

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil



REFUERZO EN VIGAS LAMINADAS DE MADERA CON FIBRAS SINTÉTICAS O VEGETALES

Trabajo de graduación presentado por Luis Francisco Minera García para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil.

Guatemala

2012

**REFUERZO EN VIGAS LAMINADAS DE MADERA CON FIBRAS
SINTÉTICAS O VEGETALES**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil



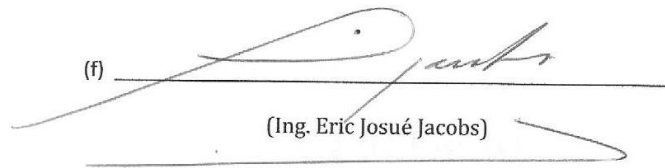
REFUERZO EN VIGAS LAMINADAS DE MADERA CON FIBRAS SINTÉTICAS O VEGETALES

Trabajo de graduación presentado por Luis Francisco Minera García para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil.

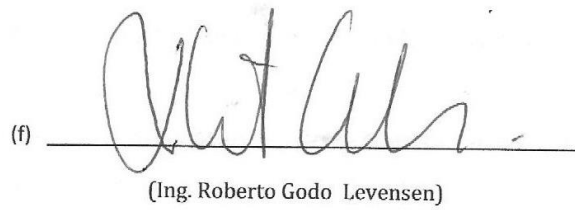
Guatemala

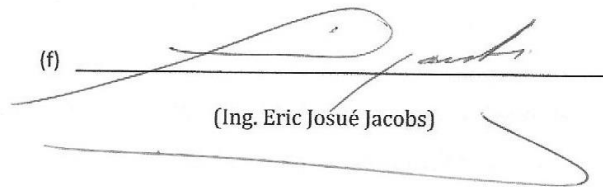
2012

Vo. Bo.:

(f) 
(Ing. Eric Josué Jacobs)

Tribunal Examinador:

(f) 
(Ing. Roberto Godo Levensen)

(f) 
(Ing. Eric Josué Jacobs)

(f) 
(Ing. Luis Alberto Díaz)

Fecha de aprobación: Guatemala, 31 de mayo de 2012.

PREFACIO

Las vigas de madera laminada reforzadas se vuelven un producto de Ingeniería y no simplemente un producto fabricado pegando láminas de madera.

El arte del diseño consiste a aprovechar de la entera sección transversal, el material de refuerzo debe alcanzar su esfuerzo último.

Al obtener una sección reforzada más resistente que una sección tradicional en madera laminada, una opción para el estructuralista es reducirla para obtener una sección de misma resistencia.

Se debe reforzar longitudinalmente ciertas láminas de una viga para crear continuidad en la viga, pero también se debe reforzar localmente parte más débiles tales como nudos o empalmes.

Al momento de obtener materiales compuestos con mayor valor de Modulo de elasticidad en comparación con usar fibras sintéticas por ejemplo. En efecto, en el dominio elástico y en caso del uso de dos materiales diferentes, se puede aplicar la teoría de la sección transformada obteniendo así una sección con mayor inercia dependiendo de la razón modular de los materiales.

Se ha observado que los modos de ruptura ocurren más por corte longitudinal entre láminas, dejando que las rupturas por tensión o compresión ocurran.

Numerosos estudios sobre materiales de refuerzo mostraron la posibilidad de reforzar vigas en madera laminada y sus resultados ilustraron un aumento en la capacidad de flexión y de corte de las vigas. Otros estudios mostraron la posibilidad de reforzar in-situ vigas de madera para aumentar las propiedades mecánicas de las estructuras existentes de madera.

Quiero agradecerle a Dios, por permitirme concluir una etapa más de mi vida, a mi padre, que ha sido un gran apoyo y una gran inspiración, a mi madre y a mis hermanos que con su incondicional amor y paciencia, me han ayudado a sobrepasar todas las pruebas.

Se agradece a la empresa SIKA de Guatemala por proporcionar las bandas de fibra de carbono, el pegamento Sikadur 30 y la asesoría técnica para pegar las bandas en las vigas de madera.

ÍNDICE

PREFACIO	v
LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xii

CAPITULOS

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	2
A. General.....	2
B. Específicos.....	2
III. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	3
A. METODOS DE REFORZAMIENTO	3
B. HISTORIA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA LAMINADA	3
C. CONSTRUCCIÓN DE VIGAS DE MADERA LAMINADA	6
D. CONSTRUCCIÓN DE VIGAS DE MADERA LAMINADA REFORZADAS.....	8
E. ELEMENTOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS POLIMEROS REFORZADOS CON FIBRAS (FRP) ...	9
F. MODOS DE RUPTURA DE LA MADERA	13
1. Modo de ruptura de tensión por flexión	14
2. Modo de ruptura de compresión por flexión	16
3. Modo de ruptura por corte vertical.....	17
4. Modo de ruptura de compresión paralela a la fibra.....	17
5. Modo de ruptura por corte longitudinal.....	18
6. Modo de ruptura en el material de refuerzo.....	20
IV. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DEL PINO CARIBAEA.....	22

A.	Contenido de humedad	22
B.	Prueba de Compresión paralela a la fibra.....	25
C.	Prueba de Compresión perpendicular a la fibra	26
D.	Prueba de Dureza Janka.....	28
E.	Prueba de Corte	30
F.	Prueba de Flexión Estática	31
G.	Cálculos y Discusión.....	33
V.	ENSAYO DE VIGAS DE MADERA LAMINADA SIN REFUERZO	41
A.	Proceso de elaboración de las vigas de madera laminada	41
B.	Método lineal para el cálculo de las vigas de madera laminada sin refuerzo	43
C.	Cálculo de las tres vigas ensayadas.....	44
VI.	ENSAYO DE VIGAS DE MADERA LAMINADA CON REFUERZO	55
A.	Proceso de elaboración de las vigas de madera laminada con refuerzo.....	55
B.	Método de la sección transformada para el cálculo de las vigas de madera laminada con refuerzo.....	59
C.	Cálculo de las tres vigas ensayadas.....	63
VII.	RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS EN LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS.....	76
A.	Valores representativos de los esfuerzos básicos y del contenido de humedad, de la especie de madera de pino caribaea	76
B.	Valores representativos de las vigas de madera sin refuerzo y las vigas de madera con refuerzo de fibra de carbono	77
VIII.	CONCLUSIONES.....	81
IX.	RECOMENDACIONES.....	84
X.	BIBLIOGRAFÍA.....	86
XI.	ANEXOS	87
A.	ANEXO # 1	87
1.	Datos de Ensayo de Flexión Estática	87
2.	Datos de Ensayo de Compresión Paralela a la Fibra	90
3.	Datos de Ensayo de Compresión Perpendicular a la Fibra	95

4.	Datos de Ensayo de Prueba Janka (Dureza Lateral).....	96
5.	Datos de Ensayo de Prueba Janka (Dureza Axial)	97
6.	Datos de Ensayo de Prueba de Corte (Radial)	98
7.	Datos de Ensayo de Prueba de Corte (Tangencial).....	99
B.	ANEXO # 2	100
1.	Valor del coeficiente $k\sigma$ para un percentil de 5%.....	100
2.	Graficas de carga y deformación de cada probeta sometida a flexión	101
C.	ANEXO # 3	108
1.	Propiedades mecánicas y físicas de la lámina de fibra de carbono Sika Carbodur	108

LISTA DE TABLAS

	Pág.	
Tabla 1	Propiedades mecánicas de los tipos de fibras sintéticas	11
Tabla 2	Soluciones estructurales con fibra de carbono	21
Tabla 3	Pesos experimentales obtenidos de cada probeta	24
Tabla 4	Cargas y deformaciones ult. del ensayo de compresión paralela a la fibra	34
Tabla 5	Valores últimos del ensayo de compresión paralela a la fibra	34
Tabla 6	Valores últimos del ensayo de compresión perpendicular a la fibra	35
Tabla 7	Valores últimos del ensayo de dureza Janka axial	35
Tabla 8	Valores últimos del ensayo de dureza Janka lateral	36
Tabla 9	Valores últimos del ensayo de corte radial	36
Tabla 10	Valores últimos del ensayo de corte tangencial	36
Tabla 11	Módulos de elasticidad del ensayo de flexión estática	38
Tabla 12	Valores últimos del MOE del ensayo de flexión estática	38
Tabla 13	Módulos de ruptura del ensayo de flexión estática	39
Tabla 14	Valores últimos del MOR del ensayo de flexión estática	40
Tabla 15	Cargas y deformaciones de viga laminada sin refuerzo No.1	45
Tabla 16	Cargas y deformaciones de viga laminada sin refuerzo No.2	48
Tabla 17	Cargas y deformaciones de viga laminada sin refuerzo No.3	51
Tabla 18	Momento último.	53
Tabla 19	Módulo de ruptura promedio.	53
Tabla 20	Módulo de elasticidad promedio.	53
Tabla 21	Cargas y deformaciones de viga laminada con refuerzo No.1	64
Tabla 22	Cargas y deformaciones de viga laminada con refuerzo No.2	68
Tabla 23	Cargas y deformaciones de viga laminada con refuerzo No.3	72
Tabla 24	Resumen de esfuerzos básicos del pino Caribaea	76
Tabla 25	Módulos de ruptura para las veinte probetas	76
Tabla 26	MOE de vigas sin refuerzo	77
Tabla 27	Carga última de vigas sin refuerzo.	78
Tabla 28	Momento último de vigas sin refuerzo.	79
Tabla 29	Módulo de ruptura de vigas sin refuerzo.	79

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1	Ruptura de tensión por flexión cuando no hay plastificación: Diagramas de esfuerzo-deformación.	15
Figura 2	Ruptura de tensión por flexión cuando hay plastificación: Diagramas de esfuerzo-deformación.	16
Figura 3	Ruptura de compresión por flexión con plastificación: Diagramas de esfuerzo-deformación.	16
Figura 4	Distribución de esfuerzos normales en vigas sin refuerzo	54
Figura 5	Figura de sección compuesta	61
Figura 6	Figura de sección compuesta de la viga con refuerzo No. 1	64
Figura 7	Figura de sección compuesta de la viga con refuerzo No. 2	68
Figura 8	Figura de sección compuesta de la viga con refuerzo No. 3	72

RESUMEN

En el caso de la madera de pino rústico de la especie *Caribaea*, se determinará el contenido de humedad así como las pruebas mecánicas de flexión estática, compresión paralela y perpendicular a la fibra, pruebas de corte y dureza. Todas las pruebas se llevarán bajo los estándares de la (ASTM, American Society for Testing and Materials).

Con base en las pruebas realizadas, se podrá obtener el módulo de ruptura y el módulo de elasticidad que servirá como parámetro de comparación con los ensayos de vigas laminadas.

Se reforzarán vigas de madera laminada con fibras sintéticas o vegetales para que sean productos estructurales de ingeniería, se compararán los módulos de ruptura de las vigas ensayadas solidas con las vigas laminadas.

Luego se compararán los módulos de ruptura de las vigas laminadas sin refuerzo, con las vigas laminadas con refuerzo.

I. INTRODUCCIÓN

La madera es un material que ha estado involucrado en las construcciones civiles desde siglos. Se le ha utilizado no solo como elemento decorativo, sino también como elemento estructural capaz de soportar cargas muertas y vivas. Una particular ventaja de la madera, es que, es menos costosa y menos difícil de transportar que el acero y el concreto.

Alrededor de los últimos 15 años se han realizado estudios exitosos que demuestran la posibilidad de adherir fibras sintéticas o naturales a vigas de madera aumentando la capacidad de las vigas a la flexión. Los compuestos de fibras consisten en polímeros (plásticos) reforzados de carbón, vidrio y/o amarid (Kevlar) que representan una fracción del peso de las vigas de acero, concreto o de madera. Otros estudios demostraron la posibilidad de utilizar fibras vegetales tales como el Bambú, el sisal, el kenaf.

Este proyecto de investigación trata de dar una metodología al reforzamiento de vigas en madera laminada con fibras sintéticas utilizando el método de la sección transformada y abrir las oportunidades de desarrollar productos de sustitución a las vigas en madera laminada tradicionales. Al investigar estas nuevas opciones de desarrollo de elementos estructurales en madera, se pretende reducir la percepción negativa del público guatemalteco hacia el uso de vigas de madera en la construcción en general y poder así competir con las vigas de acero, ya que en el mercado guatemalteco son las más utilizadas y de las cuales solo muy pocas empresas controlan dicho mercado.

II. OBJETIVOS

A. General

Aumentar la resistencia a flexión de vigas de madera laminada a través de fibras sintéticas.

B. Específicos

- Determinar los esfuerzos básicos de la especie de madera de pino Caribaea.
- Determinar experimentalmente el momento último para el caso de vigas laminadas sin refuerzo.
- Determinar experimentalmente el momento último para el caso de vigas laminadas con refuerzo de fibras de carbono.
- Realizar una comparación entre vigas de madera laminada sin refuerzo y vigas con refuerzo sintético para determinar el incremento de la carga última y el momento último.

III. FUNDAMENTO TEÓRICO

A. MÉTODOS DE REFORZAMIENTO

Según el Ing. Ricardo Oviedo¹, *el reforzamiento esta dirigido a incrementar la capacidad de carga y el tiempo de uso de una estructura existente* .Al momento de utilizar reforzamientos es normal que cambie la de formación del elemento, la inercia, el eje neutro y otras propiedades.

Cuando se habla de reforzamiento; el elemento adopta una estructura de sección compuesta, esto quiere decir que hay más de un material en dicho elemento.

B. HISTORIA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA LAMINADA

La madera laminada está conformada por piezas de madera, unidas con pegamento o adhesivo de tal forma que las fibras quedan paralelas al eje de la madera. Es un producto muy utilizable en la ingeniería ya que se pueden controlar los esfuerzos. El tamaño de los elementos se limita por cuestiones de logística y transporte. El uso más frecuente de la madera laminada en el campo de la ingeniería estructural se puede ver en la elaboración de vigas y columnas, frecuentemente combinando flexión y compresión.

¹ Oviedo Sarmiento, Ricardo Ramón, "Métodos de Reforzamiento en Edificios de Concreto Armado", Artículo de la especialización en Ing. Sismorresistente- UNI, p. 2

Muchos años atrás la madera laminada fue utilizada en la elaboración de muebles, artículos para el hogar, etc. Posteriormente se comenzó a utilizar en la construcción civil, en la primera década del siglo XVIII. En la actualidad, constituye un material de relevancia en las estructuras, destacándose en grandes luces, esto hace a este material apto para una amplia gama de aplicaciones.

Una de las primeras estructuras con madera laminada se observó según SOMOZA VEIGA² a comienzos del ciclo XVIII con el Coronel Emy, Director de Fortificaciones de Bayona, idea el sistema que lleva su nombre. Se trata de láminas de madera colocadas horizontalmente y ensambladas por bulones y bridas metálicas. Un ejemplo de este tipo de fabricación existe todavía en la Estación de Dieppe en Francia. Sistemas mixtos fueron realizados al mismo tiempo, como la estructura del picadero de Libourne, que asocia la triangulación y la laminación.

