminada
%% Aquí se calcula el factor Cp de acuerdo al estándar NDS (2018) p.21
FcE=(0.822*Emin)/((L/d)^2);
Cp=((1+(FcE/Fc))/(2*c))-sqrt((((1+(FcE/Fc))/(2*c))^2)-((FcE/Fc)/c));

```

%% Por último se calcula la capacidad de carga para la columna
 $A=b*d$; % Área de la sección de la columna
 $P=F_c*C_p*A$; % Capacidad de carga de la columna

Comprobación de vigas laminada encoladas

% Este script es para calcular una viga de madera laminada encolada
 % con una carga puntual al centro
 % No se aplican factores de ajuste o corrección
 clear;
 %% Primero se introducen las propiedades de la viga
 $L=2200$; % Claro en mm
 $b=93.51$; % Base en mm
 $d=131$; % Altura en mm
 %% Después se introducen los valores de diseño de la madera (Tablas)
 $F_b=36.72$; % Resistencia característica al límite elástico en N/mm²
 $F_v=3.57$; % Valor de diseño por cortante en N/mm²
 $E=12213.07$; % Módulo de elasticidad de diseño en N/mm²
 $F_{ct}=28.43$; % Capacidad de compresión paralela a las fibras de diseño en N/mm²
 %% Aquí se introducen las cargas puntuales
 $P=17593.8$; % Carga puntual en N
 %% Aquí se calculan las reacciones
 $R=(P*2)/2$
 %% Aquí se calculan los momentos
 $M=(P*L/4)$; % Fórmula para un momento de una carga puntual al centro
 %% Aquí se calcula el módulo de sección requerido y se compara con el propuesto
 $S_{req}=M/F_b$; % Módulo de sección requerido
 $S=b*d^2/6$; % Módulo de sección de la opción evaluada
 %% Revisión por flexión
 $f_b=M/S$; % Esfuerzo máximo de flexión
 $a_{RevFlexion}=(f_b/F_b)*100$; % Revisión por flexión
 $P_{max}=(P*100)/a_{RevFlexion}$; % Carga máxima
 %% Revisión por cortante
 $A=d*b$; % Área de la sección
 $f_v=1.5*R/A$; % Esfuerzo máximo de cortante
 $a_{RevCortante}=(f_v/F_v)*100$; % Revisión por cortante
 %% Deflexión
 $I=b*d^3/12$; % Fórmula para la inercia
 $dL=(P*L^3)/(48*E*I)$; % Fórmula de la deflexión máxima para una carga puntual al centro
 $AdL=L/300$; % Flecha permisible para una viga de entresuelo en casa habitación
 $a_{RevDef}=(dL/AdL)*100$; % Revisión por deflección
 %% Soporte
 $reqS=R/F_{ct}$; % Área requerida para los apoyos (depende de la reacción de las cargas)
 $l_b=reqS/b$; % Longitud mínima de los apoyos

Comprobación de losas de madera laminada clavada

```
% Este script es para calcular una losa de madera NLT
% con una carga puntual al centro
% No se aplican factores ASD/LRFD de ajuste o corrección
clear;%
clc;% Limpiar pantalla
%% Primero se introducen las propiedades de la losa
L=622;% Claro en mm
bpanel=284;% Base en mm
d=95.5;% Altura en mm
p=11.74;% Peso de la losa (kg)
D=p/(768*bpanel*d/1000000000);% (kg/m3)
%% Después se introducen los valores de diseño de la madera (Tablas)
Fb=36.72;% Resistencia característica al límite elástico en N/mm2
Fv=3.57;% Valor de diseño por cortante en N/mm2
E=12213.07;% Módulo de elasticidad de diseño en N/mm2
Fct=28.43;% Capacidad de compresión paralela a las fibras de diseño en N/mm2
%% Aquí se introducen las cargas puntuales
P=143578;% Carga puntual en N (143578-flexion)(129100.7-cortante)
%% Aquí se calculan las reacciones
R=P/2;
%% Aquí se calculan los momentos
M=(P*L/4);% Fórmula para un momento de una carga puntual al centro
%% Aquí se calcula el módulo de sección requerido y se compara con el propuesto
Sreq=M/Fb;% Módulo de sección requerido
S=bpanel*d^2/6;% Módulo de sección de la opción evaluada
%% Aquí se calcula el factor Ksectionb
d1=95.5;% Altura de laminas altas (mm)
n1=10;% Número de láminas altas
blam1=20;% Espesor de láminas altas (mm)
d2=95.5;% Altura de laminas cortas (mm)
n2=10;% Número de láminas cortas
blam2=20;% Espesor de láminas cortas (mm)
x1=((n1*blam1)/bpanel);% Fórmula para x1 (NLT Design Bool, Capítulo 4, p.49)
x2=((n2*blam2)/bpanel);% Fórmula para x2 (NLT Design Bool, Capítulo 4, p.49)
ksb=x1+(x2*((d2/d1)^3));% Fórmula para el factor Ksectionb (NLT Design Bool, Capítulo 4,
p.49)
%% Factor Klayupb
klb=1;% Valor de Klayupb (NLT Design Bool, Capítulo 4, p.48)
