



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD

DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA

MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA

**“ANÁLISIS DE FACTORES PARA EL CÁLCULO DE DISEÑO DE VIGAS
LAMINADAS”**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA

Presenta: Ernesto Mendoza González

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Cruz De León

Morelia. Michoacán. Enero 2024

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	GENERALIDADES	5
2.1	LA MADERA Y SU USO	5
2.2	CONSTRUCCIÓN DE MADERA EN MÉXICO	15
2.3	SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN MADERA	19
3.	MARCO TEÓRICO.....	24
3.1	ANÁLISIS DE UNA VIGA	24
3.2	VIGAS ANALIZADAS EN SOLID WORKS	37
4.	ANTECEDENTES	44
5.	JUSTIFICACIÓN	46
6.	HIPÓTESIS	47
7.	OBJETIVO GENERAL	48
7.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	48
8.	METODOLOGÍA	49
8.1	ACTIVIDADES PRELIMINARES	51
8.2	DENSIDAD	53
8.3	CONSTRUCCIÓN DE PROBETAS ESCALA 1:4	56
8.4	ARMADO DE LA PROBETA.....	58
8.5	PRUEBAS DE FLEXIÓN ESTATICA.....	65
8.6	PRUEBA DE HIPOTESIS	79
9.	RESULTADOS	83

9.1 GENERALIDADES	83
9.2 CALCULO DE VIGAS LAMINADAS.....	88
10. DISCUSIÓN.....	102
11. CONCLUSIONES	107
12. RECOMENDACIONES	109
13. BIBLIOGRAFIA.....	111
14. ANEXOS	117



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Viguería del techo, museo “Casa Natal de Morelos” Morelia, Mich., recuperado de t.ly/apmx.....	1
Figura 2. Arcos de madera laminada, inicios del proceso de laminación de madera, recuperado de t.ly/ta-D.....	3
Figura 3. Producción de muebles de MDF, recuperado de t.ly/CI_b.....	5
Figura 4. Anónimo (2017), Edificios de madera en el mundo, recuperado de t.ly/ve8LY.7	
Figura 5. Casa Astoria, diseño de FC3 arquitectura, Saltillo, Coahuila, México, recuperada de t.ly/KG1O.....	8
Figura 6. Construcción de fraccionamientos contemporáneos en México, recuperado de t.ly/mMpG.....	8
Figura 7. Garza A. (2013). Vivienda Experimental en Mty. Recuperada de t.ly/dOrML...	9
Figura 8. Pelan 13 (2015). Recreación de una casa del periodo Neolítico. Recuperado de t.ly/2d1E5	10
Figura 9. Anónimo (2015). Construcción de casa de madera en USA. Recuperado de t.ly/rxOwX.....	10
Figura 10. Pabellón de Chile Expo Milán 2015, Undurruga Devés Arquitectos,.....	11
Figura 11. Anónimo. Brock Commons - Tallwood House. Recuperado de t.ly/DXRXD	12
Figura 12. Naturally Wood. World’s tallest hybrid wood building. Recuperado de t.ly/y6NNG.....	13
Figura 13. Anónimo. Torre experimental Peñuelas. Recuperado de t.ly/VZ0Jg.....	13
Figura 14. Anónimo. Secciones y cortes torre experimental peñuelas. Recuperado de t.ly/zNW2G	14
Figura 15. Garza A (2017). Casa vista al lago, sistema híbrido madera - concreto. Recuperado de t.ly/AXLm7	14
Figura 16. Anónimo (2018). La Troje principal herencia Purépecha. Recuperada de t.ly/0ELw5.....	15
Figura 17. Cruz De León, J. et al. (2016). Contraste de construcciones en Charapan, Michoacán. Recuperado de t.ly/KXI8O.....	16
Figura 18. Anónimo (2018). Vivienda Intraurbana Multifamiliar, proyecto concursante 11 edición COMACO. Recuperado de t.ly/W5XP9.....	17

Figura 19. Cabaña Dilyka sistema de muro ligero, recuperado de t.ly/y9Kv	18
Figura 20. Anónimo. Construcción de entramado ligero. Recuperado de t.ly/OXJR8 ...	19
Figura 21. Anónimo. Resistencia al hundimiento de las casas fabricadas con el sistema de entramado ligero, gracias a su bajo peso, no requiere cimentaciones especiales. Recuperado de t.ly/rxOzn.....	20
Figura 22. Anónimo. Casa de troncos macizos. Recuperado de t.ly/epJNr	21
Figura 23. Enso S. (2013). CLT – Cross Laminated Timber. Recuperado de t.ly/j6JP8	22
Figura 24. Anónimo. Residencia hecha de CLT. Recuperado de t.ly/dOJmD.....	22
Figura 25. Anónimo (2016). Madera laminada. Recuperado de t.ly/7ObqJ.....	23
Figura 26. Anónimo (2016). Vigas de madera lamina empotradas, sistema hibrido. Recuperado de t.ly/q2xyE	23
Figura 27. Diagrama de fuerzas actuantes sobre el área transversal	25
Figura 28. Diagrama de módulo de elasticidad	26
Figura 29. Diagramas de momento y cortante de una viga simplemente apoyada.....	29
Figura 30. Metodología de trabajo en Solid Works, para el diseño y análisis de las vigas de la investigación, elaboración propia	38
Figura 31. A) Simulación de viga laminada propuesta en Cedro Blanco, elaboración propia	39
Figura 32. B) Simulación de Viga laminada propuesta en Pino Lacio, elaboración propia	39
Figura 33. C) Simulación de viga laminada comercial en Cedro Blanco, elaboración propia	40
Figura 34. D) Simulación de Viga laminada comercial de Pino Lacio, elaboración propia	40
Figura 35. Diseño de la investigación, elaboración propia.	51
Figura 36. Madera de pino de tercera antes de su tratamiento de secado al aire y su almacenamiento en bodega. Imagen propia.	52
Figura 37. Sección transversal de las láminas para las probetas. Elaboración propia..	56
Figura 38. A) Corte de la madera en tiras para fabricación de láminas, B) Dispositivo para corte de tiras para la fabricación de las láminas, imágenes propias.	56
Figura 39. Sección transversal de la viga propuesta a escala 1:4. Imagen propia.....	57



Figura 40. Orden de despiece y pegado de las láminas de las probetas. Elaboración propia	58
Figura 41. Traslapes de las láminas para conformar las probetas. Elaboración propia	58
Figura 42. Cepillo marca Truper, elaboración propia.	59
Figura 43. Unión finger joint. Recuperado de t.ly/9miH.	59
Figura 44. Izq. unión a tope de las piezas para fabricar la lámina, der. Mesa de prensado para la fabricación de las láminas. Elaboración propia.	60
Figura 45. Prensa transversal para el pegado de las láminas que conformaron la probeta, elaboración propia.....	61
Figura 46. Toma de medidas de la laminas antes de la conformación de las probetas, elaboración propia.....	61
Figura 47. Higrómetro de termómetros, elaboración propia	62
Figura 48. Probetas terminadas para el proyecto de investigación. Elaboración propia.	65
Figura 49. Condiciones de apoyo y puntos de carga para pruebas de flexión.	66
Figura 50. Gráfico de prueba de dos puntos con cargas repartidas en tercios.	67
Figura 51. Pruebas de flexión a probetas de madera, realizadas en la prensa universal del laboratorio de pruebas físicas de la facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH.....	68
Figura 52. Probetas ensayadas de ambos tipos de vigas de madera de Pino. Elaboración propia.	68
Figura 53. Probetas ensayadas de ambos tipos de vigas de madera de Cedro Blanco. Elaboración propia.	69
Figura 54. Falla por pegamento en ambas especies de las probetas. Elaboración propia.	84
Figura 55. Falla por desviación de la fibra en ambas especies de las probetas. Elaboración propia.	84
Figura 56. Ruptura vista en las probetas con las líneas de las vetas con ángulos mayores o iguales a 20°. Elaboración propia.....	85
Figura 57. Seguimiento de la obtención de madera para elementos estructurales. Elaboración propia	89



Figura 58. Ruta de elaboración de vigas laminadas de cada tipo propuesto en la investigación. Elaboración propia.....	90
Figura 59. Tabla de valores de diferentes medidas de secciones rectangulares. Elaboración propia	91
Figura 60. Sección de análisis de cargas dependiendo de la posición de la viga. Elaboración propia	92
Figura 61. Tabla de datos para cálculo de secciones de vigas. Elaboración propia	93
Figura 62. Tabla de deflexiones máximas admisibles en elementos estructurales de concreto según la ACI (American Concrete Institute).....	93
Figura 63. Tabla de valores de momentos y cortantes de la viga propuesta según sea el caso. Elaboración propia.....	95
Figura 64. Tabla de valores a flexión según sea el caso de cada viga propuesta. Elaboración propia	95
Figura 65. Tabla comparativa de los diferentes casos de flexión. Elaboración propia ..	97
Figura 66. Valor de esfuerzo cortante horizontal contra el valor del esfuerzo cortante admisible del material, se establece la verificación de la viga si el primer valor es menor que el segundo. Elaboración propia.....	97
Figura 67. Valores de diseño de vigas laminadas de madera de coníferas, obtenidos del reglamento de construcciones del Distrito Federal, edición 2005, en la sección de Normas Técnicas Complementarias para la Construcción de Estructuras de Madera	98
Figura 68. Sección primera de la hoja de cálculo donde se introduce el dato de la densidad de la madera a emplear para las vigas, así como el nombre de la especie con la que se trabaja, para que la hoja calcule en automático el peso de las dimensiones nominales de la tabla. Elaboración propia.....	100



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores obtenidos de la simulación de las vigas laminadas de Pino Lacio. Elaboración propia.	43
Tabla 2. Valores obtenidos de la simulación de las vigas laminadas de Cedro Blanco. Elaboración propia.	43
Tabla 3. Valores de peso anhidro y volúmen verde de piezas de cedro blanco <i>sp.</i> Elaboración propia.	54
Tabla 4. Valores de peso anhidro y volúmen verde de piezas de pino <i>sp.</i> Elaboración propia.	55
Tabla 5. Medidas reales y a escala de las láminas para fabricar las probetas de vigas laminadas. Elaboración propia.	57
Tabla 6. Valores medios de temperatura y %HR durante el periodo de construcción de las probetas de cedro blanco <i>sp.</i> Elaboración propia.....	63
Tabla 7. Valores medios de temperatura y %HR durante el periodo de construcción de las probetas de pino <i>sp.</i> Elaboración propia.	64
Tabla 8. Tabla de valores esfuerzo deformación de las probetas de pino <i>sp.</i> propuestas.	70
Tabla 9. Tabla de valores esfuerzo deformación de las probetas de pino <i>sp.</i> comercial.	70
Tabla 10. Tabla de valores esfuerzo deformación de las probetas de cedro blanco <i>sp.</i> propuestas.	71
Tabla 11. Tabla de valores esfuerzo deformación de las probetas de cedro blanco <i>sp.</i> comerciales.	72
Tabla 12. Tabla de valores de carga, MOR y MOE de las probetas de pino <i>sp.</i> propuestas (Kg/cm ²).	74
Tabla 13. Tabla de valores de carga, MOR y MOE de las probetas de pino <i>sp.</i> comercial.	75
Tabla 14. Tabla de valores de carga, MOR y MOE de las probetas de cedro blanco <i>sp.</i> propuestas	75
Tabla 15. Tabla de valores de carga, MOR y MOE de las probetas de cedro blanco <i>sp.</i> comercial.....	76



Tabla 16. Valores resultantes de la comparación de medias estadísticas del módulo de elasticidad (MOE) de las probetas de cedro blanco <i>sp.</i> propuestas y las probetas comerciales	80
Tabla 17. Valores resultantes de la comparación de medias estadísticas del módulo de ruptura (MOR) de las probetas de cedro blanco <i>sp.</i> propuestas y las probetas comerciales	81
Tabla 18. Valores resultantes de la comparación de medias estadísticas del módulo de elasticidad (MOE) de las probetas de pino <i>sp.</i> propuestas y las probetas comerciales	81
Tabla 19. Valores resultantes de la comparación de medias estadísticas del módulo de ruptura (MOR) de las probetas de pino <i>sp.</i> propuestas y las probetas comerciales	82
Tabla 21. Tabla de valores de MOE Y MOR de las distintas investigaciones revisadas. Elaboración propia.	104
Tabla 22. Valores del Módulo de Ruptura (MOR) y Módulo de Elasticidad (MOE) de vigas laminadas de pino caribe (<i>Pinus caribaea</i> var. <i>Hondurensis</i>).	108
Tabla 23. Valores del Módulo de Ruptura (MOR) y Módulo de Elasticidad (MOE) de vigas laminadas de la forma comercial y de la forma propuesta de pino <i>sp</i> y cedro blanco <i>sp.</i>	108



ÍNDICE DE GRAFICAS

Grafica 1. Valores de desplazamiento (Flexión) obtenido de la simulación de la viga laminada propuesta fabricada en Cedro Blanco. Elaboración propia.....	41
Grafica 2. Valores de desplazamiento (Flexión) obtenido de la simulación de la viga laminada comercial fabricada en Cedro Blanco. Elaboración propia	41
Grafica 3. Valores de desplazamiento (Flexión) obtenido de la simulación de la viga laminada propuesta fabricada en Pino Lacio. Elaboración propia.....	42
Grafica 4. Valores de desplazamiento (Flexión) obtenido de la simulación de la viga laminada comercial fabricada en Pino Lacio. Elaboración propia	42
Grafica 5. Relación entre los módulos de ruptura de las probetas de pino sp., elaboración propia	77
Grafica 6. Relación entre los módulos de elasticidad de las probetas de pino sp., elaboración propia.....	78
Grafica 7. Relación entre los módulos de ruptura de las probetas de cedro blanco sp, elaboración propia.....	78
Grafica 8. Relación entre los módulos de elasticidad de las probetas de cedro blanco sp, elaboración propia.....	79



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Esfuerzo unitario.....	25
Ecuación 2. Deformación total.	26
Ecuación 3. Momento flexionante	28
Ecuación 4. Esfuerzo cortante	28
Ecuación 5. Esfuerzo cortante unitario horizontal máximo	30
Ecuación 6. Esfuerzo cortante unitario horizontal máximo	30
Ecuación 7. Esfuerzo en las fibras extremas de la viga	31
Ecuación 8. Momento flexionante máximo en la viga.....	31
Ecuación 9. Módulo de la sección	32
Ecuación 10. Momento flexionante según Parker.	32
Ecuación 11. Esfuerzo admisible en la fibra extrema según Parker	32
Ecuación 12. Módulo de la sección según Parker.....	32
Ecuación 13. Momento flexionante	33
Ecuación 14. Módulo de la sección según Fitzgerald.....	33
Ecuación 15. Flexión con relación entre M y Z.....	33
Ecuación 16. Módulo de la sección según Fitzgerald y Parker	34
Ecuación 17. Deflexión de la viga	35
Ecuación 18. Deflexión de la viga según Parker	36
Ecuación 19. Deflexiones de la viga con datos de tablas según Parker	36
Ecuación 20. Deflexión real de la viga con datos de tablas según Parker	37
Ecuación 21. Densidad básica	53
Ecuación 22. Módulo de ruptura para prueba de tres puntos.....	73
Ecuación 23. Módulo de elasticidad para prueba de tres puntos	73
Ecuación 24. Ecuación de esfuerzo de flexión de Fitzgerald	96
Ecuación 25ecuación de Parker para obtener el módulo de sección de la viga.	96



RESUMEN

El presente proyecto de investigación, plantea el uso de dos especies maderables para la elaboración y comparación de vigas laminadas para su uso en la construcción de estructuras de madera, dicha comparación se realizó a partir de la obtención de los valores de MOE, MOR y DENSIDAD de dos distintos tipos de vigas laminadas que se emplearon de cada especie, estableciendo así, como viga laminada comercial a la viga cuya construcción tiene sus laminas en un acomodo horizontal (VH), y la otra, como viga laminada propuesta, viga cuya construcción tiene sus laminas en un acomodo horizontal-vertical (VHV). Proponiendo así, que la viga laminada propuesta tendrá una mayor capacidad de carga y menos flexión que la viga comercial, de esta forma, los valores obtenidos de MOR, MOE y DENSIDAD se emplearan en una base de cálculo, para determinar cada una de las secciones transversales, para cada tipo de viga laminada, en la diferente condición de carga- claro que se presente en una estructura de madera, así como establecer, por medio de valores de diseño, que las vigas laminadas de las especies propuestas se aceptan para su uso como elementos estructurales.

Palabras clave: módulo de elasticidad, módulo de ruptura, densidad, carga, valores de diseño.



ABSTRAC

This research project proposes the use of two timber species for the preparation and comparison of laminated beams for use in the construction of wooden structures, said comparison was made from obtaining the values of MOE, MOR and DENSITY. of two different types of laminated beams that were used of each species, thus establishing, as a commercial laminated beam, the beam whose construction has its sheets in a horizontal arrangement (VH), and the other, as a proposed laminated beam, a beam whose construction has their sheets in a horizontal-vertical arrangement (VHV). Thus, proposing that the proposed laminated beam will have a greater load capacity and less bending than the commercial beam, in this way, the values obtained from MOR, MOE and DENSITY will be used in a calculation base, to determine each of the sections. transversal, for each type of laminated beam, in the different load condition - of course that occurs in a wooden structure, as well as establishing, through design values, that the laminated beams of the proposed species are accepted for use as structural elements.



1. INTRODUCCIÓN

Para fines de esta investigación, se define como viga a un elemento relativamente delgado y rígido, el cual soporta cargas perpendiculares y tangenciales a lo largo de su eje longitudinal, produciendo una flexión al elemento que soporta dicha carga, esta puede el ser por peso propio del elemento más el peso de otros cuerpos que normalmente se colocan sobre la viga. Este tipo de elementos pueden estar hechos de diversos materiales y formas, tener diferentes condiciones de uso y apoyo según cada caso, y a su vez, tener diferentes necesidades particulares para el uso que convenga; dentro de los materiales usados como vigas, la madera es uno de ellos, tal como lo demuestran las vigas de madera en los edificios antiguos e históricos (figura 1), que utilizaron vigas de madera maciza.



Figura 1. Viguería del techo, museo “Casa Natal de Morelos” Morelia, Mich., recuperado de t.ly/apmx

Refiriéndonos a vigas de madera podemos dividirlas para fines de construcción en casas y edificios en forma sencilla en dos tipos: las vigas de madera de una sola pieza sólida y las vigas de madera formadas de varias piezas sólidas, comúnmente denominadas “vigas laminadas”. Las piezas normalmente son tablas o tablonés.

A su vez estas vigas laminadas las podemos clasificar en dos tipos: a) las que unen las piezas con algún adhesivo y b) las que no usan adhesivo y unen las piezas con tornillos.

Para esta investigación usamos vigas laminadas unidas con adhesivo, considerando dos tipos de laminación: a) la más común que es la laminación horizontal y b) una propuesta de usar laminación mixta, es decir laminación horizontal y laminación vertical.

También utilizamos dos tipos comerciales y comunes de madera en México, madera de pino (*Pinus sp.*) y madera de cedro blanco (*Cupressus sp.*) para determinar si había diferencias entre ellas en la elaboración de vigas laminadas.

En los edificios antiguos e históricos de México, las leyes mexicanas, no permiten actualmente el uso de vigas laminadas. Sin embargo, para usos modernos, la viga laminada, si puede y debe ser ya un material de construcción común. La razón de mencionar el uso de vigas laminadas y no de vigas de una pieza solida en construcciones modernas, es porque ya no existen amplios bosques que presenten arboles con características biotecnológicas adecuadas para obtener vigas de una sola pieza. Principalmente mayor edad y mayores diámetros y alturas.

A mayor edad del árbol, hasta ciertos límites, mayor madurez celular tanto anatómica como físico-mecánicas, química y mayor diámetro y porcentaje del Duramen, parte de la madera del árbol con características químicas que le proporcionan una larga vida útil al estar protegida químicamente en forma natural contra el deterioro por agentes bióticos y abióticos.

Me refiero entre otras cosas, *anatómicamente*, a la presencia de pocos nudos y por ende dirección de la fibra recta, *físicamente*, a tener mayor estabilidad dimensional (contracción e hinchamiento bajos), *mecánicamente*, tener alta resistencia mecánica (dada por la mayor cantidad de anillos) y *químicamente*, tener mayor durabilidad natural contra el deterioro de agentes bióticos y abióticos (dado por mayor madurez química de las células y por tener mayor porcentaje de duramen).

Para coadyuvar al uso de vigas laminadas en México, en el presente trabajo se proporcionarán datos técnicos de vigas laminadas tanto con laminación horizontal como laminación vertical, se presentará una metodología sencilla para determinar estos datos técnicos y finalmente una tabla que nos indica la sección de una viga de acuerdo a la carga, a la longitud del claro y al distanciamiento entre vigas.

El alemán, Karl Friedrich Otto Hetzer (1846-1911) originario de Weimar, Alemania, en 1901 obtiene su primera patente, y hace referencia a un singular método de fabricación de vigas rectas, que se basa en el empleo y la unión de láminas de madera y pegamentos, dicho proceso se logró ya que en esas fechas hubo un enorme desarrollo de la industria química.

Los primeros trabajos de Hetzer fueron techos arqueados (figura 2), donde la facilidad de moldeo con su sistema fue de gran ayuda; este tipo de tecnología que podía fabricar cualquier tipo de forma recta o curva, se extendió por todo Europa, para los años 20´ existían en diversos países una cantidad enorme de edificios que empleaban el sistema de cubiertas rectas y curvas de Hetzer (Stephen Smulski , 1997).



Figura 2. Arcos de madera laminada, inicios del proceso de laminación de madera, recuperado de t.ly/ta-D

En los inicios de la construcción moderna, el mayor problema que se tiene es la obtención del material para construir dichas estructuras, en el caso particular de la madera, esta tiene limitantes como el largo del fuste del árbol, el diámetro del tronco, y, sobre todo, la rectitud de las piezas que se obtiene.

El proyecto de investigación propone analizar algunos de los factores que intervienen en el diseño y el cálculo de vigas laminadas, tales como:

- Para el diseño: especie de madera, tipo de apoyo de la viga, tipo de laminación,
- Para el cálculo: densidad de la madera, módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidad (MOE), sección transversal, momento de inercia, análisis de cargas, dimensiones, deformación máxima permisible, módulo de sección, cortante vertical, momento, flexión, esfuerzo de trabajo a flexión, esfuerzo flexionante permisible, cortante horizontal, factor de seguridad.

En la investigación también se propone la comparación de dos tipos de vigas laminadas de dos diferentes especies, la primera el pino (*Pinus sp.*), y la segunda, el cedro blanco (*Cupressus sp.*), donde se empleará madera de tercera, según la norma mexicana NMX-C-239, que corresponde a “Madera clasificada estructuralmente correspondiente a coníferas”.

Para el diseño, se sabe que la viga es un elemento recto apoyado en dos o más puntos y que siempre estará sometida a cargas de flexión, dicha flexión será diferente en cada una de las distintas condiciones de apoyo y carga en las que las vigas se empleen; para el caso específico de esta investigación se empleará una viga simplemente apoyada, con combinaciones de carga uniformemente repartida y cargas puntuales.

La investigación plantea la construcción de probetas de madera con laminación horizontal y vertical (viga laminada propuesta), y probetas de madera con laminación horizontal (viga laminada comercial), donde la probeta propuesta disminuirá la flexión y soportará más carga que la viga comercial.

En cuanto a las especies maderables a emplear, tomamos como base el pino, ya que es una de las maderas más comunes en la construcción y es una de las especies de mayor producción en el estado y que ha permitido su empleo en diversas actividades, empleamos también el cedro blanco tiene ventajas físicas y químicas que la hacen ser una madera libre de procesos de preservación haciéndola menos pesada para elaborar elementos estructurales y que puede tener los mismos usos que el pino (AEIM, 2005).

2. GENERALIDADES

2.1 LA MADERA Y SU USO

Ya se ha mencionado que la madera es uno de los materiales más usados en todo el mundo, teniendo usos tan variados, que uno de los principales se ha enfocado mayormente al sector mueblero (figura 3), otro sector ha sido el del papel y cartón, otros muy diferentes como, la fabricación de distintos tipos de prefabricados cuya aplicación ha aportado demasiado al sector de la construcción, así mismo y no menos importante, en la industria farmacéutica y alimenticia, que han sido áreas con mucho desarrollo en cuanto al uso de los subproductos obtenidos de este material (MADERA nueva era, 2017).



Figura 3. Producción de muebles de MDF, recuperado de t.ly/CI_b

Actualmente el sector de construcción alrededor del mundo, ha observado un cambio constante en el diseño de nuevas estructuras, así como en los materiales y técnicas empleadas para construir, esto ha logrado un cambio tecnológico y de innovación en el avance de esta área, sin embargo, actualmente se reconoce que esta actividad ha sido la responsable de una de las mayores fuentes de contaminación actual en el mundo.

Ante estas situación, tanto arquitectos como ingenieros, propusieron como respuesta al problema de contaminación volver a emplear los sistemas constructivos tradicionales, implementando mejoras en la materia prima, así como la combinación entre materiales, mejorando los sistemas constructivos tradicionales e incluso creando nuevos sistemas constructivos híbridos (SUR, diario de Malaga, noticias y actualidad de Malaga, 2017), que han dado resultados positivos para mitigar los efectos de contaminación, también gracias a esto, se han podido generar nuevas propuestas de teorías arquitectónicas que se han hecho presentes en nuevas tendencias enfocadas hacia los ambiciosos proyectos de la nueva arquitectura.

Gracias a esta situación, los arquitectos e ingenieros retoman la madera como una nueva alternativa de material y sistema de construcción moderno, tecnológico e innovador que cumpla con los requerimientos y necesidades de la vida actual alrededor del mundo, como se observa en los ejemplos de la figura 4 (OBRAS, 2017).



Figura 4. Anónimo (2017), Edificios de madera en el mundo, recuperado de t.ly/ve8LY.

Actualmente en México, las estructuras a base de madera, para usos de vivienda y espacios urbanos, han sido muy poco o nulamente usadas por diversos factores. Entre estos podemos mencionar los siguientes:

La mayoría de arquitectos y usuarios consideran los costos de mantenimiento y preservación son muy elevados, así como la resistencia y durabilidad de la madera es muy inferior, en comparación con la que se le atribuyen al block, ladrillo, concreto o acero, que culturalmente se han heredado con el paso del tiempo, haciendo que las generaciones actuales rechacen sistemas constructivos y tecnológicos innovadores en los que se incluye la madera como base estructural.

Un ejemplo de esto, fue la realización de un comparativo entre viviendas de madera y adobe contra las de block de cemento o ladrillo recocido, donde las personas inclinaron su gusto hacia la segunda opción, ya que estas les representan una seguridad y mayor poder adquisitivo, (figura 5) (CONAFOR, s.f.).



Figura 5. Casa Astoria, diseño de FC3 arquitectura, Saltillo, Coahuila, México, recuperada de t.ly/KG1O

Otro factor esencial es el costo de materiales, su distribución y la facilidad de adquisición; ya que México es uno de los mayores productores de concreto en el mundo, se ha logrado que este producto y sus derivados tengan una alta demanda de consumo en el mercado haciéndolos accesibles a bajos costos, por consecuencia la construcción de vivienda media se ha incrementado como muestra la figura 6 (ASOSEM, 2018).



Figura 6. Construcción de fraccionamientos contemporáneos en México, recuperado de t.ly/mMpG

Como respuesta a esta situación, el gerente de integración de las cadenas productivas de la CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) en 2014, el ing. Ignacio González Hernández en una entrevista a un medio periodístico expreso que, “*construir*

viviendas con madera es una opción viable y económica en México, pues permite reducir costos hasta en 70%”.

Es así, que, gracias a los avances tecnológicos en productos de ingeniería de madera en otros países, que su uso se ha expandido, se puede encontrar y emplear vigas, columnas, pisos laminados, barnices, preservadores, retardantes de fuego entre otros, y que en nuestro país han comenzado a ser una opción distinta de construcción a las que tenemos en el mercado nacional.

Una muestra de lo dicho anteriormente es el caso del estudio de arquitectura “S-AR stacion-arquitectura”, que presento su prototipo de vivienda en madera (figura 7), en el cual emplearon una combinación de madera de pino y cristal, este estudio colaborativo, propone el análisis reflexivo de las actuales formas de construir en exceso de las ciudades.



Figura 7. Garza A. (2013). Vivienda Experimental en Mty. Recuperada de t.ly/dOrML

En México, se ha comenzado a emplear de una manera muy pequeña, el uso de la madera en proyectos que sean integrados a la estructura (figura 7), sin embargo, la gran mayoría de los arquitectos que ven solo a la madera como material para decoración y muebles o como cimbra, ha sido solo gracias al nulo conocimiento de este material.

tendríamos que hacer conciencia en las personas inmersas en el área de la construcción, que la madera al poder combinarse con otros materiales, lograrían tener un mayor control sobre los recursos destinados a la construcción de tal forma, que las propuestas arquitectónicas innovadoras en madera podrían tomar como base las estructuras construidas desde la antigüedad (figura 8), para proponer, como ejemplo, la construcción de vivienda por marco rígido empleada en muchos países europeos y de norte de América (figura 9).



Figura 8. Pelan 13 (2015). Recreación de una casa del periodo Neolítico. Recuperado de t.ly/2d1E5



Figura 9. Anónimo (2015). Construcción de casa de madera en USA. Recuperado de t.ly/rxOwX

Teniendo en cuenta lo anterior se desarrollaron diferentes técnicas para el empleo de la madera en sistemas constructivos en los que era posible la construcción de edificios de 1 hasta 4 pisos de altura máxima, sin embargo, con los avances tecnológicos aplicados a adhesivos y tratamientos de madera que actualmente se aplican en sistemas

constructivos, han contribuido a construir más alto, aunque, la limitante que representa esta altura, es el incremento de materia y recursos económicos por los costos generados por la sobre estructura (figura 10) (Borràs, 2010).



Figura 10. Pabellón de Chile Expo Milán 2015, Undurraga Devés Arquitectos, recuperado de t.ly/MZBy

En diversos países, como Chile, Canadá y Estados Unidos han desarrollado sistemas híbridos de construcción, que les ha permitido ser más versátiles en cuanto a la construcción, no solo de vivienda horizontal. Ahora gracias a esta evolución, les ha permitido realizar construcciones verticales, logrando igualar edificios de concreto o acero de mediana altura, de al menos unos 55 m de alto.

Podemos mencionar algunos ejemplos de edificios que han logrado ser construidos y que son referentes de estos sistemas constructivos híbridos, el primero, es el edificio “Brocks Commons”, de la Universidad de Columbia Británica, en Vancouver Canadá y el segundo es la “Torre experimental Peñuelas”, ubicado en la ruta 68 a menos de una hora de la población de Santiago, en la reserva forestal peñuelas en Chile, siendo este el primer edificio más alto construido en madera y con refuerzos de acero en este país.

Edificio Brocks Commons

Ubicado en Vancouver Canadá, la residencia estudiantil de la universidad de Columbia Británica nombrado Brock Commons Tallwood House, es un edificio híbrido más grande del mundo (figura 11), donde se combinó masivamente el concreto, la madera y el acero, para lograr 18 niveles con una altura de 53 m, cabe destacar que el tiempo ayudó a bajar los costos ya que fue construido en 66 días.



Figura 11. Anónimo. Brock Commons - Tallwood House. Recuperado de t.ly/DXRXD

El sistema híbrido de construcción empleado para el cuerpo del edificio combinó la madera laminada cruzada (CLT) (figura 12), sistema empleado en columnas, núcleos de entresuelo, y núcleos de muros.

Las columnas cuentan con una placa de acero con un conector para su armado en ambos sentidos, el concreto utilizado en el primer nivel funciona como base de desplante para la estructura de madera, así como los cubos de escaleras sirven como elementos de soporte y liga de la estructura de madera, la última cubierta fue elaborada con un sistema de acero con concreto para cubierta del edificio completo. (Dazne, 2006).



Figura 12. Naturally Wood. World's tallest hybrid wood building. Recuperado de t.ly/y6NNG

Torre Experimental Peñuelas

Este edificio ubicado en la zona de la reserva forestal Peñuelas cerca de Santiago en Chile, las torres más altas de América Latina, y emplea un sistema constructivo de muro encolado con paneles de *osb*, y madera encolada como elementos estructurales sobre una plancha de concreto como cimentación (figura 13).



Figura 13. Anónimo. Torre experimental Peñuelas. Recuperado de t.ly/VZ0Jg

Su inauguración en noviembre de 2018, dio paso a una torre de 6 pisos utilizando la madera como materia prima en su mayoría (figura 14), utiliza el sistema de madera encolada, y el sistema de muro envolvente que ha sido un panel de madera encolada con relleno de lana de vidrio como elemento acústico y térmico, unido por conectores

atornillables y con la utilización de barras de acero tensadas atornilladas entre sí, que atraviesan los muros para soportar los movimientos sísmicos (Infogate.cl HH, 2019).



Figura 14. Anónimo. Secciones y cortes torre experimental peñuelas. Recuperado de t.ly/zNW2G

Como ya se mencionó anteriormente, estos sistemas modernos o híbridos (figura 15) que se han empleado en la construcción de estos edificios los ha llevado a colocarse en la punta de la construcción de edificios de gran altura en madera, haciéndolos un referente para los arquitectos de otros países que están en el camino de uso de nuevos materiales para sus propuestas arquitectónicas (CONFEMADERA, 2010).

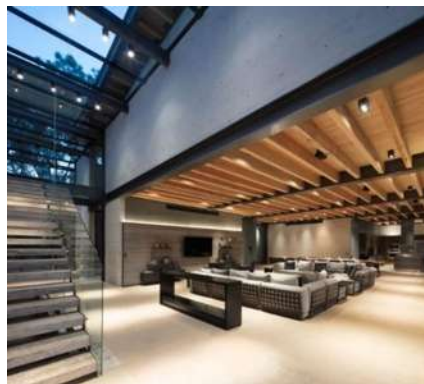


Figura 15. Garza A (2017). Casa vista al lago, sistema híbrido madera - concreto. Recuperado de t.ly/AXLm7

2.2 CONSTRUCCIÓN DE MADERA EN MÉXICO

En México, específicamente en el estado de Michoacán, la construcción de casas con madera proviene desde la época prehispánica, estas tuvieron una evolución al mezclarse con las técnicas de construcción españolas, dando pie a la arquitectura colonial, como un arte característico de cada región del país, así, los pueblos purépechas construyeron sus nuevos pueblos, empleando la madera, el adobe y la piedra como materiales fundamentales para la construcción de sus viviendas; a las que se les llama trojes (figura 16).



Figura 16. Anónimo (2018). La Troje principal herencia Purépecha. Recuperada de t.ly/0ELw5

En la imagen 16, podemos observar el troje de madera como el esquema vivienda propia de la región purépecha, que actualmente ha cambiado drásticamente con el fenómeno de la migración a los Estados Unidos, además, con la tala desmedida de los bosques, y sobre todo, con la desvalorización de la madera, como material constructivo que da identidad a esta región, se ha dejado de lado y se ha sustituido por otros sistemas, donde se emplea el concreto, la varilla y el block de cemento (figura 17).