Un último paso quedaba por franquear, y este honor le corresponde a Otto Hetzer, maestro carpintero en Ewimar (Suiza) que tuvo la genial idea, hacia 1906, retomando el sistema Emy, y gracias a los progresos de la química moderna, de sustituir los bulones y bridas metálicas por colas tipo caseína, obteniendo así una sección prácticamente homogénea. La MADERA LAMINADA había sido creada en su totalidad.

Según FAO³ en Guatemala las especies de pino que más se dan son *Pinus oocarpa* y el *Pinus caribaea* por lo cual en esta tesis se experimentará con Madera de *Pinus Caribaea*.

² SOMOZA VEIGA, Luis, "LA MADERA LAMINADA ENCOLADA: HISTORIA y DEFINICION", Artículo de la E.T.S. de Arquitectura de La Coruña, p. 41

³ Fuente: Información tomada de la página oficial de Food and Agriculture Organization of the United Nations, "INFORME DE UNA EXPEDICION A MEXICO Y AMERICA CENTRAL PARA OBTENER SEMILLAS DE PINOS TROPICALES", <http://www.fao.org/docrep/006/d4959s/D4959S02.htm>

En Guatemala la elaboración de vigas en madera laminada se limita a vigas para techo dejando la potencialidad de construir diferentes sistemas estructurales, como por ejemplo entresijos o marcos rígidos para casas y edificios. Según Ortiz Pineda⁴ *en el 2,010 se desarrolló un estudio sobre el uso de diámetros menores con énfasis a sus propiedades físicas y mecánicas y su uso en la fabricación de elementos estructurales. El estudio demostró que es factible usar madera de menor calidad en zonas menos solicitadas a la flexión.*

La madera laminada es excepcionalmente ventajosa ya que se pueden elaborar elementos más largos, más peraltados y más anchos que elementos realizados con madera sólida. Otras ventajas que posee es que tiene mayor resistencia y es más liviana que la madera sólida.

Según Demkoff,⁵ *la madera laminada a igualdad de peso es cuatro veces más resistente que el acero*, aparte de esa característica se puede apreciar que el fabricar vigas de madera conlleva bajo consumo de energía en su elaboración y utilización que las vigas de acero.

Una de las cualidades mecánicas más importantes de la madera laminada es su resiliencia; ya que actúa como un fenómeno de distribución de cargas que soportan las vigas o las columnas, permitiendo absorber considerables esfuerzos por períodos de tiempo sin llegar a superar el límite elástico. Este factor es un beneficio grande en luces grandes o en riesgos sísmicos, debido a que la periodicidad de los miembros laminados no se acumula en forma simple a las cargas permanentes, a las que superan normalmente en valor absoluto.

⁴ M. E. Ortiz Pineda. "Aptitud de la madera de diámetros menores de *Pinus maximinoi* para la fabricación de secciones compuestas como elemento de construcción". 077-2009 (2010).

⁵ Demkoff, Miguel L.V., "VIGAS LAMINADAS ESTRUCTURALES DE MADERA, SU FABRICACIÓN Y EMPLEO", *Concordia, Octubre de 2008*, p. v-4

Una desventaja de la madera y en caso específico de la madera lámina es la deformación que se va generando a largo plazo por cargas permanentes (fluencia) que se interpreta como un cambio gradual en la geometría del miembro. Esta desventaja se puede evitar a) al usar láminas de madera más gruesas aumentando la sección transversal, o dicho de otra forma se aumenta la inercia o b) al colocar elementos estructurales agregados a las láminas, para que soporte la combinación de manera más eficiente a las cargas. Para la opción b, una de las formas de hacerlo es utilizar grado de madera diferente, y otra forma de hacerlo es agregar refuerzo que puede ser otro material distinto a la madera para transformar la sección en una sección compuesta.

Otra característica importante de la madera laminada es que es más resistente al fuego que la madera sólida según Demkoff⁶ las experiencias realizadas en laboratorio y las observaciones efectuadas en siniestros han demostrado que la pérdida de sección en estas vigas es del orden de 1 cm por cuarto de hora sin deformaciones importantes durante los primeros 30 o 60 minutos.

Se debe señalar que al momento de utilizar elementos estructurales de metal, estos pueden colapsar por acción del calor, ya que el metal fluye y se dilata mucho más que la madera ocasionando en los primeros minutos grandes esfuerzos en los apoyos de tal manera que provoquen el colapso del sistema estructural de cualquier edificación.

C. CONSTRUCCIÓN DE VIGAS DE MADERA LAMINADA

La elaboración de vigas de madera laminada es un procedimiento teóricamente sencillo. Que básicamente consiste en elaborar miembros sólidos de resistencia aumentada, compuestos por tablas de espesor reducido unidas con adhesivo de tal forma que no se separe el trabajo de cada tabla. Para ello es muy importante utilizar

⁶ Demkoff, Miguel L.V., "VIGAS LAMINADAS ESTRUCTURALES DE MADERA, SU FABRICACIÓN Y EMPLEO", *Concordia, Octubre de 2008*, p. v-4

madera seca, aplicar a la estructura de madera laminada presión correspondiente con un adhesivo apropiado.

En la práctica la elaboración de vigas de madera laminada es un procedimiento riguroso y de fino cuidado, ya que en el lugar donde se elaboran las vigas es necesario que se controle la temperatura y la humedad. De lo contrario esto puede afectar la resistencia deseada y que el adhesivo no haga la unión debida entre láminas. Es muy importante según Demkoff⁷ *que el porcentaje de humedad este entre un 12% y un 17%, con diferencias no mayores a 4% entre tablas y no mayor a 2% entre sectores de una misma tabla.*

Es de vital importancia emplear un adhesivo para uso estructural. Según Demkoff⁸ *por el momento los únicos adecuados son los adhesivos de urea formaldehído, urea resorcinol y urea melamina, todos de dos componentes y de curado en frío.* Se debe evitar de forma total los adhesivos vinílicos que se emplean mucho en carpintería, debido a que no resisten el mantener unidos a los elementos estructurales.

Con respecto al prensado de las láminas de madera es muy importante que se mantenga la presión requerida hasta que finalice completamente el secado del adhesivo. El lapso de tiempo del prensado varía según el tipo de adhesivo, la hidrometría ambiental y temperatura.

La presión aplicada es en cualquier parte un punto crítico, por tanto es importante que la presión sea constante en todo el elemento estructural, observando la distribución homogénea de la presión en toda la superficie de las láminas. Según Demkoff⁹ *la temperatura normal del taller debe ser de 15º C. Un error frecuente es*

⁷ Demkoff, Miguel L.V., "VIGAS LAMINADAS ESTRUCTURALES DE MADERA, SU FABRICACIÓN Y EMPLEO", *Concordia, Octubre de 2008*, p. v-2

⁸ *Ibid.*, p. v-2

⁹ Demkoff, Miguel L.V., "VIGAS LAMINADAS ESTRUCTURALES DE MADERA, SU FABRICACIÓN Y EMPLEO", *Concordia, Octubre de 2008*, p. v-3

separar demasiado las prensas, lo que se traduce en una menor capacidad para ejercer presión global, y acarrea una segunda consecuencia muy negativa que se traduce en presiones localizadas en forma intermitente. El resultado final es una baja resistencia general de las vigas, agravado por la de laminación a través del tiempo.

Después de la presión aplicada a las láminas, se deben evitar golpes y flexiones inadecuadas durante una semana, hasta llegar a la estabilización higrométrica interna de las láminas pegadas y la casi definitiva resistencia del pegado.

Luego del proceso de secado de las láminas de madera, de la aplicación del adhesivo y de la presión en las caras de las láminas llega la etapa del cepillado de la viga laminada. Entre los procedimientos finales para hacer una viga laminada de madera se puede colocar barniz o cubrientes.

D.CONSTRUCCIÓN DE VIGAS DE MADERA LAMINADA REFORZADAS

Las técnicas de rehabilitación y de reparación de las estructuras actuales han sido desafíos de suma importancia en la Ingeniería Civil. La principal razón para reforzar estructuras son que las mismas puedan soportar cargas más elevadas de esto depende el aumento de la resistencia, la eliminación de ruptura prematura, la restauración de una capacidad de carga perdida por corrosión u otros tipos de degradación. Diferentes técnicas han sido desarrolladas para rehabilitar estructuras podemos ver por ejemplo el debilitamiento local para cambiar el modo de falla, control pasivo o activo, mejorar la configuración de la estructura, disminuir la masa reactiva. Se han reforzado vigas de concreto con placas de acero y epoxi para aumentar la flexión y el corte, pero el problema de usar placas metálicas es la corrosión del acero que va debilitando el refuerzo de la viga. Para eliminar el problema de la corrosión, las placas metálicas fueron reemplazadas por el uso de Polímeros Reforzados con Fibras (PRF) o Fibre

Reinforced Polymer (FRP) como es conocido en inglés. El uso de éstos materiales compuestos es bien conocido en países desarrollados como Canadá, Japón, Estados Unidos y Europa en donde se les ha utilizado inclusive en sustitución del refuerzo del acero que va dentro del concreto y no solo como refuerzo externo.

E. ELEMENTOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS (FRP)

Los polímeros reforzados con fibras (FRP) son materiales que están constituidos por fibras, una matriz y adhesivos. Las fibras son las responsables de proporcionar propiedades estructurales al material compuesto ya que la resistencia y rigidez es mucho mayor que la de la matriz. Las fibras utilizadas en el refuerzo, son fibras pequeñas, y continuas y con una dirección paralela al eje longitudinal del elemento. Los FRP no son susceptibles de ataques electroquímicos como es el caso del acero, su elaboración y pegado es más fácil que el de las placas de acero.

Hay tres tipos de fibras que predominan en la utilización de polímeros, las cuales son:

- Fibra de vidrio (GFRP)
- Fibra de aramida (AFRP)
- Fibra de carbono (CFRP)

Las fibras de vidrio (GFRP) tienen como principal ventaja su bajo costo en comparación de las demás fibras, pero sin embargo son menos resistentes que otras fibras. Hay en el mercado tres clases de fibra de vidrio que son: E, S y AR. Las clases de fibra de vidrio se diferencian entre sí en su resistencia mecánica.

Las fibras de aramida (AFRP) tienen como principal ventaja su buen desempeño ante cargas repetitivas y también poseen alta dureza. Estas fibras tienen una estructura

anisotrópica (mayor resistencia y módulo de elasticidad en el sentido longitudinal del miembro), tiene una respuesta elástica lineal cuando se les somete a tensión y tiene un desempeño no lineal cuando actúan en compresión. La fibra marca Kevlar es la fibra aramida más conocida en el mercado.

Las fibras de carbono (CFRP) son las más conocidas y utilizadas en el mercado, esto es debido a que presentan mejores propiedades mecánicas en comparación con las fibras mencionadas. Las fibras de carbono son elaboradas con polímeros tipo PITCH o PAN.

Las fibras de carbono que están hechas de polímeros PITCH están hechas de petróleo refinado o brea, estas fibras poseen una gran resistencia y un gran módulo de elasticidad.

Las fibras de carbono que están hechas de polímeros PAN están hechas de poliacrilonitrilo, estas fibras poseen una gran resistencia y un gran módulo de elasticidad.

La tabla que se presenta a continuación muestra las propiedades mecánicas de los tipos de fibras mencionados en los párrafos anteriores.

Tabla 1

Material	Modulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Deformación última a la tensión (%)
Carbono			
Alta resistencia	215-235	3500-4800	1,4-2,0
Ultra alta resistencia	215-235	3500-6000	1,5-2,3
Alto módulo	350-500	2500-3100	0,5-0,9
Ultra alto módulo	500-700	2100-2400	0,2-0,4
Vidrio			
E	70	1900-3000	3,0-4,5
S	85-90	3500-4800	4,5-5,5
Aramida			
Bajo módulo	70-80	3500-4100	4,3-5,0
Alto módulo	115-130	3500-4000	2,5-3,5

*Fuente de datos proporcionados por la Fédération Internationale du Béton FIB, Externally bonded FRP¹⁰

La función de la matriz de la FRP es principalmente proteger a las fibras contra la corrosión ambiental y abrasión, también se encarga de mantener las fibras unidas y distribuir las cargas entre ellas. La matriz se puede dividir en dos clases que son: Termoendurecible o Termoplástica.

Los materiales termoendurecibles son materiales que en su forma natural son suaves pero al momento de recibir calor se endurecen; este proceso no es reversible. Por otra parte, los materiales termoplásticos tienen un comportamiento líquido cuando reciben calor. La matriz que se utiliza tiene una influencia bastante grande con respecto a las propiedades mecánicas del material, tal es el caso del módulo de elasticidad, la resistencia transversal, el corte y la resistencia a la compresión.

Los tipos de matriz más comunes en el mercado son el poliéster, el viniléster y las resinas epóxicas. Este tipo de polímeros son termoendurecibles, que ofrecen una gran resistencia química y de fácil procesamiento. De estas tres matrices las resinas

¹⁰ Fédération Internationale du Béton FIB, Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, reporte, julio de 2001.

epóxicas ofrecen mejores propiedades mecánicas y una durabilidad excepcional. Por el otro lado, el poliéster y vinilíster son más económicos.

La función de los adhesivos es pegar la FRP a la superficie que reforzará, ya sea concreto madera u otro material. Esto con el hecho de que se pueda dar una transferencia apropiada de las carga por cortante entre el elemento estructural y las FRP y de esta forma puedan actuar como una sección compuesta. Es muy común que los adhesivos sean de una mezcla de resina epóxica con un endurecedor.

Este ensayo tiene como intención desarrollar un modelo analítico unidireccional que permita reforzar estructuras de madera laminada y alcanzar la resistencia última por tensión o compresión o por flexión.

Es frecuente que en miembros de madera se aumente la sección transversal del miembro sin refuerzo para resistir a la flexión y al corte longitudinal. Es también frecuente emplear elementos estructurales de la unión de láminas de madera pegadas con mayor grosor o reforzar localmente con láminas de madera de otras especies más resistentes. Estos métodos sirven para obtener mayor capacidad estructural o para disminuir el tamaño de los elementos requeridos y por ende disminuir el costo de los materiales.

El estudio de FRP acarrea complicaciones a temas relacionados con la deflexión, la ductilidad, la contracción, la compatibilidad con el concreto y el acero, el comportamiento a largo plazo bajo exposición a la luz ultra violeta, la humedad y los ataques químicos. Para ayudar en la resolución de estos problemas, se debe desarrollar una metodología de diseño así como de estándares para que los ensayos se puedan adaptar a las propiedades de las FRP para determinar secciones transversales más eficientes desde el punto de vista de la resistencia y de las deformaciones.

F. MODOS DE RUPTURA DE LA MADERA

Es esencial la identificación de los modos de ruptura tanto para el diseño como para la experimentación. Hay diferentes modos de ruptura con base en las propiedades del material y la configuración de las cargas.