%% Revisión por flexión
fb=(6*M)/(bpanel*d^2);% Esfuerzo máximo de flexión (NLT Design Bool, Capítulo 4, p.50)
Fbnlt=Fb*klb*ksb;% Capacidad de flexión del panel (NLT Design Bool, Capítulo 4, p.50)
aRevFlexion=(fb/Fbnlt)*100;% Revisión por flexión
%% Factor Klayupe
kle=1;% Valor de Klayupe (NLT Design Bool, Capítulo 4, p.48)
```



```

%% Factor Ksectione
kse=ksb;% La fórmula para ksectione es la misma que para ksectionb (NLT Design Bool,
Capítulo 4, p.49)
%% Deflexión
Enlt=E*kle*ksb;% Módulo de elasticidad ajustado(NLT Design Bool, Capítulo 4, p.51)
I=bpanel*d^3/12;% Fórmula para la inercia
dL=(P*L^3)/(48*Enlt*I);% Fórmula de la deflexión máxima para dos cargas a tercios de
distancia
AdL=L/300;% Flecha permisible para una viga de entrepiso en casa habitación
aRevDef=(dL/AdL)*100;% Revisión por deflección
%% Revisión por cortante
A=d*bpanel;% Área de la sección
fv=(1.5*R)/A;% Esfuerzo máximo de cortante
ksv=x1;% Factor Ksectionv (NLT Design Bool, Capítulo 4, p.49)
Fvnl=Fv*ksv;% Resistencia al cortante ajustada(NLT Design Bool, Capítulo 4, p.50)
aRevCortante=(fv/Fv)*100;% Revisión por cortante
%% Soporte
reqS=R/Fct;% Área requerida para los apoyos (depende de la reacción de las cargas)
lb=reqS/bpanel;% Longitud mínima de los apoyos

```

Comprobación de losas de madera contralaminada

```

%% Este script es para calcular la "rigidez a la flexión efectiva" y la "deflexión" de una losa
clear;% Limpiar pantalla
clc;
%% Primero se definen las propiedades de la sección y la carga
b=297;% Ancho del panel (mm)
L=622;% Longitud del panel (mm)
P=81653.1;% Carga puntual a la mitad (N)
d=98;% Altura en mm
p=12.88;% Peso de la losa (kg)
D=p/(752.5*b*d/1000000000);% (kg/m3)
%% Aquí se introducen las dimensiones (mm)
h1=19;%
h2=20;%
h3=20;%
h4=20;%
h5=19;%
htot=h1+h2+h3+h4+h5;
% zi es la distancia entre el punto central de cada lámina y el eje neutro del panel.
z1=39.5;% Lámina superior (mm)
z2=20;% Lámina central (mm)
z3=0;% Lámina inferior (mm)
z4=20;% Lámina central (mm)
z5=39.5;% Lámina inferior (mm)

```

```

% Áreas de las capas (mm2)
A1=h1*b;% Área de lámina superior (mm2)
A2=h2*b;% Área de lámina intermedia (mm2)
A3=h3*b;% Área de lámina inferior (mm2)
A4=h4*b;% Área de lámina intermedia (mm2)
A5=h5*b;% Área de lámina inferior (mm2)
%% Aquí se especifican las propiedades del material
Fb0=40.45;% Resistencia al flexión (N/mm2)
Fc0=32.38;% Resistencia a la compresión paralela (N/mm2)
Fv=3.8;% Resistencia de cortante (N/mm2)
E0=12751.91;% Módulo de elasticidad paralelo (N/mm2)
E90=425.06;% Módulo de elasticidad perpendicular (N/mm2)
G0=796.99;% Módulo de cortante paralelo (N/mm2)
G90=G0/10;% Módulo de cortante perpendicular (N/mm2)
%% Con este procedimiento se encuentra el EIEff (Fórmula [24], USA CLT HANDBOOK)
EIEff=(E0*b*h1^3/12)+(E0*A1*z1^2)+(E90*b*h2^3/12)+(E90*A2*z2^2)+(E0*b*h3^3/12)+(E0*A3*z3^2)+(E90*b*h4^3/12)+(E90*A4*z4^2)+(E0*b*h5^3/12)+(E0*A5*z5^2);
%% Con este procedimiento se encuentra el Seff (Fórmula [1], USA CLT HANDBOOK)
Seff=(2*EIEff)/(E0*htot);
%% Aquí se calculan los momentos
M=(P*L/4);% Fórmula para un momento de una carga puntual
%% Revisión por flexión
fb=M/Seff;% Esfuerzo máximo de flexión
aRevFlexion=(fb/Fb0)*100;% Revisión por flexión
%% Cálculo de la deflexión
dL=(P*L^3)/(48*EIEff);% Fórmula de la deflexión máxima para una carga puntual al centro
AdL=L/300;% Flecha permisible para una viga de entrepiso en casa habitación
aRevDef=(dL/AdL)*100;% Revisión por deflexión
%% Revisión por cortante
A=b*htot;
R=P/2;
fv=(1.5*R)/A;% Esfuerzo máximo de cortante
IbQeff=EIEff/((E0*h1*z1)+(E90*h2*z2)+(E0*(h3/2)*z3)+(E90*h4*z4)+(E0*h5*z5))
FvIbQeff=Fv*IbQeff;
aRevCortante=(1.5*R)/FvIbQeff*100;% Revisión por cortante

```

ANEXO 7

Construcción de Madera Masiva

Propuesta para construir vivienda vertical sustentable

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables

Christian Hernández Cárdenas

Estimación del costo por m³ de madera masiva colocada en obra.