Figura 17. Cruz De León, J. et al. (2016). Contraste de construcciones en Charapan, Michoacán. Recuperado de t.ly/KXl8O

En la imagen anterior, podemos apreciar el contraste entre el sistema constructivo de madera típicamente michoacano que da vida al “troje” con la influencia extranjerizante debido a la migración y el empleo de los sistemas constructivos de concreto.

En contraste, cabe mencionar que las sociedades de clase alta, en diversos países del llamado primer mundo, tienen una percepción muy distinta a la que predomina aquí ya que las viviendas realizadas en madera se consideran de mejor gusto y elegancia, además de ser más confortables y generar menos contaminación (Luna & Sánchez Díaz, 2015) .

Actualmente en México, desde hace 11 años la COMACO (Consejo Nacional de la madera en la construcción) ha realizado concursos enfocados a vivienda multifamiliar y vivienda rural utilizando como material principal la madera. Los ganadores de su 11° concurso realizado en 2018, lograron la conformación de varios proyectos interesantes, todos ellos, emplearon el sistema de bastidores cubiertos con paneles *osb* o triplay de 9mm, tanto en elementos de entrepisos, cubiertas, así como muros, con este sistema se pudo proponer estructuras de 4 niveles para su edición de vivienda multifamiliar (figura 18).



Figura 18. Anónimo (2018). Vivienda Intraurbana Multifamiliar, proyecto concursante 11 edición COMACO. Recuperado de t.ly/W5XP9

Para la partida de casa rural, se revisaron dos proyectos en los cuales se emplearon diferentes sistemas constructivos, el primer caso, el empleo de poste y vigas con cubierta de *osb* en forma de sandwich con relleno y aislante térmico en el exterior.

El segundo caso emplea el mismo sistema constructivo, de postes y viga, muros en madera, aunque de este último no se especifica algún sistema en particular. Este sistema combinó muros de block de concreto, así como el empleo de armaduras en la techumbre donde también se hace uso de láminas prefabricadas de fibrocemento.

El último sistema constructivo que se empleó, utilizó sistemas de bastidores forrados con *OSB* en ambas caras, aquí se empleó un aislante de poliestireno como relleno del muro, en la techumbre se emplea el mismo sistema constructivo que el ejemplo anterior, un sistema de armadura con uso de panel *osb* como cubierta y láminas zintro como cubierta final (COMACO, 2018).

Cabe mencionar que, de los ejemplos ganadores, no existe información alguna de haber sido construidos, situación en la cual no se puede determinar que los sistemas lograran trabajar de una manera adecuada en cada una de las diferentes regiones donde fueron propuestos.

Gracias a este tipo de eventos, podemos decir, que en México existe el gusto, la inquietud y la propuesta por las construcciones de madera, de tal forma que ya se empiezan a conocer pequeñas empresas que ofrecen este servicio, por ejemplo, “Cabañas Dilyka” y “Mi Hogar con Madera” son pequeñas empresas que iniciaron su actividad con cinco y tres años respectivamente, emplean un sistema de construcción de troncos cuadrados y de muro ligero (figura 19).



Figura 19. Cabaña Dilyka sistema de muro ligero, recuperado de t.ly/y9Kv

El auge que este tipo de viviendas ha tenido no ha sido demasiado, pese a que ya existen este tipo de empresas, solo emplean uno o dos sistemas constructivos, y estos han sido importados sobre todo de Canadá, Estados Unidos y Chile, sin embargo, existen otros sistemas que han sido los que dieron pauta al desarrollo de los sistemas híbridos.

2.3 SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN MADERA

Entramado ligero

Es un sistema de construcción por elementos prefabricados que ocupan bastidores de madera, relleno de lana de vidrio como elemento acústico y térmico, y cubiertas en paneles de tableros OSB o triplay de diferentes medidas, el entramado ligero tiene sus inicios en el siglo XIX, respondiendo a la necesidad de construcción rápida y de productos prefabricados industrializados y normados (figura 20).

Esta forma de construcción se compone de tres fases, entramado, cerramiento y revestimiento, gracias a este sistema se ha logrado construir con tal firmeza que puede igualarse a las construcciones de concreto.

Por su ligereza, los hundimientos por asentamiento de estructura son mínimos y gracias a que se emplean elementos prefabricados, se tiene un excelente control de calidad (figura 21) (Borràs, 2010)



Figura 20. Anónimo. Construcción de entramado ligero. Recuperado de t.ly/OXJR8



Figura 21. Anónimo. Resistencia al hundimiento de las casas fabricadas con el sistema de entramado ligero, gracias a su bajo peso, no requiere cimentaciones especiales. Recuperado de t.ly/rxOzn

Estructuras de troncos

El sistema de troncos es el sistema más tradicional de construcción con madera y es el más comúnmente empleado en los países con amplios suministros de madera. Los troncos de acuerdo a su tamaño y forma se clasifican en: troncos redondos, tronco cuadrado, tronco muerto y tronco laminado. En el sistema constructivo de troncos redondos, éstos se emplearán de tal forma que el diámetro sea constante a lo largo del mismo, logrando un escalonamiento constante, y se instalan entrecruzando las puntas sobresaliendo una cierta distancia desde la esquina (PINECA, 2018).

El empleo de troncos cuadrados se aplica por razones estéticas y de mayor hermetismo entre las paredes, aunque por este motivo el sistema incrementa su costo, se emplean para que en el interior los muebles se adecuen al espacio sin tener mucho desperdicio de espacio útil entre huecos y así no reduzcan las áreas efectivas de tránsito del lugar (figura 22) (Arquitectura en madera, 2018).



Figura 22. Anónimo. Casa de troncos macizos. Recuperado de t.ly/epJNr

Bloques de madera maciza (tecnología CLT)

Este sistema tecnológico se refiere al empleo de madera maciza encolada por capas transversales entre sí (figura 23), con la finalidad de obtener una estructura cruzada como la del triplay, ya que, con este, se pueden dar dimensiones en espesor, longitud y altura deseadas para formar bloques que puedan irse armando con el empleo de uniones de acero, este sistema nos ayuda a obtener mayores capacidades de carga por su rigidez.

Gracias a este incremento en sus propiedades físicas y mecánicas es utilizado en sistemas de piso y muros, columnas y vigas, cuyo tablero más grande construido para muro, se ha podido obtener una medida de 3m de alto por 16m de longitud, por 0.12 m de espesor; sin perder sus características antes mencionadas, permitiendo una construcción de hasta 12 niveles de altura. Este sistema permite el incremento de dimensiones para soportar cargas mayores, sin embargo, los costos empezarían a encarecer el sistema (figura 24) (Franco, 2019).



Figura 23. Enso S. (2013). CLT – Cross Laminated Timber. Recuperado de t.ly/j6JP8



Figura 24. Anónimo. Residencia hecha de CLT. Recuperado de t.ly/dOJmD

Madera laminada

Se reconoce como madera laminada al sistema compuesto por piezas pegadas entre sí con adhesivo para uso en exteriores, además cada pieza está unida en el lado de la testa por un corte dentado finger-joint que, por medio del adhesivo adecuado, une a presión cada tramo de madera hasta formar elementos de longitudes considerables; que por razones de transporte y manejo van de 3 a 12m (figura 25).

Estas piezas, se pegan entre sí por el lado de sus caras hasta formar el peralte deseado, así se consiguen secciones de largos de gran tamaño que con la madera común no se lograrían, también, su estructura es más estable y resistente, gracias a esto, la versatilidad en el diseño de estructura grandes y complejas se ha podido dar paso a

soluciones creativas al poder construir elementos rectos y curvos de secciones variables (figura 26), en donde el tamaño de la sección ha podido alcanzar los 30 metros de longitud (ARCHDAILY, 2015).



Figura 25. Anónimo (2016). Madera laminada. Recuperado de t.ly/7ObqJ



Figura 26. Anónimo (2016). Vigas de madera lamina empotradas, sistema hibrido. Recuperado de t.ly/q2xyE

3. MARCO TEÓRICO

3.1 ANÁLISIS DE UNA VIGA

En el área de la construcción (ingeniería civil y arquitectura), una estructura es un elemento conformado de otros sub elementos resistentes, fabricados de diversos materiales como acero, concreto, madera o de una combinación entre ellos, con el fin de soportar cargas o fuerzas (diferentes condiciones de uso y peso) para transmitir las entre ellos, hasta llegar al suelo (cimentación), Estos elementos estructurales deben ser capaces de recibir fuerzas externas (movimientos sísmicos, factores expansión contracción por cambios de temperatura, además la variación de las condiciones climáticas que ocurren en la zona donde se coloca la viga) resistiéndolas internamente para transmitir las de igual forma a la cimentación.

En la construcción de estructuras, debemos conocer, comprender y analizar los conceptos que nos permitan entender el funcionamiento de cada sub elemento que conforma la estructura, para poder determinar el tipo de material que se empleará para conformar dicho elemento.

Actualmente las propuestas arquitectónicas, tienen una tendencia más funcionalista, que se basa en formas simples (cuadrados, rectángulos) para el mejor aprovechamiento de los espacios y de los recursos, que anteriormente se mencionaron.

Bajo estas condiciones, la viga, que es uno de los elementos estructurales, trabaja en diversas condiciones de carga y apoyo. Una carga, es una fuerza que se puede ser puntual o a lo largo del elemento, para realizar una presión, un ejemplo es cuando se coloca un cuerpo sobre otro; por esta carga se producen dos fuerzas distintas en su eje longitudinal, una es la compresión, que se produce en la parte alta del eje neutro y que comprime las fibras del elemento, el otro, es la tensión, que se produce en la parte baja del eje neutro y estira las fibras del elemento.

Puesto que la carga es una fuerza exterior aplicada sobre la viga y que puede ser puntual o repartida uniformemente sobre ella, esta, hace que la viga cambie ligeramente su forma o se deforme completamente. Esta fuerza externa que deforma la viga, produce una fuerza interna dentro del material, a la que llamaremos esfuerzo (Fitzgerald, Resistencia de materiales, 2005).

De acuerdo con Fitzgerald, el esfuerzo interno del material lo denomina esfuerzo unitario (figura 27) y lo define como la fuerza por unidad de área, con lo que llega a la siguiente expresión matemática:

Ecuación 1. Esfuerzo unitario

$$s = \frac{P}{A}$$

Donde:

s= esfuerzo unitario en lb/plg² o N/m².

P= carga aplicada en lb o N.

A= área sobre la cual actúa la carga, en plg² o m².

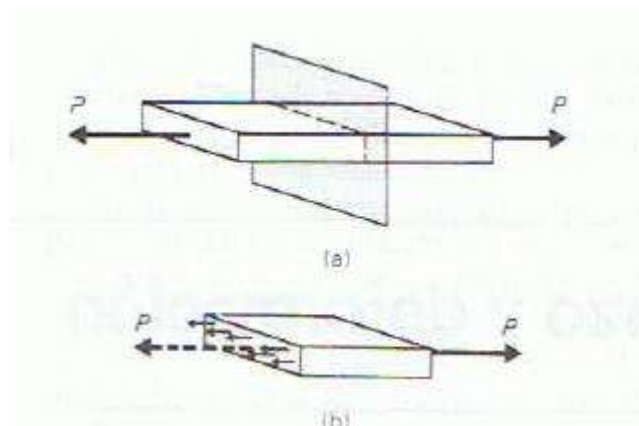


Figura 27. Diagrama de fuerzas actuantes sobre el área transversal

Esta expresión nos aclara que la deformación en un cuerpo se considera que es el cambio de longitud (se alarga o se encoge) y de acuerdo a la expresión, deformación (δ) es directamente proporcional a la carga (P) y a la longitud (L) e inversamente

proporcional al área transversal (A), Normalmente los resultados de esta expresión matemática son muy pequeños, lo cual obliga a incluir la constante de proporcionalidad y la cual consiste en hacer el inverso del módulo de elasticidad (módulo de Young) (figura 28). Que se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 2. Deformación total.

$$\delta = \frac{PL}{AE}$$

Donde:

δ = deformación total.

P = carga aplicada.

L = distancia de la carga.

A = área sobre la cual actúa la carga.

E = módulo de elasticidad.

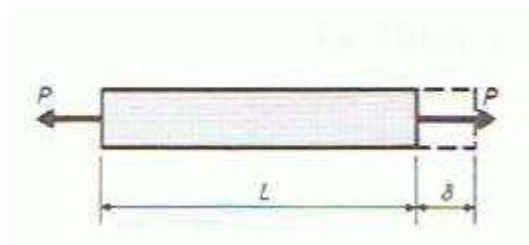


Figura 28. Diagrama de módulo de elasticidad

Es importante para el estudio de las vigas, poder clasificarlas de una manera que puedan simplificar sus cálculos, tanto Fitzgerald y Parker coinciden, que se pueden clasificar en vigas estáticamente determinadas y vigas estáticamente indeterminadas.

Fitzgerald también clasifica las vigas por sus condiciones de apoyo en:

A) vigas simplemente apoyadas; donde una viga simplemente se apoya en una superficie igual o mayor que la sección transversal de la viga, en el ángulo que el diseñador decida.

- B) Vigas en voladizo o vigas empotradas en un extremo. En este tipo de viga una parte longitudinal de la misma sobresale del punto de apoyo en una distancia definida, por el diseño y por las características intrínsecas de la viga y la parte fija se empotra en el cuerpo del que se apoya la viga.
- C) Vigas continuas son vigas de tramos largos que se apoyan en tres o más puntos teniendo para dar continuidad a espacios que por debajo de ella queden libres.

En el análisis de una viga, las mediciones cruciales son la determinación de los esfuerzos internos y las deflexiones, por lo tanto, se hace necesario determinar los momentos flexionantes internos y las fuerzas cortantes de una viga. Ya que estos datos nos indican la resistencia a la flexión (pandeo) y la fuerza transversal que la viga puede resistir; lo anterior nos coadyuba a decidir si la viga propuesta se ajusta a los cálculos del diseño estructural

La ley fundamental de la estática se basa en que “todo cuerpo que está en equilibrio, cualquier parte de su cuerpo estará en equilibrio”; por esta razón, Fitzgerald menciona, que la viga al estar sostenida en sus extremos, los soportes que la cargan ejercen una fuerza, que es igual al peso o carga que soporta, pero en sentido contrario, produciendo un giro a favor o en contra de las manecillas del reloj y a esto se le llama momento flexionante interno o simplemente momento (M).

En el punto de soporte, a la fuerza vertical que se ejerce, por la acción de soporte, se le llama cortante vertical (V). en las vigas estáticamente determinadas, los valores del cortante y momento están determinados por fórmulas que se obtuvieron de análisis previos, estos análisis establecen ciertas condiciones de uso y ubicación de las cargas y las diferentes condiciones de apoyo en que se encuentran las vigas, esta información se encuentra en tablas y son una herramienta para hacer más rápido el cálculo de los valores buscados.

Para fines de la investigación, emplearemos una viga simplemente apoyada con una carga uniformemente repartida (figura 29), de la cual obtendremos que:

El momento flexionante es igual a la expresión matemática:

Ecuación 3. Momento flexionante

$$M_{max} = \frac{wL^2}{8}$$

Donde:

M = momento máximo en lb o kg.

w = carga por longitud y puede ser en lb/ pie o kg/m.

L = longitud de la viga. En pie o m.

En este caso específico de viga, el cortante es igual a las reacciones de los apoyos ($R_1 = R_2 = V$) (figura 29), se obtiene la siguiente expresión matemática:

Ecuación 4. Esfuerzo cortante

$$V = \frac{wL}{2}$$

Donde:

V = cortante.

w = carga por unidad de longitud dado en lb/pie o kg/m

L = longitud de la viga pie o m.

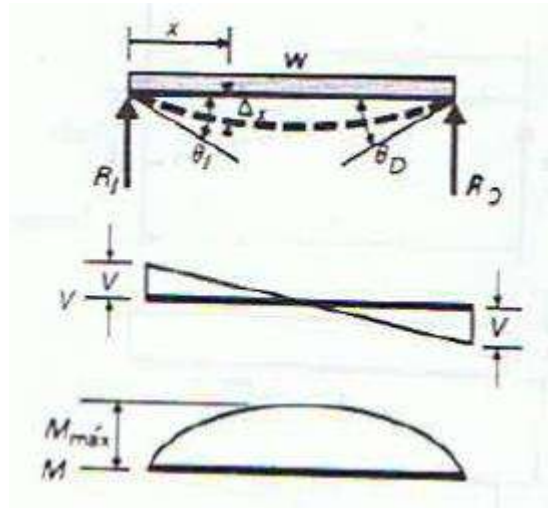


Figura 29. Diagramas de momento y cortante de una viga simplemente apoyada

En las vigas de madera, a diferencia de las de concreto y acero, se debe calcular un esfuerzo cortante horizontal (Harry Parker, 2013), que se relaciona directamente con los esfuerzos cortantes verticales; el concreto y el acero, el cortante horizontal no se toma en cuenta para cálculos de secciones y cálculos estructurales, debido a que el tiempo que estos materiales se han empleado y los datos obtenidos, arrojan fluctuaciones muy pequeñas que pueden despreciarse, lo anterior se debe a la dureza y rigidez de este tipo de materiales.

Sin embargo, Fitzgerald y Parker, coinciden que cuando se trata de madera, para uso en vigas de madera maciza, estos datos son indispensables ya que la madera es un material de baja resistencia al esfuerzo cortante en una dirección (generalmente horizontal, figura 29), aunque se pueden hacer vigas de madera uniendo placas y secciones laminadas, los 2 casos, ambos autores coinciden en que deben hacerse los cálculos de las fuerzas horizontales y verticales, y de los materiales de unión, como pueden ser la cantidad de clavos, o de remaches, algunos tipos de adhesivos que tengan valores más altos de resistencia a los esfuerzos cortantes horizontales.

Para calcular el esfuerzo cortante horizontal en vigas de sección rectangular, de madera solida se emplea la siguiente expresión:

Ecuación 5. Esfuerzo cortante unitario horizontal máximo

$$f_v = \frac{3V}{2bd}$$

Donde:

f_v = esfuerzo cortante unitario horizontal máximo en lb/pulg² o N/m².

V = fuerza cortante vertical total en el extremo en lb o N.

b = ancho de la sección transversal en pulg. o m.

d = peralte de la sección transversal en pulg. o m.

Para el cálculo del esfuerzo cortante horizontal en vigas de madera laminadas y de diferente sección transversal a la rectangular, se emplea la siguiente expresión:

Ecuación 6. Esfuerzo cortante unitario horizontal máximo

$$f_v = \frac{VQ}{Ib}$$

Donde:

f_v = esfuerzo cortante unitario horizontal máximo en lb/pulg² o N/m².

V = fuerza cortante vertical total en el extremo en lb o N.

Q = momento estático con respecto al eje neutro del área de la sección

transversal, arriba o abajo del punto en el que se determine f_v

I = momento de inercia de la sección transversal de la viga con respecto a su eje

neutro en pulg⁴ o mm⁴

b = ancho de la viga en el punto en el que se calcula f_v en pulg. o m.

El siguiente valor que se debe determinar es el momento resistente, en este se incluye la forma y las dimensiones de la sección transversal de la viga y del material del que está hecha, en este caso es de madera; para obtener el valor del momento resistente emplearemos la expresión que define la flexión; Fitzgerald define a la flexión como la relación que se establece entre los esfuerzos de las fibras y el momento resistente interno, así la expresión matemática que define la flexión es la siguiente:

Ecuación 7. Esfuerzo en las fibras extremas de la viga

$$s = \frac{Mc}{I}$$

Donde:

s = esfuerzo en las fibras extremas de la viga, en lb/plg² o N/m²

M = momento flexionante interno en la viga, en plg-lb o m-N

I = momento de inercia de la sección transversal de la viga en plg⁴ o mm⁴

c = distancia desde el eje neutro de la viga hasta las fibras extremas, en plg.

Parker en cambio, basa su expresión de flexión en la combinación entre el material del cual está hecha la viga f , y en la forma y el tamaño de la sección transversal y estas están representadas por una expresión matemática denominada módulo de la sección S .

Ecuación 8. Momento flexionante máximo en la viga

$$M = f S$$

Donde:

M = momento flexionante máximo en la viga, en plg-lb o m-N

f = esfuerzo de la fibra extrema.

S = módulo de la sección.

Y donde S matemáticamente se define como sigue:

Ecuación 9. Módulo de la sección

$$S = \frac{bd^2}{6}$$

Donde:

S = módulo de la sección.

b = ancho de la sección transversal.

d = peralte de la sección transversal.

De esta manera la variante de la expresión de la flexión que estableció Parker queda de la siguiente forma:

Ecuación 10. Momento flexionante según Parker.

$$M = f \frac{bd^2}{6}$$

Parker, establece una diferencia entre la variable f como el esfuerzo admisible en la fibra extrema (F_b) y f como el cálculo de la fibra extrema (f_b), con frecuencia se usa de forma intercambiable los términos *esfuerzo de la fibra extrema* y *esfuerzo flexionante* así la formula inicial de Parker sobre la flexión queda de tres formas posibles de uso:

Ecuación 11. Esfuerzo admisible en la fibra extrema según Parker

$$F_b = \frac{M}{S}$$

Ecuación 12. Módulo de la sección según Parker

$$S = \frac{M}{F_b}$$

Ecuación 13. Momento flexionante

$$M = F_b S$$

Ahora bien, Fitzgerald determina por separado el módulo de la sección, ya que considera que puede resolver problemas de elementos constructivos con secciones transversales simples como el círculo, triángulo o rectángulos; en el diseño de vigas la relación entre el momento de inercia y la distancia a la fibra más alejada de la viga, proporciona los datos necesarios para calcular las dimensiones de la misma, a partir del relación entre el momento flector y del esfuerzo en las fibras extremas de la viga.

De tal forma que la expresión matemática queda de la siguiente manera:

Ecuación 14. Módulo de la sección según Fitzgerald

$$Z = \frac{I}{c}$$

Donde:

Z = módulo de la sección.

I= momento de inercia.

c= distancia de la fibra más alejada a partir del eje neutro de la viga.

Con esta definición, Fitzgerald emplea la expresión que formulo sobre flexión para describirla de la siguiente manera:

Ecuación 15. Flexión con relación entre M y Z

$$s = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{Z}$$

Sin embargo, esta expresión en algunos casos donde se desconocen ciertos datos y se tienen otros, la descomposición de sus variables para realizar ciertas

igualdades, pueden ayudar al cálculo de valores necesarios para el cálculo de las secciones a partir de otros datos que se proporcionen, de esta manera Fitzgerald y Parker coinciden en que el módulo de la sección quede de la siguiente manera:

Ecuación 16. Módulo de la sección según Fitzgerald y Parker

$$Z = \frac{bh^2}{6} \quad \text{ó} \quad S = \frac{bd^2}{6}$$

Es importante obtener y cuidar el valor máximo de la deflexión de la viga en la construcción, debemos entender que una viga puede soportar las cargas sin exceder el límite de flexión admisible, pero esto implica que quizá la viga tenga una curvatura muy amplia, que provocaría fracturas de los elementos, que se pueden presentar en: grietas en los plafones; acumulación de agua en las azoteas, fracturas de muros y de los recubrimientos de estos; en los pisos la compresión de las duelas y su posible desprendimiento; por esta razón, la viga, además de soportar los esfuerzos de flexión deberá ser lo suficientemente rígida para evitar este tipo de problemas.

Los diseñadores estructurales, al hacer un redimensionamiento las deflexiones de las vigas de un edificio, toman en cuenta la relación de 1/360 del claro a cubrir, cuando son elementos que llevan acabados arquitectónicos, y un valor de 1/240 del claro cuando, no tienen algún tipo de acabado, sin embargo, estas relaciones entregan un valor aproximado de los valores reales de la deflexión.

Como el cálculo real de la deflexión de una viga depende de muchos factores como son: el ambiente, las cargas, las contracciones y elongaciones del material, los asentamientos, los módulos de elasticidad, así como los personas y animales y a los que son susceptibles, por lo tanto, la determinación de las deflexiones solo son aproximaciones.

Parker establece que para las estructuras de madera, este cálculo de las deflexiones es importante ya que pueden afectar a los demás materiales y elementos, como lo son marcos de puertas, ventanas y algunos muros y techos, ya que estos se

llevan al límite de sus capacidades, un ejemplo de esto es cuando se libran claros demasiado largos y que aparte cargan un nivel extra sobre ellos, el cálculo de estas vectores determina también el largo de los vanos o claros a cubrir, así los diseñadores podrán tener una visión más clara de los elementos con los que están trabajando.

En su mayoría, los elementos que conforman la estructura de cualquier edificio, se emplean vigas simplemente apoyadas con cargas uniformes repartidas, en este caso la ecuación se aplica de la siguiente manera:

Ecuación 17. Deflexión de la viga

$$\Delta = \frac{5WL^3}{384EI}$$

Donde:

Δ = deflexión de la viga.

W = carga total repartida.

L = longitud de la viga.

E = módulo de elasticidad del material empleado.

I = momento de inercia.

Y 384 es una constante que se obtiene de la derivación de todas las fórmulas desarrolladas.

Aunque Parker también, sustituyo las relaciones que incluyen a W , L y el esfuerzo de flexión que produce la deflexión de la viga esta expresión queda de la siguiente forma:

Ecuación 18. Deflexión de la viga según Parker

$$\Delta = \frac{5L^2 f_b}{24Ed}$$

Donde:

Δ = deflexión de la viga en pulg o m.

f_b = esfuerzo de flexión.

L = longitud de la viga en pulg o m.

E = módulo de elasticidad del material empleado.

24 es una constante de proporcionalidad.

d = peralte de la viga en pulg o m.

Parker establece una ecuación con valores promedio de f_b de 1500 lb/pulg² y E de 1500 000 lb/pulg², sin embargo, esta ecuación solo puede ser usada con valores de tablas que estén dentro de este rango, de tal forma que la ecuación queda de la siguiente manera:

Ecuación 19. Deflexiones de la viga con datos de tablas según Parker

$$\Delta = \frac{0.03L^2}{d}$$

Donde:

Δ = deflexión de la viga en pulg o m.

d = peralte de la viga en pulg o m.

L = longitud de la viga en pulg o m.

Como las vigas empleadas en la construcción, no siempre van a cumplir la relación de la ecuación anterior, Parker estableció una relación entre los valores medios dados anteriormente y los datos reales de la viga que se calculara, (anexo) por lo que tendríamos la siguiente expresión:

Ecuación 20. Deflexión real de la viga con datos de tablas según Parker

$$\Delta_{real} = \frac{f_b^{real}}{1500} \cdot \frac{1\,500\,000}{E_{real \text{ en } lb/pulg^2}} \cdot \text{valor de } \Delta \text{ en las tablas}$$

Todas las fórmulas analizadas anteriormente se conjuntaron en una base de datos que nos a podido dar respuestas a ciertas incógnitas con respecto a casos hipotéticos donde el uso de vigas es empleado para la conformación del proyecto estructural de una estructura.

3.2 VIGAS ANALIZADAS EN SOLID WORKS

Con base en lo anterior, en la etapa de diseño (figura 30), se generó el modelo de viga para la investigación y que se comparara con el modelo de una viga laminada de la forma como encontramos en el mercado, para estos modelos, el programa necesitaba tener la referencia de la densidad específica, así como el módulo de elasticidad de cada especie además de ser sometidas a las mismas condiciones de carga y de apoyo, en este caso se empleó una carga uniformemente repartida de 1 k/cm², en una viga simplemente apoyada, ya que dicha carga mostraba valores de flexión en las simulaciones que podían analizar de una mejor manera al ser el valor de la unidad.

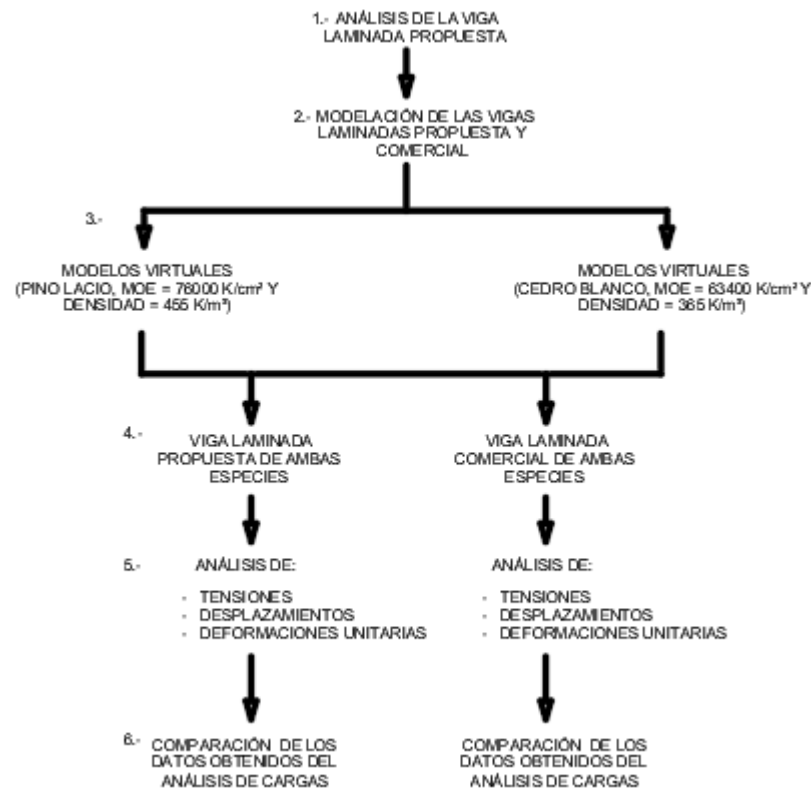


Figura 30. Metodología de trabajo en Solid Works, para el diseño y análisis de las vigas de la investigación, elaboración propia

La finalidad de emplear el programa de análisis finito (SOLID WORKS), era obtener valores simulados de flexión de cada tipo de viga y de cada distinta especie que se empleó, para observar el comportamiento en los diferentes casos de vigas empleadas en condiciones de carga iguales y en el caso de la viga propuesta poder realizar los cambios necesarios.

De la literatura revisada, para fines del análisis de elemento finito, se emplearon los datos reportados en “Tabla FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas” (Castellanos, 2008) para la densidad específica y el módulo de elasticidad (MOE) de las especies de Pino Lacio (*Pinus Michoacana*) y Cedro Blanco (*Libocedrus Decurrens*), se obtuvo un valor de densidad específica del pino lacio 455 k/m³ y de Cedro Blanco 365 k/m³ así como los valores del módulo de elasticidad (MOE)

de cada especie respectivamente, del pino lacio 76000 k/cm², y del cedro blanco 63400 k/cm².