La heterogeneidad de la madera con respecto a su origen biológico, es una limitante para hacer uso de ella en la industria. Disminuir la heterogeneidad de las propiedades mecánicas antes de utilizar la madera es un proceso delicado en la construcción y sobre todo si se va a utilizar para fungir una función estructural. La madera para fin estructural implica un proceso de clasificación y selección y esto empieza al momento de obtenerla, ya que debe tener sus fibras lo más paralelo posible al eje longitudinal, luego se debe hacer una medición o estimación de la rigidez pieza por pieza, expresada a través de su módulo de elasticidad.

Alrededor de tres décadas atrás se tienen en el mercado máquinas para clasificar la madera estructural. Esta máquina proporciona una correlación entre el módulo de elasticidad y la resistencia (módulo de ruptura) en elementos de madera. Estas máquinas tienen la capacidad de calcular la relación de esfuerzo y deformación flectando los elementos mediante rodillos a medida que se desplazan en forma longitudinal. Dentro de este tipo de máquinas las más comerciales son: High Capacity Lumber Tester (HCLT), Stress-O-Matic (SOM), Computermatic, TRU Timber Grader.

En situaciones de madera laminada el proceso es aún más complejo ya que al haber hecho los pasos anteriores es necesario que las láminas estén secas ya que si no lo están el adhesivo que se coloca de lámina a lámina no llegara a pegarlas. Teniendo en cuenta estos pasos es momento de abordar los modos de ruptura que se ven afectados por la presencia de nudos y las imperfecciones que posee la madera. Se deben tomar en

cuenta estos factores al momento de diseñar e introducir factores de reducción de la resistencia de la madera.

1. Modo de ruptura de tensión por flexión. Es el modo de ruptura más frecuente en miembros de madera. Este tipo de ruptura es más frágil, debido a que la madera no tiene un comportamiento plástico a la tensión. Por tanto cuando se somete a carga se comienzan a generar grietas longitudinales paralelas a la fibra provocando la falla del miembro.

El estado límite de tensión en la madera es alcanzado al momento de que el esfuerzo máximo de tensión excede su límite de tensión. Se puede determinar que la viga ha alcanzado su estado límite cuando fallan las fibras extremas por tensión.

La tensión que se obtiene en el cálculo teórico que debe resistir la estructura de madera debe ser inferior a la tensión que debe ser capaz de resistir la estructura de madera. La tensión que es capaz de soportar realmente el miembro estructural se obtiene mediante ensayos en los que se van obteniendo una serie de esfuerzos en los cuales ciertos miembros testigos de igual dimensiones y propiedades mecánicas son sometidos al momento de llegar a la falla por tensión, luego se verifican los esfuerzos de falla para todas las vigas testigo que fueron sometidas a los ensayos y se realiza un promedio para estimar el esfuerzo máximo de falla por tensión a la que una viga puede soportar.

Hay dos formas de ruptura de tensión por flexión según el grado de plastificación en la zona comprimida de la madera.

a. Ruptura de la madera en la zona de tensión, esto ocurre cuando la sección transversal del miembro está en un estado lineal elástico. Entonces las fibras extremas de la zona en tensión alcanza su límite a la tensión, aun cuando la zona comprimida está

todavía en su rango lineal elástico. Este tipo de ruptura pasa en miembros estructurales de madera cuya resistencia a la tensión es menor que su resistencia a la compresión. La ruptura es denominada frágil.

b. Ruptura de la madera cuando la sección transversal se encuentra en un estado elástico-plástico. Esto pasa al momento de que los esfuerzos en las fibras extremas del elemento estructural están en la zona de tensión y alcanzan su límite de tensión después de una cierta plastificación en la zona comprimida, sin que la zona de compresión haya alcanzado su deformación específica última por compresión. No obstante aunque haya una cierta ductilidad en el comportamiento del miembro estructural de madera, las fibras fallan por tensión haciendo que el modo de ruptura sea frágil.

Figura 1: Ruptura de tensión por flexión cuando no hay plastificación: Diagramas de esfuerzo-deformación.

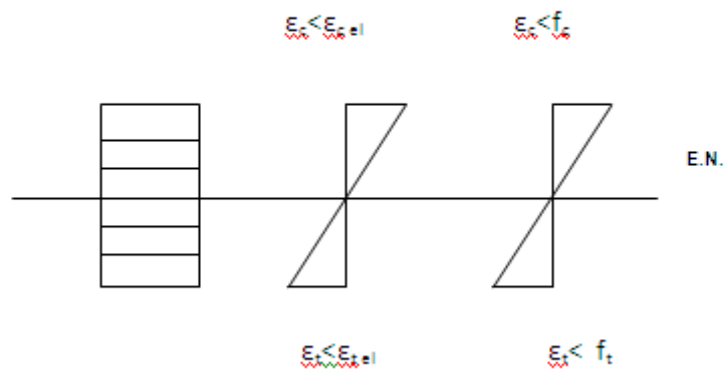
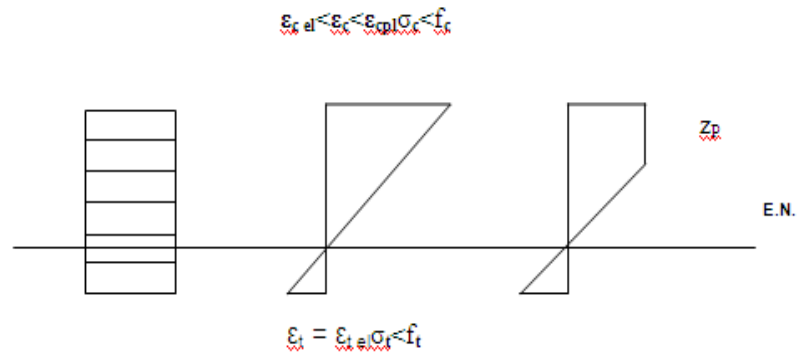
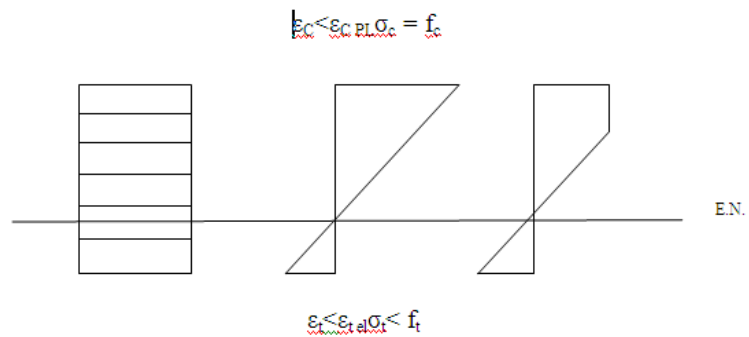


Figura 2: Ruptura de tensión por flexión cuando hay plastificación: Diagramas de esfuerzo-deformación.



2. Modo de ruptura de compresión por flexión. Cuando el estado último de compresión ha sido alcanzado, en donde el esfuerzo máximo de compresión sobrepasa el límite último de compresión. Este tipo de ruptura por compresión ocurre antes de la ruptura por tensión. Por ejemplo en el caso de miembros estructurales de madera demasiado reforzados en la zona de tensión. El comportamiento del miembro es dúctil debido a la deformación plástica en la zona comprimida.

Figura 3: Ruptura de compresión por flexión con plastificación: Diagramas de esfuerzo-deformación.



3. Modo de ruptura por corte vertical. Entre los modos de ruptura más frecuentes se puede mencionar al que es producido por corte vertical. Al momento de reforzar un miembro estructural de madera, tanto en tensión como en compresión por flexión, ocurren rupturas por corte vertical. Este fenómeno se da cuando el esfuerzo de corte excede el límite por corte de la madera. La ruptura es abrupta conforme las grietas se propagan longitudinalmente. En el rango elástico, la distribución de los esfuerzos de corte es parabólica con un máximo en el centroide de la sección, y cero en las fibras extremas.

Se puede definir el esfuerzo cortante en una sección rectangular de la siguiente manera:

$$\tau_v = \frac{3V}{2bh}$$

Ecuación 1

Fórmula obtenida del Libro de James Gere, 2,004¹¹

Dónde:

τ_v = esfuerzo cortante vertical (N/mm²)

V = Fuerza cortante (kN)

b = ancho de la viga (mm)

h = peralte de la viga (mm)

4. Modo de ruptura de compresión paralela a la fibra. Con el caso de la compresión paralela a las fibras, se destaca un pandeo de una fila de fibras como consecuencia del esfuerzo paralelo a las fibras. Se puede contemplar la existencia de

¹¹ Gere, James. 2,004. *Mecánica de Materiales*. Universidad de Stanford. Sexta Edición. Editorial Thomson. 339 p.

una inestabilidad local, debida al corte a lo largo de un plano inclinado, donde es posible ver el diferente modo de falla de la madera temprana de la madera tardía.

El aplastamiento es causado por el esfuerzo de compresión perpendicular al grano del miembro estructural de madera. Es en ese momento que se debe controlar al miembro estructural de madera cuando este apoyado en los extremos o cuando soporte carga concentrada.

El controlar al miembro de madera representa multiplicar un esfuerzo admisible de aplastamiento por el área de apoyo. Se debe aclarar que cuando el área de aplastamiento es reducida, se produce un esfuerzo cercano al valor límite por compresión perpendicular al grano provocando un aplastamiento en el borde de la sección del miembro de madera. Esto no quiere decir que sea un nivel inseguro de resistencia, pero por estética quedaría el miembro de madera mal visto. Por esta causa, en ciertas situaciones es mejor aumentar el área de apoyo y reducir el nivel de aplastamiento.

5. Modo de ruptura por corte longitudinal. La falla por corte vertical es una tendencia que existe en toda viga. No obstante, es muy probable que una viga falle debido a la tendencia de sus fibras a deslizarse en una dirección longitudinal, dicho fenómeno es conocido como cortante horizontal. Los esfuerzos por corte longitudinal no son distribuidos uniformemente en toda la sección transversal del miembro de madera.

Se puede definir el esfuerzo cortante longitudinal en una sección rectangular de la siguiente manera:

$$\tau_L = \frac{VQ_E}{Ib}$$

Ecuación 2

Formula obtenida del Libro de James Gere, 2,004¹²

Dónde:

τ_L = esfuerzo cortante longitudinal (N/mm²)

V = Fuerza cortante (kN)

b = ancho de la viga (mm)

I = Momento de inercia (mm⁴)

Q_E = Momento estático de la viga o Primer Momento (mm³)

Asumiendo el caso de un miembro es rectangular, el esfuerzo cortante horizontal es cero en las fibras extremas del miembro y tiene un valor máximo en el plano neutro (eje neutro) donde el valor del Primer Momento es:

$$Q_{h/2} = b \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{h}{4} = \frac{bh^2}{8}$$

$$I = \frac{1}{12}bh^3$$

$$\tau_L = \frac{VQ_E}{Ib} = \frac{3V}{2hb}$$

¹² Gere, James. 2,004. *Mecánica de Materiales*. Universidad de Stanford. Sexta Edición. Editorial Thomson. 338 p.

Nota: Condición para controlar los esfuerzos cortantes longitudinales.

Cabe entender que la fórmula para el corte longitudinal es aplicada a secciones de miembros rectangulares. La desventaja de la madera sólida aserrada es que tiene ciertas limitaciones estructurales, siendo una de las más notables su baja capacidad al esfuerzo cortante longitudinal. La resistencia de la madera al cortante longitudinal es relativamente baja, por lo que las vigas de claro corto con cargas altas deben revisarse siempre bajo este concepto. Ya que el esfuerzo cortante longitudinal es muy bajo, las vigas con grandes cargas son comúnmente muy críticas en los límites del esfuerzo cortante: En el caso de las vigas en madera laminada encolada lo que debe sobrepasar la limitación del corte longitudinal es escoger un adhesivo cuya adherencia (esfuerzo cortante) sea mayor que el esfuerzo cortante longitudinal de la madera.

6. Modo de ruptura en el material de refuerzo. Se debe buscar materiales para el refuerzo que soporten esfuerzos más grandes que los de la madera debido a la diferencia entre los módulos de elasticidad. En la práctica la madera se puede reforzar con bandas de acero adheridas externamente o con fibras, en el caso de las fibras de carbón comparadas a las tiras de acero se pueden mencionar los siguientes puntos:

Tabla 2

Criterio	Refuerzo con Sika Carbodur	Refuerzo con Bandas de Acero
Peso propio	Bajo	Alto
Resistencia a la tracción	Muy alta	Alta
Espesor	Muy bajo	Bajo
Corrosión	Ninguna	Sí
Longitud de las bandas	Cualquiera	Limitada
Manejo	Flexible, fácil	Difícil, rígido
Capacidad de carga	En dirección longitudinal únicamente	En cualquier dirección
Cruces	Fácil	Complejo
Comportamiento a la fatiga	Sobresaliente	Adecuado
Costo de materiales	Alto	Bajo
Costo de instalación	Bajo	Alto
Aplicación	Sin herramientas	Con equipos de elevación y elementos de fijación

*Fuente de datos proporcionados por Elementa Soluciones Estructurales con Fibra de Carbono¹³

En el rango elástico, los esfuerzos son directamente proporcionales al módulo de elasticidad y a las deformaciones unitarias. Cuando dos materiales tienen la misma deformación específica, para que haya una diferencia entre los esfuerzos, los mismos deben tener módulos de elasticidad diferentes (Ley de Hooke).

El material más rígido atrae más esfuerzos, por lo que el refuerzo debe alcanzar el esfuerzo de estado último antes que el de la madera. En efecto, una ruptura dúctil del refuerzo es preferible a una ruptura frágil del mismo.

¹³Elementa Soluciones Estructurales con Fibra de Carbono. Página Web: <http://www.elese.cl/servicios/conocimiento/refuerzos-estruct-con-frp.html>

IV. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DEL PINO CARIBAEA

A. Contenido de humedad

La madera es higroscópica (exhibe afinidad por el agua) y puede absorber, ya sea agua líquida (si está en contacto por ella) o en forma de vapor (por la atmósfera donde está). Es esencial saber el contenido de humedad de la madera que se va a utilizar en la fabricación de vigas, ya que dicha humedad afecta las propiedades mecánicas del material haciendo que se disminuya el modulo de elasticidad o que el pegado de las piezas o láminas no sea el óptimo.

El contenido de humedad es el peso del agua que esta contenida en la madera con relación al peso seco de la misma, dicho valor es expresado en porcentaje. La ecuación para determinar el contenido de humedad es la siguiente:

$$CONTENIDO DE HUMEDAD (CH) = \frac{PESO\ húmedo - PESO\ seco}{PESO_{seco}} * 100\%$$

Ecuación 3

Ecuación obtenida de la Tesis de Luis Gerardo Bonilla, 2,007¹⁴

¹⁴ Bonilla, Luis Gerardo. 2,007. Determinación de las principales propiedades físicas y mecánicas de lamadera de *Cordia dodecandra* (Siricote), *Mastichodendron capiri var. Tempisque* (Tempisque), *Bucida buceras* (Pucte), *Swartzia cubensis* (Llora-sangre), y *Astronium graveolens* (Jobillo). Trabajo de Graduación Licenciatura en Forestal. Guatemala. Universidad del Valle de Guatemala. 7 p.