Objetivo

Conocer el costo directo del metro cúbico de elementos estructurales de madera laminada clavada y de madera laminada encolada, fabricados con madera de Pinus spp., proveniente del bosque de San Juan, Nuevo.

Variables

7. Variables de entrada
 - a. Maquinaria necesaria para el taller
 - b. Costo de la maquinaria
 - c. Rendimiento en metros por minuto de la maquinaria
 - d. Mano de obra necesaria para cada proceso
 - e. Precio de la materia prima
8. Variables no controladas
 - a. Capacidad del personal de realizar la prueba
 - b. Cambios en los precios
9. Variables de respuesta
 - a. Costo directo del metro cúbico de madera laminada clavada
 - b. Costo directo del metro cúbico de madera laminada encolada

Unidad experimental

Metro cúbico de madera laminada clavada y madera laminada encolada.

Factores

- Costo de la maquinaria
- Costo diario de operación del taller
- Rendimiento diario de fabricación de madera laminada clavada
- Rendimiento diario de fabricación de madera laminada encolada
- Costo de la materia prima

Procedimiento de la prueba

10. Se definió la maquinaria necesaria
11. Se cotizó la maquinaria
12. Se estimó la mano de obra requerida para operar el taller
13. Se consideraron los demás gastos que implicaría tener operando el taller
14. Se obtuvo el monto anual de operación del taller y se dividió entre 306 días laborables, para obtener el costo diario de operación
15. Se obtuvieron sus rendimientos por minuto de cada máquina y proceso
16. Se estimó la producción diaria de cada tipo de panel en base a los rendimientos individuales de la maquinaria
17. Dividiendo el costo diario de operación del taller entre el rendimiento diario se obtuvo el precio de fabricación de cada tipo de panel
18. A este precio se le sumaron el costo de los insumos y fletes, y se consideró un 15% de utilidad para obtener el precio de venta.
19. Finalmente con este precio se configuró el análisis de precios unitarios para cada tipo de panel, con la mano de obra requerida para montar los elementos estructurales.

Proceso de información

La maquinaria propuesta para el taller y sus costos son los siguientes:

Maquina/Herramienta	Cantidad	P.U.	Importe
Higrómetro	1	\$ 18,068.52	\$ 18,068.52

Molduradora 4 cabezales	1	\$ 43,166.67	\$ 43,166.67
Bascula Plataforma	1	\$ 13,880.00	\$ 13,880.00
Clasificador del MOE de la madera	1	\$ 25,000.00	\$ 25,000.00
Sierra Tronzadora De 18''	1	\$ 96,551.72	\$ 96,551.72
Trompo Piso Madera	1	\$ 53,835.34	\$ 53,835.34
Juego de 2 rieles guías para trompos	1	\$ 9,200.00	\$ 9,200.00
Fresa finger joint	3	\$ 20,000.00	\$ 60,000.00
Prensa Hidraulica 12 Ton modificada para madera laminada	50	\$ 3,103.45	\$ 155,172.41
Cepillo Para Madera De 20 Pulgadas	1	\$ 54,301.72	\$ 54,301.72
Sierra Cinta De 24 Pulgadas	1	\$ 45,149.14	\$ 45,149.14
Banda Transportadora Rodillos Mesa Conveyor De Gavedad (3.0 x 0.8 m)	10	\$ 9,482.76	\$ 94,827.59
Clavadora Neumática	3	\$ 9,112.98	\$ 27,338.95
		Subtotal	\$ 696,492.07
		I.V.A.	\$ 111,438.73
		Total	\$ 807,930.80

Tabla. Maquinaria propuesta para el taller de producción de madera masiva.