La modelación de las vigas quedo de la siguiente manera:

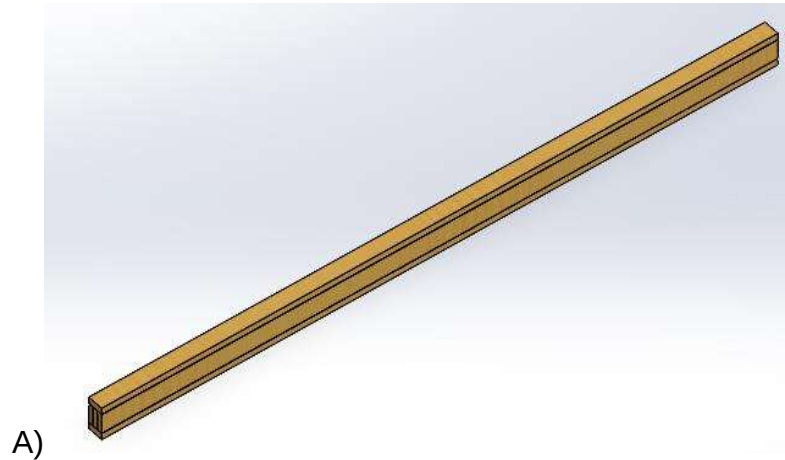


Figura 31. A) Simulación de viga laminada propuesta en Cedro Blanco, elaboración propia

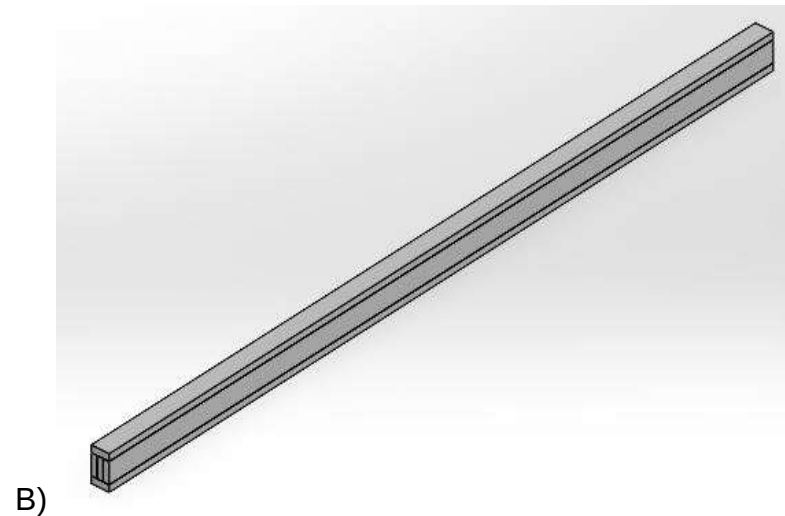


Figura 32. B) Simulación de Viga laminada propuesta en Pino Lacio, elaboración propia

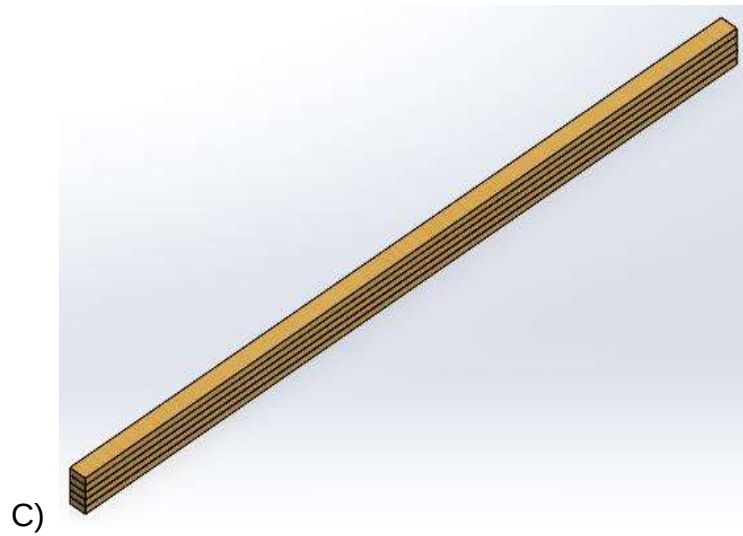


Figura 33. C) Simulación de viga laminada comercial en Cedro Blanco, elaboración propia

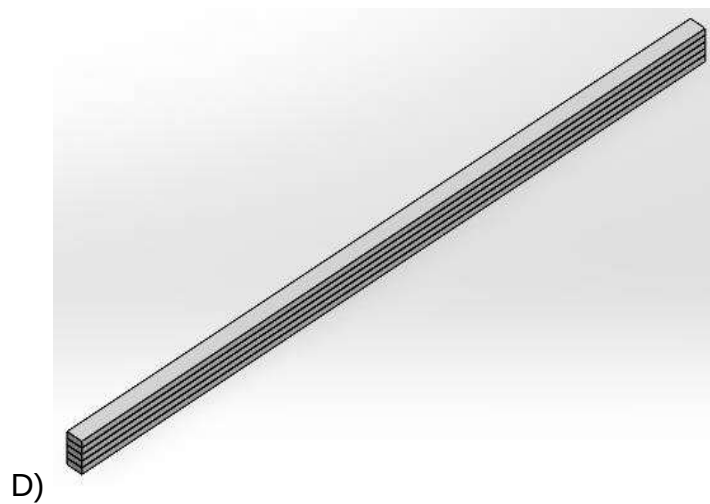
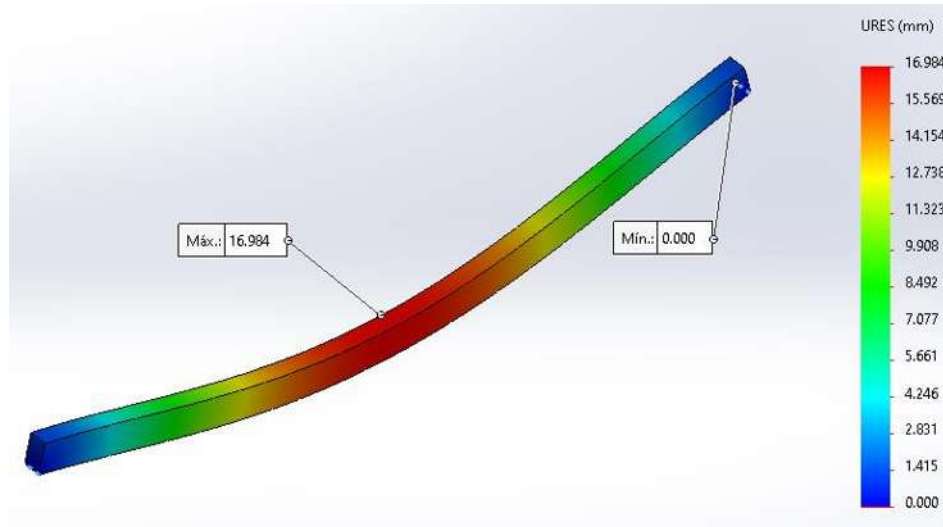


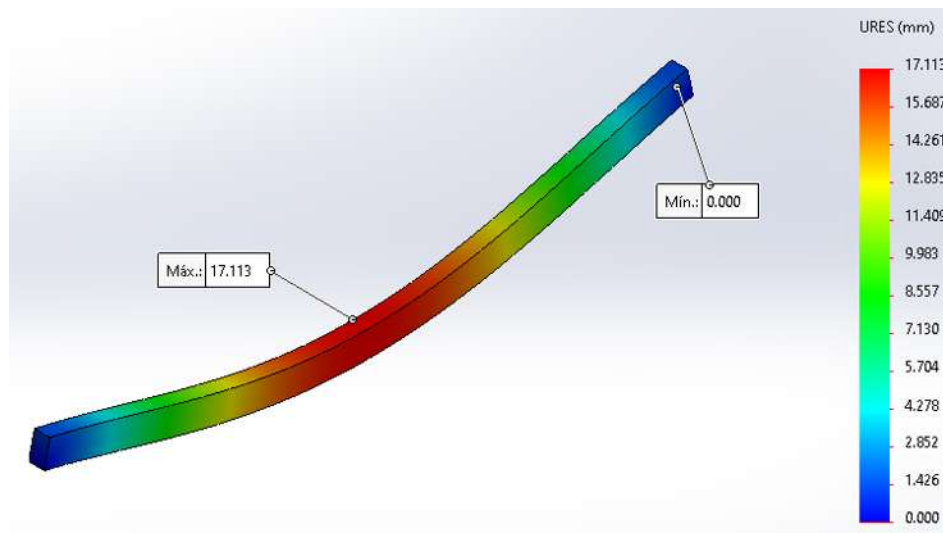
Figura 34. D) Simulación de Viga laminada comercial de Pino Lacio, elaboración propia

A cada uno de los modelos se les sometió a un análisis estático donde se obtuvieron tres variables: tensión, desplazamiento y deformación unitaria; también el análisis mostró la gráfica de cada variable tanto en tabla como en la viga, indicando los valores máximos y mínimos de las unidades medidas.

De los valores obtenidos de la simulación, que fue respecto al desplazamiento (Flexión) que es el que interesa para fines de la investigación, estos valores sirvieron para la comparación de los valores obtenidos de cada una de las variables, así las gráficas obtenidas fueron las siguientes:

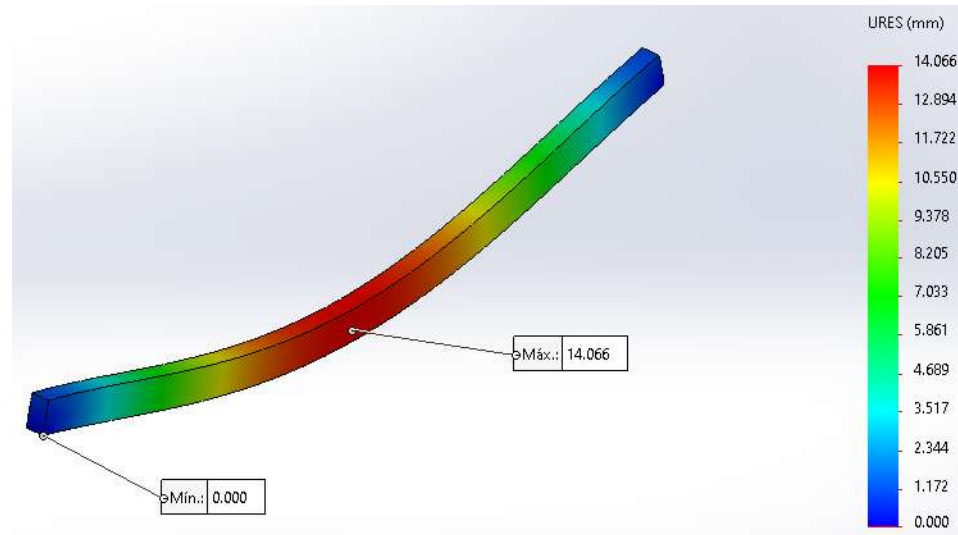


Grafica 1. Valores de desplazamiento (Flexión) obtenido de la simulación de la viga laminada propuesta fabricada en Cedro Blanco. Elaboración propia

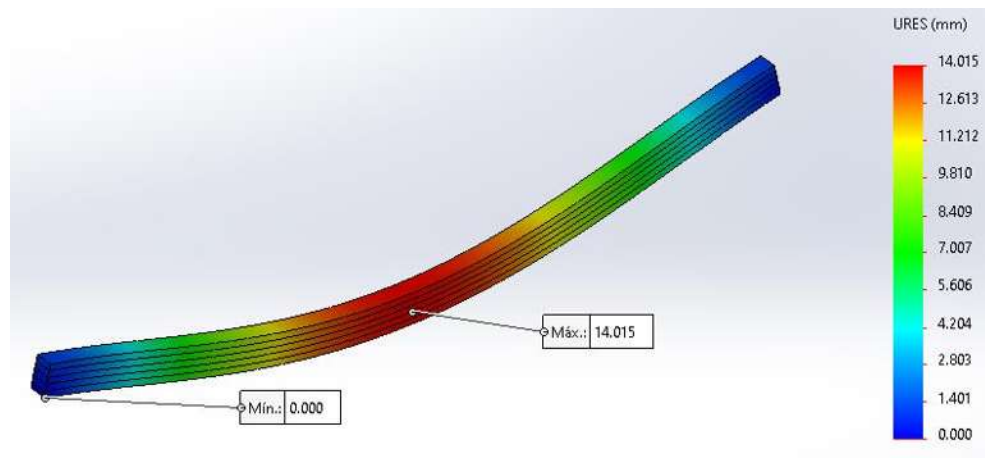


Grafica 2. Valores de desplazamiento (Flexión) obtenido de la simulación de la viga laminada comercial fabricada en Cedro Blanco. Elaboración propia

En las gráficas de deformaciones (grafica 1 y grafica 2), que corresponden a las vigas laminadas propuestas (figura 30) y vigas laminadas comerciales (figura 32) de cedro blanco respectivamente, los valores de flexión difieren por algunas décimas de milímetro, que pueden ser despreciables y se afirma que se obtuvo el mismo valor de flexión, en este caso de fue de 17 mm.



Grafica 3. Valores de desplazamiento (Flexión) obtenido de la simulación de la viga laminada propuesta fabricada en Pino Lacio. Elaboración propia



Grafica 4. Valores de desplazamiento (Flexión) obtenido de la simulación de la viga laminada comercial fabricada en Pino Lacio. Elaboración propia

Para el siguiente caso, en las gráficas de deformaciones (grafica 3 y grafica 4), que corresponden a las vigas laminadas propuestas (figura 30) y vigas laminadas comerciales (figura 32) de Pino Lacio respectivamente, los valores de flexión difieren, como en el caso anterior, por algunas décimas de milímetro, igual que en lo anterior se desprecia dicha diferencia y se afirma que se obtuvo el mismo valor de flexión, en este caso de fue de 14 mm.

Los valores obtenidos del análisis estático realizado a cada modelo de viga que corresponden a Desplazamiento (Flexión), Tensión y Deformaciones unitarias, se concentraron en dos tablas por especie y por vigas:

VALORES OBTENIDOS DE LOS MODELOS VIRTUALES DE PINO LACIO					
	TENSIONES (kg/ cm ²)		DESPLAZAMIENTO (mm)	DEFORMACIONES UNITARIAS	
	MIN	MAX		MIN	MAX
VIGAS PROPUESTAS	0.541	2163.77	14.066	0	0.012
VIGAS COMERCIALES	1.302	2122.69	14.015	0	0.010

Tabla 1. Valores obtenidos de la simulación de las vigas laminadas de Pino Lacio. Elaboración propia.

VALORES OBTENIDOS DE LOS MODELOS VIRTUALES DE CEDRO BLANCO					
	TENCIONES (kg/ cm ²)		DESPLAZAMIENTO (mm)	DEFORMACIONES UNITARIAS	
	MIN	MAX		MIN	MAX
VIGAS PROPUESTAS	0.266	1908.15	16.94	0	0.013
VIGAS COMERCIALES	0.245	2136.20	17.11	0	0.014

Tabla 2. Valores obtenidos de la simulación de las vigas laminadas de Cedro Blanco. Elaboración propia.

Se puede observar que los valores de desplazamiento que se muestran en la tabla 1 referentes al Pino Lacio son de 14 mm en ambos casos de los tipos de vigas laminadas comparadas, así mismo, los valores de desplazamiento obtenidos en la tabla 2, referentes al Cedro Blanco son de 17 mm en ambos casos de los tipos de vigas láminas de la investigación.

Gracias a los datos obtenidos, podemos afirmar que de la manera en que se construya la viga laminada se obtendrán valores iguales de flexión, así, al comparar dichos valores que existen entre cada forma de cada especie, podemos observar que con la misma carga uniforme, existe una diferencia aproximada entre ambas especies de un 20% en cuanto a su capacidad de flexión; esto nos da una idea que la madera de Cedro Blanco si puede ser usada en elementos estructurales, como la madera de Pino Lacio, siempre y cuando el cedro blanco compense ese 20 % de carga, con una sección transversal más grande que la que se está proponiendo de pino lacio.

Con los datos obtenidos y con el análisis hecho, es factible poder realizar las vigas para la investigación, ya que nos da un panorama positivo que se va a cumplir la hipótesis experimental.

4. ANTECEDENTES

Durante la revisión de la bibliografía y de las investigaciones relacionadas con vigas laminadas, se tomaron en cuenta las basadas en maderas de crecimiento rápido como el pino caribe (Wilver Contreras M, 2007), también, las investigaciones donde se emplearon maderas tropicales mexicanas (Javier Ramón Sotomayor Castellanos, 2017), (Omar Araujo Molina, 2005)

En estas investigaciones se observa la importancia de obtener los módulos de elasticidad y ruptura (MOE y MOR) así como la densidad, variables que al ser obtenidas y analizadas de las pruebas de flexión (ASTM d198), los autores determinaron según

sus objetivos, que en ciertos casos, algunas especies podrían ser utilizadas para niveles estructurales, y otras en casos diferentes a la construcción de estructuras para vivienda, sin embargo, solo plantean la idea del empleo de la combinación de especies autóctonas de los lugares de dichas investigaciones.

Contreras (2007). en su investigación, plantea el hecho de usar madera de pino caribe con un adhesivo de isocianato, para elaborar vigas laminas, que se podrían emplear en la construcción de casas de madera para resolver parte del déficit de vivienda de su país, como fue el caso del arquitecto Aravena en Chile (Pita, 2016); sin embargo al comparar sus resultados con vigas similares de pino radiata de Chile y pino resinero de Argentina, determino que la especie en esa primera etapa, no era adecuada para niveles estructurales, ya que los módulos de elasticidad y ruptura así como su densidad tenían valores muy por debajo en comparación con los de las otras especies.

En el caso de Sotomayor (2017) y Araujo (2005), donde la finalidad de sus investigaciones fue el obtener datos de la comparación de vigas macizas contra las vigas laminadas empleando adhesivos de acetato de polivinilo en cada una de sus respectivas especies maderables; con esto ambos concuerdan, al igual que Contreras (2007), en la obtención de los módulos de elasticidad y de ruptura, así como la densidad del material ya que es parte importante para la determinación de la flexión en cada caso estudiado.

Con la revisión y análisis de estos estudios, se observaron diferencias entre la obtención de las diferentes variables, en el caso de Sotomayor y Araujo, se basaron el método de flexión estática con carga concentrada al centro de la norma ASTM D-198, en cambio, las probetas ensayadas de Contreras M. (2007) fue con el método de carga a dos puntos colocados a cada tercio de la distancia total entre apoyos.

Con las investigaciones antes revisadas podemos mencionar que los tres autores, concuerdan en que:

- La madera solida tiene defectos propios, que se observan al igualar su humedad en equilibrio con el ambiente (HE) que se hace notar con la torcedura, pandeo,

rajamiento, y que cada vez la madera se obtiene de árboles de diámetros más pequeños.

- Coinciden también que, al hacer la laminación, los defectos se reducen, por el seccionamiento del elemento principal, y que al unirlos con un adhesivo el elemento laminado mejora sus capacidades físicas y mecánicas.
- Coinciden en que los valores de los módulos de elasticidad y ruptura son un poco mayores con secciones laminadas que con secciones macizas.
- Los autores coinciden en el empleo de vigas a escala tanto laminadas como macizas para la obtención de datos, de los diferentes módulos y densidades.
- Coinciden que las vigas son de vital importancia para el desarrollo de elementos estructurales aplicados al área de la construcción de vivienda y de la práctica de la arquitectura.

En este último punto, Guzmán (2003), propone en su investigación, la elaboración de un software de cálculo de elementos a flexión, para determinar secciones de vigas de madera para dar respuesta a un sistema constructivo cualquiera; con esta investigación se logró un avance en cuanto al cálculo de estructuras de madera.

5. JUSTIFICACIÓN

Ante las evidentes deficiencias de la madera como material de construcción para obras complejas y grandes, actualmente es muy difícil encontrar secciones lo suficientemente gruesas y de dimensiones grandes y largas (máximo 8 m que es lo que se puede encontrar en la maderería), especialmente en pino, lo cual dificulta su uso en la arquitectura; en México a pesar de que la madera es un recurso renovable y sustentable solo se emplea con fines decorativos así como en muebles, marcos, pisos laminados, barandales, etc., y bajo nuestro enfoque, este extraordinario material esta

sub empleado, pues mayoritariamente se usa para la formación de andamios y cimbras para colados de concreto, y no se emplea como material estructural y arquitectónico.

La tendencia mundial hacia una nueva arquitectura, hace énfasis en el uso de la madera como material sustentable que complemente al acero y el concreto en la construcción de estructuras verticales, que ayude a mitigar muchos de los efectos contaminantes de estos materiales: para la fabricación de concreto se emplea mucha energía y se lanzan al ambiente polvos contaminantes, así mismo, en la obtención del acero se consume mucha energía y se despiden muchos gases de efecto invernadero, por lo anterior PITA propone tanto en las construcciones actuales de gran altura, como en la producción de vivienda se emplee la madera (PITA, 2016).

Como resultado de esta nueva tendencia arquitectónica, se pudo desarrollar edificios antes mencionados, con los sistemas de vigas laminadas de madera y CLT, sin embargo el problema de volumen de madera empleado en este edificio, lo hace más costoso que el sistema de concreto o acero, ante esto, con la torre Peñuelas, se propuso el empleo de menos madera empleando un sistema híbrido madera-acero, y espacios más pequeños y funcionales; aunque, en ambos casos por ser estructuras recientes, aún no se determinan sus características intrínsecas como la durabilidad del sistema, el confort, y sus características extrínsecas, como la durabilidad real de la madera, en cuanto a tiempo y condiciones climáticas extremas (NAVARRO, 2017).

6. HIPÓTESIS

Demostrar a partir de los factores de diseño que son empleados para el cálculo de diseño de vigas laminadas, se define el uso adecuado de una viga laminada con sección rectangular.

7. OBJETIVO GENERAL

Obtener los valores del módulo de elasticidad (MOE), módulo de ruptura (MOR) y densidad de la viga laminada propuesta (VHV) y la viga laminada comercial (VH), de cada especie maderable, así como el valor de inercia y módulo de la sección como factores para el diseño y cálculo de vigas laminadas.

7.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Comparar vigas laminadas de Pino (*pinus sp*) y Cedro Blanco (*cupressus sp.*) a nivel escala 1:4.
2. Utilizar dos tipos de arreglo estructural de las láminas de madera: arreglo horizontal y arreglo horizontal-vertical.
3. Utilizar simulación con solids Works como un prediseño para las vigas laminadas.
4. Determinar en muestras a escala 1:4, el Módulo de Ruptura (MOR), el Módulo de Elasticidad (MOE), la densidad.
5. Establecer y determinar las variables de diseño tales como: la sección transversal, el momento de inercia, deformación máxima permisible, módulo de sección, cortante vertical, momento, flexión, esfuerzo de trabajo a flexión, esfuerzo flexiónate permisible, cortante horizontal, factor de seguridad, cargas y dimensiones.
6. Tomando en cuenta el MOR, el MOE, la densidad y las variables de diseño antes mencionadas, calcular para 3 tipos de longitud de viga y 3 tipos de espaciamiento entre vigas, el tipo de sección transversal a utilizar.
7. Elaborar una base de cálculo para cualquier viga de sección rectangular.
8. Análisis de cargas, dimensiones,
9. Establecer una metodología para calculo y construcción de vigas laminadas

8. METODOLOGÍA

Con base a lo anterior partimos para continuar la investigación y determinar las calidades, especies secciones laminables, a fin de construir las probetas, que someteremos a diferentes mediciones; tomando en cuenta las especies que consideramos más viables: dos especies de madera con distintas densidades: pino (*pinus sp*) por ser el material más usado en las estructuras de madera y este proviene de los aserraderos del municipio de Cd. Hidalgo y cedro blanco (*sp*), siendo la especie de mayor producción del municipio de Tlalpujahua, ambos municipios de la zona oriente del estado de Michoacán, México.

1. PRIMERA ETAPA.

- Etapa de simulación: a fin de tener datos de inicio para las siguientes etapas de la investigación, se empleó el programa SOLID WORKS, donde se emplearon los valores reportados en la literatura de experimentos anteriores, esto con el fin de tener un comparativo de los datos posibles esperados.
- Etapa inicial: se realizaron los bosquejos de la viga propuesta, y esto se hizo mediante un análisis que comprendió la comparación de las vigas de madera maciza y las vigas laminadas; el motivo de dicha comparación, era poder emular las características de compresión y tensión del concreto y el acero.

2. SEGUNDA ETAPA.

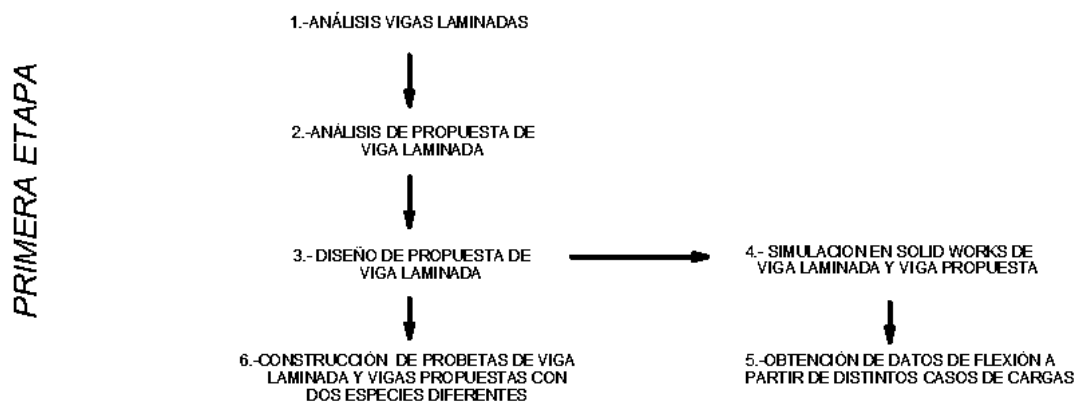
- Etapa de tratamiento: el tratamiento consistió en preparar el material iniciando con secado, cepillado y dimensionamiento de acuerdo a lo especificado en los bosquejos.
- Elaboración de probetas: se fabricaron 12 probetas de cada especie y de cada forma a escala 1:4 para obtener valores significativos para su análisis estadístico.

3. TERCERA ETAPA.

- Pruebas físico-mecánicas de las probetas elaboradas: será realizaran las pruebas de flexión en el laboratorio de pruebas físico-mecánicas de la Facultad de Ingeniería de la Madera (FITECMA) para determinar los módulos de elasticidad (MOE) y ruptura (MOR) de las distintas probetas que se elaboraran.
- Análisis y uso de los datos obtenidos: una vez obtenidos los valores, se realizarán las comparaciones entre los distintos resultados obtenidos y un apartado de conclusiones y sugerencias para concluir la investigación.
- Elaboración de una base de cálculo en donde se emplee los datos obtenidos por las pruebas físicas como es el MOE y la densidad de cualquier especie para calcular las secciones transversales de vigas laminas que cumplan con los valores de diseño de los proyectos estructurales.

Lo descrito anteriormente lo podemos comprender mejor con el siguiente diagrama de flujo:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN



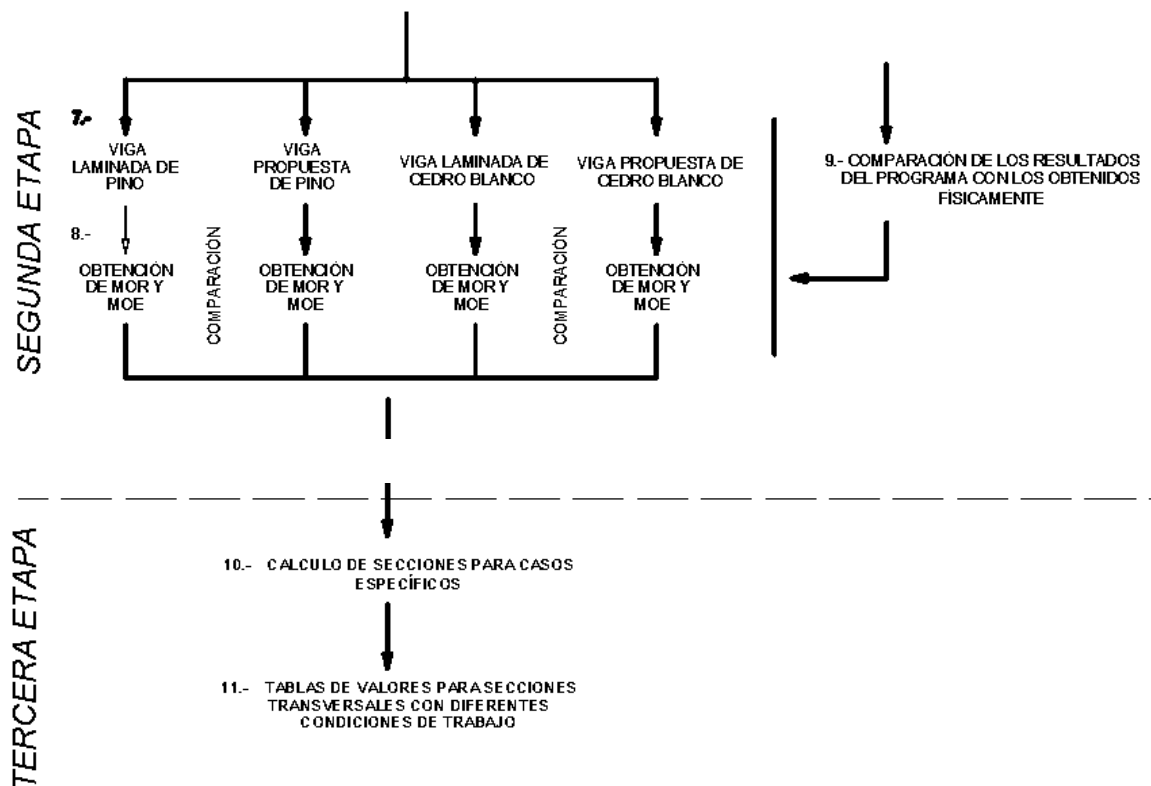


Figura 35. Diseño de la investigación, elaboración propia.

8.1 ACTIVIDADES PRELIMINARES

Se utilizaron dos especies de madera comercial: madera de pino y madera de cedro blanco. Para la elaboración de las probetas seguimos los pasos preliminares que se describen a continuación:

A. Madera de Cedro Blanco (*Cupressus sp.*)

1. Para la madera de cedro blanco (*Cupressus sp.*), se obtuvo una medición de 35% CH en aserradero.
2. Posteriormente, se cortaron trozos de 120 cm de largo por 16 cm de ancho, y durante 3 meses se resguardaron en una cámara de acondicionamiento, a una

temperatura entre los 22-26°C, y 55 a 65 % de Humedad relativa en las instalaciones del Laboratorio de Conservación y Preservación de la Madera de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, en la ciudad de Morelia, Michoacán.

3. Por conveniencia y debido a que, en el municipio de Jocotitlán, Edo. México, localizamos un taller que cuenta con herramientas de mayor precisión, decidimos trasladar la madera a dicho municipio para realizar el dimensionamiento y fabricación de las probetas. En dicho lugar se decidió darle a la madera un tiempo de almacenamiento de dos meses bajo condiciones normales de ambiente para alcanzar el equilibrio de humedad con el medio del sitio.

B. Madera de Pino

La madera de Pino (*Pinus sp*), se obtuvo de un aserradero ubicado en el municipio de Cd. Hidalgo, Michoacán; se dejó secar al aire previo a la obtención de la misma, como fue el caso del cedro blanco. Así mismo, la madera fue trasladada al municipio de Jocotitlán para la producción de las probetas propuestas.



Figura 36. Madera de pino de tercera antes de su tratamiento de secado al aire y su almacenamiento en bodega. Imagen propia.

Una vez que se tuvo la madera en el lugar de trabajo, la madera de ambas especies fue almacenada bajo techo durante 2 meses, con ventilación constante en una temperatura media entre los 18°C a los 21°C, y de un 45 a 50% HR del ambiente (figura 36), esta se iba sacando del lugar conforme se trabajaba, al final de la jornada de trabajo se regresaba la madera ya trabajada a dicho espacio para no afectar demasiado sus condiciones de humedad.

8.2 DENSIDAD

Cuando se cortó la madera a las dimensiones que se emplearon, se obtuvieron muestras para determinar la densidad básica de cada especie (Herrera, 2016), las medidas de las piezas fueron de 2.4 cm de ancho por 0.8 cm de alto por 10 cm de longitud, estas fueron secadas en horno de microondas hasta que ya no tuvieran variaciones en cuanto a sus medidas y su peso, de esta manera se pudo determinar las densidades de cada una de las especies que se emplearon en la investigación.

Para esto empleamos la siguiente fórmula:

Ecuación 21. Densidad básica

$$Densidad\ basica = \frac{Peso\ anhidro}{Volumen\ Verde}$$

Donde se obtuvieron los siguientes datos:

Cedro blanco (*cupressus sp.*).

PIEZA	Peso anhi.	Vol. Ver (cm3)	Densidad (g/cm3)
1	13.2	28.469	0.464
2	16.4	28.287	0.580
3	12.6	29.301	0.430
4	11.6	28.082	0.413
5	14.4	28.067	0.513
6	15.4	28.578	0.539
7	14.2	29.326	0.484
8	14.0	29.259	0.478
9	10.8	28.924	0.373
10	11.0	29.070	0.378
11	14.0	29.168	0.480
12	14.4	29.009	0.496
media	13.290	28.788	0.461
varianza	2.97091	0.22536	0.00385
des stan.	1.723633	0.474716	0.062021
Coefi. Varia.	0.129690	0.016490	0.134412

Tabla 3. Valores de peso anhidro y volumen verde de piezas de cedro blanco *sp.* Elaboración propia.

Se obtuvo una densidad básica de 0.461 g/cm³ para la madera de Cedro Blanco (*Cupressus sp*) (tabla 3).

Ahora para el pino se obtuvieron los siguientes datos:

Pino (*pinus sp*)

PIEZA	Peso anhi.	Vol. Ver. (cm3)	Dens.fin (g/cm3)
1	18.2	27.004	0.674
2	18.4	26.855	0.685
3	18.6	27.381	0.679
4	18.2	27.853	0.653
5	14.2	28.399	0.500
6	13	27.250	0.477
7	13.6	27.700	0.491
8	19	26.623	0.714
9	12.6	27.700	0.455
10	18.4	27.678	0.665
11	12	27.861	0.431
12	16.4	28.062	0.584
media	15.594	27.521	0.566
varianza	7.51364	0.27150	0.01117
des stan.	2.741101	0.521060	0.105698
coef. Varia.	0.175780	0.018933	0.186868

Tabla 4. Valores de peso anhidro y volumen verde de piezas de pino *sp*. Elaboración propia.

En el caso de la madera de pino *sp*. la densidad básica fue de 0.566 g/cm³ (tabla 4). Con la obtención de los valores de densidad de cada una de nuestras especies, se podrán utilizar para dos cosas, al introducirlos en el programa Solid Works realizaremos las simulaciones de cada una de las vigas de la investigación y podremos observar y analizar su comportamiento, también obtendremos el dato de los pesos propios para cada una de las diferentes secciones transversales que se empleen en cada caso de carga, claro y separación entre vigas.

8.3 CONSTRUCCIÓN DE PROBETAS ESCALA 1:4

Para la construcción de las probetas, se hizo uso de la herramienta del taller de carpintería “**Maderas Elaboradas, SA de CV**”; ajeno a la Facultad de Ingeniería de la Madera, donde:

- Se empleó una sierra de banco que usa un disco de corte de 16” de diámetro.
- Fue necesario fabricar un dispositivo especial para la sierra, que nos permitiera obtener un ángulo de 90° entre la mesa y la sierra además de contar con un movimiento de ajuste más preciso, lo que permitió obtener dimensiones más estables de las láminas para las probetas.

Las tiras se cortaron de dos medidas distintas (figura 37):

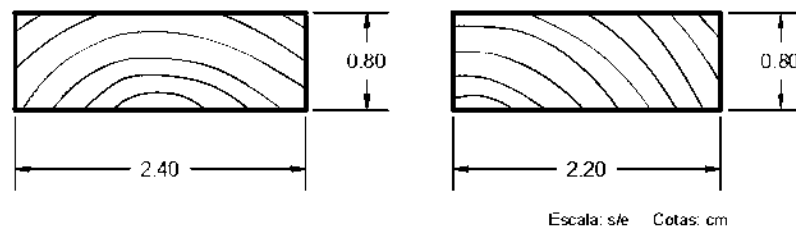


Figura 37. Sección transversal de las láminas para las probetas. Elaboración propia.



Figura 38. A) Corte de la madera en tiras para fabricación de láminas, B) Dispositivo para corte de tiras para la fabricación de las láminas, imágenes propias.

- c. Una vez obtenidas las tiras para el corte de las piezas se dejaron secar nuevamente por un tiempo de 15 días para eliminar el máximo contenido de agua y así lograr obtener un contenido de humedad en equilibrio del 12% (figura 38, izq).
- d. Para la propuesta de esta investigación, estas láminas se pegaron de la siguiente forma para obtener una sección transversal de 4"x 6" nominal (figura 39):

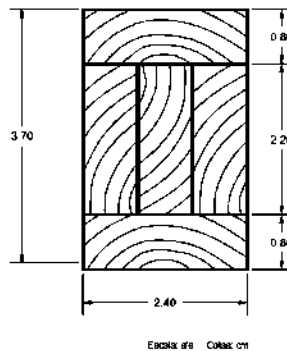


Figura 39. Sección transversal de la viga propuesta a escala 1:4. Imagen propia.

- e. Una vez dimensionada la sección transversal, las láminas se cortaron a lo largo con una medida no menor a 80 cm y no mayor a 170 cm, a escala las dimensiones quedaron de la siguiente manera (tabla 5):

Medida escala (cm)	Medida real (cm)
20	80
22	88
25	100
29.5	118
30	120
34.5	138
37.5	150
39.5	158
40	160
42	168

Tabla 5. Medidas reales y a escala de las láminas para fabricar las probetas de vigas laminadas. Elaboración propia.

8.4 ARMADO DE LA PROBETA

- a. Obtenidas las piezas con las medidas correspondientes se realizó un plano de pegado de láminas (figura 40), en las cuales se determinó el orden de pegado de cada pieza para conformar la lámina, ya que en dicho acomodo se observaron las distancias de traslape (figura 41) entre las juntas de las láminas.

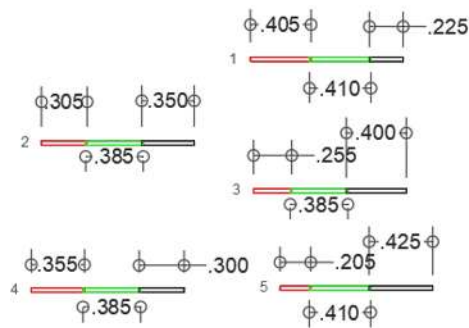


Figura 40. Orden de despiece y pegado de las láminas de las probetas. Elaboración propia

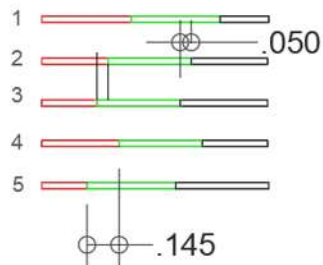


Figura 41. Traslapes de las láminas para conformar las probetas. Elaboración propia

- b. Teniendo las piezas ya cortadas y seleccionadas, y en base a la norma ASTM D-1666-87-1994 que hace referencia a procedimientos de trabajo para la realización de ensayos de trabajabilidad.