Para estimar el peso húmedo, se emplearon 5 probetas de 2" x 2" x 2". Las cuales fueron pesadas en una balanza con capacidad máxima de 1,000 gr.

Foto 2-1

Probeta que se utilizó para obtener el contenido de humedad



Al obtener los datos de los pesos húmedos, se colocaron las probetas en un horno a 100°C alrededor de 24 hrs., en bandejas de aluminio ventiladas. Luego del secado se procedió a pesar las probetas para obtener el peso seco.

Foto 2

Horno donde se secaron las probetas para obtener el peso seco



Tabla 3

Pesos experimentales obtenidos de cada probeta.

Probeta	PESO HÚMEDO	PESO SECO	CH
1	54.80	49.80	10%
2	55.90	50.10	12%
3	57.10	51.30	11%
4	57.40	49.70	16%
5	52.70	50.40	7%
	PROMEDIO:		11%

B. Prueba de Compresión paralela a la fibra

Para este tipo de prueba se han utilizado veinte probetas de dimensiones de 2" x 2" x 8" a estas probetas se les aplicó una carga paralela al el eje axial, hasta que la pieza de madera llegara al momento de la falla. La prueba se efectuó en una compresora hidráulica marca Versa Tester Soiltest, Número de Serie 153. Cuando se realizó la prueba se anotaron las cargas, las deformaciones y las formas de la falla. Para las deformaciones se utilizó un deformímetro 1C-8 con una carrera de 1".

Foto 3

Probeta que se utilizó para obtener la compresión paralela a la fibra



Foto 4

Máquina y deformímetro para el ensayo de compresión paralela a la fibra



C. Prueba de Compresión perpendicular a la fibra

Para este tipo de prueba se han utilizado veinte probetas de dimensiones de 2"x 2"x 6" a estas probetas se les aplicó una carga perpendicular al eje axial, hasta que la pieza de madera llegara al momento de la falla. La prueba se efectuó en una compresora hidráulica marca Versa Tester Soiltest, Número de Serie 153. Cuando se realizó la prueba se anotaron solamente las cargas últimas de cada probeta.

Foto 5

Probeta que se utilizó para obtener la compresión perpendicular a la fibra



Foto 6

Máquina y deformímetro para el ensayo de compresión perpendicular a la fibra



D. Prueba de Dureza Janka

Para este tipo de prueba se han utilizado veinte probetas de dimensiones de 2" x 2" x 2" a estas probetas se les aplicó la carga necesaria para que una bala de acero de 0.44" penetrará dentro de la probeta, hasta llegar a la mitad de su diámetro. Cuando se llega a esa profundidad, se toma la lectura de deformación del anillo, por medio del deformímetro Soiltets LC-2. La lectura del deformímetro, se utiliza para determinar la carga mediante la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{1000(\text{Vueltas del Deformímetro})}{1.33}$$

Ecuación 4

Fórmula obtenida de la Tesis de Luis Gerardo Bonilla, 2,007¹⁵

Donde:

Q = Carga (lb)

La prueba se efectuó en una compresora manual, marca Solitest, modelo CN-472y, Serie (192) con un deformímetro incorporado.

¹⁵ Bonilla, Luis Gerardo. 2,007. Determinación de las principales propiedades físicas y mecánicas de lamadera de *Cordia dodecandra* (Siricote), *Mastichodendron capiri var. Tempisque* (Tempisque), *Bucida buceras* (Pucte), *Swartzia cubensis* (Llora-sangre), y *Astronium graveolens* (Jobillo). Trabajo de Graduación Licenciatura en Forestal. Guatemala. Universidad del Valle de Guatemala. 46 p.

Foto 7

Probeta y bala que se utilizaron para obtener la dureza Janka



Foto 8

Máquina para el ensayo de dureza Janka



E. Prueba de Corte

Para este tipo de prueba se han utilizado veinte probetas de dimensiones de 2"x 2"x 2" a estas probetas se les colocó dentro de un molde, el cual fue previamente medido para que las piezas cupieran, de lo contrario las piezas podrían quedar sueltas dentro del molde o no podrían ingresarse al molde, en el caso de que sean muy grandes. Al realizar la prueba se obtiene la carga, a la cual la grada de la pieza colapsa. La prueba se efectuó en una compresora manual, marca Solitest, modelo CN-472y, Serie (192) con un deformímetro incorporado, en donde la formula para sacar el corte fue la misma que para sacar la carga en la prueba de dureza.

Foto 9

Máquina, molde y probeta para el ensayo de corte



F. Prueba de Flexión Estática

Para este tipo de prueba se han utilizado veinte probetas de dimensiones de 1" x 1" x 16" a las cuales se les aplicó una carga en la cara tangencial. La prueba se efectuó en una compresora hidráulica marca Versa Tester Soiltest, Número de Serie 153. Cuando se realizó la prueba, se agregaron discos de acero bajo la plancha de soporte de la probeta. Con los datos anotados se debe calcular: esfuerzo máximo en flexión o módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidad (MOE).

Foto 10

Máquina, deformímetro y probeta para el ensayo de flexión



Para calcular el módulo de ruptura, se utilizó la carga última registrada hasta la falla y se aplicó la siguiente ecuación:

$$MOR = \frac{3PL}{2bh^2}$$

Ecuación 5

Fórmula obtenida de Guía de laboratorio de Gabriel Calle Trujillo, 2,009¹⁶

Donde:

P = carga de rotura.

L = distancia entre soportes.

b = ancho de la muestra en el punto de rotura.

h = espesor de la muestra en el punto de rotura.

Para calcular el módulo de elasticidad, se aplicó la siguiente ecuación:

$$MOE = \frac{1L^3(P_2 - P_1)}{4bh^3(\Delta_2 - \Delta_1)}$$

Ecuación 6

Formula obtenida de Publicación de Jaime Moreno, 2,004¹⁷

Donde:

P = Carga en el límite proporcional.

Δ = Deformación en el límite proporcional.

¹⁶ Calle, Gabriel. 2,009. *Determinación de las Principales Propiedades Mecánicas de los Materiales Sometidos a Flexión*. Guía de laboratorio. Universidad Tecnológica de Pereira. 2 p.

¹⁷ Moreno, Jaime. 2,004. *Propiedades Mecánicas de Gmelina arborea*. Publicación. Valle del Sacta Cochabamba. 34 p.

G. Cálculos y Discusión

Para sacar la resistencia del pino rústico de la especie *pinus Caribaea*, se utiliza un criterio muy aceptado que es tomar el percentil de 5% y no un valor promedio. Esta situación se debe a que las piezas más débiles de la prueba determinarán el valor total. Por tanto, si el material de una población es variable, peor será su rendimiento pues el percentil de 5% estará constituido por las peores piezas.

Suponiendo una distribución normal, el valor representativo quedará expresado de la siguiente manera:

$$R_{k,est} = mR - k\sigma (\sigma R)$$

Ecuación 2-5

Fórmula obtenida del diseño de madera con el manual LRFD¹⁸

Donde:

$R_{k,est}$ = Valor estadístico representativo.

mR = valor medio de la muestra.

σR = Desviación típica de la muestra, se estima a partir de los resultados experimentales.

$k\sigma$ = Coeficiente que depende del tamaño de la muestra (número de ensayos, n).

En ausencia de previa información, se utilizará la tercera columna de la tabla 30 de Anexos # 2.

¹⁸ Taylor, Robert. 2,010. *Designing with LRFD for Wood*. LRFD Manual.

Tabla 4

**Resumen de las cargas y deformaciones últimas del ensayo de compresión
paralela a la fibra.**

No. Probeta	Carga última (lb)	Deformación Última (pulg.)
1	22,500	0.088
2	14,500	0.095
3	21,500	0.084
4	22,000	0.090
5	22,500	0.210
6	24,000	0.065
7	22,000	0.050
8	21,000	0.049
9	22,500	0.080
10	20,500	0.120
11	20,200	0.108
12	21,000	0.082
13	20,000	0.078
14	18,000	0.107
15	20,500	0.076
16	21,800	0.120
17	20,600	0.072
18	21,000	0.069
19	23,500	0.076
20	22,200	0.089

Tabla 5

**Estadística de los valores últimos del ensayo de compresión paralela a la
fibra.**

mR =	20,982.09
σR =	1,996.47
Kσ =	1.93

$$R_{k,est} = 20,982.09 - 1,996.47 (1.93) = \mathbf{17,128.90 \text{ libras}}$$

$$\text{Esfuerzo \u00faltimo de compresi\u00f3n paralela a la fibra} = \sigma_{c1} = \frac{P}{A} = 17,128.90 \frac{\text{libras}}{4\text{in}^2} = \mathbf{4,282.22 \text{ PSI}}$$

Tabla 6

Estad\u00edstica de los valores \u00faltimos del ensayo de compresi\u00f3n perpendicular a la fibra.

mR =	6,094.95
\u03c3R =	517.03
K\u03c3 =	1.93

$$R_{k,est} = 6,094.95 - 517.03 (1.93) = \mathbf{5,097.09 \text{ libras}}$$

$$\text{Esfuerzo \u00faltimo de compresi\u00f3n perpendicular a la fibra} = \sigma_{c2} = \frac{P}{A} = 5,097.09 \frac{\text{libras}}{4\text{in}^2} = \mathbf{1,274.27 \text{ PSI}}$$

Tabla 7

Estad\u00edstica de los valores \u00faltimos del ensayo de dureza Janka axial.

mR =	749.60
\u03c3R =	96.77
K\u03c3 =	1.93

$$R_{k,est} = 749.60 - 96.77 (1.93) = \mathbf{562.84 \text{ libras}}$$

Tabla 8

Estadística de los valores últimos del ensayo de dureza Janka lateral.

mR =	459.30
σR =	62.90
Kσ =	1.93

$$R_{k,est} = 459.30 - 62.90 (1.93) = \mathbf{337.91 \text{ libras}}$$

Tabla 9

Estadística de los valores últimos del ensayo de corte radial.

mR =	453.46
σR =	40.26
Kσ =	1.93

$$R_{k,est} = 453.46 - 40.26 (1.93) = \mathbf{375.76 \text{ libras}}$$

$$\text{Esfuerzo último de corte radial} = \tau_r = \frac{P}{A} = 375.76 \frac{\text{libras}}{0.47 \text{ in}^2} = \mathbf{799.50 \text{ PSI}}$$

Tabla 10

Estadística de los valores últimos del ensayo de corte tangencial.

mR =	764.98
σR =	59.68
Kσ =	1.93

$$R_{k,est} = 453.46 - 40.26 (1.93) = \mathbf{649.8 \text{ libras}}$$

$$\text{Esfuerzo \u00faltimo de corte tangencial} = \tau_t = \frac{P}{A} = 649.8 \frac{\text{libras}}{0.47 \text{ in}^2} = \mathbf{1,382.55 \text{ PSI}}$$

C\u00e1lculo del m\u00f3dulo de elasticidad (MOE) para el ensayo de flexi\u00f3n est\u00e1tica.

Se sabe que:

$$MOE = \frac{1L^3(P_2 - P_1)}{4bh^3(\Delta_2 - \Delta_1)}$$

De esto se puede despejarla deformaci\u00f3n:

$$(\Delta_2 - \Delta_1) = \frac{1L^3(P_2 - P_1)}{4bh^3MOE}$$

Al momento de tener los datos de las distintas cargas con su respectiva deformaci\u00f3n para cada probeta, se puede construir un gr\u00e1fico con los valores de las deformaciones en las abscisas y los valores de la expresi\u00f3n $\frac{1L^3(P_2 - P_1)}{4bh^3}$ en las ordenadas. El valor de la pendiente de dicho gr\u00e1fico, ser\u00e1 el m\u00f3dulo de elasticidad del material sometido a ensayo. El procedimiento que se hizo fue sacar la ecuaci\u00f3n de la recta a los gr\u00e1ficos de carga contra deformaci\u00f3n de cada probeta (VER ANEXO 2 en el inciso Graficas de carga y deformaci\u00f3n de cada probeta sometida a flexi\u00f3n) y a la pendiente multiplicar el factor $\frac{1L^3}{4bh^3}$ para obtener el MOE de cada probeta.

Tabla 11

Resumen de los módulos de elasticidad del ensayo de flexión estática.

No. Probeta	MOE (psi)	MOE (GPa)
1	730,726.40	5.04
2	781,527.04	5.39
3	940,267.52	6.48
4	912,056.32	6.29
5	963,358.72	6.64
6	999,680.00	6.89
7	928,819.20	6.40
8	929,454.08	6.41
9	905,175.04	6.24
10	966,062.08	6.66
11	754,728.96	5.20
12	836,167.68	5.77
13	703,856.64	4.85
14	712,826.88	4.91
15	725,862.40	5.00
16	815,820.80	5.62
17	720,087.04	4.96
18	696,473.60	4.80
19	789,022.72	5.44
20	778,854.40	5.37

Tabla 12

Estadística de los valores últimos del MOE del ensayo de flexión estática.

	PSI	Gpa
mR =	823,507.85	5.68
σ_R =	100,520.03	0.69
$K\sigma$ =	1.93	1.93

$$R_{k,est} = 823,507.85 - 100,520.03 (1.93) = \mathbf{629,504.19 \text{ PSI}}$$

$$\mathbf{MOE = 629,504.19 \text{ PSI Ó 4.34 GPa.}}$$

Tabla 13

Resumen de los módulos de ruptura del ensayo de flexión estática.

No. Probeta	MOR (psi)
1	5,400.00
2	3,600.00
3	5,340.00
4	5,136.00
5	3,864.00
6	3,696.00
7	3,780.00
8	3,900.00
9	3,744.00
10	5,400.00
11	3,600.00
12	3,720.00
13	5,352.00
14	5,400.00
15	5,340.00
16	3,600.00
17	5,400.00
18	5,328.00
19	3,696.00
20	3,648.00

Tabla 14

Estadística de los valores últimos del MOR del ensayo de flexión estática.

mR =	4,373.34
σR =	816.18
Kσ =	1.93

$$R_{k,est} = 4,373.34 - 816.18 (1.93) = \mathbf{2,798.11 \text{ PSI}}$$

$$\mathbf{MOR = 2798.11 \text{ PSI}}$$

V. ENSAYO DE VIGAS DE MADERA LAMINADA SIN REFUERZO

A. Proceso de elaboración de las vigas de madera laminada

Para realizar el ensayo de vigas de madera laminada sin refuerzo, se hizo el proceso siguiente:

1. Se consiguieron 15 tablones de pino rústico de la especie pinus Caribaea, con las dimensiones siguientes: 10' de largo, 2" de alto y 12" de ancho. Dichos tablones provenían del aserradero, donde se seleccionaron tablones que tuvieran la mínima cantidad de defectos y nudos.
2. Los tablones se secaron al aire libre, estos fueron apoyados en el suelo y la pared a un ángulo aproximadamente de 70°. El factor clima siempre tiene un papel importante en la determinación del tiempo de secado, ya que en el clima había humedad se dejaron los tablones al aire libre aproximadamente un mes para que secaran y se pudieran trabajar.
3. Los tablones se cortaron en láminas de madera, con las dimensiones siguientes: 8' de largo, 2" de alto y 5" de ancho, de las cuales se obtuvieron 24 láminas.