El costo diario de operación del taller para 306 días laborables al año resultó el siguiente:

Concepto	Costo de adquisición	Costo Mensual (120 meses)	Costo Anual (12 meses)
Costo de la maquinaria y herramienta	\$ 807,930.80	\$ 6,732.76	\$ 80,793.08
Mantenimiento 15%		\$ 1,009.91	\$ 12,118.96
Renta		\$ 20,000.00	\$ 240,000.00
Sueldos brutos 4 operadores		\$ 60,000.00	\$ 750,000.00
Sueldo bruto director responsable planta		\$ 28,000.00	\$ 350,000.00
Energía			\$ 45,000.00
Administrativos			\$ 25,000.00
Otros			\$ 25,000.00
		Total	\$ 1,527,912.04
		Costo por día laborarl (306 días/año)	\$ 4,993.18

Tabla. Costo diario de operación del taller para 306 días laborables al año.

El rendimiento diario para la producción de madera laminada clavada resultó el siguiente:

Proceso	Velocidad (m/min)	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Volumen (m ³)	Tiempo de producción para un m ³ (min)	Rendimiento de maquinaria (m ³ /hr)	Rendimiento por jornada de 7.5 horas (m ³ /jor)	Número de operadores requeridos	Jornadas de trabajo por maquina	Jornadas reales en fábrica
Dimensionado	2	45	152	0.01	72.91	0.82	6.17	2.00	1.00	0.50
Corte de tablas	9	45	152	0.06	16.20	3.70	27.77	2.00	0.22	0.11
Clavado de paneles	2	45	152	0.01	72.91	0.82	6.17	2.00	1.00	0.50
Corte final	1	45	1000	0.05	22.22	2.70	20.25	4.00	0.30	0.30
Total									2.53	1.42
10% de margen de error									2.78	1.56
Producción diaria (m³/jor)										3.96

Tabla. Rendimiento diario de madera laminada clavada.

El rendimiento diario para la producción de madera laminada encolada resultó el siguiente:

Proceso	Velocidad (m/min)	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Volumen (m ³)	Tiempo de producción para un m ³ (min)	Rendimiento de maquinaria (m ³ /hr)	Rendimiento por jornada de 7.5 horas (m ³ /jor)	Número de operadores requeridos	Jornadas de trabajo por maquina	Jornadas reales en fábrica
Dimensionado	2	45	152	0.01	72.91	0.82	6.17	2.00	1.00	0.50
Corte de tablillas	9	45	152	0.06	16.20	3.70	27.77	2.00	0.22	0.11
Finger Joint	1.3	45	152	0.01	116.65	0.51	3.86	2.00	1.60	0.80
Pegado de laminas	2.5	45	152	0.02	58.33	1.03	7.72	2.00	0.80	0.40
Prensado (16 a la vez)							6.58	4.00	0.94	0.94
Cepillado	1.5	450	152	0.10	9.72	6.17	46.29	4.00	0.13	0.13
Corte final	2	450	152	0.14	7.29	8.23	61.72	4.00	0.10	0.10
Total									4.79	2.98
10% de margen de error									5.27	3.28

Producción diaria (m ³ /jor)	1.88
---	------

Tabla. Rendimiento diario de madera laminada encolada.

En análisis para determinar el precio de venta de la madera laminada clavada es el siguiente:

NLT - Análisis de precio de venta		
Insumo o Proceso	Precio	Unidad
Madera	\$ 5,328.58	m ³
Flete a fabrica	\$ 750.00	m ³
Clavos	\$ 175.00	m ³
Proteccion	\$ 650.00	m ³
Flete a obra	\$ 750.00	m ³
Subtotal	\$ 7,653.58	m³
Rendimiento diario de fábrica	3.96	m ³ /jor
Costo diario fabrica	4,993.18	\$/jor
precio fabricacion	\$ 1,259.99	\$/m ³
Precio de Venta (15% de utilidad)	\$ 10,250.60	\$/m ³

Tabla. Análisis del precio de venta de la madera laminada clavada.

El análisis para determinar el precio de venta de la madera laminada encolada es el siguiente:

GLULAM - Análisis de precio de venta		
Insumo o Proceso	Precio	Unidad
Madera	\$ 5,793.62	m ³
Flete a fabrica	\$ 750.00	m ³
Pegamento	\$ 1,100.00	m ³
Proteccion	\$ 650.00	m ³
Flete a obra	\$ 750.00	m ³
Subtotal	\$ 9,043.62	m³
Rendimiento diario de fábrica	1.88	m ³ /jor
Costo diario fabrica	4,993.18	\$/jor
precio fabricacion	\$ 2,653.56	\$/m ³
Precio de Venta (15% de utilidad)	\$ 13,451.75	\$/m ³

Tabla. Análisis del precio de venta para la madera laminada encolada.