Se empleó un cepillo eléctrico de 2.5 hp, marca TRUPER de dos cuchillas (figura 42), para dar la dimensión final y cerciorarnos de obtener mejor uniformidad que

la que dejó el disco de corte de la sierra, para el proceso de pegado; puesto que, para una mayor eficiencia de pegado, las piezas deben embonar perfectamente.



Figura 42. Cepillo marca Truper, elaboración propia.

- c. Parte de la norma ASTM D-1666-87-1994, plantea que exista una unión dentada o finger joint (figura 43) en las testas de las láminas, que sirve para aumentar el área de contacto del adhesivo, y poder soportar mejor los momentos flectores en la unión, haciendo de estos, puntos críticos para la laminación (Vega, 2017).

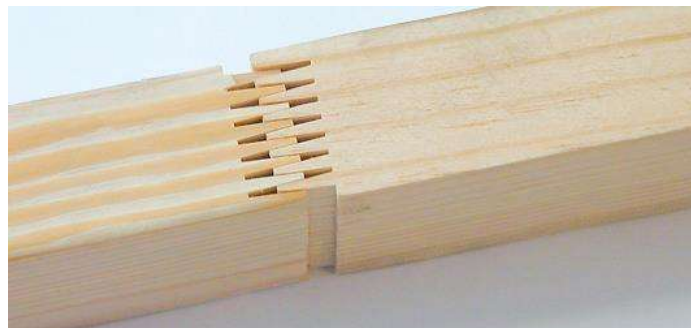


Figura 43. Unión finger joint. Recuperado de t.ly/9miH.

- d. Se empleó una herramienta de finger joint (figura43) que se montó en un router marca Bosch modelo 1617 de 11 amp y 2 hp de base fija, la herramienta tiene un vástago de 1/2 “de diámetro, con dientes de 12 mm de largo y un paso de 4 mm en su valle y 2 mm en la cresta, de modelo MM-713. Dicha herramienta por la

velocidad de giro y lo grande del diente, se produjeron demasiadas rupturas de las piezas pequeñas utilizadas para conformar las láminas, por esta razón, las láminas fueron unidas a tope con un torque de 80 lb/in.

Para esto se fabricó una mesa de trabajo que tuviera dos prensas, una longitudinal (figura 45) y otra transversal para realizar el pegado de las láminas y la conformación de la viga a escala (figura 44.izq y 44.der).



Figura 44. Izq. unión a tope de las piezas para fabricar la lámina, der. Mesa de prensado para la fabricación de las láminas. Elaboración propia.



Figura 45. Prensa transversal para el pegado de las láminas que conformaron la probeta, elaboración propia

- e. Teniendo las láminas completas conforme al plano de pegado, se encolaron las caras y pegamos a presión los elementos; se utilizó un pegamento comercial a base de polivinilo acetato, para simular los efectos de pegado que producirá un adhesivo de grado estructural.
- f. Al momento de ir pegando las piezas para formar las láminas se empleó un medidor eléctrico, para determinar el valor de humedad de cada pieza (figuras 46), esta medida no debería tener variaciones de más del 4%, entre la HR de pieza y pieza. Para esto, el medidor eléctrico en sus características de medición, empleaba solo ciertas especies de árboles, por lo cual el manual recomendaba su uso en el nivel 4 para especies no especificadas, siendo el nivel máximo de medición del 43.7% de humedad que equivale al 100%.



Figura 46. Toma de medidas de la laminas antes de la conformación de las probetas, elaboración propia.

- g. En el tiempo que duró la fabricación de las probetas se presentaron cambios no controlados en cuanto a la humedad del ambiente, esto afectó parte del pegado, ya que observamos que si el pegado se realiza entre 5-8 °C de temperatura ambiental, el anclaje del pegamento no se lleva a cabo. Lo anterior no indica que el pegamento empleado (comercial) no es el adecuado para bajas temperaturas.

Por tal razón se fabricó un higrómetro de termómetros (figura 47) para observar y registrar las variaciones de la temperatura, la humedad relativa, así como el contenido de humedad en equilibrio de la madera durante la fabricación de las probetas.



Figura 47. Higrómetro de termómetros, elaboración propia

A partir del uso de le higrómetro de bulbos obtuvimos los valores medios de %HR y de temperatura cuando se fabricaron las probetas de cedro blanco se obtuvo lo siguiente (tabla 6):

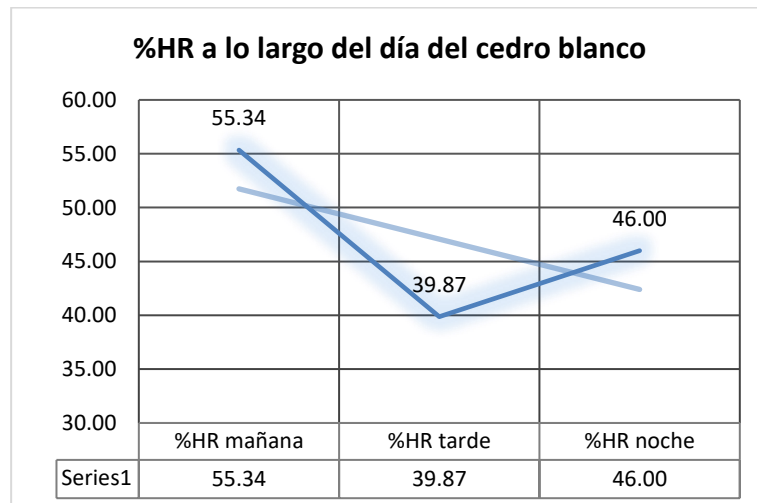
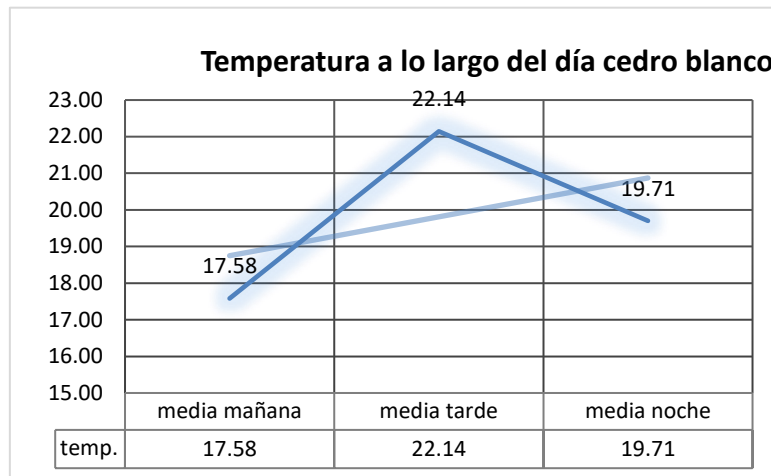


Tabla 6. Valores medios de temperatura y %HR durante el periodo de construcción de las probetas de cedro blanco *sp.* Elaboración propia.

- h. Para los valores medios de %HR y de temperatura cuando se construyeron las probetas de pino *sp.* se obtuvo los siguientes (tabla 7):

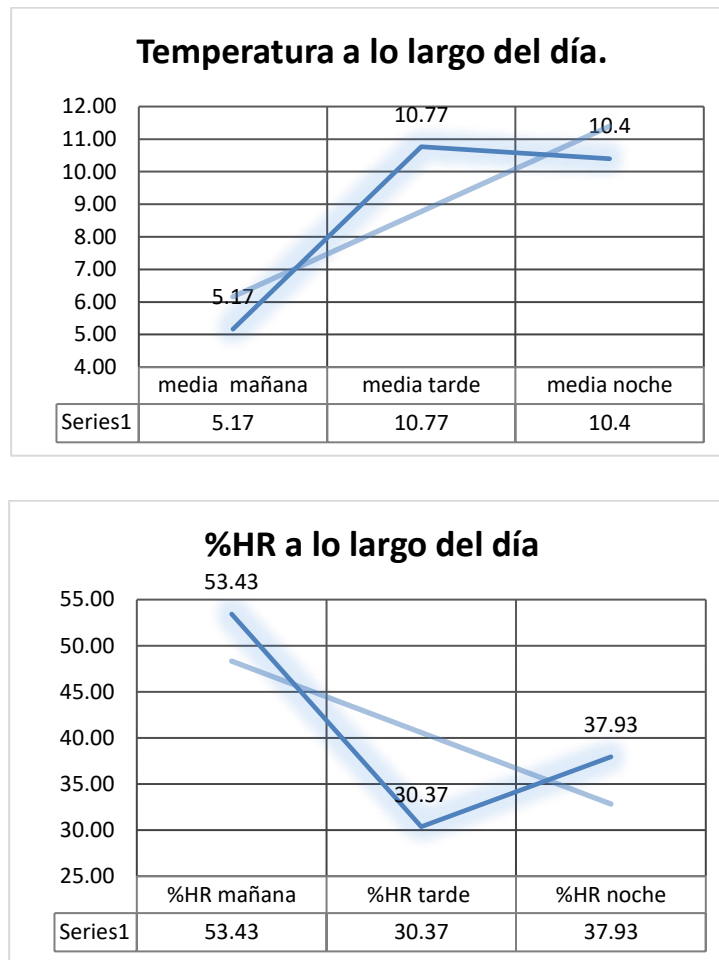


Tabla 7. Valores medios de temperatura y %HR durante el periodo de construcción de las probetas de pino sp. Elaboración propia.

- i. Una vez terminadas las probetas (figura 48), estas se acondicionaron para someterlas a la prueba de flexión; para hacer el acondicionamiento requerido, las probetas fueron llevadas a una cámara de acondicionamiento situada en el área de preservación de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, donde permanecieron durante un periodo de 30 días a una temperatura constante de 22°C y un 58 %HR, así al concluir el tiempo de espera las probetas fueron ensayadas con la prueba de flexión para determinar su módulo de ruptura y su módulo de elasticidad.



Figura 48. Probetas terminadas para el proyecto de investigación. Elaboración propia.

Al someter las probetas a las pruebas de flexión estática, las cuales se realizaron a las probetas en el laboratorio de pruebas mecánicas de la Facultad de Ingeniería de la Madera, esta prueba determinó el módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de ruptura (MOR) de las dos diferentes propuestas de construcción de cada una de las especies que se emplearon.

Con el fin de determinar coincidencias o diferencias de nuestras probetas contra los datos que se reportan en la literatura y en la aplicación del programa de cálculo.

Para la parte estadística se realizó una comparación de dos medias estadística suponiendo medias normales; comparando las variables MOR y MOE, y carga máxima para saber la viabilidad de emplear una especie alterna al pino *sp*, para la construcción de estructuras de madera de mediana y baja altura.

8.5 PRUEBAS DE FLEXIÓN ESTÁTICA

Las pruebas de flexión se realizaron en el laboratorio de pruebas físico-mecánicas de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, empleamos la prensa universal con una capacidad máxima de 10 ton; para realizar esta prueba nos basamos en la norma ASTM D 198-15, norma internacional, que marca los métodos y valores para determinar las fuerzas de unión, en tramos largos de madera, así como los valores aceptados que estos deben cubrir, para ser empleados en forma estructural.

Generalmente en los ensayos de flexión, se emplea una prueba con carga al centro de la probeta a ensayar, aunque la norma nos da la posibilidad de realizarla en dos condiciones diferentes, una carga aplicada en dos puntos, y una carga aplicada en tres puntos.

La prueba de flexión con carga central, concentra la carga puntualmente al centro de la probeta, en cambio, la prueba de flexión de tres puntos, la carga aplicada, se concentra en los tercios de la distancia total de viga (figura 49) dando como resultado que, esta carga actúe de una forma uniformemente repartida a lo largo de la probeta, gracias a esto, se emplea en materiales frágiles, aunque esto no signifique que no pueda sea aplicado en materiales duros,

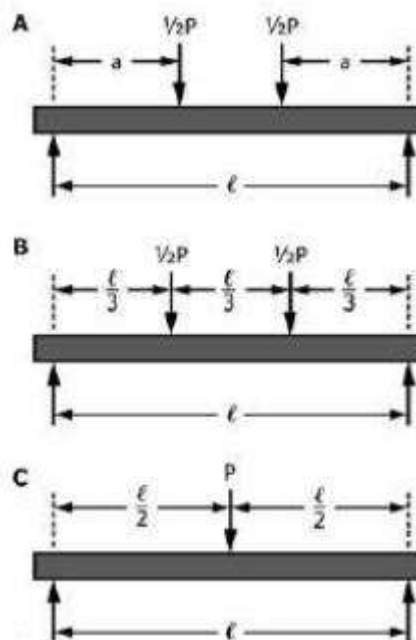


Figura 49. Condiciones de apoyo y puntos de carga para pruebas de flexión.

Aplicamos la prueba de tres puntos a 48 probetas de las cuales fueron separadas en cuatro grupos: se propuso un arreglo de 12 probetas para cada grupo de cada especie, el primer grupo de probetas de pino sp. fueron con una laminación totalmente

horizontal, el segundo, fueron las probetas con la combinación vertical con horizontal; este arreglo fue el mismo para las probetas de cedro blanco *sp.*

Al iniciar las pruebas, se empleó una base, con una distancia entre apoyos de 0.85 m máxima, se empleó un dispositivo de dos puntos para la presión en la probeta, cuyos puntos son ajustables a la distancia que se requiera.

Antes de iniciar las pruebas de flexión, obtuvimos los datos preliminares de las probetas, que la norma internacional ASTM D 198-15 nos marcaba, así fue que se obtuvieron, las medidas de la sección transversal, largo y peso de las probetas, como también su volumen y densidad.

Por el tipo de probeta propuesto empleamos, una carga aplicada a los tercios de la distancia como se observa en la imagen 50:

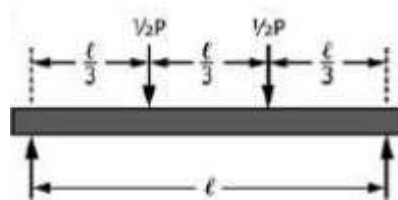


Figura 50. Gráfico de prueba de dos puntos con cargas repartidas en tercios.

Se inicio la prueba, con una velocidad de avance del pistón de 6mm/min con una escala de medición de la magnitud de 2:1 equivalente a media tonelada de presión ejercida, observando y registrando la carga máxima soportada de las probetas al momento de su ruptura (figura 51).



Figura 51. Pruebas de flexión a probetas de madera, realizadas en la prensa universal del laboratorio de pruebas físicas de la facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, UMSNH.

De esta manera se colocaron en el dispositivo una a una las probetas para ser ensayadas (figuras 52 y 53), así obtuvimos los valores de carga máxima soportada al momento de la ruptura, con los que se calcularon los módulos de ruptura (MOR) y módulos de elasticidad (MOE) de cada una de las dos especies empleadas.



Figura 52. Probetas ensayadas de ambos tipos de vigas de madera de Pino. Elaboración propia.



Figura 53. Probetas ensayadas de ambos tipos de vigas de madera de Cedro Blanco. Elaboración propia.

Considerando que toda medición que se hace a cualquier material o variable, resulta indispensable interpretar los valores obtenidos a fin de compararlos con los valores de referencia, hacerlo de esta manera nos permite obtener conclusiones sobre nuestra hipótesis y nos indica los probables cambios que el planteamiento requiera, así pues, cualquier valor obtenido en un experimento o una medición, es indispensable ser analizado, ya que lo anterior es la base fundamental de cualquier conclusión.

Basándonos en las gráficas obtenidas de la prensa universal se obtuvieron los siguientes de resultados para la relación esfuerzo-deformación de las probetas de pino con la laminación propuesta de la investigación (tabla 8):

Probetas Pino <i>sp.</i> laminación propuesta			escala: 1:2
Relación esfuerzo- deformación			presión: 500k
	ΔE	ΔD	$\Delta E/\Delta D$
Probeta			
1	44.8	4	11.200
2	41.9	4	10.475
3	33	3	11.000
4	55.5	3	18.500
5	43.8	2	21.900
6	51.9	4	12.975
7	42.7	4	10.675
8	39.9	4	9.975

9	31.4	3	10.467
10	45.5	3	15.167
11	42.1	2	21.050
12	49.7	4	12.425
media	43.52	3.33	13.82
varianza	48.50515	0.60606	18.71463
des stand.	6.964564	0.778499	4.326041
Coef. Varia.	0.160044	0.233550	0.313087

Tabla 8. Tabla de valores esfuerzo deformación de las probetas de pino *sp.* propuestas.

Para las probetas de pino de laminación comercial se obtuvieron los siguientes de resultados en la relación esfuerzo deformación (tabla 9):

Probetas Pino <i>sp.</i> laminación comercial		escala: 1:2	
Relación esfuerzo- deformación		presión: 500k	
	ΔE	ΔD	$\Delta E/\Delta D$
Probeta			
1	43.4	3	14.467
2	63.5	4	15.875
3	49.5	2	24.75
4	48.4	3	16.133
5	43.1	3	14.367
6	64	2	32.000
7	42.1	4	10.525
8	59.8	3	19.933
9	48.1	2	24.050
10	47.8	3	15.933
11	41.5	3	13.833
12	59.4	2	29.700
media	50.88	2.83	19.30
varianza	71.85242	0.51515	46.34480
des stand.	8.476581	0.717741	6.807702
Coef. Varia.	0.166589	0.253320	0.352781

Tabla 9. Tabla de valores esfuerzo deformación de las probetas de pino *sp.* comercial.

Los valores de deformación de las probetas de Cedro Blanco de laminación propuesta se obtuvieron los siguientes valores (tabla 10):

Probetas Cedro blanco <i>sp.</i> laminación propuesta			escala: 1:2
Relación esfuerzo- deformación			presión: 500 k
	ΔE	ΔD	$\Delta E/\Delta D$
Probeta			
A	32.5	5	6.500
B	46.4	6	7.733
C	30.8	2	15.400
D	44.9	4	11.225
E	42.6	2	21.300
F	42.8	3	14.267
G	44.3	4	11.075
H	43.2	4	10.800
I	28.8	2	14.400
J	41.3	4	10.325
K	39.8	2	19.900
L	39.4	3	13.133
media	39.73	3.42	13.00
varianza	34.16970	1.71970	19.51651
des stand.	5.845485	1.311372	4.417749
Coef. Varia.	0.147118	0.383816	0.339700

Tabla 10. Tabla de valores esfuerzo deformación de las probetas de cedro blanco *sp.* propuestas.

Los valores de deformación de las probetas de Cedro Blanco de laminación comercial se obtuvieron los siguientes valores (tabla 11):

Probetas Cedro blanco <i>sp</i> laminación comercial			escala: 1:2
Relación esfuerzo- deformación			presión: 500 k
	ΔE	ΔD	$\Delta E/\Delta D$
Probeta			
A1	26	3	8.667
B1	43.2	5	8.640
C1	55	4	13.75
D1	53	4	13.25

E1	45.1	4	11.275
F1	26.7	2	13.35
G1	24.6	2	12.300
H1	39.4	5	7.880
I1	49.5	4	12.375
J1	50	3	16.667
K1	45.3	4	11.325
L1	44.8	3	14.933
media	41.88	3.58	12.03
varianza	112.67970	0.99242	7.03660
des stand.	10.615069	0.996205	2.652659
Coef. Varia.	0.253444	0.278011	0.220425

Tabla 11. Tabla de valores esfuerzo deformación de las probetas de cedro blanco *sp.* comerciales.

En donde para las cuatro tablas, con forme a las gráficas obtenidas de la prensa universal las variables nos indican que:

ΔE = cambio en el esfuerzo (eje y, en kg)

ΔD = cambio en la deformación (eje x, en cm)

$\Delta E/\Delta D$ = cambio total empleado para el cálculo de MOE

Una vez obtenidos los datos se elaboró una tabla para calcular los módulos de ruptura (MOR) y elasticidad (MOE) para cada tipo especie con las ecuaciones que se encuentran en la sección X2 de los apéndices de la norma ASTM D 198-15 en la tabla X2.1 fórmulas de flexión de la página 19 referente a flexión, para cada tipo de condición de apoyo y carga con la que se hayan ensayado las probetas, con lo que se emplearon las siguientes formulas:

Para el determinar el módulo de ruptura (MOR):

Ecuación 22. Módulo de ruptura para prueba de tres puntos

$$MOR = \frac{P_{max}L}{bd^2}$$

Donde:

P_{max} : carga máxima en el momento de ruptura.

L : longitud de la aplicación de la carga.

b : base de la sección transversal.

d : peralte de la sección transversal.

Para el módulo de elasticidad (MOE):

Ecuación 23. Módulo de elasticidad para prueba de tres puntos

$$MOE = \frac{23P_{max}L^3}{108bd^3 \Delta}$$

Donde:

P_{max} : carga máxima soportada.

L : longitud de la carga aplicada.

b : base de la sección transversal.

d : peralte de la sección transversal.

Δ : deformación medida de las probetas.

Estas ecuaciones fueron aplicadas para determinar los valores MOE y MOR (Norma D 198-06, 2006) para cada tipo de probeta y los resultados se muestran en las siguientes tablas:

Para las probetas de pino *sp.* se obtuvieron los siguientes valores de MOR y MOE (tabla 12):

Pino *sp.*, probetas propuestas a escala 1:4

Probeta	Carga Kg	MOR V. PROP.	MOE V. PROP.
1	168	516.789	32088.818
2	131	399.973	24538.353
3	165	397.270	41632.483
4	148	352.189	36997.059
5	175	423.380	66713.447
6	201	486.282	38312.579
7	165	395.367	31000.265
8	129	306.759	24110.394
9	159	377.596	39381.372
10	140	338.704	35580.505
11	168	393.546	61274.095
12	195	465.942	36710.045
media	162.00	404.48	39028.28
varianza	509.82	3731.61	166841563.70
des stand.	22.579154	61.086867	12916.72
Coef. Varia.	0.139377	0.151024	0.33

Tabla 12. Tabla de valores de carga, MOR y MOE de las probetas de pino *sp.* propuestas (Kg/cm²).

De las probetas de pino *sp.* de laminación comercial se obtuvieron los siguientes valores de Mor y MOE:

Pino *ps.* probetas laminación comercial a escala 1:4

Probeta	Carga	MOR V. COMER.	MOE V. COMER.
1	238	578.582	60926.228
2	227	548.938	43776.400
3	198	467.687	72817.697
4	210	520.523	55347.255
5	266	653.881	69527.130
6	256	634.543	101206.409

7	230	570.097	45463.817
8	220	545.310	57982.838
9	217	537.874	85788.245
10	209	518.045	55083.697
11	259	641.979	68261.614
12	257	629.157	100347.404
media	232.25	570.55	68044.06
varianza	517.11	3422.98	369363295.79
des stand.	22.740133	58.506248	19218.83
Coef. Varia.	0.097912	0.102543	0.28

Tabla 13. Tabla de valores de carga, MOR y MOE de las probetas de pino sp. comercial.

Para las probetas de cedro blanco sp. de laminación propuesta obtuvimos los siguientes valores de MOR y MOE (tabla 14):

Cedro blanco sp. probetas laminación propuesta a escala 1:4

Probeta	Carga	MOR V. PROP.	MOE V. PROP.
A	65	225.204	11550.383
B	85	287.271	12126.504
C	92	237.954	37952.403
D	87	220.234	17563.080
E	128	333.333	54494.117
F	93	230.518	24510.927
G	83	210.108	16755.582
H	95	240.485	19178.076
I	112	283.519	45219.885
J	85	210.688	16801.845
K	120	297.442	47440.504
L	90	223.081	23720.252
media	94.58	249.99	27276.13
varianza	304.26515	1607.75739	223708834.67
des stand.	17.443198	40.096850	14956.90
Coef. Varia.	0.184421	0.160396	0.55

Tabla 14. Tabla de valores de carga, MOR y MOE de las probetas de cedro blanco sp. propuestas

Para las probetas de cedro blanco *sp.* de laminación comercial obtuvimos los siguientes datos (tabla 15):

Cedro blanco *sp.* probetas laminación comercial a escala 1:4

Probeta	Carga	MOR V. COMER.	MOE V. COMER.
A1	72	239.063	8662.788
B1	110	373.005	8819.880
C1	124	322.917	26395.588
D1	126	328.125	26821.323
E1	107	271.808	21943.623
F1	80	203.221	32812.894
G1	90	227.167	36409.601
H1	105	265.028	16991.147
I1	120	300.365	24070.792
J1	116	287.527	30572.769
K1	115	287.850	23067.842
L1	95	237.789	25408.058
media	105.00	278.66	23498.03
varianza	301.45455	2341.30982	73401541.05
des stand.	17.362446	48.387083	8567.47
Coef. Varia	0.165357	0.173645	0.36

Tabla 15. Tabla de valores de carga, MOR y MOE de las probetas de cedro blanco *sp.* comercial.

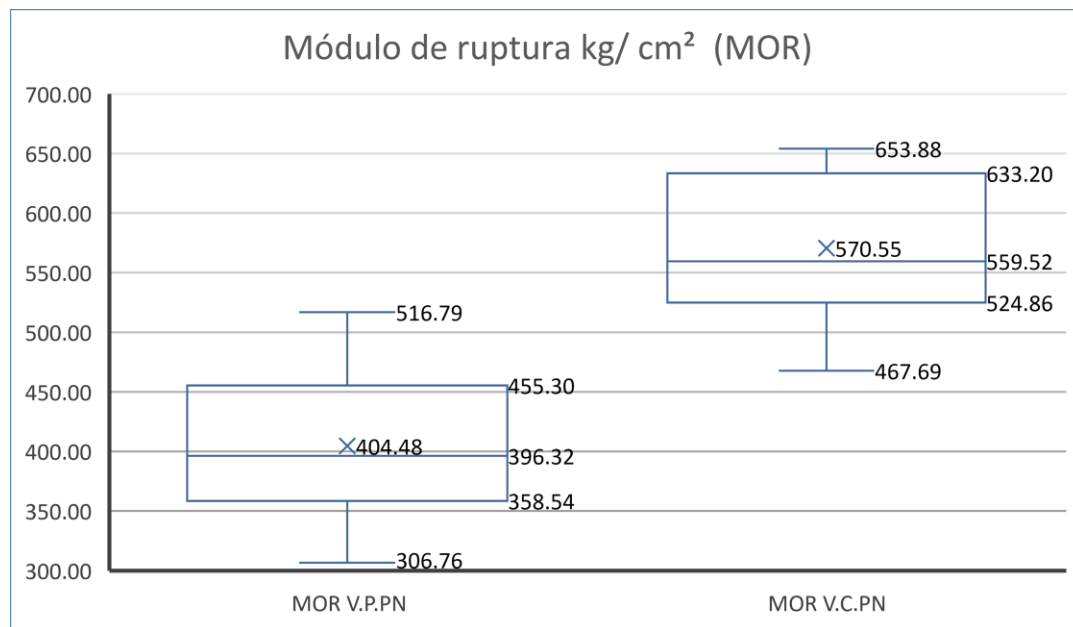
Podemos observar en las gráficas que la línea que proyectan los valores obtenidos de la laminación propuesta contra los valores de la laminación comercial en ambos módulos se comporta de una manera muy similar, aunque los valores obtenidos de carga y flexión de las probetas de laminación propuestas fue menos que el de las probetas de laminación comercial.

Refiriéndonos al módulo de ruptura del pino *sp.* Existe una diferencia del 5.15 % en la desviación estándar y un 32.11% del coeficiente de variación, entre las probetas de pino *sp.* comercial comparado con las probetas de pino *sp.* propuestas; el módulo de ruptura del cedro blanco *sp.* existe un 17.13% de diferencia de la desviación estándar y

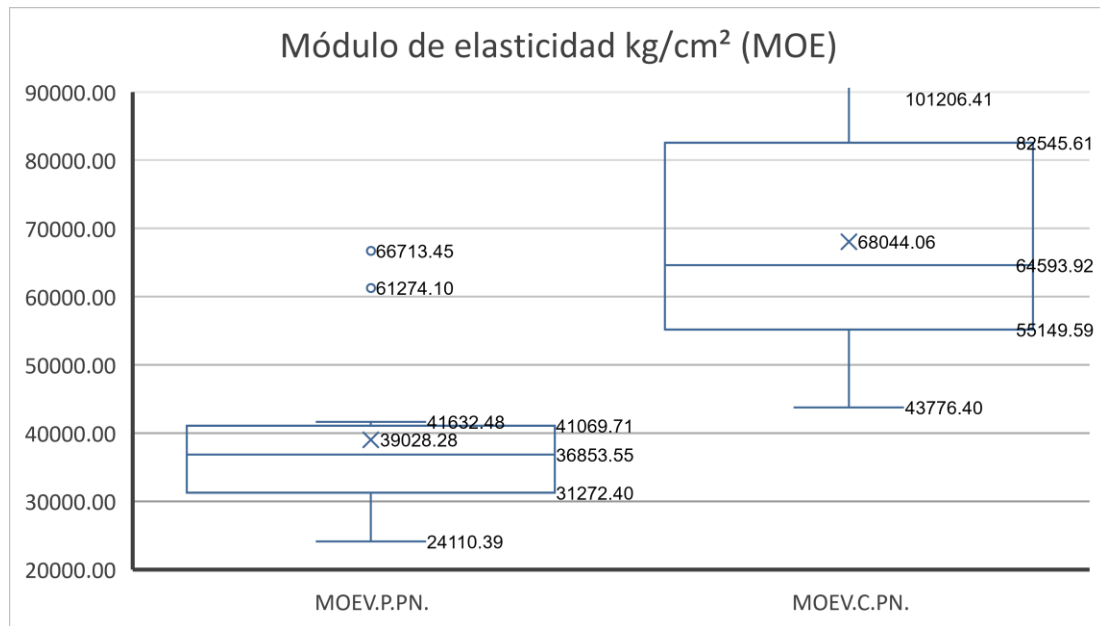
un 7.66% de diferencia en cuanto al coeficiente de variación con respecto a las probetas de cedro blanco *sp.* comercial contra las probetas de cedro blanco *sp.* propuestas

Tomando los valores del módulo de elasticidad del pino *sp.*, existe un 32.79% de aumento en la desviación estándar, entre las probetas de pino *sp.* comercial y las probetas de pino *sp.* propuestas, y un 15.15% de aumento del coeficiente de variación entre las probetas de pino *sp.* propuestas en comparación con las probetas de pino *sp.* comerciales, en cuanto al módulo de elasticidad del cedro blanco *sp.*, existe una diferencia del 42.72% de la desviación estándar, entre las probetas de cedro blanco *sp.* propuestas contra las probetas de cedro blanco *sp.* comerciales, y un 34.54% de diferencia del coeficiente de variación, entre las probetas de cedro blanco propuestas contra las probetas de cedro blanco comerciales.

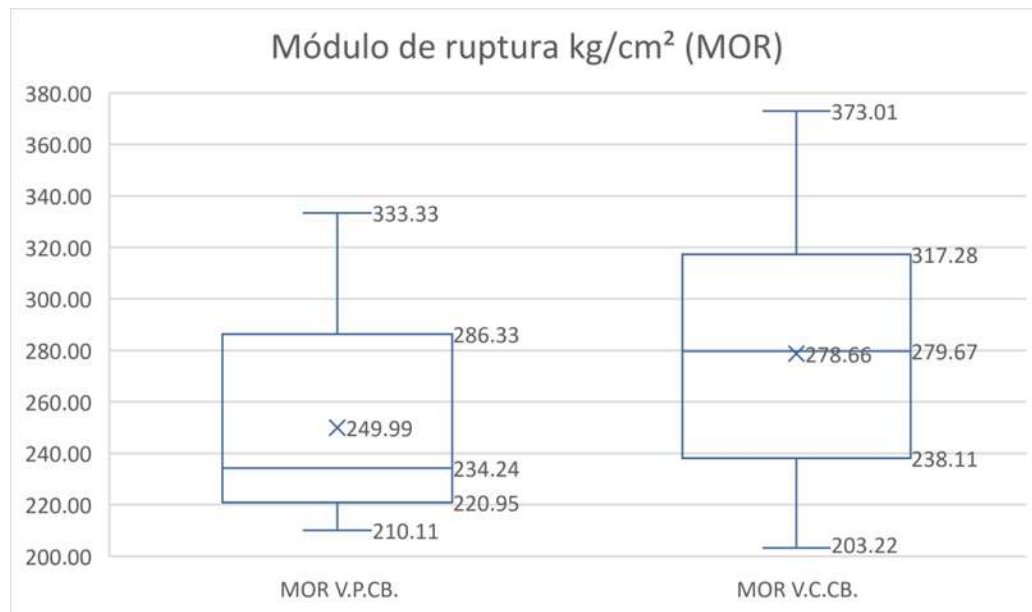
Esto lo podemos ver reflejado en las siguientes tablas:



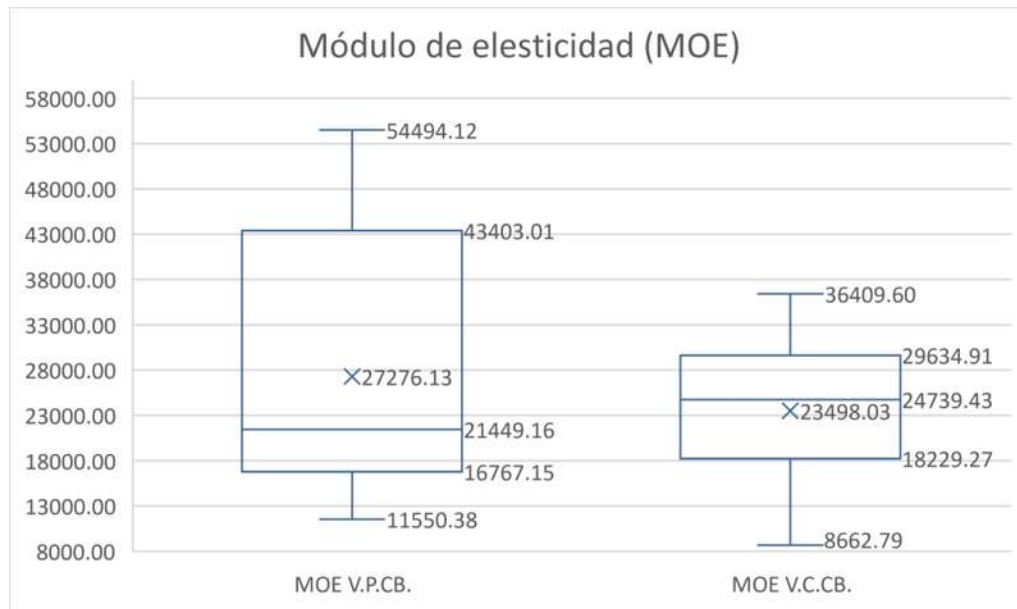
Grafica 5. Relación entre los módulos de ruptura de las probetas de pino *sp.*, elaboración propia



Grafica 6. Relación entre los módulos de elasticidad de las probetas de pino sp., elaboración propia



Grafica 7. Relación entre los módulos de ruptura de las probetas de cedro blanco sp, elaboración propia



Grafica 8. Relación entre los módulos de elasticidad de las probetas de cedro blanco sp, elaboración propia

8.6 PRUEBA DE HIPOTESIS

Con los valores obtenidos de las pruebas de MOE y MOR realizadas a todas probetas de la investigación, decidimos emplear el método de “comparación de medias como estadístico de análisis de los valores”, para de esta forma determinar si los valores obtenidos nos arrojan alguna diferencia estadística significativa que nos indique la validación o rechazo de la hipótesis planteada y sobre todo en la definición del problema y en la ejecución de la experimentación.