4. Se hizo un exhaustivo proceso de canteado y cepillado para que las 24 láminas tuvieran lo más exacto posible las siguientes dimensiones: 8' de largo, 1 ¼" de alto y 4" de ancho.

5. El paso siguiente fue encolar de dos en dos las láminas, pegarlas también de dos en dos y prensarlas. Luego se encolaron de dos en dos las láminas, pero ahora se pegaron de cuatro en cuatro y se prensaron. Al final se encolaron, pegaron y prensaron las 8 láminas para hacer la viga.

6. Los pasos anteriores se hicieron tres veces para hacer las tres vigas de 8' de largo, 4" de ancho y 10" de alto.

Foto 11

Vigas de madera laminada



B. Método lineal para el cálculo de las vigas de madera laminada sin refuerzo

Hay dos métodos de análisis para el cálculo de la resistencia a la flexión: El primer método simplificado es basado en un análisis lineal. El acercamiento del comportamiento lineal permite una evaluación rápida y consistente del estado de esfuerzo de un elemento de madera, pero el inconveniente que tiene, es que no toma en cuenta el comportamiento no lineal que la madera puede mostrar, con o sin refuerzos. Un segundo método consiste en analizar el comportamiento no lineal del material.

El método de cálculo a utilizar por su simplicidad será el lineal por tanto, en un comportamiento lineal, se admite una distribución lineal de los esfuerzos en los extremos de la sección. Este análisis del estado de tensión / compresión se obtiene de manera general:

Ecuación 8

Fórmula obtenida de Guía de laboratorio de Gabriel Calle Trujillo, 2,009¹⁹

$$f = \frac{M}{(S)}$$

¹⁹ Calle, Gabriel. 2,009. *Determinación de las Principales Propiedades Mecánicas de los Materiales Sometidos a Flexión*. Guía de laboratorio. Universidad Tecnológica de Pereira. 2 p.

Dónde:

$M =$ momento flector $= \frac{PL}{4}$ para vigas simplemente apoyadas con carga puntual en el centro.

$P =$ Carga

$L =$ distancia de apoyo a apoyo

$S =$ módulo de sección $= I/c = \frac{bh^2}{6}$ para secciones rectangulares.

$I =$ inercia

$b =$ ancho de la viga

$h =$ alto de la viga

$c =$ DISTANCIA CENTROIDE Y FIBRA SUPERIOR

$$f = \frac{3PL}{2bh^2}$$

Ecuación 9

C. Cálculo de las tres vigas ensayadas

El radio de la prensa hidráulica es de 1" por tanto para obtener la carga que transmitía la prensa se tenía que dividir por un área expresada de la siguiente manera:

$$A = \pi r^2$$

Ecuación 10

Fórmula obtenida del Libro de James Gere, 2,004²⁰

²⁰ Gere, James. 2,004. *Mecánica de Materiales*. Universidad de Stanford. Sexta Edición. Editorial Thomson. 893 p.

Siendo $r = 1$ in se obtiene:

$$A = \pi * 1in^2$$

Ecuación 11

Por tanto, para obtener la carga del esfuerzo que transmite la prensa se determina de la siguiente manera:

$$P = \sigma A = \sigma \frac{lb}{in^2} * \pi * 1 in^2$$

Ecuación 12

VIGA No. 1

Datos:

$$b = 4 \text{ in}$$

$$h = 10 \text{ in}$$

$$L_{total} = 2.49 \text{ m} = 98 \text{ in}$$

$$L = 2.35 \text{ m} = 92.50 \text{ in}$$

Tabla 15

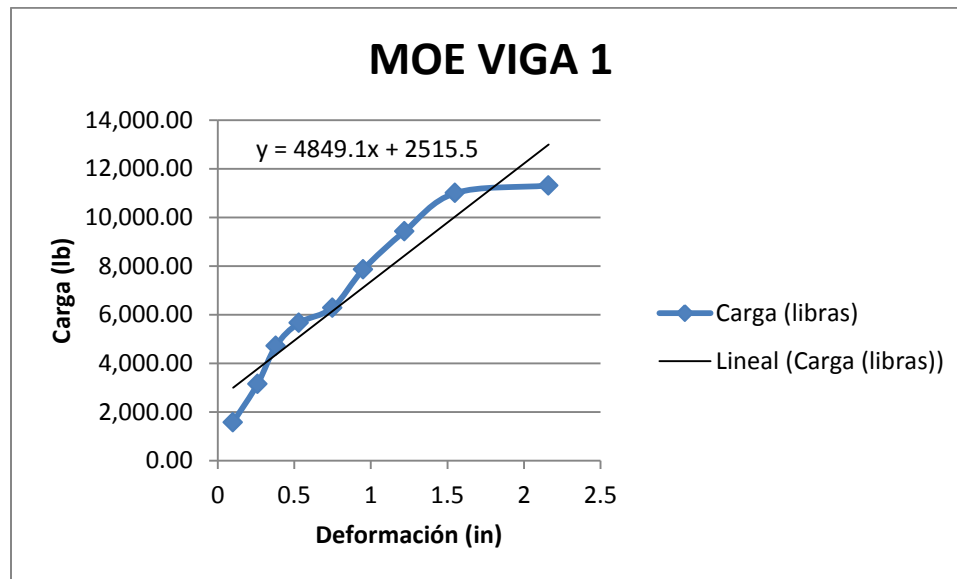
Cargas y deformaciones de viga laminada sin refuerzo No.1

Esfuerzo de la prensa (psi)	Deflexión (mm)	Deflexión (in)	Carga (libras)
500	2.5	0.10	1,570.80
1000	6.7	0.26	3,141.59
1500	9.6	0.38	4,712.39
1800	13.5	0.53	5,654.87
2000	19	0.75	6,283.19
2500	24.1	0.95	7,853.98
3000	31.1	1.22	9,424.78
3500	39.3	1.55	10,995.57
3600	54.9	2.16	11,309.73

$$M_{FU} = \frac{P_u L}{4} = \frac{11,309.73 \text{ libras} * 92.5 \text{ in}}{4} = 261,538 \text{ libras} - \text{in}$$

$$f = \frac{3P_u L}{2bh^2} = \frac{3 * 11,309.73 \text{ libras} * 92.5 \text{ in}}{2 * 4 \text{ in} * (10 \text{ in})^2} = 3,923.06 \text{ psi}$$

Gráfica # 1



$$MOE = m * \frac{1L^3}{4bh^3} = 4849.1 \frac{lb}{in} * \frac{92.5 \text{ in}^3}{4 * 4 \text{ in} * (10 \text{ in})^3} = 239,864.71 \text{ psi}$$

Foto 12
Viga de madera No. 1



Foto 13
Viga de madera No. 1 fallada



VIGA No. 2

Datos:

$$b = 4 \text{ in}$$

$$h = 10 \text{ in}$$

$$L_{total} = 2.44 \text{ m} = 96.04 \text{ in}$$

$$L = 2.30 \text{ m} = 90.53 \text{ in}$$

Tabla 16

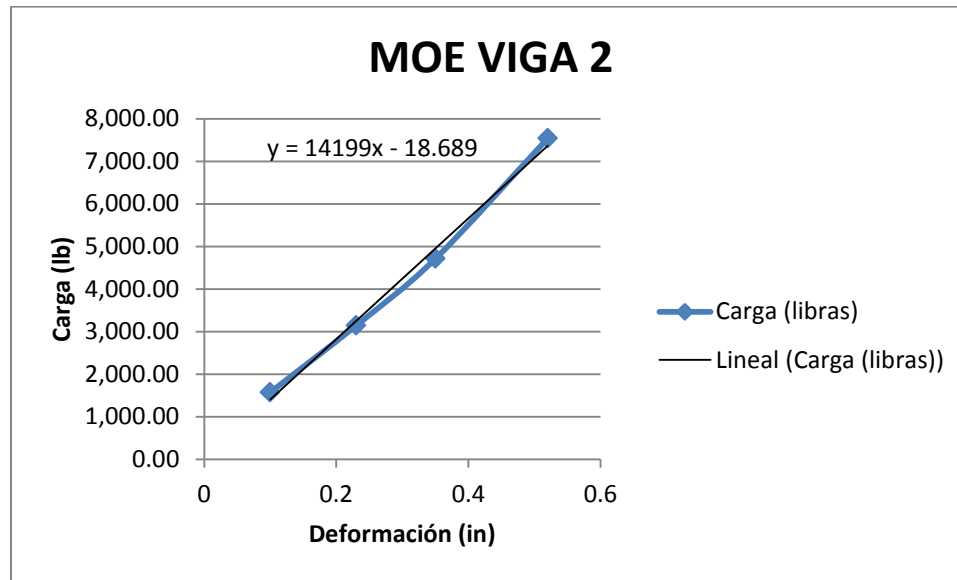
Cargas y deformaciones de viga laminada sin refuerzo No.2

Esfuerzo de la prensa (psi)	Deflexión (mm)	Deflexión (in)	Carga (libras)
500	2.6	0.10	1,570.80
1000	5.8	0.23	3,141.59
1500	9	0.35	4,712.39
2400	13.1	0.52	7,539.82

$$M_{FU} = \frac{P_u L}{4} = \frac{7,539.82 \text{ libras} * 90.53 \text{ in}}{4} = 170,645 \text{ libras} - \text{in}$$

$$f = \frac{3P_u L}{2bh^2} = \frac{3 * 7,539.82 \text{ libras} * 90.53 \text{ in}}{2 * 4 \text{ in} * (10 \text{ in})^2} = 2,559.67 \text{ psi}$$

Gráfica # 2



$$MOE = m * \frac{1L^3}{4bh^3} = 14199 \frac{lb}{in} * \frac{90.53in^3}{4 * 4in * (10in)^3} = 658,438.68 \text{ psi}$$

Foto 14

Viga de madera No. 2



Foto 15
Viga de madera No. 2 fallada



VIGA No. 3

Datos:

$$b = 3.98 \text{ in}$$

$$h = 9.84 \text{ in}$$

$$L_{total} = 2.49 \text{ m} = 98 \text{ in}$$

$$L = 2.35 \text{ m} = 92.50 \text{ in}$$

Tabla 17

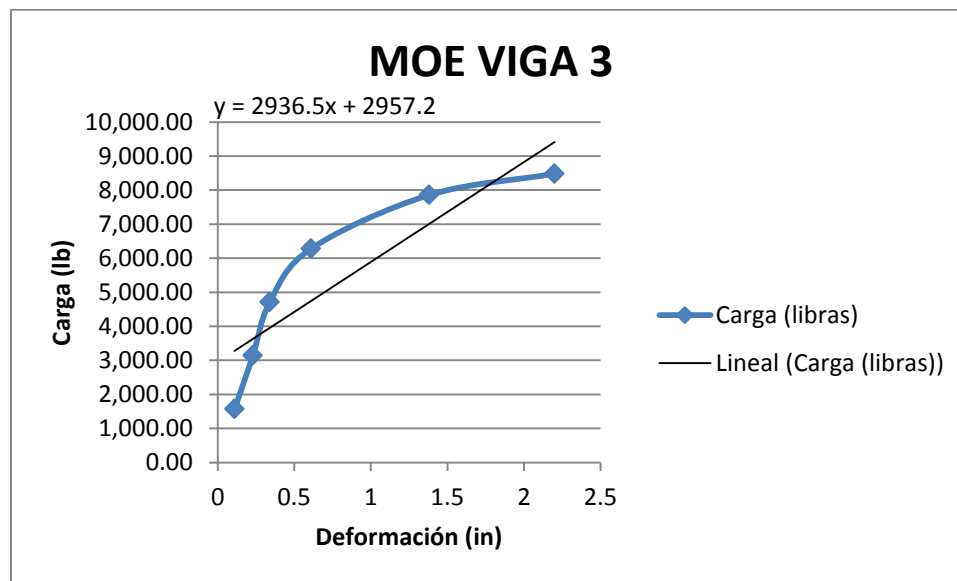
Cargas y deformaciones de viga laminada sin refuerzo No.3

Esfuerzo de la prensa (psi)	Deflexión (mm)	Deflexión (in)	Carga (libras)
500	2.7	0.11	1,570.80
1000	5.8	0.23	3,141.59
1500	8.6	0.34	4,712.39
2000	15.4	0.61	6,283.19
2500	35	1.38	7,853.98
2700	56	2.20	8,482.30

$$M_{FU} = \frac{P_u L}{4} = \frac{8,482.3 \text{ libras} * 92.50 \text{ in}}{4} = 196,153 \text{ libras} - \text{in}$$

$$f = \frac{3P_u L}{2bh^2} = \frac{3 * 8,482.3 \text{ libras} * 92.50 \text{ in}}{2 * 3.98 \text{ in} * (9.84 \text{ in})^2} = 3,054.03 \text{ psi}$$

Gráfica # 3



$$MOE = m * \frac{1L^3}{4bh^3} = 2936.5 \frac{lb}{in} * \frac{92.50 \text{ in}^3}{4 * 3.98 \text{ in} * (9.84 \text{ in})^3} = 153,224.02 \text{ psi}$$

Foto 16
Viga de madera No. 3



Foto 17
Viga de madera No. 3 fallada



Con los momentos últimos obtenidos en las tres vigas se procederá a sacar el momento último promedio.

Tabla 18
Momento último

	Mu (lib.-in)
VIGA No. 1	261,538.00
VIGA No. 2	170,645.00
VIGA No. 3	196,153.00
Mu promedio	209,445.33

Con los módulos de ruptura obtenidos en las tres vigas se procederá a sacar el módulo de ruptura promedio.

Tabla 19
Módulo de ruptura promedio

	f (psi)	
VIGA No. 1	3,923.06	
VIGA No. 2	2,559.67	
VIGA No. 3	3,054.03	
f promedio	3,178.92	21.92 Mpa

Con los módulos de elasticidad obtenidos en las tres vigas se procederá a sacar el módulo de elasticidad promedio.