El precio por metro cúbico de madera laminada clavada puesta en obra resultó el siguiente:

Concepto	Cantidad	Unidad	Costo	Importe
<i>Material</i>				

Madera laminada clavada homogénea, de 45 mm de espesor de las láminas, para losa de sección constante, de 15 cm de sección y hasta 5 m de longitud, para aplicaciones estructurales, de madera de Pinus spp. y protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración NP1 y NP2 (3 mm en las caras laterales de la albura), trabajada en taller.	1	m ³	\$ 10,250.60	\$ 10,250.60
<i>Mano de obra</i>				
Oficial montador de estructura de madera.	4.88	hr	86.99	\$ 424.53
Ayudante montador de estructura de madera.	2.44	hr	45.78	\$ 111.73
<i>Herramienta menor</i>				
Herramienta menor	2	%	\$ 536.26	\$ 10.73
			Costo Directo	\$ 10,797.58

Tabla. Análisis de precios unitarios para un metro cúbico de madera laminada clavada puesta en obra.

El precio por metro cúbico de madera laminada encolada puesta en obra resultó el siguiente:

Concepto	Cantidad	Unidad	Costo	Importe
<i>Material</i>				
Madera laminada encolada homogénea, de 45 mm de espesor de las láminas, para vigas de sección constante, de hasta 30x60 cm de sección y 5 m de longitud, para aplicaciones estructurales, con madera de Pinus spp. y protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración NP1 y NP2 (3 mm en las caras laterales de la albura), trabajada en taller.	1	m ³	\$ 13,451.75	\$ 13,451.75
<i>Mano de obra</i>				
Oficial montador de estructura de madera.	4.88	hr	86.99	\$ 424.53
Ayudante montador de estructura de madera.	2.44	hr	45.78	\$ 111.73
<i>Herramienta menor</i>				
Herramienta menor	2	%	\$ 536.26	\$ 10.73
			Total	\$ 13,998.74

Tabla. Análisis de precios unitarios para un metro cúbico de madera laminada encolada puesta en obra.

ANEXO 8

Construcción de Madera Masiva

Propuesta para construir vivienda vertical sustentable

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables

Christian Hernández Cárdenas

Encuesta sobre la oferta de madera certificada, y la disponibilidad a aceptar el pago por servicios ambientales que beneficien a las comunidades forestales de México.

Objetivo

El objetivo de este cuestionario fue recabar información sobre las características cuantitativas y cualitativas de la madera que se ofrece actualmente en los aserraderos certificados de México, e identificar las áreas donde existe disponibilidad para aceptar el pago por servicios ambientales, diseñados para fomentar un desarrollo sustentable en las comunidades forestales.

Listado de Temas

1. Datos generales del aserradero.
 - a. Datos de contacto de la empresa.
 - b. Datos de quien contesta el cuestionario.
 - c. Tipo de empresa forestal.
2. Características cuantitativas de madera certificada.
 - a. Volumen anual producido.
 - b. Medidas producidas comercialmente.
 - c. Calendario de cosecha.
 - d. Precios por pt.
3. Características cualitativas de la madera certificada.
 - a. Especies de madera certificada.
 - b. Procedencia de la madera.
 - c. Tipos de calidad de la madera.

4. Proceso de estufado.
 - a. Tipo de estufado
 - b. Procedimiento empleado.
 - c. Impacto ambiental del proceso.
5. Proceso de certificación.
 - a. Cómo fue su proceso.
 - b. Evaluación de los resultados.
6. Evaluación de la relación comercial.
 - a. Factibilidad de producir las piezas necesarias para el proyecto.
 - b. Procedimiento para generar un pedido.
 - c. Servicio de flete.
7. Disponibilidad a aceptar el pago para fomentar el desarrollo sustentable de la comunidad forestal.
 - a. Dimensión económica.
 - b. Dimensión ambiental.
 - c. Dimensión social.
 - d. Dimensión cultural.
 - e. Dimensión educativa.
 - f. Dimensión ética.
 - g. Dimensión política.

Definición del marco muestral

Para el marco muestral se eligió realizar un censo aplicando el cuestionario a los 73 predios del país que cuentan con un certificado de manejo forestal sustentable vigente al día 29 de marzo del 2017. Todas los predios que forman la muestra cuentan con el certificado RA-FM/COC. La RA corresponde a la organización Rainforest Alliance quien fue la certificadora acreditada por el Forest Stewardship Council (FSC) para emitir los certificados. La FM/COC se refiere al certificado conjunto de Manejo Forestal y Cadena de Custodia, el cual certifica que los bosques se manejan conforme a los estándares ambientales, económicos y sociales, establecidos por el FSC, y además garantiza que la madera proveniente de los bosques certificados no ha sido contaminada con madera proveniente de otras fuentes.

Formato del cuestionario

El cuestionario se envió en formato electrónico utilizando la aplicación Google Forms que remite por correo electrónico el dispositivo. En el Anexo 10 se presenta el instrumento completo.