Puesto que nuestra hipótesis la planteamos en el supuesto de que las vigas propuestas soportan más carga (menor flexión y mayor capacidad de ruptura) que las vigas comerciales de las mismas especies, entonces la hipótesis nula de nuestra experimentación queda definida con el supuesto que ambas probetas soportan lo mismo y que no importa el orden de acomodo de las láminas para la elaboración de vigas láminas de madera.

Como se mencionó anteriormente, las variables de módulo de elasticidad (MOE) y del módulo de ruptura (MOR) nos proporcionan los valores de referencia básicos necesarios para el análisis estructural de las vigas laminadas, en aplicaciones constructivas, por tanto, la comparación de las medias de estas variables de las diferentes especies y formas de las probetas nos indicara la mejor técnica, de construcción.

Es así, que para nuestro análisis estadístico planteamos las siguientes hipótesis del experimento:

La hipótesis nula (H_0) establece, que el promedio de la media 1 (μ_1) es igual o menor que la media 2 (μ_2) y la hipótesis alterna (H_1) donde la media 1 (μ_1) es mayor que la media 2 (μ_2).

Para las comparaciones de las medias del módulo de elasticidad (MOE) del cedro blanco *sp.*, determinamos un grado de significación $\alpha = 0.05$ y un 95 % de confianza para los intervalos, además, un gráfico de una cola por la comparación que realizamos de las hipótesis planteadas, lo anterior podemos resumirlo en (tabla 16):

Descripción	MOE probetas propuestas CB <i>sp.</i>	MOE probetas comerciales CB <i>sp.</i>
Media	2727.13	23498.025
Varianza	223708834.7	73401541.05
Observaciones	12	12
Estadístico t	0.7592	
G.L. = 22	$\alpha = 0.05$	
t crítico	1.717	

Tabla 16. Valores resultantes de la comparación de medias estadísticas del módulo de elasticidad (MOE) de las probetas de cedro blanco *sp.* propuestas y las probetas comerciales

Para la comparación de medias de los valores del módulo de ruptura (MOR) para las mismas pruebas de cedro blanco *sp.*, se resumen en (tabla 17):

Descripción	MOR probetas propuestas CB sp.	MOR probetas comerciales CB sp.
Media	249.986	278.655
Varianza	1607.7573	2341.3098
Observaciones	12	12
Estadístico t	-1.5803	
G.L. = 22	$\alpha = 0.05$	
t crítico	1.717	

Tabla 17. Valores resultantes de la comparación de medias estadísticas del módulo de ruptura (MOR) de las probetas de cedro blanco sp. propuestas y las probetas comerciales

Se calcularon los datos de la comparación de medias para todas las probetas de pino sp., tanto del módulo de elasticidad (MOE) como del módulo de ruptura, obteniendo los datos siguientes y mostrados en las siguientes tablas:

Para la comparación de medias del módulo de elasticidad (MOE) del Pino sp., tenemos (tabla 18):

Descripción	MOE probetas propuestas Psp.	MOE probetas comerciales Psp.
Media	39028.2845	68044.0612
Varianza	166841563.7	369363295.8
Observaciones	12	12
Estadístico t	-4.3406	
G.L. = 22	$\alpha = 0.05$	
t crítico	1.717	

Tabla 18. Valores resultantes de la comparación de medias estadísticas del módulo de elasticidad (MOE) de las probetas de pino sp. propuestas y las probetas comerciales

Para la comparación de medias del módulo de ruptura (MOR) del Pino sp., tenemos (tabla 19):

Descripción	MOR probetas propuestas Psp.	MOR probetas comerciales Psp.
-------------	---------------------------------	----------------------------------

Media	404.4831	570.5514
Varianza	3731.6053	3422.981
Observaciones	12	12
Estadístico t	-6.8011	
G.L. = 22	$\alpha = 0.05$	
t crítico	1.717	

Tabla 19. Valores resultantes de la comparación de medias estadísticas del módulo de ruptura (MOR) de las probetas de pino *sp.* propuestas y las probetas comerciales

Con los valores obtenidos del estadístico “t” calculado y del valor de “t” crítico mostrado en las tablas, se hace evidente que, en las dos comparaciones realizadas a los valores medios de MOR y MOE para cada una de las especies empleadas, los valores del estadístico “t” calculado, son valores inferiores al valor del estadístico “t” crítico.

De esta manera podemos determinar que con un grado de significación $\alpha = 0.05$ y un 95 % de confianza, los valores calculados al ser inferiores al valor crítico y que éstos se encontraron en el área de aceptación de la hipótesis nula (H_0), nos lleva a rechazar la hipótesis alterna (H_1), ya que en base a los valores estadísticos calculados, se concluye que no existe diferencia entre las medias de los módulos de elasticidad (MOE) y de ruptura (MOR), por lo tanto, con las probetas propuestas y las probetas comerciales, podemos proponer el uso de cualquiera de las de las vigas laminas para fines estructurales.

Con respecto, a la carga soportada, los valores obtenidos con las probetas propuestas fueron menores, que los soportados por las probetas comerciales; por lo que se concluye, que la forma propuesta no cumple con la hipótesis que se plantea en la investigación, la cual afirmaba, que el arreglo de las láminas empleadas con los sentidos horizontal y vertical, soportarían más carga y menos flexión que las probetas que se realizaron con un arreglo horizontal solamente, siendo éste último el empleado en la fabricación de las vigas laminadas comerciales actualmente.

9. RESULTADOS

9.1 GENERALIDADES

Al inicio del diseño, la forma propuesta de viga laminada se hizo en base a los valores obtenidos de la simulación que se realizó en el programa de análisis finito Solid Works, en donde los datos empleados fueron obtenidos de la tabla “dureza de maderas” que reportado por (Espinoza, 2021), así mismo se consultó la tabla “TABLA FICTEMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas” reportada por (Sotomayor, 2010). Aclarando que en ambos reportes se incluyen tanto el cedro blanco como el pino.

En la presente investigación se propuso que las especies fueran, Pino lacio (*pinus michoacana*) y Cedro Blanco (*cupressus Lindley*), cuyos valores de tabla fueron los empleados para las simulaciones, sin embargo, los valores obtenidos en las pruebas físico mecánicas, los valores de MOR, MOE y de densidad, fueron más bajos que los que arroja la simulación.

Con base a lo anterior, al evidente que los valores obtenidos fueron inferiores a los de la simulación, nos mostró la necesidad de realizar una observación más profunda de los resultados obtenidos en la experimentación, con base a lo anterior, podemos hacer los siguientes señalamientos.

- a) Se identificaron los tipos de fallas y el daño que sufrieron las probetas ensayadas, que nos lleva a determinar que las fallas por pegamento (figura 54) y por desviación de la fibra (figura 55) fueron más frecuentes.

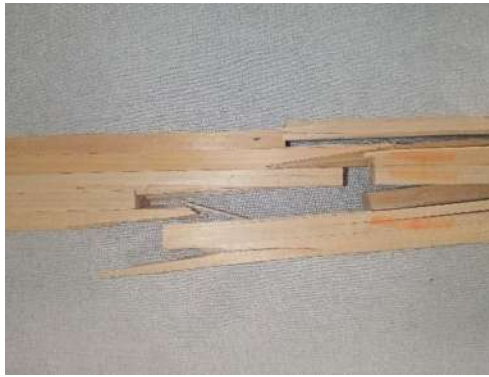


Figura 54. Falla por pegamento en ambas especies de las probetas. Elaboración propia.



Figura 55. Falla por desviación de la fibra en ambas especies de las probetas. Elaboración propia.

- b) Por la época del año y las condiciones en que se almacenaron las probetas de ensayo, la humedad no fue constante ni homogénea.
- c) Notamos que las uniones con el pegamento empleado, presentaron cristalización que se nota con un color blanco lechoso y frágil en la unión.
- d) Debido a condiciones de herramientas el tiempo de presión para propiciar el fraguado del pegamento no fue suficiente.
- e) La mayor frecuencia de rupturas se presentó, donde la veta de la medara presentaba inclusiones superiores a 20° (figura 56).



Figura 56. Ruptura vista en las probetas con las líneas de las vetas con ángulos mayores o iguales a 20°. Elaboración propia

El desarrollo de la investigación arrojó resultados muy cercanos a los que se pudieran obtener en la fabricación de vigas láminas de tamaño real, pudimos observar como las condiciones de trabajo reales de la materia prima y como las herramientas, área de trabajo y consumibles afectan la fabricación de dichas vigas.

En un inicio se tomó en cuenta las condiciones en las que se obtiene la madera de los aserraderos, las condiciones climáticas, de humedad, y procedencia, también se tomó en cuenta la clasificación visual de la madera, para fines estructurales.

Un punto importante fue el traslado de la madera a un lugar con diferentes condiciones climáticas a las del origen, ya que, al tener condiciones diferentes de trabajabilidad, nos enfrentaríamos a condiciones de cambio en todas las variables dependiendo de los lugares de traslado con lo cual, daría las pautas para el diseño de las áreas de producción en el caso de querer comenzar con un giro industrial y no de laboratorio, donde las condiciones son adecuadas para la experimentación.

La madera empleada para las probetas, se clasificó como madera de tercera, obtenida de las últimas corta de los troncos de los árboles, en cuyo caso las secciones de albura son mayores a las del duramen obtenido, que sus propiedades físico mecánicas son más bajas en comparación a la madera que se selecciona para uso estructural donde es mayor el porcentaje de duramen que de albura.

El pegamento empleado fue de poli acetato de vinilo comercial, y se empleó este para simular los valores de adhesión de los pegamentos disponibles para cualquier unión Madera/madera, así mismo, el tiempo de fraguado del pegamento y la presión sometida a las probetas para la unión, al ser valores escalados, no fueron constantes, y hubo variaciones de fabricación; la humedad del ambiente fue un factor determinante en el pegado de las láminas, ya que al tener porcentajes altos de humedad relativa del ambiente, el pegamento llegó a su punto de transición vítrea (T_g), que se pudo observar de un color blanco, razón por la cual, muchos de los puntos de fallas ocurrieron en estas zonas, este problema fue repetitivo en las probetas propuestas ya que en la temporada en que fueron fabricadas, las humedades son altas y las temperaturas bajas, sin importar que las probetas estuvieran en un lugar específico con condiciones controladas.

Las probetas de pino de forma comercial fueron elaboradas en condiciones diferentes de ambiente en donde la humedad y temperatura eran valores constantes y cercanos a los valores ideales para la fabricación de vigas laminadas.

Estos puntos fueron clave para que las probetas hechas primero, tuvieran la falla por cristalización del pegamento, otro factor importante que provocó las fallas, fue la orientación del hilo de la madera que eran caminos por donde la fuerza se transmitió.

Estos resultados al ser comparados con los valores obtenidos de diseño y de simulación no corresponden con los obtenidos físicamente, sin embargo las condiciones en las que la experimentación se llevó a cabo, fueron muy precarias, y con valores de escala que difieren de las condiciones reales de trabajo y de simulaciones, en este caso la hipótesis de investigación se aleja de lo planteado, ya que es imposible poder tener control sobre las variables de probetas en ambientes no tan controlados que afectan los resultados obtenidos en condiciones perfectas de trabajo.

Todo esto nos da un enfoque, que, aunque en la hipótesis de investigación no se cumplió en su totalidad, debido a factores que escaparon a nuestro control, sí nos induce a saber que es posible sustituir ciertas especies para fines estructurales, en este caso el Cedro Blanco sp y el Pino sp, nos dan la idea y la dimensión de las posibles estructuras que se podrían construir con ellas.

Para poder competir, con los países productores de madera empleada en la arquitectura y para tener un desarrollo sustentable como se ha venido planteando hace ya muchos años, podemos decir con seguridad que esta investigación da un punto de partida para:

- A) El empleo de otras especies diferentes al pino de cualquier clase, son perfectas para ciertas condiciones de carga y altura.
- B) Abre un campo de estudio hacia las diversas condiciones de apoyo y conexiones que puedan soportar fuerzas externas como vientos y sismos.
- C) Se podrían fabricar vigas laminadas de madera a escala real sin tener la duda que funcionarían sin temor a tener una pérdida de material y recursos.
- D) Se obtendrían valores reales para tablas de diseño de maderas empleadas para la construcción, para fines de vivienda, y no solo para cálculo de cimbras para colado, como actualmente se emplea (que se reportan en el anexo).
- E) De acuerdo con los resultados se hace evidente la necesidad de desarrollar adhesivos especiales para las diversas zonas en la que la madera se emplee con fines arquitectónicos.
- F) Procesos de secado de madera, diferenciados acordes al sitio donde se empleen las vigas.
- G) Métodos de protección de la madera, que preserven la madera del ataque de hongos de pudrición (hongo negro), insectos (especialmente polillas y termitas) líquenes (mohos).
- H) En concordancia con lo observado en la parte experimental resulta evidente la necesidad de ampliar lo más posible el área de pegado, con el fin de minimizar los problemas presentados en las diferentes regiones donde se pudieran fabricar las vigas laminadas; puesto que las condiciones climatológicas son, especialmente temperatura y humedad relativa, son diferentes en cada región.

9.2 CALCULO DE VIGAS LAMINADAS

Con los datos reales obtenidos de MOR y MOE de cada tipo de viga laminada analizada, así como el valor de la densidad de cada una de las especies empleadas para la construcción de las mismas, se pudo emplear las tablas de cálculo de secciones para diferentes condiciones de carga, diferentes condiciones de longitud de apoyo, así como diferentes condiciones de separación entre centro de vigas, siendo este último, un factor determinante para las cargas (ver sección de anexos).

Gracias a lo anterior, se logró establecer la metodología de cálculo de vigas, que se hace evidente a partir de la obtención de cada uno de los distintos módulos y densidades de cada especie, que son empleados en una hoja de cálculo para un análisis posterior, dicha metodología se menciona a continuación:

Ante las evidentes deficiencias de la madera como material de construcción para obras arquitectónicas, se pretende la sustitución de madera de pino por otra especie, en este caso cedro blanco, como sustituto de material para elementos estructurales, siendo así, se describe lo siguiente:

A) Proponer el uso de Pino (*pinus sp*) y Cedro Blanco (*cupressus sp.*).

Se toma como base la madera de pino como material principal en el uso de estructuras de madera, para ser comparada con la madera de cedro blanco como una madera alterna a la de pino para su uso estructural.

Esta comparación se realiza con el fin de poder:

- Emplear la madera de mayor producción de cada región, donde la producción madera de pino es menor o nula.
- Menor densidad del cedro blanco que se refleja en elementos menos pesados en comparación con los elementos de pino.



- Aprovechamiento y valor agregado de la madera seleccionada como tercera calidad de cada especie. (figura 57)

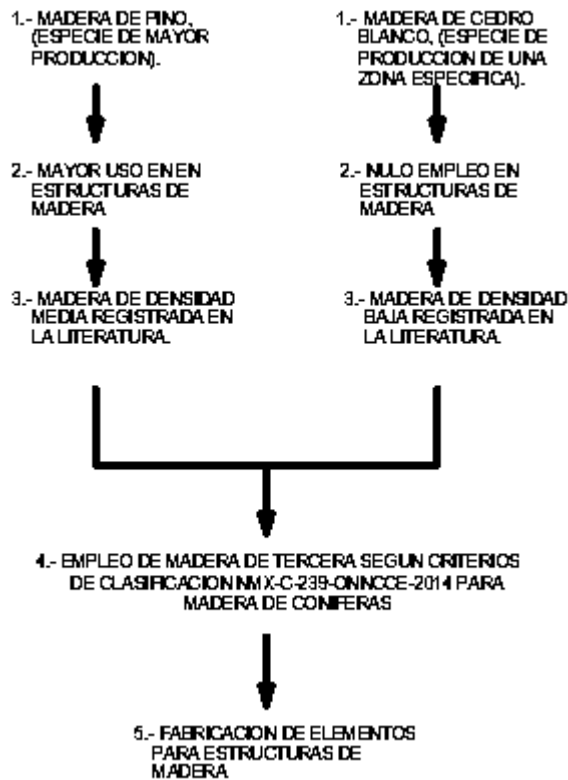


Figura 57. Seguimiento de la obtención de madera para elementos estructurales. Elaboración propia

- B) Utilizar dos tipos de arreglo estructural de las láminas de madera: arreglo horizontal y arreglo horizontal-vertical.

Actualmente la forma más común de construcción de las vigas laminadas ha sido con un acomodo en sentido horizontal de sus laminas, sin embargo, el acomodo vertical de las láminas se ha propuesto pero pocas veces empleado.

La investigación plantea hacer una viga laminada utilizando una combinación de la forma horizontal-vertical y compararla con la viga laminada con sentido horizontal.

En este caso se plantea:

- Obtención de la madera de cada una de las especies a emplear

- Tratamiento de la madera que inicia en el secado de la madera, seguido de su almacenamiento para establecer el porcentaje de CHE de la madera, selección de la madera para conformar las piezas, procesamiento de las láminas para el pegado de las mismas, almacenamiento a 12% CHE de las vigas.

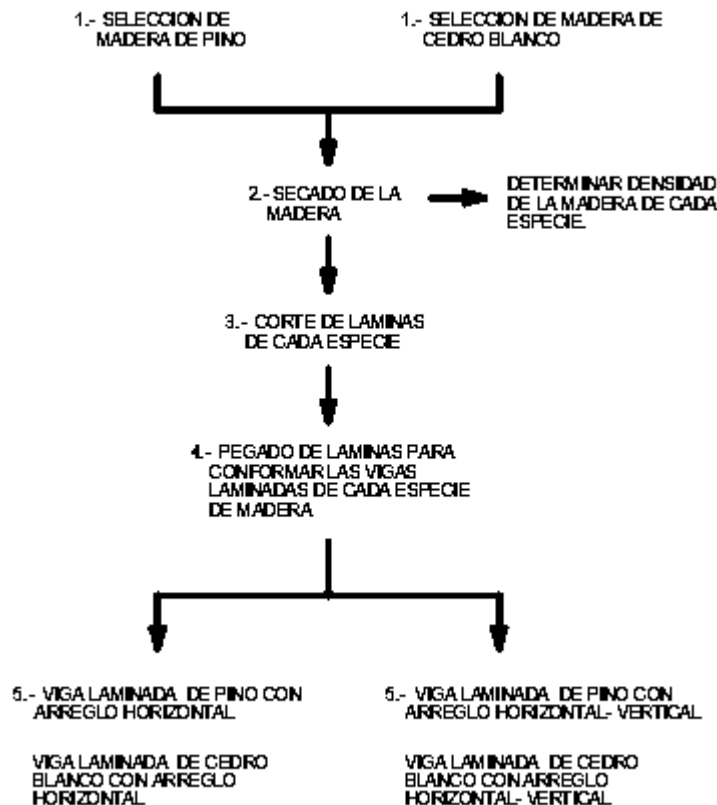


Figura 58. Ruta de elaboración de vigas laminadas de cada tipo propuesto en la investigación.
Elaboración propia

C) Determinar los Factores de diseño siguientes

Dos de los factores que depende directamente para el análisis de vigas laminadas de madera, son determinados por pruebas de flexión estática, de la cual se obtiene el módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) los

cuales tienen relación con la flexión que se le produce una viga laminada con ciertos criterios de diseño. (figura 58)

- Inicialmente se obtiene la densidad de cada una de las especies a partir de muestras de madera, en este caso se emplearon piezas de 2.4x0.8x10 cm que fueron medidas y pesadas antes de ser secadas en horno, después de ser sometidas al proceso de secado y que no tuvieron variaciones en cuanto a peso y medidas determinamos los dos valores necesarios para determinar la densidad básica (ecuación 21).
- Una vez fabricadas las probetas, bajo la norma ASTM D 198-15 se realizó la prueba de flexión simple de tres puntos, a 12 probetas de vigas láminas de cada especie y de cada forma que propuso la investigación. Se obtuvo el módulo de ruptura (MOR) (ecuación 22) y el módulo de flexión (MOE) (ecuación 23).
- Se proponen secciones de vigas donde se obtiene el área de la sección transversal ($A = b \times h$ (cm²)), momento de inercia ($I = bh^3/12$ (cm⁴)), módulo de la sección ($S = bh^2/6$ (cm³)) y el peso de la sección transversal en metros por un metro lineal multiplicado por la densidad de la especie a emplear. (figura 59)

	valor	unidad	nombre de la especie			densidad	
Dens. De especie	567	kg/m ³	PINO BLANCO (PINO PSEUDOSTROBUS)			567 kg/m ³	
			cedro blanco (cupressus lindley)			540	
Dimensiones nominales b.d (in)	Dimensiones efectivas b.d (in)	Dimensiones efectivas b.d (cm)	Área de la sección "A" $A = b \times h$ (cm ²)	Momento de inercia "I" $I = bh^3/12$ (cm ⁴)	Módulo de la sección "S" $S = bh^2/6$ (cm ³)	Peso aproximado Densidad-kg/ m	
2x3	1.5x2.5	3.81	6.35	24.19	81.30	25.60	1.372
2x4	1.5x3.5	3.81	8.89	33.87	223.07	50.19	1.920
2x5	1.5x4.5	3.81	11.43	43.55	474.11	82.96	2.469
2x6	1.5x5.5	3.81	13.97	53.23	865.63	123.93	3.018
2x8	1.5x7.5	3.81	19.05	72.58	2194.97	230.44	4.115
2x10	1.5x9.5	3.81	24.13	91.94	4460.83	369.73	5.213
2x12	1.5x11.5	3.81	29.21	111.29	7912.95	541.80	6.310
2x14	1.5x13.5	3.81	34.29	130.64	12801.07	746.64	7.408

Figura 59. Tabla de valores de diferentes medidas de secciones rectangulares. Elaboración propia

- Se realiza el análisis de cargas las cuales soportara la viga laminada, este análisis integra los pesos por unidad cuadrado del sistema constructivo usado, en este caso se emplea: cargas vivas y muertas, plafón (cielo falso) instalaciones eléctricas, hidráulicas y sanitarias (según sea el caso de la viga a analizar) factores como resistencia por sismos y vientos, dicha carga establece el peso para el análisis de los tableros para la carga que soportara la viga. (figura 60)

ANÁLISIS DE CARGAS POR M ² INTERNAS			ANÁLISIS DE CARGAS POR M ² EXTERNAS		
TIPO DE CARGA	KN/m ²	Kg/m ²	TIPO DE CARGA	KN/m ²	Kg/m ²
CARGA MUERTA	2	200	CARGA MUERTA	0	350
CARGA VIVA	1.7	174	CARGA VIVA	0	170
INSTALACIONES Y PLAFOND	0.46	47	INSTALACIONES Y PLAFOND	0	0
PESO DE LOSA	2.4	240	PESO DE LOSA	0	0
ANEXO 1	0	0	ANEXO 1	0	0
ANEXO 2	0	0	ANEXO 2	0	0

Figura 60. Sección de análisis de cargas dependiendo de la posición de la viga. Elaboración propia

- Establecemos la longitud de la viga, para determinar el peso por área estos parámetros nos ayudan a entender las condiciones de carga sobre la viga, supondremos que las cargas son repartidas en un techo de viguería, aquí las vigas se encuentran separadas entre si a cada cierta distancia, que es tomada de centro a centro de cada viga multiplicado por la distancia de la viga obtenemos la carga por unidad de área ya sea repartida a lo largo de la viga o la carga por metro lineal según sea el caso.(figura 61)

SECCION	Logitud de viga	area m²	W total kN/m² uniformemente repartida	W total kg/m² uniformemente repartida	"w" total kN/m metro lineal	"w" total kg/m metro lineal	deformacion maxima permisible L/360	Peso propio de la viga selección
1 sec int	6	3.60	23.62	2408.40	3.94	401.40	0.017	88.34
2 sec int	0	0.00	0.00	0.00	#iDIV/0!	#iDIV/0!	0.000	0.00
3 sec int	0	0.00	0.00	0.00	#iDIV/0!	#iDIV/0!	0.000	0.00
4 sec int	0	0.00	0.00	0.00	#iDIV/0!	#iDIV/0!	0.000	0.00
1 sec ext	0	0.00	0.00	0.00	#iDIV/0!	#iDIV/0!	0.000	0.00

Figura 61. Tabla de datos para cálculo de secciones de vigas. Elaboración propia

- Otro parámetro que se obtiene es el límite permisible de flexión en función de su claro (ACI-318, tabla 24.2.2) (manual de diseño y cálculo de estructuras, pag.98) que establece la relación L/360 para cargas vivas o L/240 para cargas vivas y muertas; esta relación se da por que los elementos en madera a diferencia de los de concreto y acero son solo elementos empotrados o simplemente apoyados; el valor obtenido es un valor de funcionalidad cómoda para el cálculo de estructuras, sin embargo la viga podría tener un valor mayor de flexión siempre y cuando dicho valor no afecte funcionamiento ni la integridad de la estructura. (figura 62)

Tabla 24.2.2 — Deflexión máxima admisible calculada

Miembro	Condición		Deflexión considerada	Límite de deflexión
Techos planos	Que no soporten ni estén ligados a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes		Deflexión inmediata debida a L_p , S y R	$\ell/180^{[1]}$
Entrepisos			$\ell/360$	
Techos o entrepisos	Soporten o están ligados a elementos no estructurales	Susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes.	La parte de la deflexión total que ocurre despnes de que los elementos no estructurales se liguen (la suma de la deflexión a largo plazo debica a todas las cargas permanentes, y la deflexión inmediata debida a cualquier carga viva adicional) ^[2]	$\ell/480^{[3]}$
		No susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes.		$\ell/240^{[4]}$

Figura 62. Tabla de deflexiones máximas admisibles en elementos estructurales de concreto según la ACI (American Concrete Institute)

- Se deberá sumar el peso propio de la viga ya que muchos de los casos de análisis hipotéticos no consideran el peso propio del elemento y esto da un resultado menor al no considerar este punto, para el cálculo se debe sumar

el peso de la viga por metro lineal, de esta manera nos aseguramos integrar al análisis todos los pesos involucrados en el cálculo de la viga

- Se calculan los momentos y cortantes, (figura 63) respecto a las condiciones de diseño de cada viga que se proponga en el diseño arquitectónico, esto es, que podríamos tener casos en las que las cargas fueran repartidas, otras cargas puntuales al centro, cargas puntuales desfasadas, entre otras, de las cuales en muchos de los casos se establecen a parte de los momentos y cortantes, la flexión máxima de la viga, en el caso de la investigación, se tomó como base una viga simplemente apoyada con carga uniforme, de la cual la flexión máxima se calcula con la ecuación 17:

$$\Delta = \frac{5wL^3}{384EI}$$

Donde:

Δ = deflexión máxima de la viga

w= carga por metro lineal

L= longitud de la viga

E= módulo de elasticidad de la especie empleada

I= momento de inercia

Este valor de flexión deberá ser menor que el valor de flexión calculado en la relación L/360 o L/240, aunque en algunos casos, y dependiendo de la parte del proyecto podría ser mayor sin afectar el funcionamiento de la estructura, siendo este uno de los factores decisivos para que verifique la viga propuesta para el caso específico de trabajo.

Carga considerando el peso de la viga y acciones		
Calculo de vigas, seccion en in.		4x12
MOMENTO (M)		
Longitud de viga	w/ m	wL ² /8
6	416.12	1872.56
0	#DIV/0!	#DIV/0!
0	#DIV/0!	#DIV/0!
CORTANTE (V)		
Longitud de viga	W	W/2
6	2496.74	1248.37
0	0.00	0.00
0	0.00	0.00

Figura 63. Tabla de valores de momentos y cortantes de la viga propuesta según sea el caso. Elaboración propia

FLEXION					
Long. Viga cm	W/ cm ²	E (kg/cm ²)	I (cm ⁴)	5WL ² / 384 EI	PASA
600	0.249674	27276.13	18463.55	0.836603	SI
0	0.000000	27276.13	18463.55	0.000000	SI
0	0.000000	27276.13	18463.55	0.000000	SI

SECCION	Logitud de viga	area m ²	W total kN/m ² uniformemente repartida	W total kg/m ² uniformemente repartida	"w" total kN/m metro lineal	"w" total kg/m metro lineal	deformacion maxima permisible L/360	Peso propio de la viga selección	
1 sec int	6	3.60	23.62	2408.40	3.94	401.40	0.017	88.34	1.7
2 sec int	0	0.00	0.00	0.00	#DIV/0!	#DIV/0!	0.000	0.00	0
3 sec int	0	0.00	0.00	0.00	#DIV/0!	#DIV/0!	0.000	0.00	0
4 sec int	0	0.00	0.00	0.00	#DIV/0!	#DIV/0!	0.000	0.00	0
1 sec ext	0	0.00	0.00	0.00	#DIV/0!	#DIV/0!	0.000	0.00	0

Figura 64. Tabla de valores a flexión según sea el caso de cada viga propuesta. Elaboración propia

- El segundo valor que es determinante para la verificación de la viga, es el esfuerzo de trabajo a flexión, (figura 64) que establece la relación entre el momento flector y el módulo de sección de la viga, en este sentido Parker

(diseño simplificado de estructuras de madera) emplea el valor de diseño a flexión Fb' , sustituyéndolo por la variable de esfuerzo de flexión en la ecuación de Fitzgerald:

Ecuación 24. Ecuación de esfuerzo de flexión de Fitzgerald

$$(\sigma = \frac{M}{S}) \text{ por,}$$

Ecuación 25ecuación de Parker para obtener el módulo de sección de la viga

$$S = \frac{M}{Fb'}$$

Donde:

σ = esfuerzo de flexión

M = momento flector

S = módulo de la sección de la viga

Fb' = valor de diseño a flexión de tablas

El valor dado del cociente del momento flector (M) y el valor de diseño de flexión de tablas (Fb') proporciona el valor mínimo de módulo de sección que debe cumplir la viga para verificar en cuanto a resistencia a la flexión. Cabe mencionar que, al obtener valores inferiores del módulo de sección de la propuesta de cierta viga, y volver a proponer alguna sección, los cálculos realizados cambian completamente volviendo a partir de un nuevo análisis para proponer una sección distinta con un módulo de sección único para ese caso en específico, ya que cambia el momento flector, y el peso propio de la viga. (figura 65)

Esfuerzo de trabajo a flexión				Esfuerzo flexionante admisible Fb	
Momento(M) kg. cm	mod. S cm²	M/Ffu' kg/cm²	M/ MOR kg/cm²		
187255.66	1264.19	985.56	998.74	MOR kg/cm2	fac. seguridad
#DIV/0!	1264.19	#DIV/0!	#DIV/0!	249.99	0.75
#DIV/0!	1264.19	#DIV/0!	#DIV/0!	Fb =	187.49

Figura 65. Tabla comparativa de los diferentes casos de flexión. Elaboración propia

- Y por último se establece una tercera variable para la verificación de la viga, y se hace por cortante horizontal (ecuación 5. Esfuerzo cortante unitario horizontal máximo):

$$f_v = \frac{3V}{2bd}$$

En este caso se emplea el cortante calculado de la viga y se divide entre el área de la sección transversal de la viga y multiplicarlo por un factor de 1.5 esta valor calculado deberá ser menor que el valor de diseño de cortante paralelo a la fibra multiplicado por un factor de seguridad que reduce su valor según el factor empleado, para este caso se emplean valores entre 0.7 y 0.85, si se obtiene valores inferiores al valor de diseño la viga verifica a cortante horizontal, y esto depende de los valores antes calculados, de obtenerse valores superiores, al igual que el cálculo anterior, se realizara un nuevo análisis, este análisis establece la corrección de valores a partir de la selección de las tablas de secciones donde contiene la información referente al área de la sección transversal de la viga, módulo de inercia, peso por metro de la viga, entre otros.

Esfuerzo cortante horizontal f_v'				Esfuerzo cortante admisible f_v'			
Cortante (V)	bh(A)	Cons. (1.5)	1.5 V/bh	cortante kg/cm2 fac. seguridad			
1235.75	185.48	1.5	9.99		14	0.75	PASA
0.00	185.48	1.5	0.00	Fb =	10.50	9.99	SI
0.00	185.48	1.5	0.00				

Figura 66. Valor de esfuerzo cortante horizontal contra el valor del esfuerzo cortante admisible del material, se establece la verificación de la viga si el primer valor es menor que el segundo. Elaboración propia

Los valores de diseño se obtuvieron del reglamento de construcciones del distrito federal en su apartado "NORMAS TECNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

ESTRUCTURAS DE MADERA”, en la sección de elementos laminados de madera de coníferas: (figura 67)

Tabla 2.2.7 Valores especificados de resistencias y módulos de elasticidad de elementos de madera laminada de especies coníferas, MPa (kg/cm²)

		Clase estructural		
		24F	20F	16F
Flexión	f_b'	18.8 (190)	14.4 (145)	13.1 (135)
Tensión paralela a la fibra	f_{tu}'	15.1 (150)	9.8 (100)	6.9 (70)
Compresión paralela a la fibra	f_{cu}'	15.8 (160)	10.3 (105)	7.8 (80)
Compresión perpendicular a la fibra	f_{cu}''	3.9 (40)	3.9 (40)	3.9 (40)
Cortante paralelo a la fibra	f_{vu}'	1.38 (14)	1.38 (14)	1.38 (14)
Módulo de elasticidad promedio	$E_{0.50}$	9 820 (100 000)	9 420 (95 000)	9 020 (90 000)
Módulo de elasticidad correspondiente al 5° percentil	$E_{0.05}$	7 900 (80 000)	7 400 (75 000)	6 900 (70 000)

Figura 67. Valores de diseño de vigas laminadas de madera de coníferas, obtenidos del reglamento de construcciones del Distrito Federal, edición 2005, en la sección de Normas Técnicas Complementarias para la Construcción de Estructuras de Madera

D) Establecer una metodología para calculo y construcción de vigas laminadas

El proyecto de investigación planteo varios puntos para determinar si una especie diferente al pino puede ser empleada para estructuras de madera, por lo cual se llegó a la siguiente metodología.

Paso 1.- la obtención de material, que involucra desde la obtención de las piezas en aserradero, su secado a sol y sus diferentes contenidos de humedad y su coeficiente de humedad en equilibrio de la madera.

Paso 2.- acondicionamiento de la madera, para tener madera al 12% de humedad, será necesario el secado en estufa y almacenado en cámara acondicionada para lograr los porcentajes deseados, en este paso se obtiene el valor de densidad específica de la especie que uno quiera emplear para las vigas laminadas.

Paso 3.- se revisan los porcentajes del contenido de humedad en equilibrio (CHE) para comenzar la fabricación de las probetas, aunado a esto de establecen las áreas de contacto del adhesivo que se empleara, además de determinar que adhesivo será el empleado para la conformación de las láminas y del pegado de

las mismas para formar la viga laminada, cuidando variables como tiempo de secado del adhesivo, temperatura del ambiente para evitar el punto de cristalización del pegamento, tiempo de presión que se ejercerá para la unión de elementos y laminas, tiempo de curado del adhesivo, humedad del ambiente, y el almacenaje de las vigas en condiciones de humedad y temperatura del lugar al que se enviarán.