Tabla 20
Módulo de elasticidad promedio

	MOE (PSI)
MOE VIGA 1	239,864.71
MOE VIGA 2	658,438.68
MOE VIGA 3	153,224.02
PROMEDIO	350,509.14

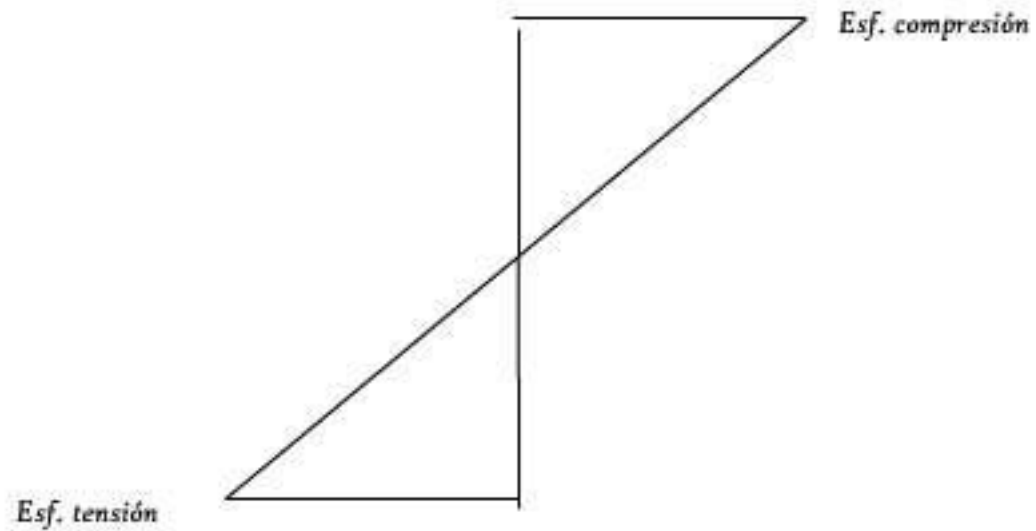
Como se esta trabajando bajo el método lineal y aparte la carga puntual de la viga esta en el centro, entonces el esfuerzo de compresión y tensión en una viga simétrica de un solo material sometida a flexión es:

$$f = \sigma_c = \sigma_T = 3,178.92 \text{ psi o } 21.92 \text{ Mpa}$$

Ecuación 13

Figura 4

Distribución de esfuerzos normales en vigas sin refuerzo



VI. ENSAYO DE VIGAS DE MADERA LAMINADA CON REFUERZO

A. Proceso de elaboración de las vigas de madera laminada con refuerzo

Para realizar el ensayo de vigas de madera laminada con refuerzo, se hizo los cuatro primeros pasos del proceso de realización de las vigas sin refuerzo, luego se hizo lo siguiente:

1. El paso siguiente fue encolar de dos en dos las láminas, pegarlas también de dos en dos y prensarlas. Luego se encolaron de dos en dos las láminas, pero ahora se pegaron de cuatro en tres y se prensaron. Al final se encolaron, pegaron y prensaron las siete láminas.

Foto 18

Viga de madera de siete láminas y fibras de carbono



Foto 19
Fibras de carbono



2. Arriba de las siete láminas, se colocó la mezcla de pegamento Sikadur 30, luego se colocó la fibra de carbono; de 1.2 mm de alto e igual ancho de las laminas de madera.

Foto 20
Componentes del pegamento Sikadur 30



Foto 21

Mezcla del pegamento Sikadur 30

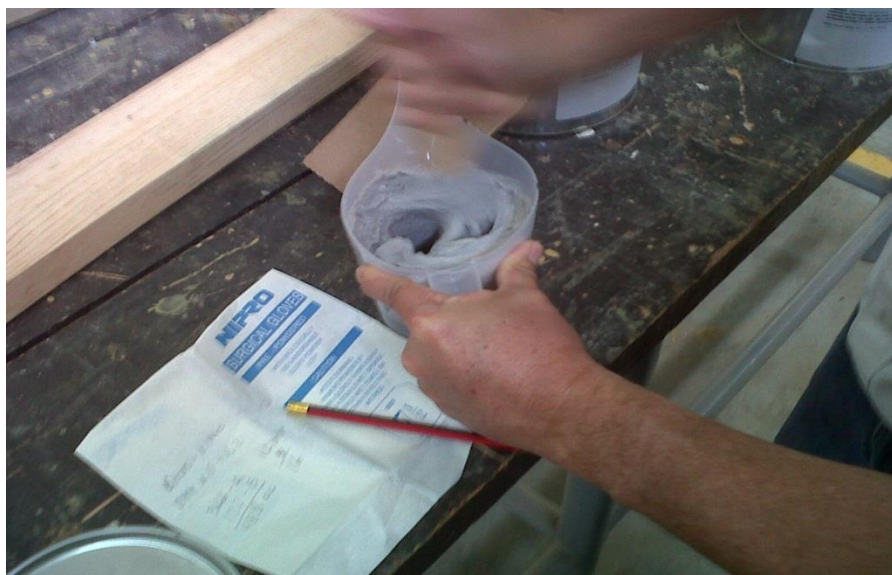


Foto 22

Colocación en la viga de la mezcla del pegamento Sikadur 30



Foto 23

Colocación en la viga de la fibra de carbono



3. Arriba de la fibra de carbono pegada, se colocó la mezcla de pegamento Sikadur 30, luego se colocó una última lámina de dimensiones: 8' de largo, 1 ¼" de alto y 4" de ancho.

4. Obteniendo la viga de sección compuesta, se colocó en la prensa para que no hubieran burbujas de aire en las bandas de pegamento.

5. Los pasos anteriores se hicieron tres veces para hacer las tres vigas con refuerzo de 8' de largo, 4" de ancho y 10.047" de alto.

Foto 24

Viga laminada con fibra de carbono



B. Método de la sección transformada para el cálculo de las vigas de madera laminada con refuerzo

El método de la sección transformada es una alternativa para poder analizar los esfuerzos de flexión en una viga compuesta de dos o más materiales.

El método consiste en transformar la sección transversal de una viga compuesta en una sección transversal equivalente a una viga compuesta de un solo material a la que se le llama sección transformada.

Como primer punto a este método se puede utilizar la razón modular, ya que por medio de la prueba de flexión realizada a veinte probetas, se pudo obtener el módulo de elasticidad de la madera que se utilizó para realizar las vigas con refuerzo. Para el caso del módulo de elasticidad del refuerzo de fibra de carbono se puede obtener del anexo 3 en la sección de Propiedades mecánicas y físicas de la lámina de fibra de carbono Sika Carbodur. Por tanto la razón modular será:

$$n = \frac{E_{ref.f.i.car.}}{E_{madera}}$$

Ecuación 14

Fórmula obtenida del Libro de James Gere, 2,004²¹

De esto:

$$n = \frac{23,200,000 \text{ psi}}{629,504.29 \text{ psi}} = 36.85$$

Luego de haber obtenido la razón modular, se puede obtener la distancia del centroide tomando como punto de referencia el borde superior de la sección transversal como se muestra con la siguiente formula:

$$h_1 = \frac{\sum y_i A_i}{\sum A_i}$$

Ecuación 15

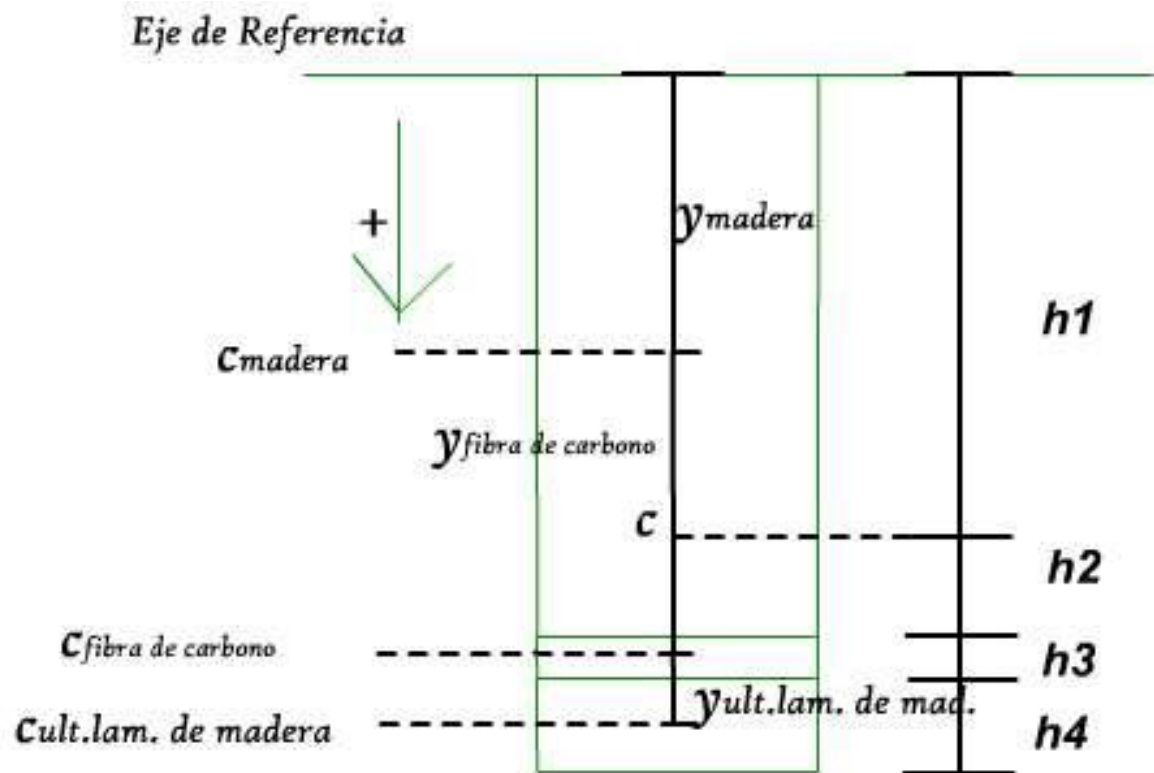
Fórmula obtenida del Libro de James Gere, 2,004²²

Nota: Se debe recordar que el área del refuerzo se debe multiplicar por la razón modular.

²¹ Gere, James. 2,004. *Mecánica de Materiales*. Universidad de Stanford. Sexta Edición. Editorial Thomson. 404 p.

²²Ibid. 407 p.

Figura 5
Figura de sección compuesta



Teniendo la distancia del centroide y el diagrama de la sección transversal se puede sacar las distancias del centroide de la fibra de carbono y de la última lámina de madera.

Como siguiente punto se debe sacar la inercia total de la sección compuesta de las vigas con la siguiente fórmula:

$$I_T = I_{madera} + nI_{refurzo} + I_{lam.ult.madera}$$

Ecuación 16

Fórmula obtenida del Libro de James Gere, 2,004²³

Por último se obtienen seis esfuerzos que consistirían en: esfuerzo de compresión en la parte superior de la viga, esfuerzo de tensión de la madera ubicado entre la parte inferior de la madera y la parte superior de la fibra, esfuerzo de tensión de la fibra ubicado entre la parte inferior de la madera y la parte superior de la fibra, esfuerzo de tensión de la fibra ubicado entre la parte inferior de la fibra y la parte superior de la última lámina de madera, esfuerzo de tensión de la última lámina de madera ubicado entre la parte inferior de la fibra y la parte superior de la última lámina de madera y esfuerzo de tensión de la última lámina de madera ubicado en la parte inferior de la viga.

Todos estos esfuerzos se obtienen de la siguiente fórmula:

$$\sigma_i = \frac{My_i}{I_T}$$

Ecuación 17

Fórmula obtenida del Libro de James Gere, 2,004²⁴

Nota: Se debe recordar que los esfuerzos de la fibra de carbono se deben multiplicar por la razón modular. De la siguiente manera:

²³ Gere, James. 2,004. *Mecánica de Materiales*. Universidad de Stanford. Sexta Edición. Editorial Thomson.. 406 p.

²⁴ Ibid. 408 p.

$$\sigma_i = \frac{My_i * n}{I_T}$$

Ecuación 18

Fórmula obtenida del Libro de James Gere, 2,004²⁵

C. Cálculo de las tres vigas ensayadas

VIGA No. 1

Datos:

$$b_{madera1} = 3.82 \text{ in}$$

$$h_{madera1} = 8.66 \text{ in}$$

$$L_{total} = 2.47 \text{ m} = 97.22 \text{ in}$$

$$L = 2.38 \text{ m} = 93.70 \text{ in}$$

$$n = 36.85$$

$$b_{refuerzo} = 3.82 \text{ in}$$

$$h_{refuerzo} = 0.05 \text{ in}$$

$$b_{tabla \text{ ult. madera}} = 3.82 \text{ in}$$

$$h_{tabla \text{ ult. madera}} = 1.25 \text{ in}$$

²⁵ Gere, James. 2,004. *Mecánica de Materiales*. Universidad de Stanford. Sexta Edición. Editorial Thomson. 408 p.

Tabla 21

Cargas y deformaciones de viga laminada con refuerzo No.1

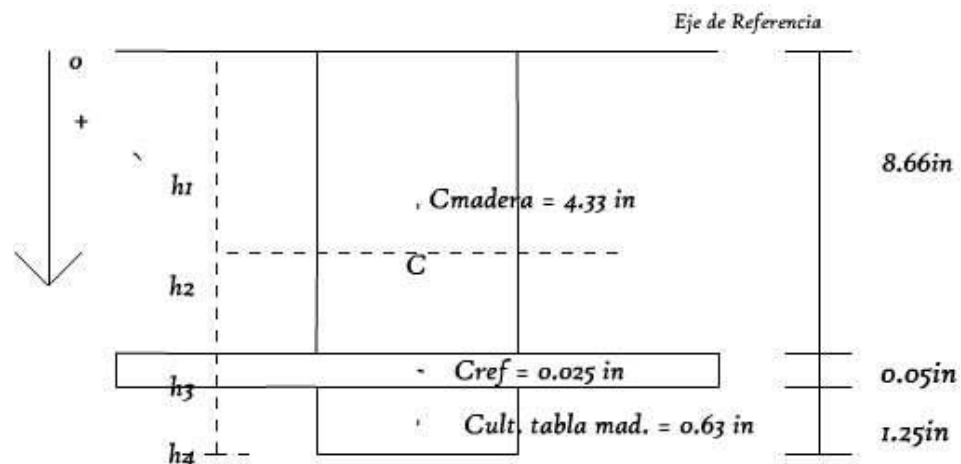
Esfuerzo de la prensa (psi)	Deflexión (mm)	Deflexión (in)	Carga (libras)
500	1.9	0.07	1,570.80
1000	4.9	0.19	3,141.59
1500	7.5	0.30	4,712.39
1800	9.9	0.39	5,654.87
2000	12.1	0.48	6,283.19
2500	14.3	0.56	7,853.98
3000	17.1	0.67	9,424.78
3500	19.1	0.75	10,995.57
3700	31.9	1.26	11,623.89

$$M_{FU} = \frac{P_u L}{4} = \frac{11,623.89 \text{ libras} * 93.7 \text{ in}}{4} = 272,290 \text{ libras} - \text{in}$$

Se puede obtener la distancia vertical del centroide, tomando el borde superior de la sección transversal como línea de referencia y con la distancia positiva hacia abajo.