ANEXO 9

Construcción de Madera Masiva

Propuesta para construir vivienda vertical sustentable

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables

Christian Hernández Cárdenas

Instrumento de la encuesta sobre la oferta de madera certificada, y la disponibilidad a aceptar el pago por servicios ambientales que beneficien a las comunidades forestales de México.

El cuestionario se diseñó utilizando la aplicación Google Forms, a continuación se muestran los contenidos del instrumento:

1. Presentación.

Oferta de madera certificada en México

Le hemos enviado esta breve encuesta al correo electrónico que aparece en la página web del FSC, donde los avalan como una empresa que comercializa madera certificada. Agradecemos que nos regale 15 minutos de su tiempo para cotizar la madera que necesitamos y contestar estas preguntas que tienen por objetivo conocer la oferta de madera certificada en México y poder integrar esta información en el desarrollo de una nueva forma de construir edificios de departamentos sustentables hechos con madera. Por cada edificio de 4 pisos se necesitan aproximadamente 72,000 pt de madera certificada, por lo que creemos que este proyecto resulta de interés para ustedes y nosotros.

Atte.

Arq. Christian Hernández Cárdenas

email: pe711013@iteso.mx

christian.hc84@gmail.com

Celular: 354-108-47-91

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente
Periférico Sur Manuel Gómez Morín # 8585
C.P. 45604 Tlaquepaque, Jalisco, México

***Required**

Email address *

Your email address

NEXT

2. Datos de contacto

Aquí se ingresan los datos básicos de su empresa para poder comunicarnos

Nombre de la empresa

Your answer

Localidad

Your answer

Estado

Your answer

Teléfono

Your answer

Email

Your answer

Nombre de quien contesta la encuesta

Your answer

Cargo de quien contesta la encuesta

Your answer

BACK

NEXT

Never submit passwords through Google Forms.

3. Características generales

Esta sección es para conocer la oferta general de madera certificada de su empresa

Su empresa es

- Comunitaria
- Privada no comunitaria
- Other:
-

¿De dónde obtienen la madera certificada?

- Manejo integral del bosque
- Plantaciones forestales
- Tenemos plantaciones forestales pero aún no entran en producción

¿Cuentan con producción de madera durante todo el año?

- Sí

- No (Si no cuentan con producción de madera durante todo el año, puede especificar en el renglón de abajo durante que meses si están produciendo)

- Other:

-

¿Cuáles especies de madera certificada comercializan?

- Pino
- Oyamel
- Encino
- Other:

-

Por favor, indique cuál es la especie de madera certificada que mas produce y cuál es el volumen de producción anual en m³

Your answer

Si la demanda de esta madera certificada aumentara bastante gracias a estas nuevas construcciones ¿Hasta que volumen anual en m³ podrían producir?

Your answer

BACK

NEXT

Never submit passwords through Google Forms.

4. Calidad y precios.

Esta sección es para conocer la calidad de su madera y los precios.

El producto que nosotros necesitamos son tablas con longitudes que van de los 2.50 m a los 3.20 m, y con espesores que van de los 19 mm a los 50 mm. ¿Pueden producir estas medidas para nosotros?

- Sí
- No
- Other:
-

Para fabricar los paneles de los edificios necesitamos piezas de madera sin alabeos, aunque pueden contener varios nudos por tabla (ver imagen). ¿Qué calidad de madera es la que más se parece?



- Primera
- Segunda
- Tercera
- Cuarta
- Other:
-

¿Cuál es el precio de mayoreo por pt de este tipo de madera sin estufar (incluyendo IVA)?

Your answer

¿Cuentan con proceso de estufado? *

- Sí
- No

BACK

NEXT

Never submit passwords through Google Forms.

5. Proceso de estufado

Esta sección es para conocer su proceso de estufado

¿Cuánto aumenta el precio por pt de madera estufada (incluyendo IVA)?

Your answer

¿Cuántos días en promedio tarda normalmente el estufado?

Your answer

¿Qué combustible usa el horno?

- Leña
- Aserrín
- Gas
- Other:
-

¿Conocen cuánto combustible se consume para estufar 1 m³ de madera?

- No
- Sí (puede escribir la cantidad en el reglón de abajo)
- Other:
-

Después del proceso de estufado, ¿Qué porcentajes de humedad se obtienen?

Your answer

BACK

NEXT

Never submit passwords through Google Forms.

6. Pedidos y entregas

Esta sección es para conocer como sería el proceso de pedidos y entregas

¿Cuántos días tardarían en tener listo un pedido de aproximadamente 18,000 pt?

Your answer

¿Qué porcentaje de anticipo requieren para empezar a fabricar el pedido?

- 50%
- Other:
-

¿Cuándo se tiene que hacer el resto del pago?