Paso 4.- realizar pruebas de flexión estática en la prensa universal en una escala 2:1, basándose en la norma ASTM D 198-15 que establece los procedimientos y fórmulas de la prueba de tres puntos con separaciones a tercios para determinar los módulos de elasticidad y ruptura de la especie que se esté empleando, en esta prueba se recomienda determinar los módulos, ensayando como mínimo 30 probetas para tener valores normalizados.

Paso 5.- realizar los análisis para determinar el valor medio, su varianza y coeficiente de variación de las probetas

Paso 6.- establecer los valores de densidad media de la viga laminada ya fabricada, así como tener determinados los valores de los módulos de ruptura y elasticidad de la especie.

Paso 7.- (opcional) realizar la modelación de las vigas en el programa de análisis de elemento finito (Solid Works) una vez terminados los modelos, determinar las especificaciones de material, en este caso se empleará la densidad y el módulo de elasticidad obtenidos previamente.

Paso 8.- en la hoja de cálculo en el apartado “tablas densidad especie” introducir el valor obtenido de densidad de la viga laminada, para determinar automáticamente el valor de peso de cada una de las secciones transversales propuestas en las tablas. En este apartado los valores de “I” que corresponden al valor de momento de inercia y “S” módulo de la sección se calcularán automáticamente con la fórmula mostrada en cada recuadro correspondiente a la variable a calcular: (figura 68)

	valor	unidad	nombre de la especie			densidad	
Dens. De especie	567	kg/m³	PINO BLANCO (PINO PSEUDOSTROBUS)			567 kg/m³	
			cedro blanco (cupressus lindley)			540	
Dimensiones nominales b.d (in)	Dimensiones efectivas b.d (in)	Dimensiones efectivas b.d (cm)		Área de la sección "A" $A = b \times h$ (cm²)	Momento de inercia "I" $I = bh^3/12$ (cm4)	Módulo de la sección "S" $S = bh^2/6$ (cm³)	Peso aproximado Densidad- kg/ m
2x3	1.5x2.5	3.81	6.35	24.19	81.30	25.60	1.372
2x4	1.5x3.5	3.81	8.89	33.87	223.07	50.19	1.920
2x5	1.5x4.5	3.81	11.43	43.55	474.11	82.96	2.469
2x6	1.5x5.5	3.81	13.97	53.23	865.63	123.93	3.018
2x8	1.5x7.5	3.81	19.05	72.58	2194.97	230.44	4.115
2x10	1.5x9.5	3.81	24.13	91.94	4460.83	369.73	5.213
2x12	1.5x11.5	3.81	29.21	111.29	7912.95	541.80	6.310
2x14	1.5x13.5	3.81	34.29	130.64	12801.07	746.64	7.408

Figura 68. Sección primera de la hoja de cálculo donde se introduce el dato de la densidad de la madera a emplear para las vigas, así como el nombre de la especie con la que se trabaja, para que la hoja calcule en automático el peso de las dimensiones nominales de la tabla. Elaboración propia

Paso 9.- determinar las acciones, análisis de los pesos del sistema constructivo empleado, correctores de carga, cargas vivas y muertas, entre otros para determinar la carga por metro cuadrado.

Paso 10.- determinar el claro de la viga o las vigas según la posición en la que se encuentre si son centrales o laterales o si son continuas, así mismo determinar las áreas de carga de la viga, en este caso se toma el área que se forma la distancia de los puntos medios que hay entre viga y viga, por la longitud total de la viga para determinar el peso total que soportara. En este paso se podrá colocar diferentes distancias de separación de vigas que así lo desee el proyecto, así como también los largos de las vigas a emplear.

Paso 11.- determinar las áreas que resultan de la separación de centros de vigas por la longitud total de la viga y multiplicar dicha área por el peso por metro cuadrado que resulto del análisis de cargas, esto con el fin de determinar una carga total repartida en la viga.

Paso 12.- obtener el peso por metro lineal de la viga, esto se logra dividiendo el peso total entre la longitud total de la viga.

Paso 13.- determinar la flexión máxima permisible de la viga con la relación L/360 o L/240 según sea el caso de diseño.

Paso 14.- se recalculan los momentos flectores y los cortantes sumando el peso de la viga propuesta a la carga ya determinada.

Paso 15.- se obtiene el valor de la flexión máxima según la viga analizada (en este caso es una viga simplemente apoyada con carga uniformemente repartida) y este deberá ser menor al valor calculado de la relación $L/360$ o $L/240$ para que pueda verificar la viga.

Paso 16.- se determina el esfuerzo a trabajo en flexión, dividiendo el valor del momento flexionante entre el valor de diseño de flexión de tablas de elementos laminados de coníferas, el valor obtenido será el módulo de sección (S) de la viga que tendrá que ser menor al valor " S " de la viga seleccionada; si el valor de " S " es menor al calculado deberá de replantearse la propuesta de viga hasta obtener un valor de " S " mayor al calculado.

Paso 17.- revisar si los valores de flexión siguen verificando con los nuevos cálculos realizados.

Paso 18.- se calcula el valor de cortante horizontal, tomando el valor de diseño de cortante paralelo a la fibra y multiplicándolo por un factor de seguridad (de 0.7 a 0.85) para darle un valor menor al de diseño, que servirá de base para verificar, que el valor del cortante vertical dividido entre el base multiplicado por 1.5 es menor que el valor de diseño corregido por el factor de seguridad, de ser mayor dicho valor, deberá de proponer otra sección para cumplir la verificación de la viga.

Paso 19.- si la viga no verifica y se propone otra sección, se deberá revisar la flexión máxima permisible y el esfuerzo de trabajo a flexión de dicha viga para revisar que cumplan los requisitos de verificación.

10. DISCUSIÓN

Comparando las investigaciones antes revisadas, con la presentada en este documento, partimos del hecho que el estudio de la madera laminada contra la madera maciza se obtienen mejores condiciones físicas y mecánicas, que se traduce en módulos de elasticidad y de ruptura con valores mayores (Araujo) y en otros menores (Sotomayor), gracias a esto podemos afirmar que colocaron las pautas para el proyecto de investigación propuesto.

Muchas de las investigaciones se basan en la comparación de vigas laminadas contra vigas de madera maciza, en este caso, la investigación se basó en la comparación de vigas laminadas con diferentes acomodos en su laminación, una primera una propuesta de láminas horizontales (vigas comerciales), la segunda, una laminación horizontal y vertical (vigas propuestas).

Los autores anteriores, puntualizaban el uso de laminación para elementos estructurales, por la falta de troncos con diámetros grandes, ya que actualmente la obtención de madera es de crecimiento rápido en algunos casos y en otros de bosque natural, pero de troncos de pequeños diámetros, se obtiene madera muy variada dependiendo de que parte del área del tronco (albura y el duramen).

Este problema dificulta que las especies no estudiadas queden fuera de un rango de uso estructural, y queden en desventaja sobre las maderas estudiadas que son más de países de climas templados (USA, Canadá, Alemania, entre otros).

Coinciden, además, que la obtención de los módulos de elasticidad y de ruptura, así como la densidad, son factores determinantes para determinar si madera ensayada para vigas laminas empleada puede ser utilizada para fines estructurales, sin realmente llegar a un análisis más profundo del elemento en dichas condiciones.

Los valores reportados por los autores de las especies tropicales, han sido inferiores a los valores más bajos de diseño reportados en las normas técnicas complementarias para estructuras de madera, en su apartado de vigas laminadas sobre

coníferas (tabla 2.2.7); estos valores deben ser s referencia para cálculos de secciones propuestas para cada condición de trabajo.

En cuanto a los valores reportados de los autores y los reportados en la investigación, podemos analizarlos en la siguiente tabla (tabla 20):

AUTOR		ESPECIE	MOR (Kg/cm ²)	MOE (Kg/cm ²)
Sotomayor	madera maciza	<i>E. ciclacarpum</i>	602.7	54922
		<i>T.rosea</i>	1063	109028
		<i>J.pyriformis</i>	1057	100075
	Madera laminada	<i>E. ciclacarpum</i>	505.8	55299
		<i>T.rosea</i>	943.2	10343
		<i>J.pyriformis</i>	899.4	93131
Araujo	madera maciza	<i>Pich</i>	411	47089
		<i>Chacah</i>	318	44210
		<i>Pucte</i>	957	104763
	madera laminada	<i>Pich</i>	316	37288
		<i>Chacah</i>	350	42680
		<i>Pucte</i>	1032	102877
	madera combinada laminada	<i>Pich -Chacah</i>	433	53751
		<i>Pucte-Pich</i>	751	85641
Contreras	madera laminada finger joint	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>Hondurensis</i> 65 mmx 270mmx 3500mm	255.9	30693
	madera laminada a tope	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>Hondurensis</i> 65 mmx 270mmx 3500mm	343.5	39208
	madera laminada finger joint	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>Hondurensis</i> 95 mmx 270mmx 3500mm	227.1	32672
	madera laminada a tope	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>Hondurensis</i> 95 mmx 270mmx 3500mm	282.4	29541

	madera laminada finger joint	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>Hondurensis</i> 125 mmx 270mmx 3500mm	244.5	37006
	madera laminada a tope	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>Hondurensis</i> 125 mmx 270mmx 3500mm	200.4	27808
Mendoza	madera laminda comercial	<i>Pinus</i> sp.	570.55	68044.06
	madera laminada propuesta	<i>Pinus</i> sp.	404.48	39028.28
	madera laminda comercial	<i>Cupressus lindley</i>	278.66	23498.03
	madera laminada propuesta	<i>Cupressus lindley</i>	249.99	27276.13

Tabla 20. Tabla de valores de MOE Y MOR de las distintas investigaciones revisadas. Elaboración propia.

Podemos observar que los valores de los módulos de elasticidad y de ruptura (MOR y MOE) (tabla 20) de las especies tropicales que reporta Sotomayor en comparación con los valores de las especies tropicales reportados por Araujo, son mayores.

Para esta esta comparativas podríamos inferir que el empleo de los adhesivos para elaboración de las probetas fue determinante para los resultados, en ambos casos las maderas empleadas fueron de origen tropical, los poros cerrados de la madera causan que el adhesivo no penetre en la madera (confort, catálogos de madera).

Para la comparación de valores los valores de MOE y MOR de las especies de pino, los valores de pino sp obtenidos por mendoza en algunos casos es casi el doble

que los reportados por Contreras con el pino caribea. Sin embargo, los resultados obtenidos por entre la comparación de del pino caribea con el cupressus lindley, podemos observar que los resultados son muy similares entre el MOR y MOE.

Las conclusiones que dan los autores, son diversas; Sotomayor concluye que el uso laminado de las especies maderables aumenta sus módulos de elasticidad y de ruptura así como un incremento de la densidad de la madera laminada con respecto a la densidad de la madera maciza además que sus resultados concuerdan con los reportados en la bibliografía existente; en el caso de Araujo, determina ambos módulos y la densidad, en este caso, compara madera maciza contra la laminada, y en el caso de laminación, emplea la combinación de especies, en dichos caso los valores son parecidos, concluyendo así que estas especies solas y en combinaciones pueden ser empleadas para uso estructural.

Por otro lado, Contreras también establece la importancia de determinar el MOE y MOR, así como la densidad, de esta manera, los bajos valores obtenidos de los módulos MOE y MOR del pino caribea, Contreras determina que no son aptos para un nivel estructural y que debería replantearse la fabricación de vigas laminas con dicha especie.

Si bien es claro que todos los autores, en el estudio de vigas laminadas, los resultados obtenidos, son valores que podríamos usar solo de referencia, para establecer un cálculo real de secciones en un proyecto de construcción en madera; en este punto, es importante para el constructor y el diseñador obtener de valores de secciones que cumplan los requerimientos técnico constructivos para soportar las diferentes condiciones de cargas, para lo cual, el diseño del software para el cálculo de vigas de madera realizado por Alejandro Guzmán Mora, es una aproximación a dichos valores, sin embargo al revisar dicho programa no contempla factores como densidad del material, módulos de elasticidad, así como la verificación de dicha sección contra los valores de diseño permisibles; dicho programa entrega los valores de momentos y cortantes de vigas en general, teniendo un enfoque general para materiales homogéneos como el caso del acero y del concreto.

De lo antes expuesto la investigación determino como base de cálculo de secciones de vigas macizas o laminadas rectangulares rectas, la obtención de los valores de MOE y MOR, así como la densidad de cada especie a emplear, a partir de estos datos se integrarán a los diferentes cálculos para la obtención de valores de posibles secciones de madera que den la certeza que soportarán los requerimientos de diseño.

Esta hoja de cálculo, que fue solo una parte de la investigación, a diferencia del software de cálculo de vigas planteado por Guzmán Mora, fue creada para establecer varios aspectos:

- Obtener valores para comparación de secciones de diferentes formas y especies empleadas.
- La hoja de cálculo, parte del resultado de la comparación, hecha por un software de análisis de elemento finito, de las diferentes formas de construcción de vigas laminadas de la misma especie propuestas en la investigación, donde se pudo observar que no existen diferencias entre los tipos de vigas laminadas de la misma especie con respecto a su flexión y a su carga soportada.
- La hoja de cálculo, al tener de base el MOR, MOE y la densidad de la madera, puede dar el resultado de varias vigas que cumplan con las diferentes condiciones de distanciamiento de cargas y de áreas de carga, de un proyecto arquitectónico en MADERA.

11. CONCLUSIONES

Basándonos en los resultados antes expuestos podemos concluir que:

- a) El conocer la densidad de cada especie maderable, nos dará idea del peso y de la forma de la viga; así como la resistencia que dicha viga tendrá.
- b) Cualquier especie maderable es propicio para su aplicación en estructuras arquitectónicas, con las limitantes que cada una posea y sin compararlas con vigas de concreto, acero.
- c) Las condiciones climatológicas donde se fabriquen las vigas laminadas, tienen una influencia directa en su resistencia.
- d) De acuerdo con los resultados, resulta evidente que los pegamentos empleados tienen que ser desarrollados específicamente para un nivel estructural y para el sitio donde se vaya a utilizar.
- e) El área de contacto por el sistema finger jointing debe procurar ser el máximo para proporcionar mayor resistencia en cada unión, así como evitar tener traslapes alineados.
- f) la flexión de la viga deberá ser calculado para disminuir el álveo lo más posible
- g) las condiciones de humedad relativa del sitio en el que la viga se coloque determinaran su comportamiento y su durabilidad.
- h) Comparando con los resultados de “Wilver Contreras M., Styles Will Valero, Edward Thomson, Mary Elena Owen de C., Eric Barrios.” (Wilver Contreras M. 1, DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS DE DISEÑO DE VIGAS, 2007) quienes reportan los siguientes valores:

Propiedad	Métodos		Diferencia cuantitativa en casi un 50% más, entre ambos métodos en N/mm ²
	Normas ASTM (N/mm ²)	JUNAC (N/mm ²)	
Esfuerzo al Límite Proporcional (ELP).	17,800	35,108	17,308
Módulo de Ruptura (MOR)	20,343	40,123	19,780
Módulo de Elasticidad (MOE)	3.186,759	6.310,634	3.123,875

Tabla 21. Valores del Módulo de Ruptura (MOR) y Módulo de Elasticidad (MOE) de vigas laminadas de pino caribe (*Pinus caribaea* var. *Hondurensis*).

Realizando pruebas similares, realizadas por los investigadores y tomando solo como referencia las norma ASTM, llegamos a los siguientes valores:

PROPIEDAD	METODO NORMAS ASTM (N/ mm ²)			
	Pino sp.		Cedro blanco sp.	
	comercial	propuesta	comercial	propuesta
Módulo de Ruptura (MOR)	20.17	21.23	9.75	8.74
Módulo de Elasticidad (MOE)	2381.54	1365.98	822.43	954.66

Tabla 22. Valores del Módulo de Ruptura (MOR) y Módulo de Elasticidad (MOE) de vigas laminadas de la forma comercial y de la forma propuesta de pino sp y cedro blanco sp.

Al comparar ambas tablas a pesar de las condiciones con las que fueron hechas las probetas, los resultados no tienen grandes diferencias, cabe mencionar que los resultados obtenidos de esta investigación para la comparación con los reportados por los otros investigadores, son solo válidos para las muestras ensayadas, para obtener los mismos valores se deberá seguir la técnica mencionada en la investigación y realizar probetas de cada especie de la cual se desee emplear para realizar vigas laminadas.

- i) Con las comparaciones realizadas en el programa Solid Works, pudimos observar que como la viga lamina comercial y la viga laminada propuesta tienen los mismos valores de flexión en la simulación, pueden ser empleadas en condiciones de apoyo específicas, esto en base a las variantes de los sistemas constructivos, donde pueden emplearse al inicio vigas simplemente apoyadas, y conforme avanza el proyecto emplear condiciones de vigas empotradas en dos extremos.
- j) Al observar las nuevas construcciones en madera, los arquitectos están realizando la sustitución de una estructura portante de concreto a una de madera, como es el caso del edificio Comons brookc, sin embargo y como un nuevo caso para continuar esta investigación, se deberá analizar los puntos de unión para los diferentes elementos constructivos que conformaran la estructura.
- k) Se concluye una de las partes medulares del proyecto de este proyecto investigación, que fue el resultado de elaborar una metodología para el cálculo de vigas laminas descrita a continuación

12. RECOMENDACIONES

Como comentario basado en la literatura revisada y citada en esta investigación, que si bien, los valores obtenidos de la comparación de las diferentes vigas, no ofrecen un valor real de si en verdad pueden o no soportar carga, incluso se puede decir que pueden o no ser usadas en la construcción como elementos estructurales, si no se aplican en cálculos reales de proyectos piloto, que su tamaño pueda ser construible y poder reafirmar o refutar si sirven o no.

Con base a lo anteriormente expuesto se puede asegurar que la investigación planteada en este documento permite la continuidad en la misma sobre los diferentes elementos estructurales, y posibilita plantear una variante del sistema constructivo en

base a maderas mexicanas que permitan un aprovechamiento más eficaz de los recursos forestales.

Deben hacer un énfasis en determinar que procesos deben ser llevados a cabo en laboratorios y que procesos deberán ser llevados a cabo fuera de laboratorio. Esto debería hacerse para determinar la viabilidad y en determinado momento, las mejoras de los procesos de construcción de cada elemento en condiciones fuera de laboratorio, para asegurar, que de ser viable la investigación para llevarla a un nivel industrial, se tengan los criterios e instalaciones adecuados para elaborar productos de calidad.

Dicho lo anterior, la fabricación de una viga a escala real y el empleo de dicho elemento en al menos un proyecto arquitectónico piloto nos dará una mayor certeza de lo planteado en este proyecto de investigación, considerando que estas innovaciones se vean reflejadas en un mayor beneficio, cuando se utilice madera en construcción de edificios y cualquier otro tipo de estructura, con la finalidad de una mayor sustentabilidad forestal disminuyendo la explotación de bosques naturales y propiciando la creación de plantaciones de especies maderables que necesariamente conlleva a una menor generación de desechos, menos emisiones de CO₂ por la transformación de otros materiales constructivos, por ejemplo: cemento, varilla, polímeros sintéticos, etc. Que puede contribuir así, al combate del calentamiento global del planeta tierra.

13. BIBLIOGRAFIA

- 1.- A., I. C. (15 de febrero de 2018). *Tipos de vivienda de los sedentarios*. Obtenido de Enciclopedia online de tipos: <https://www.tipos.cc/vivienda-de-los-sedentarios/2>.
- 2.- AEIM. (2005). *Asociacion Española del comercio e industria de la madera*.
- 3.- ARCHDAILY. (1 de JUNIO de 2015). *"La madera laminada y su aplicación en la arquitectura"*. Obtenido de ARCHDAILY: <https://www.archdaily.mx/mx/767512/materiales-madera-laminada-y-su-aplicacion-en-la-arquitectura>
- 4.- Arquitectura en madera. (26 de marzo de 2018). *Construcciones de troncos, rollizos o bloques de madera (Estructuras macizas)*. Obtenido de Arquitectura en madera: <https://www.arquitecturaenmadera.es/construcci%C3%B3n-en-madera/tronco-macizo-o-rollizos/>
- 5.- ASOSEM. (7 de febrero de 2018). *ASOSEM Asociacion de productores de cemento*. Obtenido de ASOSEM Asociacion de productores de cemento: <http://www.asocem.org.pe/archivo/files/Vision%20General%20de%20la%20Industria%20del%20Cemento%20y%20sus%20Principales%20Actores.pdf>
- 6.- Barrios, P. G. (16 de septiembre de 2016). *RCI, Radio Internacional Canada*. Recuperado el 9 de mayo de 2019, de <http://www.rcinet.ca/es/2016/09/16/el-edificio-de-madera-mas-alto-del-mundo-se-construyo-en-vancouver/>
- 7.- Borràs, X. (20 de octubre de 2010). *INTEREMPRESAS*. Obtenido de INTEREMPRESAS: <https://www.interempresas.net/Madera/Articulos/44265-Breve-historia-de-la-madera-como-material-de-construccion.html>
- 8.- Castellanos, J. R. (2008). *Tabla Fitecma de clasificacion de características mecánicas de maderas mexicanas*. Morelia, Michoacan, México.

- 9.- Centro UC de innovación de la Madera. (8 de noviembre de 2018). reserva forestal parque Peñuelas, ruta 68, V region , chile.
- 10.- Centro UC de Innovación de la Madera. (2018). Recuperado el 9 de mayo de 2019, de <http://madera.uc.cl/proyectos-todos/torre-de-penuelas>
- 11.- COMACO. (19 de junio de 2018). *GANADORES DEL 11 CONCURSO DE COSTRUCCION EN MADERA*. Obtenido de GANADORES DEL 11 CONCURSO DE COSTRUCCION EN MADERA: <http://www.comaco.com.mx/ganadores/11.html>
- 12.- COMACO. (12 de mayo de 2019). Recuperado el 12 de mayo de 2019, de COMACO: <http://www.comaco.com.mx>
- 13.- CONAFOR. (s.f.). Recuperado el 11 de MAYO de 2019, de CONAFOR: <https://www.gob.mx/conafor/prensa/lidera-mexico-en-produccion-y-consumo-de-madera-de-pino-en-america-latina-y-el-caribe>
- 14.- CONFEMADERA. (4 de mayo de 2010). *CONSTRUIR CON MADERA*. Obtenido de CONSTRUIR CON MADERA: https://egoin.com/wp-content/uploads/2017/04/Guia-Construccion_en_madera.pdf
- 15- Dazne, A. (2 de febrero de 2006). *IS ARQuitectura*. Obtenido de IS ARQuitectura: <https://is-arquitectura.com/arquitectura/torres/brock-commons/>
- 16.- Espinoza, R. (2021). *tabla de maderas mexicanas*. morelia: umich.
- 17.- EXCELSIOR. (10 de MAYO de 2019). Recuperado el 10 de MAYO de 2019, de EXCELSIOR: <https://www.excelsior.com.mx/nacional/los-departamentos-antisismicos-y-economicos-que-debes-conocer/1258014>
- 18.- Fitzgerald, R. W. (2005). *Resistencia de materiales*.
- 19.- Fitzgerald, R. W. (2007). *RESISTENCIA DE MATERIALES*. CIUDAD DE MÉXICO: ALFAOMEGA.

- 20.- *FORESTAL MADERERO*. (27 de JUNIO de 2015). Recuperado el 11 de MAYO de 2019, de *FORESTAL MADERERO*: <http://www.forestmaderero.com/articulos/item/madera-laminada-en-cruz-el-futuro-de-la-construccion.html>
- 21.- Franco, J. T. (14 de agosto de 2019). *ARCHDAILY*. Obtenido de *ARCHDAILY*: <https://www.archdaily.mx/mx/921337/es-la-madera-laminada-cruzada-clt-el-hormigon-del-futuro>
- 22.- Gaseta Oficial de la Ciudad de México. (2017). Reglamento de Construcciones del DF. Ciudad de México, Ciudad de México, México.
- 23.- Gintoff, V. (4 de julio de 2016). *archdaily*. Recuperado el 12 de mayo de 2019, de *archdaily*: <https://www.archdaily.mx/mx/790749/la-construccion-del-edificio-de-madera-mas-alto-del-mundo-se-esta-llevando-a-cabo-en-vancouver>
- 24.- Herrera, D. R. (2016). *física y mecánica de la madera*. Morelia, Michoacan: propia.
- 25.- Herrera, R. E. (2021). *Tabla Densidades de la Madera*. Morelia, Mich.
- 26.- historias y biografías. (26 de enero de 2020). *HISTORIA DE LAS VIVIENDAS LA EVOLUCIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES*. Obtenido de Historias y Biografías: https://historiaybiografias.com/historia_viviendas/
- 27.- INDUAMBIENTE. (2020). Los Avances de la Madera. *INDUAMBIENTE* , 32-34 No.136 .
- 28.- Infogate.cl HH. (5 de febrero de 2019). *INFOGATE*. Obtenido de INFOGATE: <https://www.infogate.cl/2019/02/05/torre-experimental-penuelas-en-chile-el-edificio-de-madera-mas-alto-de-latinoamerica/>
- 29.- Javier Ramón Sotomayor Castellanos, K. A. (s.f.). *MODULOS DE ELATICIDAD Y DE RUPTURA DE MADERA LAMINADA DE TRES ESPECIES TROPICALES. MEXICO*.

- 30.- L, A. S. (29 de enero de 2019). *BIT, publicación técnica de la Corporación de Desarrollo Tecnológico, CDT, de la Cámara Chilena de la Construcción, CChC.* . Recuperado el 12 de mayo de 2019, de issuu: https://issuu.com/revista_bit/docs/bit_124
- 31.- Luna, J. A., & Sánchez Díaz, G. (2015). *P'urhépecha*. Distrito Federal: Agencia Promotora de Publicaciones, S. A. de C.V.
- 32.- M. Khelifa, S. Auchet, P.-J. Méausoone, A. Celzard,. (2015). Finite element analysis of flexural strengthening of timber beams with Carbon Fibre-Reinforced Polymers,. *Science Direct*, 364-375.
- 33.- MADERA nueva era. (1 de agosto de 2017). *MADERA nueva era*. Obtenido de MADERA nueva era: <https://www.madereranuevaera.com/blog/75-la-madera-en-la-historia-del-hombre.html>
- 34.- *MADERAWORK*. (s.f.). Recuperado el 11 de MAYO de 2019, de *MADERAWORK*: <https://www.demadera.work/los-principales-paises-productores-de-madera/>
- 35.- Mora, A. G. (2003). *SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DE ESFUERZOS EN ELEMENTOS A FLEXIÓN DE MADERA*. MORELIA.
- 36.- NAVARRO, C. (24 de septiembre de 2017). *B+HAUS ARQUITECTURA EFICIENTE*. Obtenido de B+HAUS ARQUITECTURA EFICIENTE: <https://www.bhaus.es/ventajas-y-desventajas-de-la-madera-4-6/>
- 37.- Navarro, J. C. (2008). Evaluación de la calidad superficial con respecto a la variación del contenido de humedad en el cepillado en madera central y lateral para el alamo. Valdivia, Chile.
- 38.- Norma D 198-06. (2006). Standard Test Methods of Static Test of Lumber in Structural Sizes. Alemania.
- 39.- notimex. (30 de octubre de 2014). Vivienda de madera, una opción viable y económica en México. pág. 1.

- 40.- OBRAS. (16 de junio de 2017). *OBRAS*. Obtenido de OBRAS: <https://obras.expansion.mx/soluciones/2017/06/18/los-prefabricados-ganan-terreno-por-sus-aportes-en-tiempo-y-costo>
- 41.- Omar Araujo Molina, M. C. (ABRIL de 2005). *RESISTENCIA A LA FLEXION DE VIGAS LAMINADAS CON TRES ESPECIES DE MADERA TROPICAL MEXICANA*. MERIDA, YUCATAN, MEXICO.
- 42.- organizacion de las naciones unidas para la alimentacion y la agricultura. (9 de enero de 2020). *FAO,organizacion de las naciones unidas para la alimentacion y la agricultura*. Obtenido de FAO,organizacion de las naciones unidas para la alimentacion y la agricultura: <http://www.fao.org/forestry/statistics/80938@180723/es/>
- 43.- PEÑA, S. V. (11 de MAYO de 20019). *PRODUCTOS DERIVASOS DE LA MADERA*. MADRID, MADRID, ESPAÑA.
- 44.- PINECA. (22 de mayo de 2018). *PINECA*. Obtenido de PINECA: <https://www.pineca.es/blog/diferencias-entre-las-casas-de-madera-y-las-casas-con-estructuras-de-madera.html>
- 45.- PITA, E. (24 de junio de 2016). *Expansión* . Obtenido de Expansión: <https://www.expansion.com/fueradeserie/arquitectura/2016/06/24/576bc25dca47416e3e8b4579.html>
- 46.- Pita, E. (24 de junio de 2016). Las viviendas sociales de Alejandro Aravena, último Pritzker de Arquitectura. Santiago de Chile.
- 47.- Sotomayor, J. R. (2010). *tabla fitecma de clasificacion de características de maderas mexicanas*. morelia: umich.
- 48.- Stephen Smulski . (1997). *Enginnered Wood Products*. En E. W. Products, *Enginnered Wood Products* (págs. 5-23). Madison,Wisconsin: PFS Research Foundation.

- 49.- SUR, diario de Malaga, noticias y actualidad de Malaga. (15 de febrero de 2017). *SUR*. Obtenido de SUR: <https://www.diariosur.es/economia/empresas-malaguenas/201702/15/casas-hibridas-madera-ladrillo-20170214123309.html?ref=https:%2F%2Fwww.google.com%2F>
- 50.- Vega, A. &.j. (mayo de 2017). *Researchgate*. Obtenido de t.ly/Nh5x
- 51.- W., M. E. (2018). Vigas laminadas y la construccion lijera con madera/estructuras de madera con diseño para viento y sismo., (págs. 3-10). CD de México.
- 52.- Wilver Contreras M, S. W. (2007). *DISEÑO DE VIGAS LAMINADAS DE PINOCARIBE ENCOLADAS CON ADHESIVO DE ISOCIANATO*. Maderas, Ciencia y Tecnologia.
- 53.- Wilver Contreras M. 1, S. W. (2007). DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS DE DISEÑO DE VIGAS. *DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS DE DISEÑO DE VIGAS. MADERA. CIENCIA Y TECNOLOGIA*.
- 54.- Wilver Contreras M. 1, S. W. (2007). NOTAS TECNICAS. *DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS DE DISEÑO DE VIGAS. MADERAS. CIENCIA Y TECNOLOGIA*.
- 55.- Yovane, K. S. (2003). *Reacondicionamiento bioclimático de viviendas de segunda residencia en clima mediterráneo*. Recuperado el 24 de febrero de 2020, de Tesis Doctorales de Xasas: https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6113/04PARTE2_3.pdf;jsessionid=14B29F377A9BB1305CD08373A0CE9033?sequence=6

14. ANEXOS

Tablas de pino *sp.* para soportar una carga de 843 kg/ m², con una distancia de 4,5,6 m de luz efectiva de la viga laminada, calculo empleando la base de calculo.

Diagrama de una viga laminada con una carga central. El diagrama muestra una sección transversal de la viga con una carga aplicada en el centro. Las dimensiones y etiquetas son:

- área de carga:** La zona sombreada en el centro de la viga.
- centro de viga:** El punto central de la viga.
- proyección de viga:** La zona que sobresale de la viga.
- muro de carga:** El muro que soporta la carga.
- L corto:** La longitud de la viga en el lado corto.
- L largo:** La longitud total de la viga.
- Distancias:** Las distancias entre las líneas de carga son 0.93, 1.00, 1.00 y 0.93.