Figura 6

Figura de sección compuesta de la viga con refuerzo No. 1



$$h_1 = \frac{\sum y_i A_i}{\sum A_i}$$

$$= \frac{4.33in(3.82in * 8.66in) + (8.66in + 0.02in)([n * 3.82 in] * 0.05in) + (8.66in + 0.05in + 0.63in)(3.82in * 1.25in)}{(3.82in * 8.66in) + ([n * 3.82in] * 0.05in) + (3.82in * 1.25in)}$$

$$h_1 = \frac{248.93in^3}{44.89in^2} = 5.54 in$$

Ahora se calcula el momento de inercia total, de toda el área transversal con respecto al eje neutro.

$$I_T = I_{madera} + nI_{refurzo} + I_{lam.ult.madera}$$

$$= \frac{[b_{mad.} * (h_{mad.})^3]}{12} + A_{mad.}(h_1 - 4.33)^2$$

$$+ \frac{[(n * b_{ref.}) * (h_{ref.})^3]}{12} + [(n * b_{ref.}) * h_{ref.}](h_3 - 0.02)^2$$

$$+ \frac{[b_{lam.ult.madera} * (h_{lam.ult.madera})^3]}{12} + A_{lam.ult.madera}(h_4 - 0.63)^2$$

$$= \frac{[3.82in * (8.66in)^3]}{12} + 33.08in^2(5.54in - 4.33in)^2$$

$$+ \frac{[(36.85 * 3.82in) * (0.05in)^3]}{12}$$

$$+ [(36.85 * 3.82in) * 0.05in]([8.66in + 0.05in - 5.54in] - 0.02in)^2$$

$$+ \frac{[3.82in * (1.25in)^3]}{12} + 4.78in^2([8.66in + 0.05in + 1.25in - 5.54in] - 0.63in)^2$$

$$= 394.30 in^4$$

Teniendo la inercia total se pueden obtener lo siguientes esfuerzos:

$$\sigma_{madera1s} = \frac{-Mh_1}{I_T} = \frac{-272,290libras - in(5.54in)}{394.30in^4} = 3,825.73 \text{ psi compresión}$$

$$\sigma_{madera1i} = \frac{-Mh_2}{I_T} = \frac{-272,290libras - in(-8.66in + 5.54in)}{394.30in^4}$$

$$= 2,154.56 \text{ psi tensión}$$

$$\sigma_{refs} = \frac{-Mh_2 * n}{I_T} = \frac{-272,290libras - in(-8.66in + 5.54in) * n}{394.30in^4}$$

$$= 79,395.70 \text{ psi tensión}$$

$$\sigma_{refi} = \frac{-Mh_3 * n}{I_T} = \frac{-272,290libras - in(-8.66in - 0.05in + 5.54in) * n}{394.30in^4} = 80,668.07 \text{ psi tensión}$$

$$\sigma_{lam.ult.maderas} = \frac{-Mh_3}{I_T} = \frac{-272,290libras - in(-8.66in - 0.05in + 5.54in)}{394.30in^4}$$

$$= 2,189.09 \text{ psi tensión}$$

$$\sigma_{lam.ult.maderai} = \frac{-Mh_4}{I_T} = \frac{-272,290libras - in(-8.66in - 0.05in - 1.25in + 5.54in)}{394.30in^4}$$

$$= 3,052.30 \text{ psi tensión}$$

Foto 25

Viga de madera No. 1 fallada

**VIGA No. 2**

Datos:

$$b_{madera1} = 4.17 \text{ in}$$

$$h_{madera1} = 8.94 \text{ in}$$

$$L_{total} = 2.47 \text{ m} = 97.22 \text{ in}$$

$$L = 2.33 \text{ m} = 91.71 \text{ in}$$

$$n = 36.85$$

$$b_{refuerzo} = 4.17 \text{ in}$$

$$h_{refuerzo} = 0.05 \text{ in}$$

$$b_{tabla \text{ ult. madera}} = 4.17 \text{ in}$$

$$h_{tabla \text{ ult. madera}} = 1.25 \text{ in}$$

Tabla 22
Cargas y deformaciones de viga laminada con refuerzo No.2

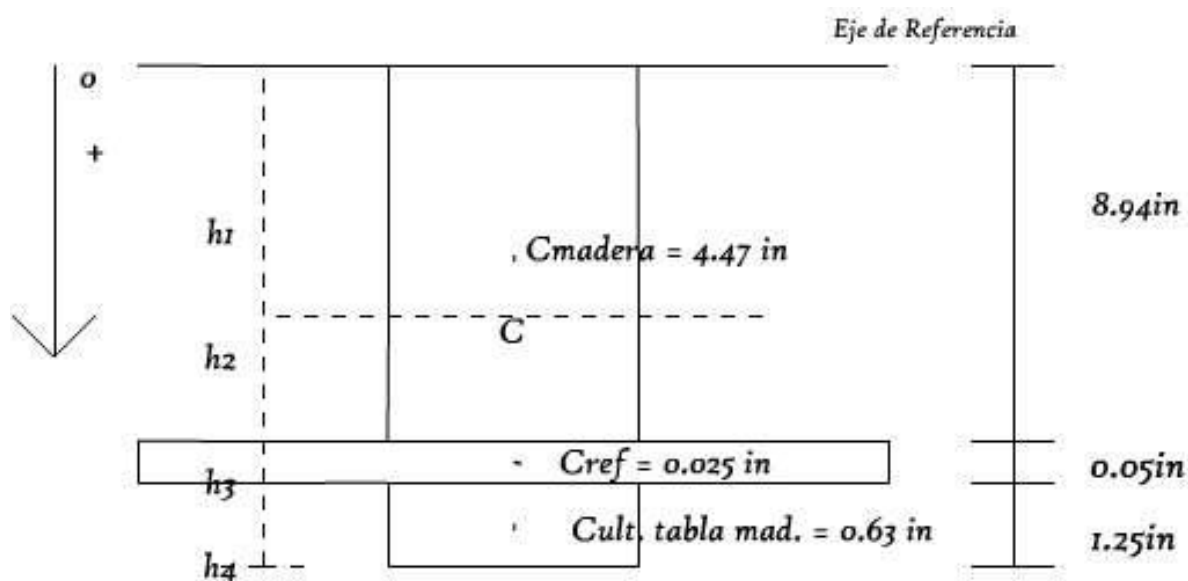
Esfuerzo de la prensa (psi)	Deflexión (mm)	Deflexión (in)	Carga (libras)
500	2.3	0.09	1,570.80
1000	4.7	0.19	3,141.59
1500	7.2	0.28	4,712.39
2000	9.8	0.39	6,283.19
3000	12.2	0.48	9,424.78

$$M_{FU} = \frac{P_u L}{4} = \frac{9,424.78 \text{ libras} * 91.71 \text{ in}}{4} = 216,086.64 \text{ libras} - \text{in}$$

Se puede obtener la distancia vertical del centroide, tomando el borde superior de la sección transversal como línea de referencia y con la distancia positiva hacia abajo.

Figura 7

Figura de sección compuesta de la viga con refuerzo No. 2



$$h_1 = \frac{\sum y_i A_i}{\sum A_i}$$

$$= \frac{4.47in(4.17in * 8.94in) + (8.94in + 0.02in)([n * 4.17 in] * 0.05in)}{(4.17in * 8.94in) + ([n * 4.17in] * 0.05in) + (4.17in * 1.25in)} +$$

$$\frac{(8.94in + 0.05in + 0.63in)(4.17in * 1.25in)}{(4.17in * 8.94in) + ([n * 4.17in] * 0.05in) + (4.17in * 1.25in)}$$

$$h_1 = \frac{285.63in^3}{50.18in^2} = 5.69 in$$

Ahora se calcula el momento de inercia total, de toda el área transversal con respecto al eje neutro.

$$I_T = I_{madera} + nI_{refurzo} + I_{lam.ult.madera}$$

$$= \frac{[b_{mad.} * (h_{mad.})^3]}{12} + A_{mad.}(h_1 - 4.47)^2$$

$$+ \frac{[(n * b_{ref.}) * (h_{ref.})^3]}{12} + [(n * b_{ref.}) * h_{ref.}](h_3 - 0.02)^2$$

$$+ \frac{[b_{lam.ult.madera} * (h_{lam.ult.madera})^3]}{12} + A_{lam.ult.madera}(h_4 - 0.63)^2$$

$$= \frac{[4.17in * (8.94in)^3]}{12} + 37.28in^2(5.69in - 4.47in)^2$$

$$+ \frac{[(36.85 * 4.17in) * (0.05in)^3]}{12}$$

$$+ [(36.85 * 4.17in) * 0.05in]([8.94in + 0.05in - 5.69in] - 0.02in)^2$$

$$+ \frac{[4.17in * (1.25in)^3]}{12} + 5.21in^2([8.94in + 0.05in + 1.25in - 5.69in] - 0.63in)^2$$

$$= 467.18 in^4$$

Teniendo la inercia total se pueden obtener lo siguientes esfuerzos:

$$\sigma_{madera1s} = \frac{-Mh_1}{I_T} = \frac{-216,086.64libras - in(5.69in)}{467.18in^4} = 2,631.82 \text{ psi compresión}$$

$$\sigma_{madera1i} = \frac{-Mh_2}{I_T} = \frac{-216,086.64libras - in(-8.94in + 5.69in)}{467.18in^4}$$

$$= 1,503.24 \text{ psi tensión}$$

$$\sigma_{refs} = \frac{-Mh_2 * n}{I_T} = \frac{-216,086.64libras(-8.94in + 5.69in) * n}{467.18in^4}$$

$$= 55,394.23 \text{ psi tensión}$$

$$\sigma_{refi} = \frac{-Mh_3 * n}{I_T} = \frac{-216,086libras - in(-8.94in - 0.05in + 5.69in) * n}{467.18in^4} = 56,246.45 \text{ psi tensión}$$

$$\sigma_{lam.ult.maderas} = \frac{-Mh_3}{I_T} = \frac{-216,086libras - in(-8.94in - 0.05in + 5.69in)}{467.18in^4}$$

$$= 1,526.36 \text{ psi tensión}$$

$$\sigma_{lam.ult.maderai} = \frac{-Mh_4}{I_T} = \frac{-216,086libras - in(-8.94in - 0.05in - 1.25in + 5.69in)}{467.18in^4}$$

$$= 2,104.53 \text{ psi tensión}$$

Foto 26
Viga de madera No. 2 fallada



VIGA No. 3

Datos:

$$b_{madera1} = 3.94 \text{ in}$$

$$h_{madera1} = 8.30 \text{ in}$$

$$L_{total} = 2.43 \text{ m} = 95.65 \text{ in}$$

$$L = 2.38 \text{ m} = 93.68 \text{ in}$$

$$n = 36.85$$

$$b_{refuerzo} = 3.94 \text{ in}$$

$$h_{refuerzo} = 0.047 \text{ in}$$

$$b_{tabla \text{ ult. madera}} = 3.94 \text{ in}$$

$$h_{tabla \text{ ult. madera}} = 1.25 \text{ in}$$

Tabla 23

Cargas y deformaciones de viga laminada con refuerzo No.3

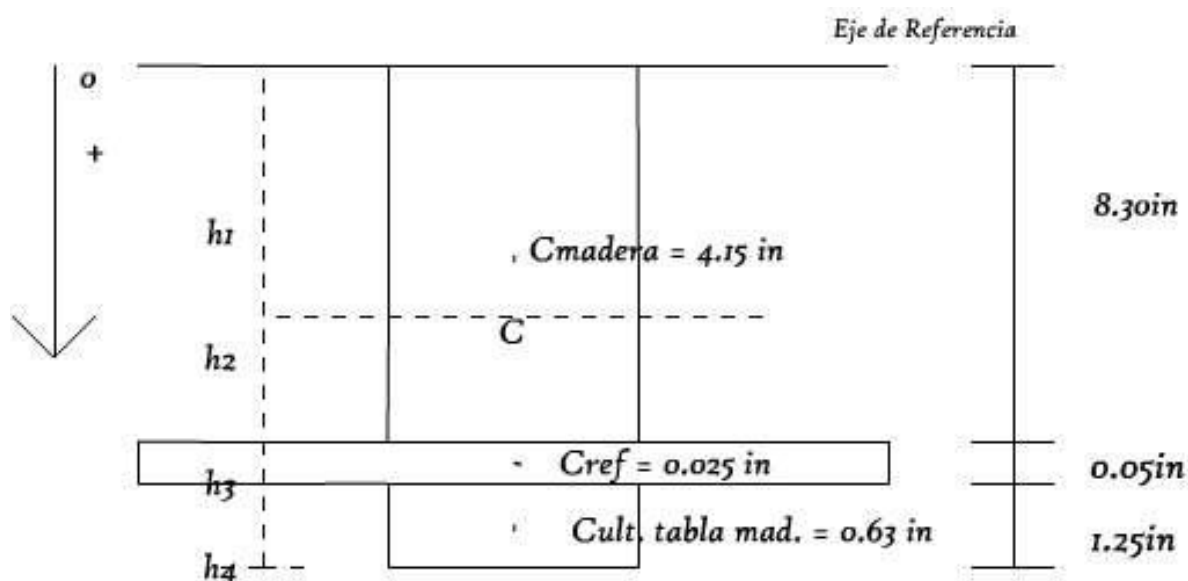
Esfuerzo de la prensa (psi)	Deflexión (mm)	Deflexión (in)	Carga (libras)
500	2.1	0.08	1,570.80
1000	4.8	0.19	3,141.59
1500	7.4	0.29	4,712.39
2000	9.7	0.38	6,283.19
2500	12.6	0.50	7,853.98
3000	15	0.59	9,424.78
3500	17.6	0.69	10,995.57
4000	20.5	0.81	12,566.37
4900	23.8	0.94	15,393.80

$$M_{FU} = \frac{P_u L}{4} = \frac{15,393.80 \text{ libras} * 93.68 \text{ in}}{4} = 360,522.80 \text{ libras} - \text{in}$$

Se puede obtener la distancia vertical del centroide, tomando el borde superior de la sección transversal como línea de referencia y con la distancia positiva hacia abajo.