- Cuando sale el pedido del aserradero
- Cuando llega el pedido al lugar de envío
- Other:
-

¿Con qué tipo de servicio de entrega cuentan?

- Camiones propios
- Camiones contratados
- El cliente tiene que conseguir el flete
- Other:
-

¿Cuál sería el costo aproximado del flete en un trailer a la ciudad de Guadalajara?

Your answer

BACK

NEXT

Never submit passwords through Google Forms.

7. La certificación

Esta sección es para conocer las oportunidades que brinda la certificación FSC

¿Cuál fue la principal motivación para tramitar la certificación?

- Por convicción de hacer las cosas bien
- El mercado lo pedía
- Other:
-

¿Qué tipo de cliente es el principal consumidor actual de madera certificada?

- Fabricante de muebles
- Cimbra para construcción
- Tarimas
- Cabañas
- Other:
-

Como considera usted

	Muy bajo	Bajo	Alto	Muy alto
El costo de la certificación	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
El número de trámites necesarios para obtener la certificación	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
El beneficio económico obtenido con la certificación	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
La demanda actual de madera certificada	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
La continuación de la cadena de custodia para ofrecer productos finales certificados	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Si tiene algún comentario sobre la tabla anterior puede hacerlo aquí

Your answer

BACK

NEXT

Never submit passwords through Google Forms.

8. Fondo para el desarrollo sustentable

Una de las intenciones de la empresa es poder beneficiar a la comunidad productora de la madera certificada, a través de un comercio justo.

Esta sección es para conocer las áreas de oportunidad donde se pueda fomentar un desarrollo sustentable financiado con parte de las ventas de los edificios de madera certificada.

¿Qué tan factible sería?

	Nada factible	Poco factible	Algo factible	Muy factible
La instalación de nuevas plantaciones forestales, con el fin de aumentar la producción	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
El diseño y establecimiento de un programa de conservación de la biodiversidad existente en los bosques	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
La rehabilitación de viviendas y dotación de agua potable, drenaje y luz solo para las personas más necesitadas de la comunidad	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Conservación y promoción de la cultura propia de la comunidad	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
La impartición de talleres educativos en sustentabilidad para la comunidad	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Qué tan factible sería entregar un informe semanal, público y abierto a la comunidad sobre los gastos realizados con el fondo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Qué tan factible sería que la comunidad se involucrará en el diseño y toma de decisiones de estas propuestas para que las sientan como propias	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Le agradecemos su tiempo para contestar estas preguntas, esperamos estar pronto en contacto. Si tiene algún comentario extra que quisiera hacernos lo puede escribir en la línea de abajo.

Your answer

Send me a copy of my responses.

BACK

SUBMIT

Never submit passwords through Google Forms.

ANEXO 10

Construcción de Madera Masiva

Propuesta para construir vivienda vertical sustentable

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables

Christian Hernández Cárdenas

Encuesta sobre el sistema constructivo de madera masiva y la disponibilidad de los compradores potenciales para pagar por proteger servicios ambientales en las comunidades forestales.

Objetivo

El objetivo de este cuestionario fue entrevistar una muestra de compradores potenciales de departamentos construidos con el sistema constructivo de madera masiva, para recabar sus percepciones sobre las construcciones de madera, las impresiones generadas sobre el sistema constructivo de madera masiva y conocer que espacios y equipamiento de serie consideran los necesarios para una vivienda nueva. También se evaluó la disponibilidad a pagar por servicios ambientales en las comunidades forestales

Listado de Temas

1. Percepciones iniciales sobre las construcciones de madera.
 - a. Fortalezas y oportunidades asociadas a una construcción de madera.
 - b. Riesgos y debilidades asociados a una construcción de madera.
2. Percepciones sobre el sistema constructivo de madera masiva.
 - a. Opinión comparativa entre el sistema constructivo tradicional y el de madera masiva.
 - b. Disponibilidad a adquirir un departamento o casa de madera masiva.
3. Características deseables en un departamento o vivienda de madera masiva.
 - a. Programa arquitectónico (número de dependencias).

- b. Equipamiento.
 - c. Ecotecnologías.
4. Disponibilidad a pagar por servicios ambientales.
- a. Precio que pagaría por la vivienda.
 - b. Pago mensual del seguro.
 - c. Porcentaje del valor de la construcción que estaría dispuesto a pagar por conservar servicios ambientales en las comunidades forestales.
5. Información sociodemográfica

Definición del marco muestral

Para el marco muestral de compradores potenciales de clase media en el área metropolitana de Guadalajara, se eligió un abordaje no probabilístico seleccionando por conveniencia un condominio habitacional ubicado en el municipio de Zapopan, con precios de vivienda previamente conocidos, con el fin de hacer comparaciones de las respuestas obtenidas y los datos sociodemográficos de los encuestados. Debido al tiempo y recursos limitados se decidió trabajar una muestra limitada y no representativa. El lugar donde se realizaron los cuestionarios fue en el condominio Milán del fraccionamiento Palermo, ubicado entre Tesistán y la carretera a Colotlán. Este fraccionamiento tiene 356 viviendas de dos habitaciones y 46 m² construidos, las cuales se vendieron entre \$440,000.00 y \$499,000.00.