Especie : pino

Carga por m²: 843 k/m²

Luz en m
(lado corto): 4

Separación
de vigas m: 1

Área de
carga m²: 4

Secciones rectangulares aceptables para cubrir la luz

6x2

5x2

4x2

6x4

5x4

4x4

6x6

5x6

4x6

6x8

5x8

4x8

6x10

5x10

4x10

6x12

5x12

4x12

6x14

5x14

4x14

6x16

5x16

4x16

6x18

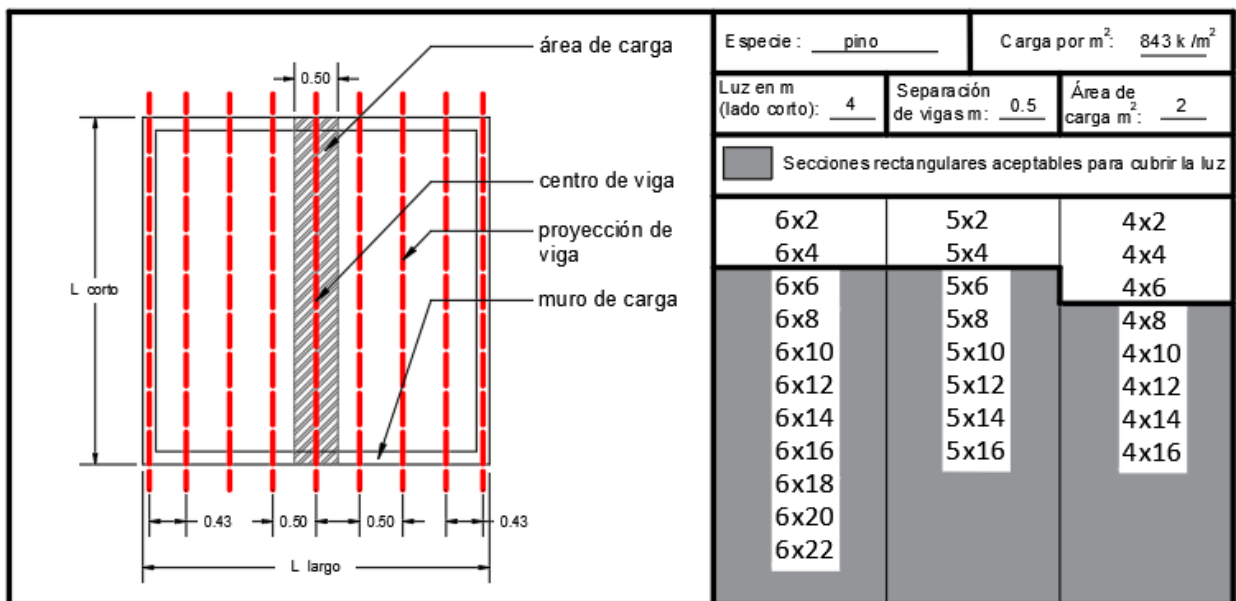
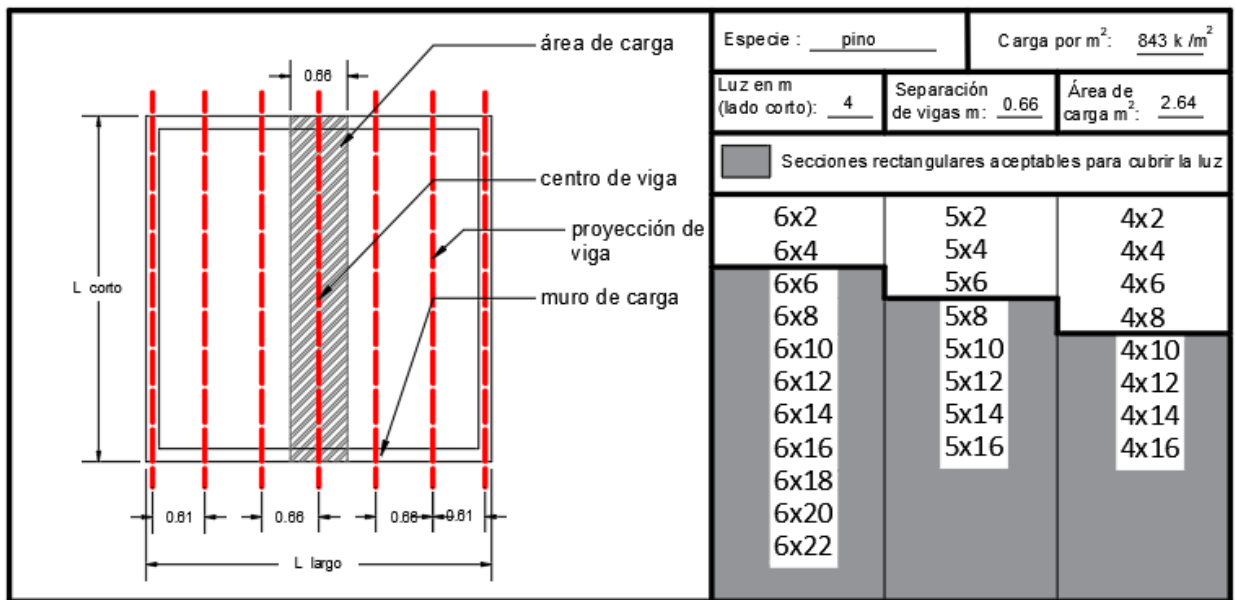
6x20

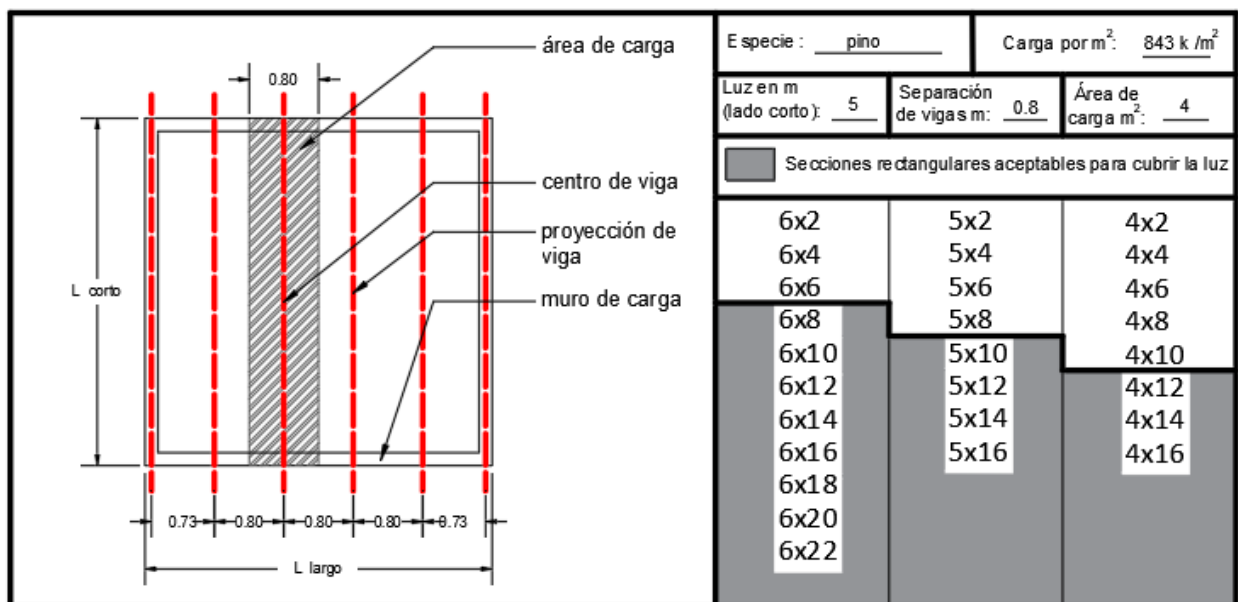
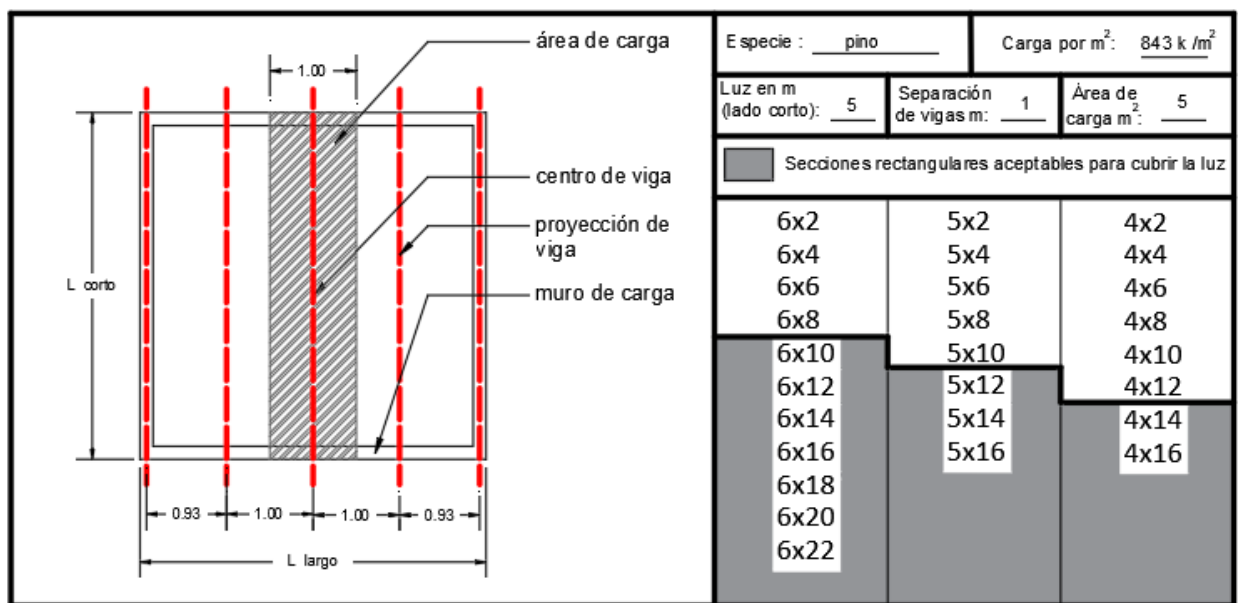
6x22

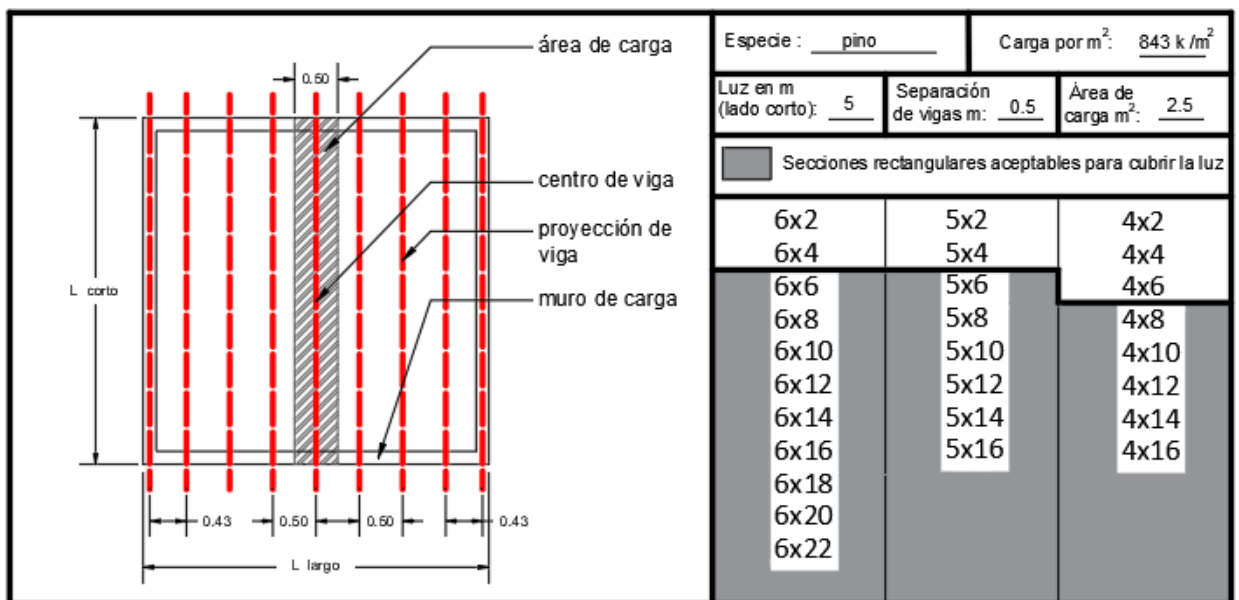
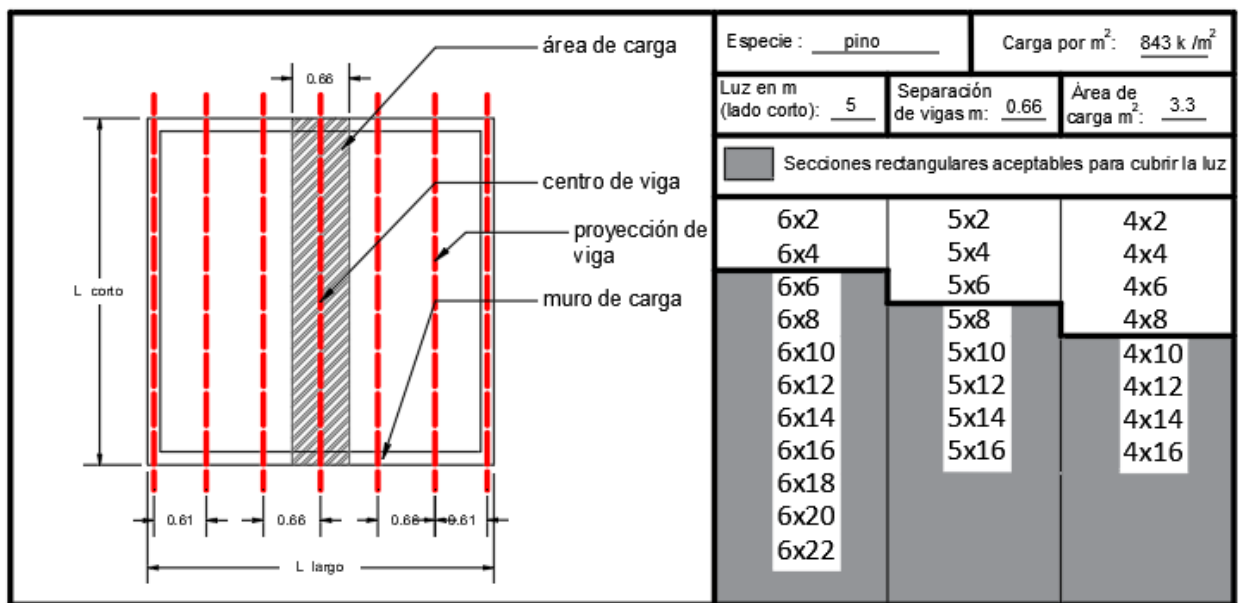
Diagrama de una viga laminada con una carga central. El diagrama muestra una sección transversal de la viga con una carga centralizada. Las dimensiones indicadas son:

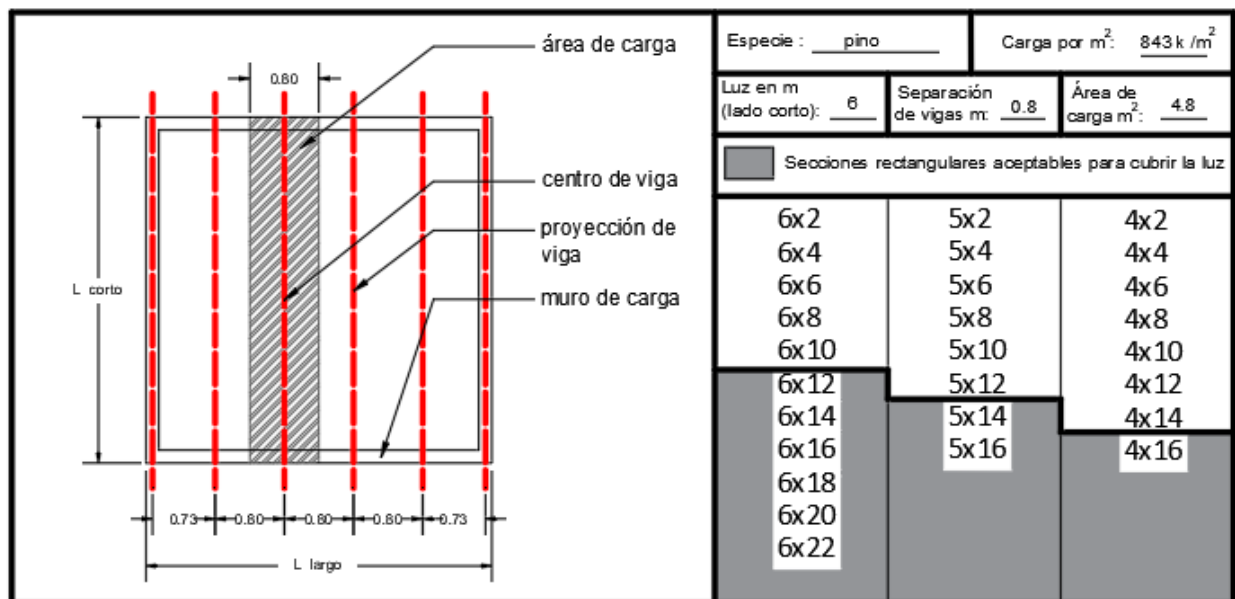
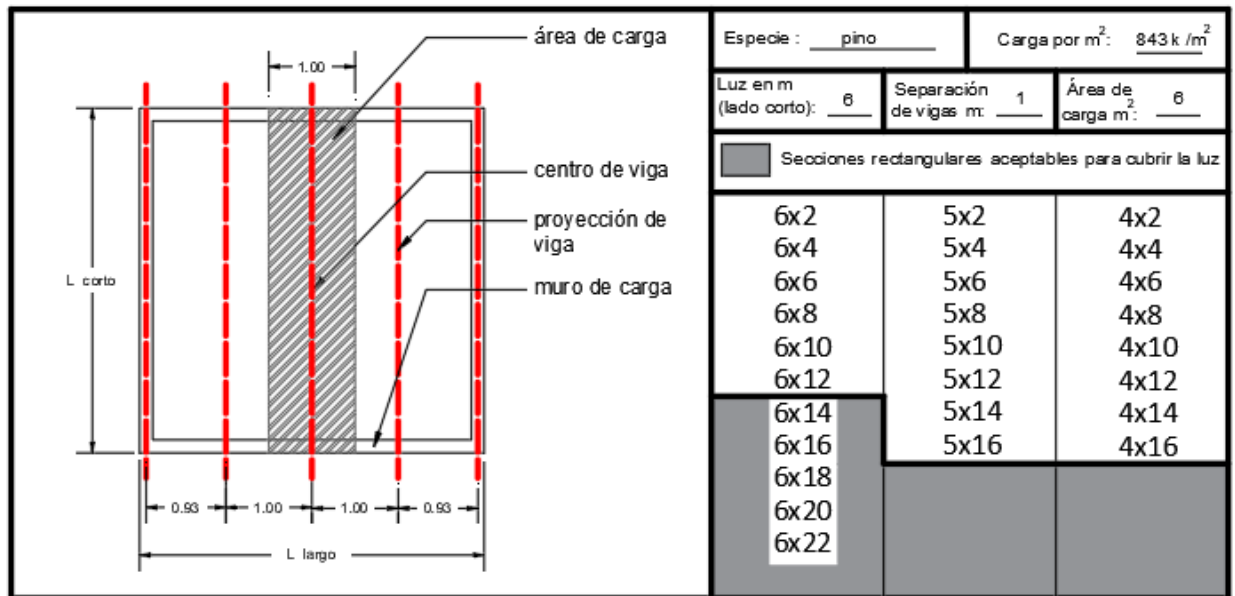
- área de carga:** La zona sombreada en el centro de la viga.
- centro de viga:** El punto central de la viga.
- proyección de viga:** La zona que sobresale de la viga.
- muro de carga:** La zona que soporta la carga.
- L corto:** La longitud de la viga en el lado corto.
- L largo:** La longitud total de la viga.
- Distancias horizontales:** 0.73, 0.80, 0.80, 0.80, 0.73.

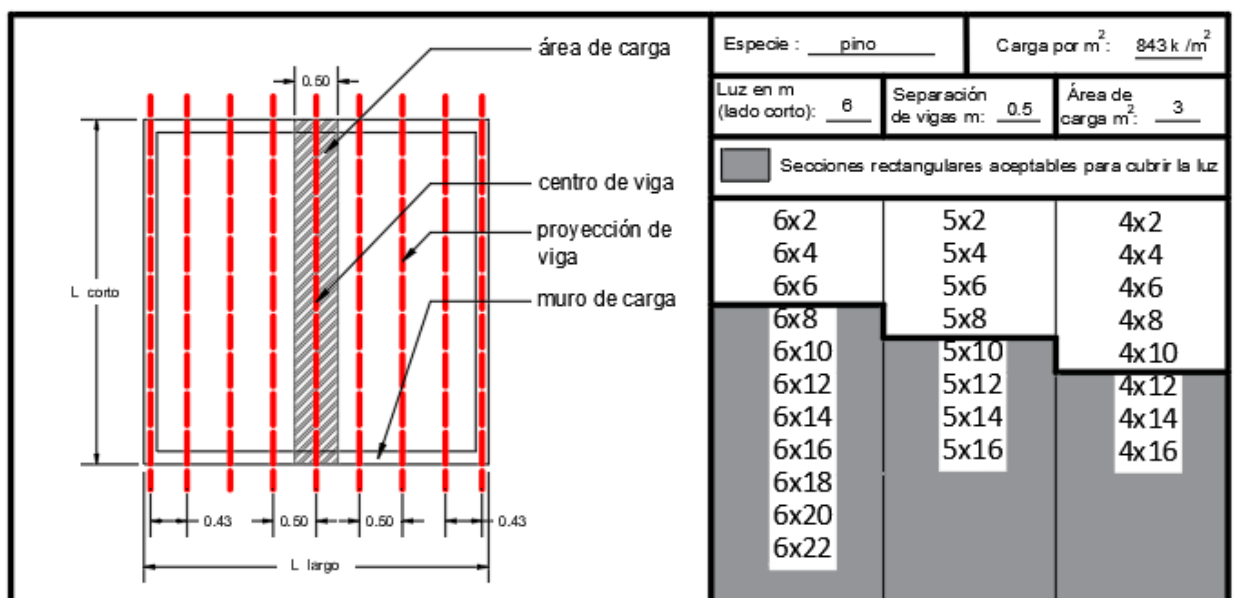
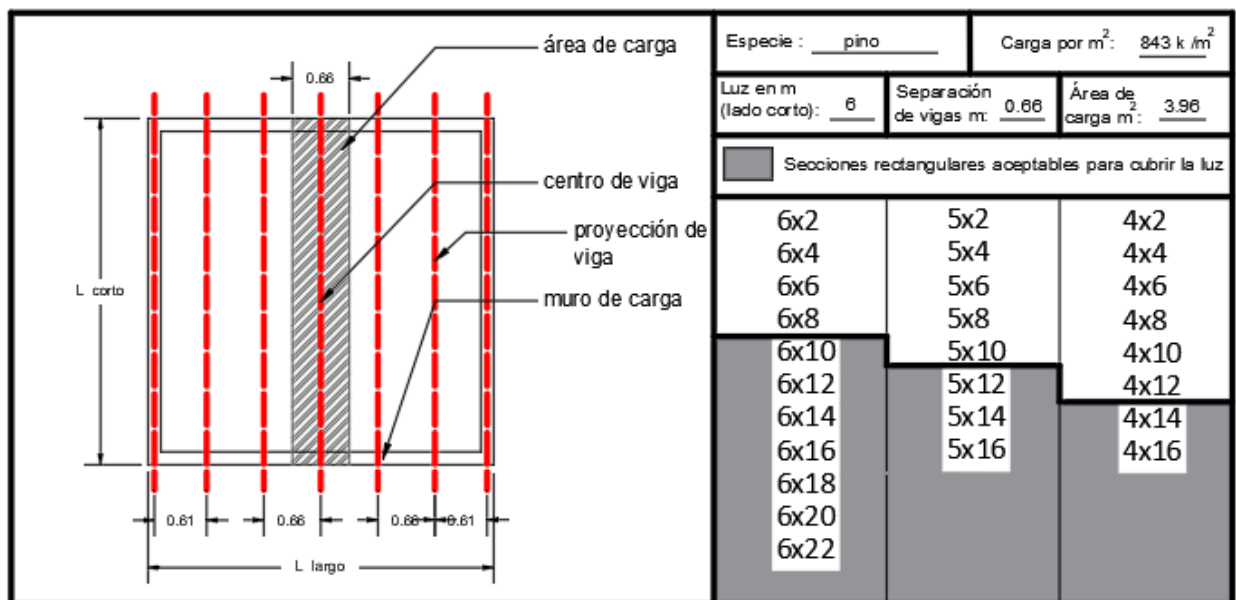
Especie : <u>pino</u>	Carga por m ² : <u>843 k/m²</u>	
Luz en m (lado corto): <u>4</u>	Separación de vigas m: <u>0.8</u>	Área de carga m ² : <u>3.2</u>
Secciones rectangulares aceptables para cubrir la luz		
6x2	5x2	4x2
6x4	5x4	4x4
6x6	5x6	4x6
6x8	5x8	4x8
6x10	5x10	4x10
6x12	5x12	4x12
6x14	5x14	4x14
6x16	5x16	4x16
6x18		
6x20		
6x22		



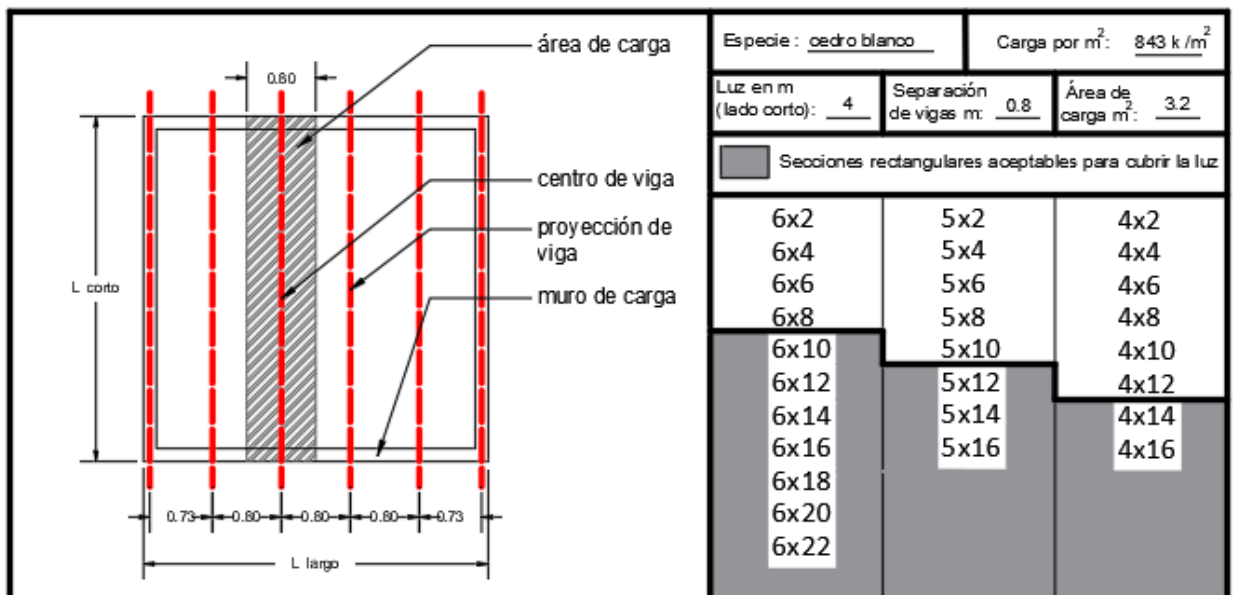
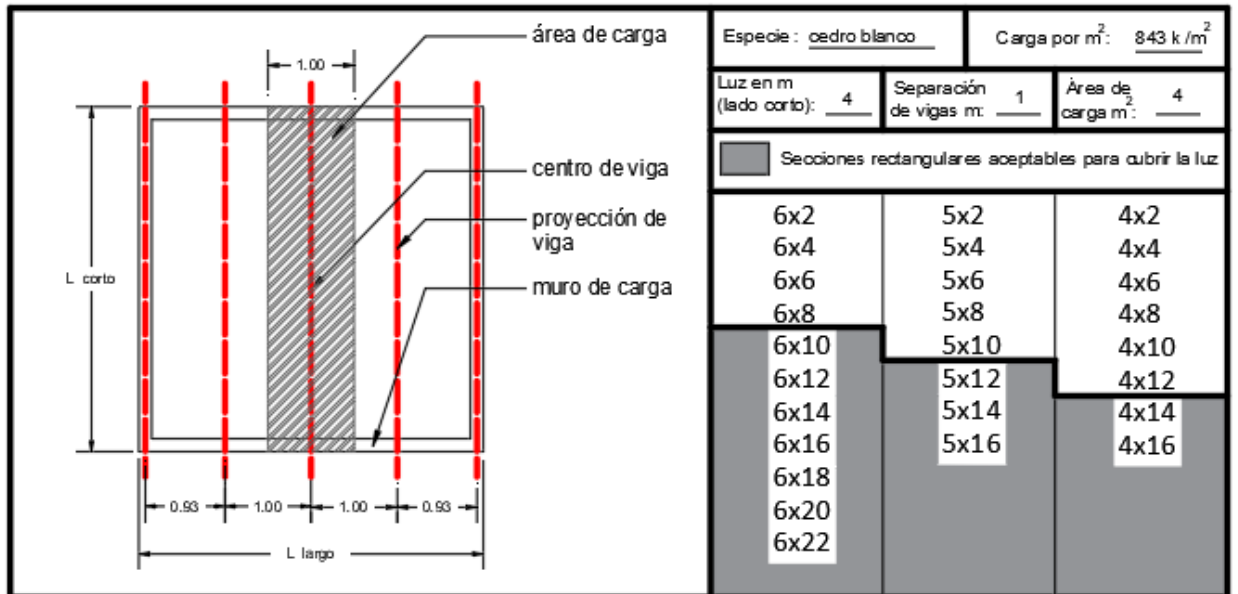


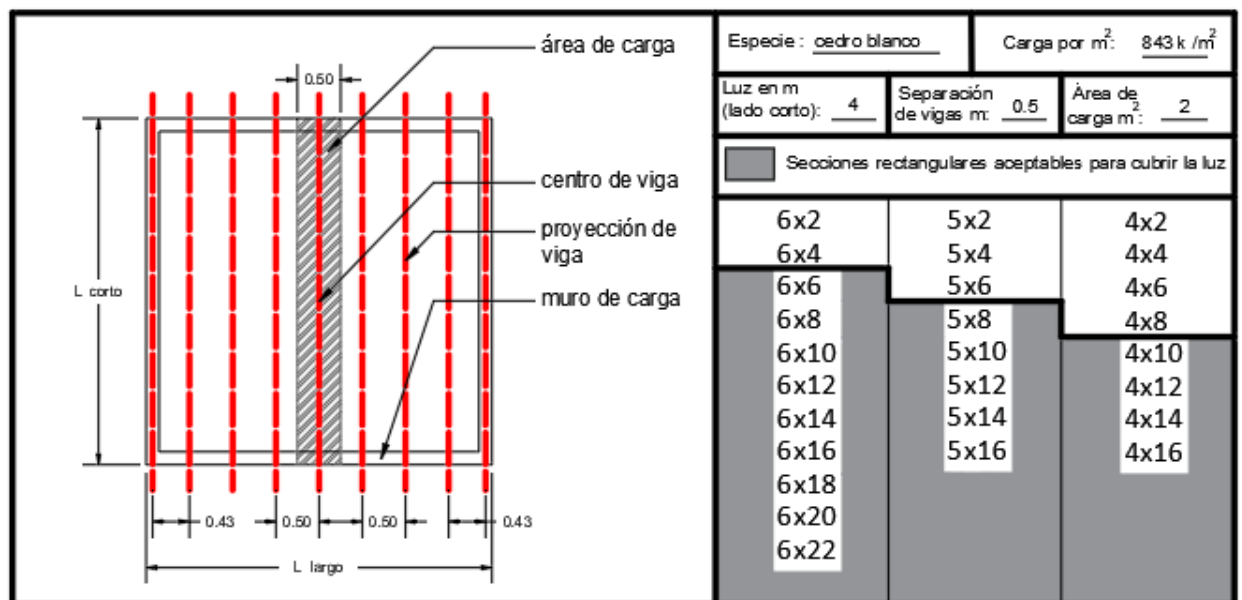
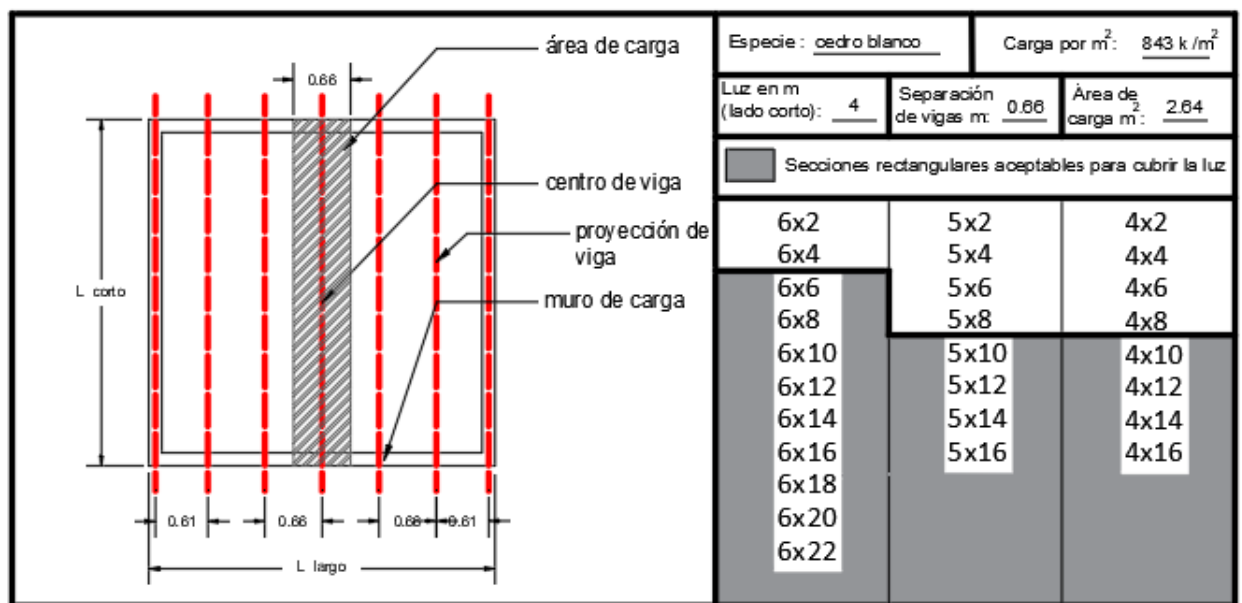


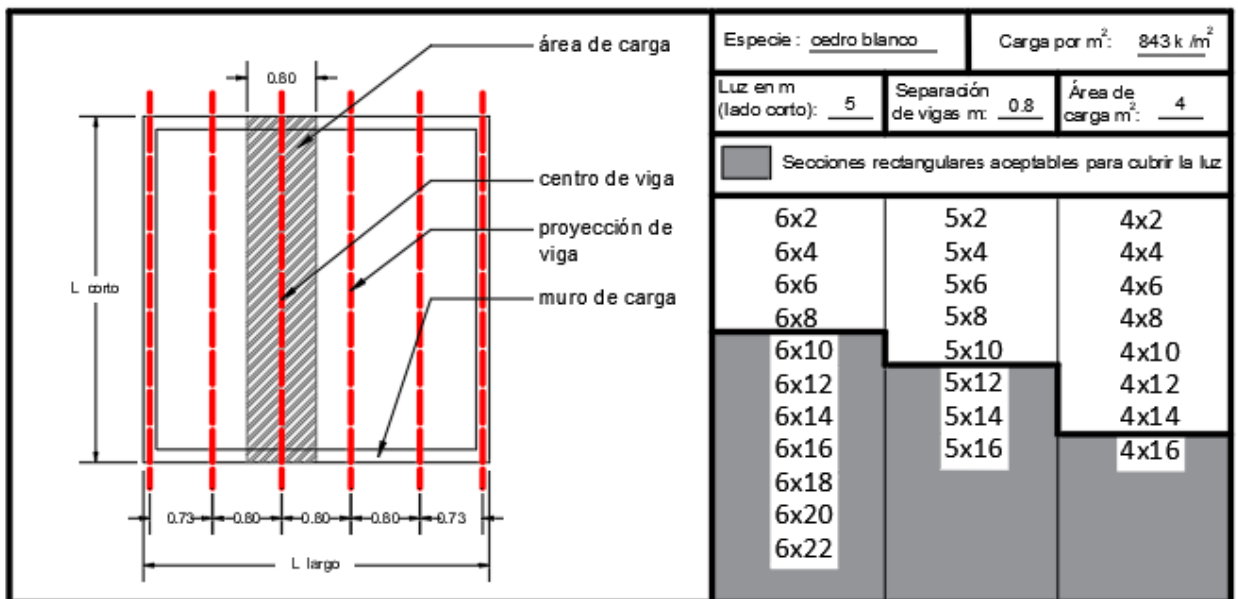
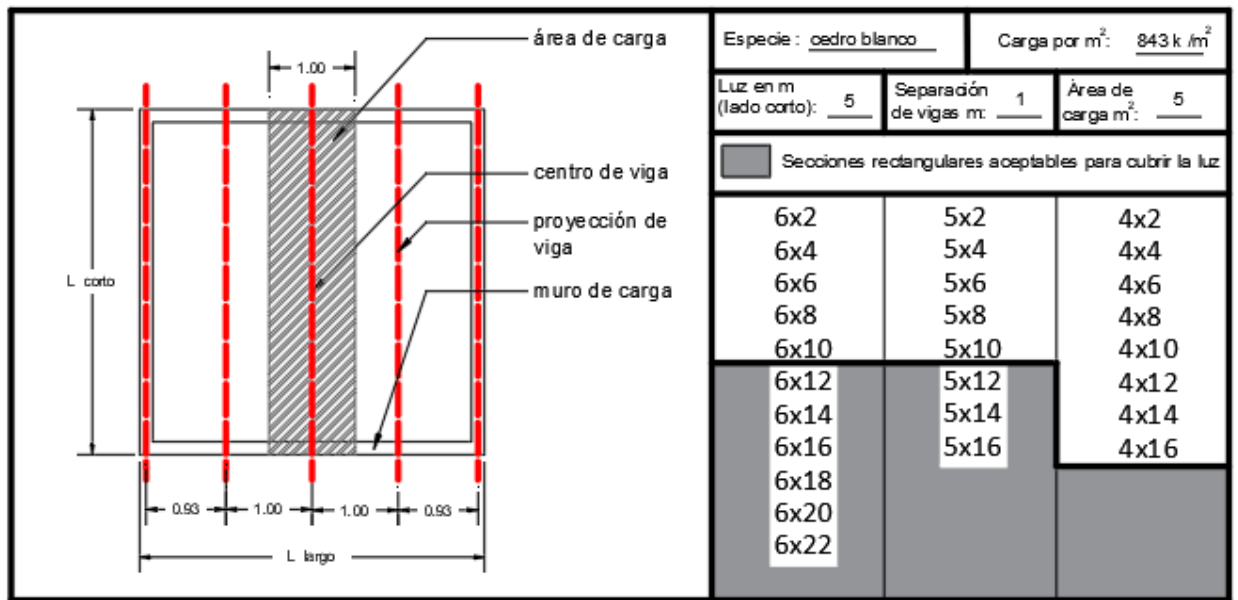