Formato del cuestionario

El cuestionario se aplicará de forma personal. En el Anexo 11 se presenta el instrumento completo.

ANEXO 11

Construcción de Madera Masiva

Propuesta para construir vivienda vertical sustentable

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables

Christian Hernández Cárdenas

Instrumento de la encuesta sobre el sistema constructivo de madera masiva y la disponibilidad de los compradores potenciales para pagar por proteger servicios ambientales en las comunidades forestales.

Encuesta sobre el sistema constructivo de madera masiva y la disponibilidad de los compradores potenciales para pagar por proteger servicios ambientales en las comunidades forestales.

1 Número de control 2 Lugar 3 Fecha 4 Hora

5 ¿Ha estado alguna vez dentro de una casa o construcción de madera? Si No

6 ¿Dónde?

7 ¿Cómo considera las siguientes características de una casa construida con madera y otra con material tradicional (tabique, concreto, etc.)?

	Madera				Material tradicional			
	Muy bajo	Bajo	Alto	Muy alto	Muy bajo	Bajo	Alto	Muy alto
a. El riesgo de que la casa se incendie fácilmente								
b. La resistencia de la casa ante un terremoto								
c. La durabilidad de la casa								
d. El precio de la casa								
e. Lo atractivo de la casa								
f. La calidad de los acabados								
g. ¿Qué tan ecológica es la casa?								

A continuación explicar de que se trata el sistema constructivo de madera masiva.

8 Después de conocer el sistema constructivo de madera masiva

	Muy bajo	Bajo	Alto	Muy alto
a. En general, ¿Cuál es el nivel de riesgo que percibe de vivir en una casa de madera masiva?				
b. ¿Cómo considera la calidad de las construcciones de madera masiva?				
c. ¿Cómo considera la calidad de las construcciones de material tradicional (tabique, concreto, etc.)?				
d. Si tuviera el dinero, ¿Qué tan dispuesto estaría a comprar o rentar una vivienda de madera masiva?				
e. ¿Cómo considera la posibilidad de que este tipo de casas y departamentos sean usados en Guadaluajara?				
f. ¿Cómo considera ahora el potencial ecológico de las construcciones de madera masiva?				

9 Si tuviera la posibilidad de adquirir una vivienda fabricada con este sistema constructivo, ¿que tipo de vivienda elegiría?

Casa en coló fuera de periferico	Departamento dentro de periferico
----------------------------------	-----------------------------------

10 ¿Qué tan importante sería que ese departamento o casa nueva tenga estos equipos ya instalados?

	Nada importante	Poco importante	Algo importante	Muy importante
a. Cocina Integral				
b. Closets				
c. Luminarias (que no sea el puro foco)				
d. Protecciones en puertas y ventanas				
e. Calentador solar para gastar menos gas				
f. Paneles solares para pagar menos luz				
g. Cuarto de servicio en lugar de patio (mostrar foto)				
h. Cuarto para estudio u oficina				
i. Huerto comunitario para producir vegetales orgánicos				

11. ¿Cuántas recámaras ocuparía?

12. ¿Cuántos cajones de estacionamiento ocuparía?

13. Si el departamento o casa estuviera cerca del tren ligero, ¿Cuántos cajones de estacionamiento ocuparía?

14 Teniendo en cuenta las características que eligió cual sería el precio justo por esa casa o departamento?

De 300 a 400	De 400 a 500	De 500 a 600	De 600 a 700	De 700 a 800	De 800 a 900	De 900 a 1 millón	Más de 1 millón

15. ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar mensualmente por un seguro de su vivienda contra desastres (incendio, terremoto, huracán, etc)?

0	50	100	150	200	250	300	350

16. Si este departamento o casa fabricada con madera masiva fuera 50 mil pesos más barato que uno de material tradicional, y le dieran la posibilidad de elegir entre aceptar todo el descuento, o aportar voluntariamente una parte de ese dinero (deducible de impuestos) a un fondo para el desarrollo sustentable de las comunidades rurales productoras de madera certificada, el cual se encargaría de promover un manejo sustentable de la madera, proteger la biodiversidad de los bosques, brindar agua potable y drenaje a las personas más pobres de la comunidad, etc. ¿Cuánto de esos 50 mil pesos aportaría?

17 Edad 18-29 30-39 40-49 50-59 60-69 70-79 80-89 90-100

18 Sexo Hombre Mujer

19 Nivel de estudios Secundaria Prepa Licenciatura Posgrado

20 Ocupación