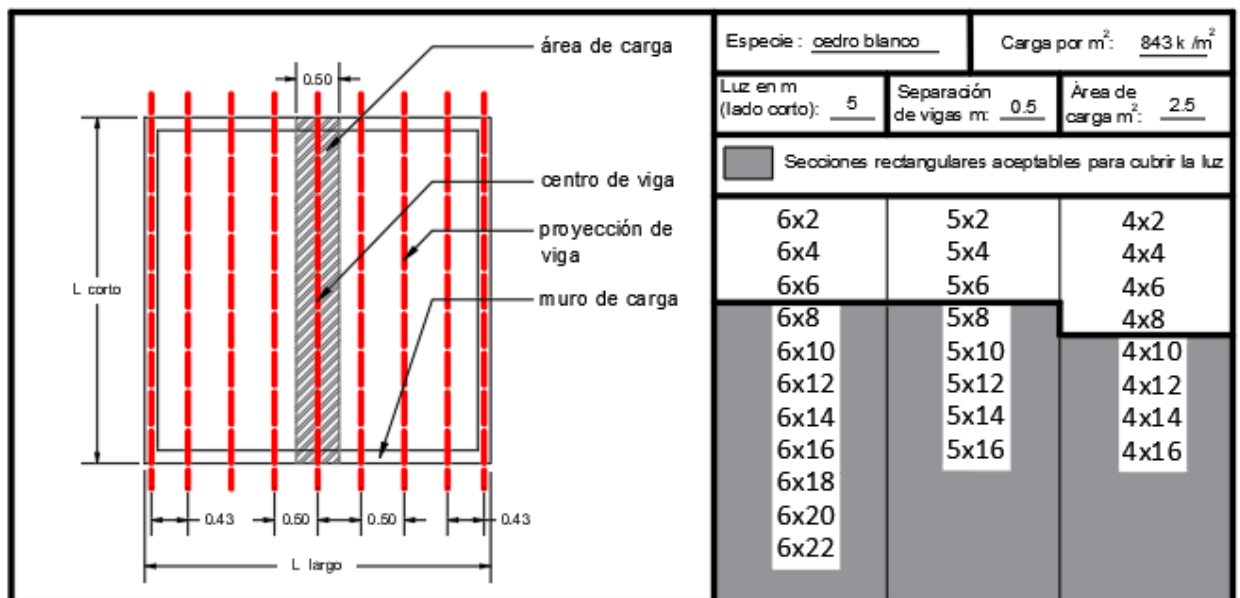
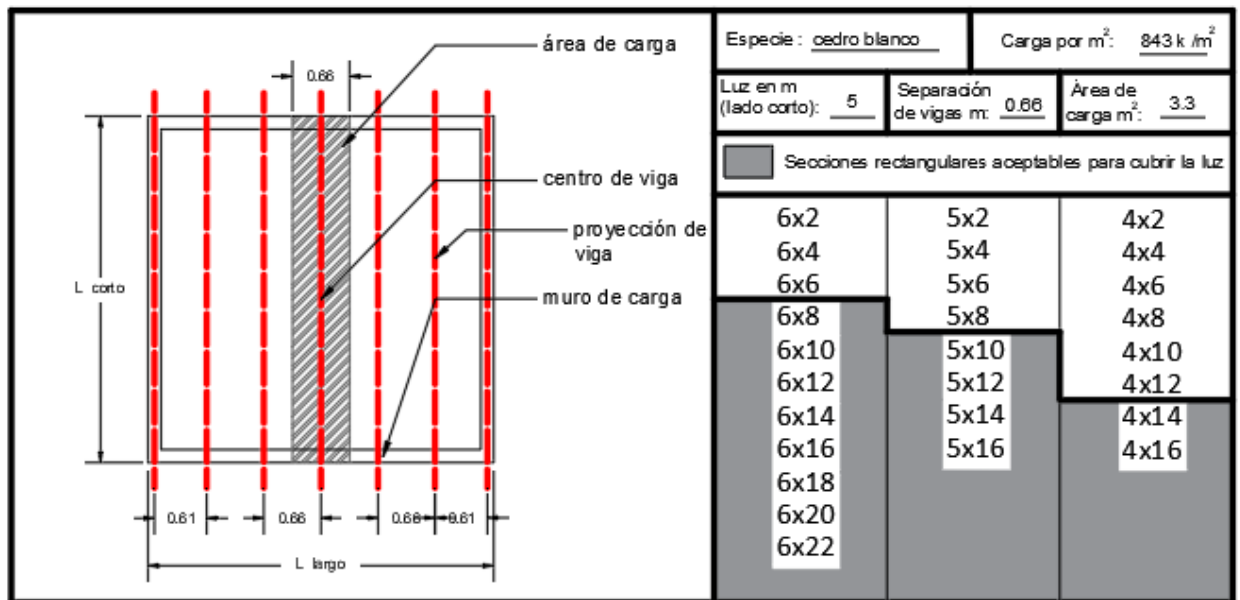


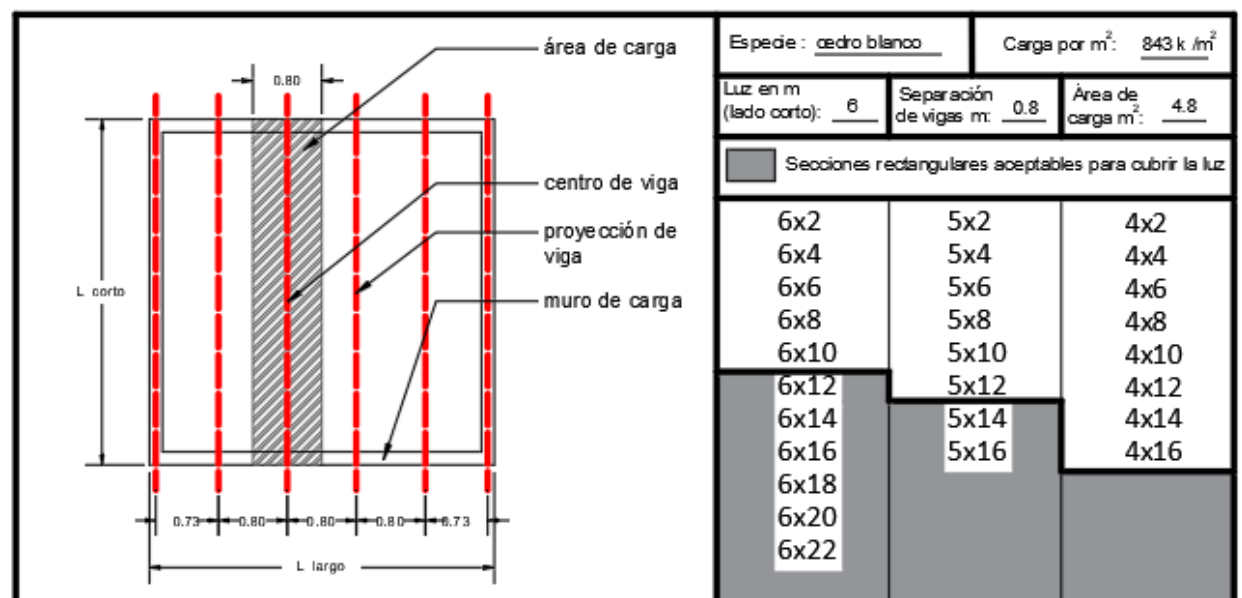
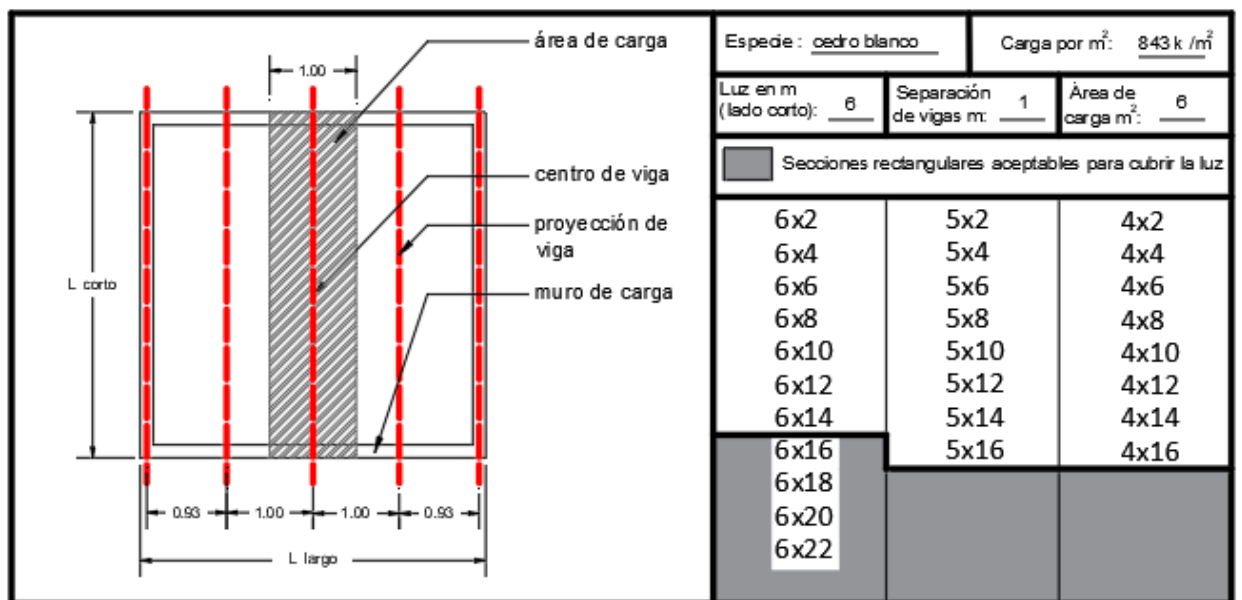
Tablas de cedro blanco sp. para soportar una carga de 843 kg/ m², con una distancia de 4,5,6 m de luz efectiva de la viga laminada.

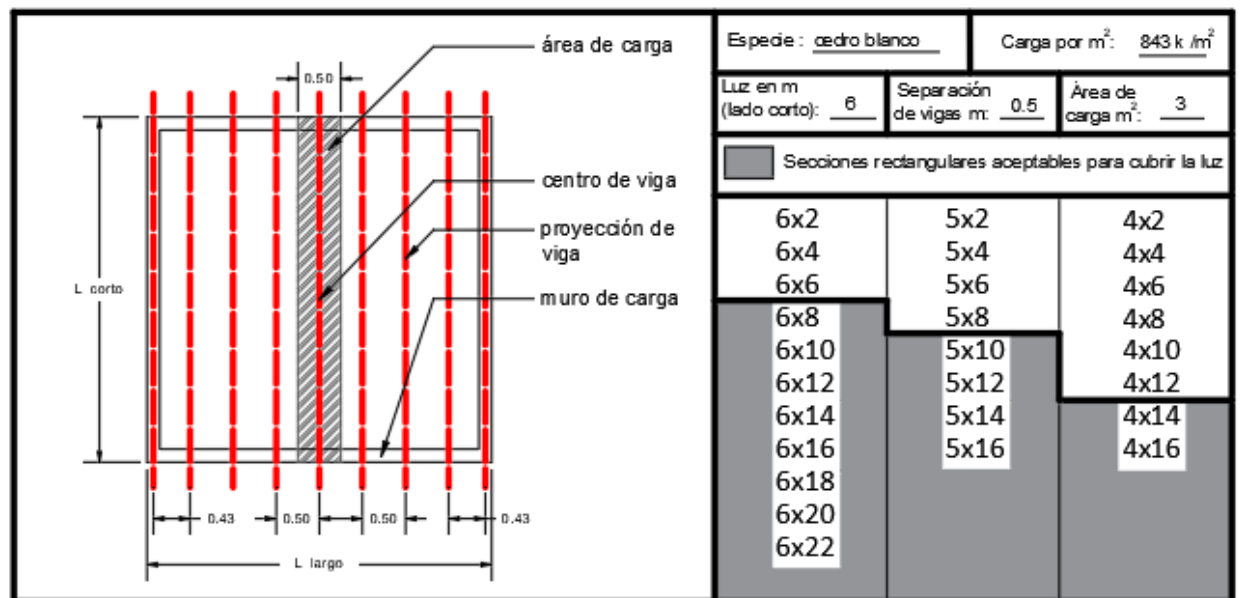
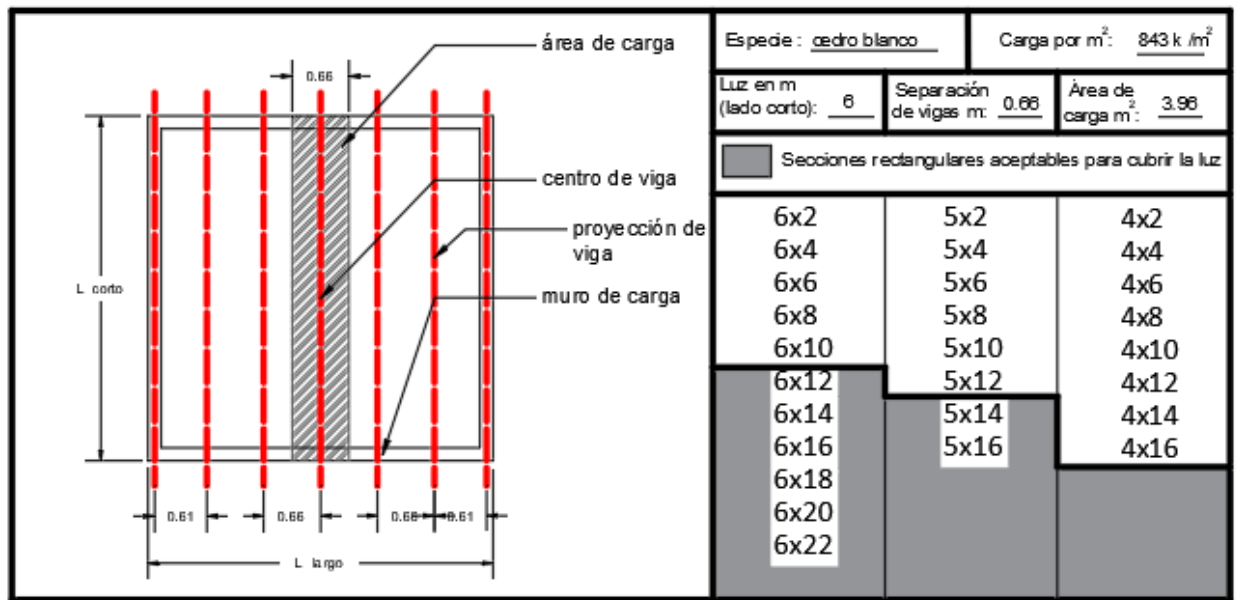












ANÁLISIS DE CARGAS			
TIPO DE CARGA	kg/m ²	2	204
CARGA MUERTA	1.9	194	
CARGA VIVA	0.5	51	
INSTALACIONES	1	102	
PESO DE LOSA	1	102	
ANEXO 1	0	0	
ANEXO 2	0	0	
Total	3.4	351	

DENSIDAD

NOMBRE (NOMBRE IDENTIFICATIVO)

valor	unidad
567	kg/m ³

Dem. de especie

DATOS INICIALES PARA SIMULACIÓN

PINO BLENCO / PINO (PSEUDOTSUGA)
cedro blanco (cupressus lindleyi)

densidad

567 kg/m³
540

DATOS DE LAS PRUEBAS DE INVESTIGACIÓN

número de la especie de investigación

pino (pinus sp)

cedro blanco (cupressus sp)

densidad

567 kg/m³
462 kg/m³

Dimensiones nominales b.d (in)	Dimensiones efectivas b.d (in)	Dimensiones efectivas b.d (cm)	Área de la sección "A" A= b x h (in ²)	Momento de inercia "I" I= b h ³ / 12 (in ⁴)	Módulo de la sección "S" S= b h ² / 6 (in ³)	Peso aproximado densidad kg/m ³
-----------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	---	---	--	---

2x3	1.5x2.5	3.81	6.35	24.19	81.30	25.60	1.372
2x4	1.5x3.5	3.81	8.89	33.87	122.07	50.19	1.920
2x4	1.5x4.5	3.81	11.43	43.55	474.11	82.96	2.469
2x6	1.5x5.5	3.81	13.97	53.23	865.63	123.93	3.018
2x6	1.5x7.5	3.81	19.05	72.58	2194.97	230.44	4.115
2x6	1.5x8.5	3.81	24.13	91.94	4460.83	369.73	5.213
2x12	1.5x11.5	3.81	29.21	111.29	7912.95	541.80	6.310
2x14	1.5x13.5	3.81	34.29	130.64	12801.07	746.64	7.408
3x1	2.5x5	6.35	1.27	8.06	1.08	1.71	0.457
3x1	2.5x1	6.35	2.54	16.13	8.67	6.83	0.915
3x4	2.5x3.5	6.35	8.89	56.45	371.79	83.64	3.201
3x6	2.5x5.5	6.35	13.97	88.71	1442.72	206.55	5.030
3x8	2.5x7.5	6.35	19.05	120.97	3658.28	384.07	6.859
3x10	2.5x8.5	6.35	24.13	153.23	7434.72	612.22	8.688
3x12	2.5x11.5	6.35	29.21	185.48	13188.25	901.00	10.517
3x14	2.5x13.5	6.35	34.29	217.74	21335.11	1244.39	12.346
3x16	2.5x15.5	6.35	39.37	250.00	32229.54	1640.41	14.175
4x1	3.5x5	8.89	1.27	11.29	1.52	2.39	0.640
4x2	3.5x1.5	8.89	3.81	33.87	40.97	21.51	1.920
4x3	3.5x2.5	8.89	6.35	56.45	189.69	59.74	3.201
4x4	3.5x3.5	8.89	8.89	79.03	520.55	110.27	4.481
4x4	3.5x4.5	8.89	11.43	108.27	975.84	159.15	5.914
4x6	3.5x5.5	8.89	13.97	129.81	2019.81	289.16	7.042
4x8	3.5x7.5	8.89	19.05	169.35	5121.60	537.70	9.602
4x10	3.5x8.5	8.89	24.13	214.52	10408.60	862.71	12.163
4x12	3.5x11.5	8.89	29.21	259.68	18463.55	1267.10	14.724
4x14	3.5x13.5	8.89	34.29	304.84	29869.16	1742.15	17.284
4x16	3.5x15.5	8.89	39.37	350.00	45208.15	2296.58	19.845
5x2	4.5x1.5	11.43	3.81	43.55	52.68	27.65	2.469
5x4	4.5x3.5	11.43	8.89	100.61	699.22	150.56	5.761
5x6	4.5x5.5	11.43	13.97	150.68	2556.86	354.56	8.054
5x8	4.5x7.5	11.43	19.05	217.74	6584.91	691.33	10.546
5x10	4.5x9.5	11.43	24.13	275.81	13382.49	1109.20	15.638
5x12	4.5x11.5	11.43	29.21	333.87	23738.85	189.90	22.223
5x14	4.5x13.5	11.43	34.29	391.93	38400.20	2239.91	25.223
5x16	4.5x15.5	11.43	39.37	450.00	58124.77	2952.74	25.515
6x1	5.5x5	13.97	1.27	17.74	2.38	3.76	1.006
6x2	5.5x1.5	13.97	3.81	53.23	64.39	33.80	3.018
6x3	5.5x2.5	13.97	6.35	88.71	298.08	93.88	5.030
6x4	5.5x3.5	13.97	8.89	124.43	617.84	184.01	7.042
6x6	5.5x5.5	13.97	13.97	195.16	3173.98	454.40	11.066
6x8	5.5x7.5	13.97	19.05	266.13	8044.22	844.96	15.089
6x10	5.5x9.5	13.97	24.13	337.10	14556.38	1355.69	19.113
6x12	5.5x11.5	13.97	29.21	408.06	29014.15	2086.59	23.137
6x14	5.5x13.5	13.97	34.29	479.03	46937.25	2737.66	27.161
6x16	5.5x15.5	13.97	39.37	550.00	71041.38	3608.91	31.185
12x18	5.5x17.5	13.97	44.45	620.97	102042.26	4500.13	35.209
12x16	5.5x15.5	13.97	49.53	691.93	145455.60	5711.92	39.233
12x22	5.5x21.5	13.97	54.61	762.90	189597.10	6943.68	43.257
12x24	5.5x23.5	13.97	59.69	833.87	247932.47	8295.61	47.280
14x1	13.5x5	34.29	1.27	43.55	5.85	9.22	2.469
14x2	13.5x1.5	34.29	3.81	130.64	158.04	82.96	7.408
14x3	13.5x2.5	34.29	6.35	217.74	271.46	124.46	12.346
14x4	13.5x3.5	34.29	8.89	304.84	2007.67	451.67	17.284
14x6	13.5x5.5	34.29	13.97	409.03	7790.68	1115.34	27.161
14x8	13.5x7.5	34.29	19.05	509.23	19754.73	2079.99	37.038
14x10	13.5x9.5	34.29	24.13	627.42	40147.47	3327.60	46.915
14x12	13.5x11.5	34.29	29.21	1001.61	71216.55	4816.58	56.791
14x14	13.5x13.5	34.29	34.29	1175.80	115209.61	6719.72	66.668
14x16	13.5x15.5	34.29	39.37	1340.10	174249.10	8658.23	76.545
14x18	13.5x17.5	34.29	44.45	1524.19	250598.28	12191.71	86.422
14x20	13.5x19.5	34.29	49.53	1698.38	347200.20	14020.16	96.298
14x22	13.5x21.5	34.29	54.61	1872.58	465374.70	17043.57	106.175
14x24	13.5x23.5	34.29	59.69	2046.77	607792.43	21061.95	116.052

Dimensiones nominales b.d (in)	Dimensiones efectivas b.d (in)	Dimensiones efectivas b.d (cm)	Área de la sección "A" A= b x h (in ²)	Momento de inercia "I" I= b h ³ / 12 (in ⁴)	Módulo de la sección "S" S= b h ² / 6 (in ³)	Peso aproximado densidad kg/m ³
-----------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	---	---	--	---

16x1	15.5x5	39.37	1.27	50.00	6.72	10.58	2.835
16x2	15.5x1.5	39.37	3.81	150.00	181.45	95.25	8.205
16x3	15.5x2.5	39.37	6.35	250.00	840.05	264.58	14.175
16x4	15.5x3.5	39.37	8.89	350.00	2305.10	518.58	19.845
16x6	15.5x5.5	39.37	13.97	550.00	8946.86	1280.58	31.185
16x8	15.5x7.5	39.37	19.05	750.00	22681.36	2381.25	42.525
16x10	15.5x9.5	39.37	24.13	950.00	46095.25	3820.58	53.865
16x12	15.5x11.5	39.37	29.21	1150.00	81673.15	5588.57	65.205
16x14	15.5x13.5	39.37	34.29	1350.00	132277.70	7715.23	76.545
16x16	15.5x15.5	39.37	39.37	1550.00	200207.51	10170.56	87.885
16x18	15.5x17.5	39.37	44.45	1750.00	288137.29	12966.96	99.225
16x20	15.5x19.5	39.37	49.53	1950.00	398647.60	16097.22	110.565
16x22	15.5x21.5	39.37	54.61	2150.00	53419.10	19688.54	121.905
16x24	15.5x23.5	39.37	59.69	2350.00	697732.42	23378.54	133.245
18x1	17.5x5	44.45	1.27	56.45	7.59	11.95	3.201
18x2	17.5x1.5	44.45	3.81	169.35	204.86	107.54	8.602
18x3	17.5x2.5	44.45	6.35	282.26	948.44	282.72	16.004
18x4	17.5x3.5	44.45	8.89	395.16	2602.53	585.50	22.406
18x6	17.5x5.5	44.45	13.97	620.97	10099.03	1445.82	35.209
18x8	17.5x7.5	44.45	19.05	846.77	25607.99	2688.50	48.012
18x10	17.5x9.5	44.45	24.13	1072.58	52043.02	4133.55	60.815
18x12	17.5x11.5	44.45	29.21	1298.38	92117.75	6320.97	73.628
18x14	17.5x13.5	44.45	34.29	14949.45	140445.14	80422.42	85.882
18x16	17.5x15.5	44.45	39.37	17500.00	226040.76	11482.89	99.225
18x18	17.5x17.5	44.45	44.45	19750.00	325126.29	14693.40	112.028
18x20	17.5x19.5	44.45	49.53	2201.61	450886.00	18174.28	124.911
18x22	17.5x21.5	44.45	54.61	2427.81	603626.50	22029.52	137.634
18x24	17.5x23.5	44.45	59.69	2653.22	787762.41	26395.12	150.438
20x1	19.5x5	49.53	1.27	62.90	8.45	13.31	3.567
20x2	19.5x1.5	49.53	3.81	188.71	228.28	119.83	10.700
20x3	19.5x2.5	49.53	6.35	334.52	1056.84	321.86	17.833
20x4	19.5x3.5	49.53	8.89	440.32	3899.86	622.41	24.965
20x6	19.5x5.5	49.53	13.97	691.93	11253.21	1611.05	39.233
20x8	19.5x7.5	49.53	19.05	943.55	28534.02	2995.76	53.499
20x10	19.5x9.5	49.53	24.13	1195.16	57990.79	4768.53	67.766
20x12	19.5x11.5	49.53	29.21	1446.77	102868.35	7043.38	82.030
20x14	19.5x13.5	49.53	34.29	1698.38	161468.88	9706.26	96.298
20x16	19.5x15.5	49.53	39.37	1950.00	251873.99	12729.22	110.565
20x18	19.5x17.5	49.53	44.45	2201.61	362495.10	16125.25	124.911
20x20	19.5x19.5	49.53	49.53	2453.22	501524.40	20251.34	139.098
20x22	19.5x21.5	49.53	54.61	2704.83	672207.90	24618.49	153.364
20x24	19.5x23.5	49.53	59.69	2956.45	877792.40	29411.71	167.630
22x1	21.5x5	54.61	1.27	69.35	9.32	14.68	3.932
22x2	21.5x1.5	54.61	3.81	200.66	251.69	132.12	11.797
22x3	21.5x2.5	54.61	6.35	346.77	1165.23	367.00	19.622
22x4	21.5x3.5	54.61	8.89	486.48	3197.39	779.32	27.527
22x6	21.5x5.5	54.61	13.97	762.90	12407.38	1796.29	43.257
22x8	21.5x7.5	54.61	19.05	1040.32	24644.34	2488.68	58.985
22x10	21.5x9.5	54.61	24.13	1317.74	43888.27	5299.51	74.716
22x12	21.5x11.5	54.61	29.21	1595.16	71848.94	7765.76	90.445
22x14	21.5x13.5	54.61	34.29	1872.58	103841.97	10107.78	106.175
22x16	21.5x15.5	54.61	39.37	2150.00	14607.16	14607.16	121.905
22x18	21.5x17.5	54.61	44.45	2427.81	207662.30	17983.10	137.634
22x20	21.5x19.5	54.61	49.53	2704.83	552962.80	22248.40	153.364
22x22	21.5x21.5	54.61	54.61	2982.25	741123.20	27443.46	169.094
22x24	21.5x23.5	54.61	59.69	3269.62	981672.40	34842.83	184.823

ANALISIS DE CARGAS POR M² INTERNAS			
TIPO DE CARGA	KN/m²	Kg/m²	
CARGA MUERTA	2	200	
CARGA VIVA	1.7	174	
INSTALACIONES Y PLAFOND	0.46	47	
PESO DE LOSA	2.4	240	
ANEXO 1	0	0	
ANEXO 2	0	0	

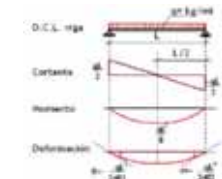
TOTAL	6.56	669	
-------	------	-----	--

valores de viga seleccionada									
nominal	real	bcm	hcm	A	I	S	peso	PASA	
4x12	3.5x11.5	8.89	29.21	259.68	18463.55	1264.19	14.724	SI	

Inf. de diseño de las NTC, madera laminada de coníferas clase F24

		Mpa	kg/ cm²
Flexión	F _{lu}	18.8	190
Tencion paral.fibra	F _{tu}	15.1	150
Compresion paral.fibra	F _{cu}	15.8	160
Compresion perp.fibra	F _{cu}	3.9	40
Cortante paralelo a fibra	F _{vu}	1.38	14
Mod. Elast.promedio	E.50	9820	100000
Mod. Elast.5 percentil	E.05	7900	80000

Valores de madera propuestas de investigación			
nombre especie	Densidad	E de la madera	MOR
cedro blanco prop.	462	27276.13	249.99
pino prop.	567	39028.28	404.48



ANALISIS DE CARGAS POR M² EXTERNAS			
TIPO DE CARGA	KN/m²	Kg/m²	
CARGA MUERTA	0	350	
CARGA VIVA	0	170	
INSTALACIONES Y PLAFOND	0	0	
PESO DE LOSA	0	0	
ANEXO 1	0	0	
ANEXO 2	0	0	

TOTAL	0	520	
-------	---	-----	--

Carga sin el peso de la viga
Cal. de vigas, seccion en in. 4x12

MOMENTO (M)			
Longitud de viga	w/ m	wL²/8	
6	401.40	1806.30	
0	#DIV/0!	#DIV/0!	
0	#DIV/0!	#DIV/0!	
0	#DIV/0!	#DIV/0!	
0	#DIV/0!	#DIV/0!	

CORTANTE (V)			
Longitud de viga	W	W/2	
6	2408.40	1204.20	
0	0.00	0.00	
0	0.00	0.00	
0	0.00	0.00	
0	0.00	0.00	

FLEXION					
Long. Viga cm	W/ cm²	E (kg/cm²)	I (cm⁴)	SWL/7 384 EI	
600	0.2498740	27276.13	18463.55	0.001345	
0	0.0000000	27276.13	18463.55	0.0000000	
0	0.0000000	27276.13	18463.55	0.0000000	
0	0.0000000	27276.13	18463.55	0.0000000	
0	0.0000000	27276.13	18463.55	0.0000000	

Esfuerzo flexionante admisible Fb			
Momento (M)	mod. S	M/S kg/cm²	
1806.30	1264.19	1.43	
#DIV/0!	1264.19	#DIV/0!	
#DIV/0!	1264.19	#DIV/0!	
#DIV/0!	1264.19	#DIV/0!	
#DIV/0!	1264.19	#DIV/0!	

Esfuerzo cortante horizontal fv				
Cortante (V)	bh(A)	Cons. (1.5)	2.5 V/bh	
1204.20	259.6769	1.5	6.96	
0.00	259.6769	1.5	0.00	
0.00	259.6769	1.5	0.00	
0.00	259.6769	1.5	0.00	
0.00	259.6769	1.5	0.00	

LOSAS TRIBUTARIAS

SECCION	Logitud de viga	area m²	W total kn/m² uniformemente repartida	W total kg/m² uniformemente repartida	"w" total kn/m metro lineal	"w" total kg/m metro lineal	deformacion maxima permisible L/960	Peso propio de la viga seleccion	
1 sec int	6	3.60	23.62	2408.40	3.94	401.40	0.017	88.34	1.7
2 sec int	0	0.00	0.00	0.00	#DIV/0!	#DIV/0!	0.000	0.00	0
3 sec int	0	0.00	0.00	0.00	#DIV/0!	#DIV/0!	0.000	0.00	0
4 sec int	0	0.00	0.00	0.00	#DIV/0!	#DIV/0!	0.000	0.00	0
1 sec ext	0	0.00	0.00	0.00	#DIV/0!	#DIV/0!	0.000	0.00	0

suma de pesos									
Viga	peso + pviga	W total kg/m²	"w"total kg/m	Long. De viga					
1	1+pviga	2496.74	416.12	6.00					
2	2+ pviga	0.00	#DIV/0!	0.00					
3	3+pviga	0.00	#DIV/0!	0.00					

Carga considerando el peso de la viga y acciones

Calculo de vigas, seccion en in. 4x12

MOMENTO (M)			
Longitud de viga	w/ m	wL²/8	
6	416.12	1872.58	
0	#DIV/0!	#DIV/0!	
0	#DIV/0!	#DIV/0!	

CORTANTE (V)			
Longitud de viga	W	W/2	
6	2496.74	1248.37	
0	0.00	0.00	
0	0.00	0.00	

FLEXION					
Long. Viga cm	W/ cm²	E (kg/cm²)	I (cm⁴)	SWL/7 384 EI	PASA
600	0.249874	27276.13	18463.55	0.836803	SI
0	0.0000000	39028.28	18463.55	0.0000000	SI
0	0.0000000	0.00	18463.55	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0.0000000	0.00	18463.55	#DIV/0!	#DIV/0!
0	0.0000000	0.00	18463.55	#DIV/0!	#DIV/0!

Esfuerzo de trabajo a flexión			
Momento(M) kg cm	mod. S cm³	M/Fb kg/cm²	M/ MOR kg/cm²
187255.86	1264.19	985.56	998.74
#DIV/0!	1264.19	#DIV/0!	#DIV/0!

Esfuerzo cortante horizontal fv				
Cortante (V)	bh(A)	Cons. (1.5)	2.5 V/bh	
1248.37	259.68	1.5	7.21	
0.00	259.68	1.5	0.00	
0.00	259.68	1.5	0.00	

Esfuerzo flexionante admisible Fb		
	MOR kg/cm2	fac. seguridad
	249.99	0.75
Fb =	187.48	

Esfuerzo cortante admisible fv			
	cortante kg/cm2	fac. seguridad	
	14	0.75	PASA
Fb =	10.50	7.21	SI