Figura 8

Figura de sección compuesta de la viga con refuerzo No. 3



$$h_1 = \frac{\sum y_i A_i}{\sum A_i}$$

$$= \frac{4.15in(3.94in * 8.30in) + (8.30in + 0.02in)([n * 3.94 in] * 0.05in) + (8.30in + 0.05in + 0.63in)(3.94in * 1.25in)}{(3.94in * 8.30in) + ([n * 3.94in] * 0.05in) + (3.94in * 1.25in)}$$

$$h_1 = \frac{240.34in^3}{44.89in^2} = 5.35 in$$

Ahora se calcula el momento de inercia total, de toda el área transversal con respecto al eje neutro.

$$I_T = I_{madera} + nI_{refurzo} + I_{lam.ult.madera}$$

$$= \frac{[b_{mad.} * (h_{mad.})^3]}{12} + A_{mad.}(h_1 - 4.15)^2$$

$$+ \frac{[(n * b_{ref.}) * (h_{ref.})^3]}{12} + [(n * b_{ref.}) * h_{ref.}](h_3 - 0.02)^2$$

$$+ \frac{[b_{lam.ult.madera} * (h_{lam.ult.madera})^3]}{12} + A_{lam.ult.madera}(h_4 - 0.63)^2$$

$$= \frac{[3.94in * (8.30in)^3]}{12} + 32.70in^2(5.35in - 4.15in)^2$$

$$+ \frac{[(36.85 * 3.94in) * (0.05in)^3]}{12}$$

$$+ [(36.85 * 3.94in) * 0.05in][(8.30in + 0.05in - 5.35in) - 0.02in]^2$$

$$+ \frac{[3.94in * (1.25in)^3]}{12} + 4.92in^2([8.30in + 0.05in + 1.25in - 5.35in] - 0.63in)^2$$

$$= 364.41 in^4$$

Teniendo la inercia total se pueden obtener lo siguientes esfuerzos:

$$\sigma_{madera1s} = \frac{-Mh_1}{I_T} = \frac{-360,522.80 \text{ libras} - in(5.35in)}{364.41 in^4} = 5,292.93 \text{ psi compresión}$$

$$\sigma_{madera1i} = \frac{-Mh_2}{I_T} = \frac{-360,522.80 \text{ libras} - in(-8.30in + 5.35in)}{364.41 in^4}$$

$$= 2,918.53 \text{ psi tensión}$$

$$\sigma_{refs} = \frac{-Mh_2 * n}{I_T} = \frac{-360,522.80 \text{ libras} - in(-8.30in + 5.35in) * n}{364.41 in^4}$$

$$= 107,547.91 \text{ psi tensión}$$

$$\sigma_{refi} = \frac{-Mh_3 * n}{I_T} = \frac{-360,522.80 \text{ libras} - in(-8.30in - 0.05in + 5.35in) * n}{364.41 in^4}$$

$$= 109,370.75 \text{ psi tensión}$$

$$\sigma_{lam.ult.maderas} = \frac{-Mh_3}{I_T} = \frac{-360,522.80 \text{ libras} - in(-8.30in - 0.05in + 5.35in)}{364.41 in^4}$$

$$= 2,968 \text{ psi tensión}$$

$$\sigma_{lam.ult.maderai} = \frac{-Mh_4}{I_T} = \frac{-360,522.80 \text{ libras} - in(-8.30in - 0.05in - 1.25in + 5.35in)}{364.41 in^4}$$

$$= 4,204.66 \text{ psi tensión}$$

Foto 27

Viga de madera No. 3 fallada



VII. RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS EN LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

A. Valores representativos de los esfuerzos básicos y del contenido de humedad, de la especie de madera de pino caribaea

Tabla 24

Datos	Valores	Medida
Contenido de Humedad =	11%	
Esfuerzo último de compresión paralela a la fibra =	4,282.22	PSI
Esfuerzo último de compresión perpendicular a la fibra =	1,274.27	PSI
Esfuerzo último de corte radial =	799.50	PSI
Esfuerzo último de corte tangencial =	1,382.55	PSI
Módulo de Elasticidad =	629,504.19	PSI
Módulo de Ruptura =	2,798.11	PSI

Tabla 25

Módulos de ruptura para las veinte probetas

No. Probeta	MOR (psi)
1	5,400.00
2	3,600.00
3	5,340.00
4	5,136.00
5	3,864.00
6	3,696.00
7	3,780.00
8	3,900.00

Continuación Tabla 25

No. Probeta	MOR (psi)
9	3,744.00
10	5,400.00
11	3,600.00
12	3,720.00
13	5,352.00
14	5,400.00
15	5,340.00
16	3,600.00
17	5,400.00
18	5,328.00
19	3,696.00
20	3,648.00
PROMEDIO	4,447.20

B. Valores representativos de las vigas de madera sin refuerzo y las vigas de madera con refuerzo de fibra de carbono

Tabla 26

MOE de vigas sin refuerzo.

	MOE (PSI)
MOE VIGA 1	239,864.71
MOE VIGA 2	658,438.68
MOE VIGA 3	153,224.02
PROMEDIO	350,509.14

$$\frac{\text{MOE de probetas sometidas a flexión normadas por ASTM D-143}}{\text{MOE de viga sin refuerzo}} - 1 = \% \text{ de incremento}$$

Ecuación 19

$$\frac{629,504.19 \text{ psi}}{350,509.14 \text{ psi}} - 1 = 80 \% \text{ de incremento del MOE de las probetas}$$

con respecto al MOE de las vigas sin ref.

Tabla 27

Carga última de vigas sin refuerzo.

	Carga ultima de vigas sin refuerzo (libras)
Viga No.1	11,309.73
Viga No.2	7,539.82
Viga No.3	8,482.30
Promedio	9,110.62

Carga última de vigas con refuerzo = 15,393.80 libras

$$\frac{\text{Carga última viga con refuerzo}}{\text{Carga última viga sin refuerzo}} - 1 = \% \text{ de incremento}$$

Ecuación 20

$$\frac{15,393.80 \text{ psi}}{9,110.62 \text{ psi}} - 1 = 69 \% \text{ de incremento en la carga de la viga con ref.}$$

Tabla 28

Momento último de vigas sin refuerzo.

	Mu (lib.-in)
VIGA No. 1	261,538.00
VIGA No. 2	170,645.00
VIGA No. 3	196,153.00
Mu promedio	209,445.33

Momento último de vigas con refuerzo = 360,522.80 libras

$$\frac{\text{Momento último viga con refuerzo}}{\text{Momento último viga sin refuerzo}} - 1 = \% \text{ de incremento}$$

Ecuación 21

$$\frac{360,522.80 \text{ libras} - \text{in}}{209,445.33 \text{ libras} - \text{in}} - 1$$

= 72% de incremento en el momento último de la viga con ref.

Tabla 29

Módulo de ruptura de vigas sin refuerzo.

	f (psi)
VIGA No. 1	3,923.06
VIGA No. 2	2,559.67
VIGA No. 3	3,054.03
f promedio	3,178.92

Módulo de ruptura de vigas con refuerzo = 5,292.93 libras

$$\frac{\text{Módulo de Ruptura viga con refuerzo}}{\text{Módulo de Ruptura viga sin refuerzo}} - 1 = \% \text{ de incremento}$$

Ecuación 22

$$\frac{5,292.93 \text{ psi}}{3,178.92 \text{ psi}} - 1 = 66.5\% \text{ de incremento}$$

$$\text{Carga actuante en la fibra: } \frac{(\sigma_{\text{fibra superior psi}} + \sigma_{\text{fibra superior psi}})}{2} * A_{\text{fibra in}^2} = \text{Plibras}$$

Ecuación 23

$$\frac{(107,547.91 \text{ psi} + 109,370.75 \text{ psi})}{2} * 0.19 \text{ in}^2 = 20,607.27 \text{ libras}$$

$$F_{\text{fibra psi}} * A_{\text{fibra in}^2} \geq \text{Carga Actuante en la Fibra}$$

Ecuación 24

$$4,060,000 \text{ psi} * 0.19 \text{ in}^2 \geq 20,607.27 \text{ libras}$$

$$771,400 \text{ libras} \geq 20,607.27 \text{ libras}$$

VIII. CONCLUSIONES

1. Los esfuerzos básicos de la madera, que en esta investigación fueron los de la especie pino Caribaea, se efectuaron según la norma ASTM D-143, como en esta investigación el objetivo principal era aumentar la resistencia a flexión de vigas de madera se necesitaban los esfuerzos que soportaban las vigas que son los de flexión y corte, aunque el primero es el más importante sobre todo si la viga es larga y también porque las vigas de madera laminadas sin refuerzo fallaron todas por flexión. Al momento de efectuar los ensayos de flexión en las veinte probetas de dimensiones de 1"x1"x16", se obtuvo el esfuerzo último o módulo de ruptura que fue de 2,798.11 psi según la Tabla 24, este esfuerzo nos sirvió después para compararlo con el módulo de ruptura del ensayo a flexión de las vigas de madera laminadas sin refuerzo de dimensiones 1 1/4"x 10" x 8' que fue de 3,178.92 psi según la Tabla 29 por lo tanto el incremento de resistencia a flexión en la vigas de madera laminada fue de 14%. Se concluye que este incremento fue debido a que en las probetas sometidas, según la norma ASTM D-143 a flexión había nudos que actuaban como agujeros que hacían que se redujera la resistencia de dicha probeta, también habían rajaduras que ocasionan que el material redujera su resistencia. En el caso de las vigas de madera laminada se puede contrarrestar este problema colocando láminas que tengan la menor cantidad de imperfecciones como lo son los nudos y las grietas. Aunque se podría haber obtenido más resistencia a la flexión en el caso de las vigas laminadas sin refuerzo, ya que solo se pudieron secar al sol, esto puede haber hecho que la humedad en las vigas no fuera uniforme, lo cual en las partes más húmedas hacía que el agua pegara o alejara las fibras, así como también las fibras perdieran alineación con su eje transversal y disminuyera su resistencia a la flexión. Esto no pasó en el caso de las probetas ensayadas a flexión según la norma ASTM D-143 debido a que las probetas fueron secadas en un horno por sus pequeñas dimensiones y esto permitió que el contenido de humedad fuera mínimo y uniforme en todas las probetas.

2. Es interesante ver cómo el módulo de elasticidad en las probetas, es mucho mayor por 80% según se puede apreciar en la ecuación 19, que en las vigas de madera laminada sin refuerzo, aun cuando las vigas de madera sin refuerzo tienen un aumento del 14% con respecto a las probetas sometidas a flexión, según la norma ASTM D-143. Entonces se puede concluir según $\frac{\sigma}{\epsilon} = E$, que teniendo los valores de esfuerzo último y módulo de elasticidad la variable que se ve afectada es la deformación unitaria que en el caso de las probetas es un valor pequeño comparado con el de las vigas laminadas, esto quiere decir que las vigas laminadas sin refuerzo tienden a deformarse más que las probetas.

3. Cuando se determinaron los esfuerzos básicos de la especie pinus Caribaea, para los diferentes ensayos (Compresión, Corte, Dureza y Flexión), se tomó como valor representativo de cada ensayo el percentil del 5% que es el método que utiliza el LRFD en el diseño en madera para obtener factores de carga, esfuerzos últimos y factores de resistencia, suponiendo una distribución normal. Dicho percentil está constituido por los valores de las peores piezas y no del promedio de éstas, dejando la probabilidad del 95% que los valores de las piezas sean iguales o superiores al valor representativo de cada ensayo. Por lo tanto cuando hay mucha variación en los datos el percentil del 95% estará más lejos de la media y peor será el rendimiento de dichos datos. Se concluye que la diferencia o el incremento del módulo de elasticidad de los probetas ensayadas a flexión por la norma ASTM D-143 tuvo menos desviación estándar en los valores de cada probeta que en los obtenidos con las vigas de madera laminada. Esto es por el hecho que se obtuvieron 17 valores más en las probetas ASTM D-143 que en las vigas laminadas sin refuerzo.

4. Cuando se realizó la comparación entre vigas de madera laminada sin refuerzo y vigas con refuerzo de fibra de carbono se puede concluir con la ecuación 21 que el incremento del Momento último en las vigas de madera con refuerzo fue de 72%.

5. Al momento de obtener la tensión efectiva en el refuerzo se pudo comprobar que la relación con el esfuerzo último de la fibra de carbono es de 5.075:1, según la ecuación 24. De esto se puede concluir que la fibra de carbono está sobredimensionada tomando en cuenta la geometría transversal de la viga estudiada.

IX. RECOMENDACIONES

1. Al momento de hacer vigas laminadas de madera, se debe hacer una exhaustiva clasificación de la madera, tratando de ser muy cuidadoso con los nudos o con las grietas, en el caso de los nudos estos se pueden quitar y se puede acoplar las láminas de madera por medio del sistema finger joint.
2. Es recomendable que para obtener el módulo de elasticidad y el esfuerzo último óptimo, las láminas de madera se sequen al horno, para que así el contenido de humedad de las láminas sean uniforme y mínimo.
3. Se recomienda que para obtener un dato más exacto de estos ensayos, se utilice la mayor cantidad de piezas, y en el caso de la madera, se tenga la menor cantidad de imperfecciones para que la variación de los valores sea mínima y se obtengan valores representativos más exactos. Por tanto esta investigación puede servir de ayuda a continuar ensayando vigas de madera laminada sin refuerzo de iguales dimensiones que las ensayadas en esta investigación para que la confiabilidad de los datos sea mayor.
4. Se recomienda tener un proceso de selección de la madera más estricto y mejorar el proceso de la fabricación para evitar fallas prematuras (adherencia fibra de carbono madera), y así hacer ensayos para poder aumentar el coeficiente a más de 72%.
5. Se recomienda por cuestión de resistencia a la tensión conseguir una fibra de resistencia menor, de área transversal menor. Otra alternativa hubiera sido colocar fibras vegetales con resistencia menor y así poder competir con resistencia y costos con los métodos tradicionales estructurales y de reforzamiento.

X. BIBLIOGRAFIA

- ASTM (American Society for Testing Materials). 2006. *ASTM- D 143*. Thirteenth edition. USA.
- Bonilla, Luis Gerardo. 2007. *Determinación de las principales propiedades físicas y mecánicas de lamadera de Cordia dodecandra (Siricote), Mastichodendron capiri var. Tempisque (Tempisque), Bucida buceras (Pucte), Swartzia cubensis (Llora-sangre), y Astronium graveolens (Jobillo). Trabajo de Graduación Licenciatura en Forestal. Guatemala. Universidad del Valle de Guatemala. 77 págs.*
- Calle, Gabriel. 2009. *Determinación de las Principales Propiedades Mecánicas de los Materiales Sometidos a Flexión. Guía de laboratorio. Universidad Tecnológica de Pereira. 120 Págs.*
- Demkoff, Miguel L.V. 2008. *VIGAS LAMINADAS ESTRUCTURALES DE MADERA, SU FABRICACIÓN Y EMPLEO. 220 Págs.*
- Elementa. 2009. *Soluciones Estructurales con Fibra de Carbono. Página Web: <http://www.elese.cl/servicios/conocimiento/refuerzos-estruct-con-frp.html>*
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2007. *INFORME DE UNA EXPEDICION A MEXICO Y AMERICA CENTRAL PARA OBTENER SEMILLAS DE PINOS TROPICALES, <http://www.fao.org/docrep/006/d4959s/D4959S02.html>.*

- Gere, James. 2004. *Mecánica de Materiales*. Universidad de Stanford. Sexta Edición. Editorial Thomson. 610 Págs.
- Moreno, Jaime. 2,004. *Propiedades Mecánicas de Gmelina arborea*. Publicación. Valle del Sacta Cochabamba. 64 Págs.
- Ortiz Pineda, María Elena. 2009. *Aptitud de la madera de diámetros menores de Pinus maximinoi para la fabricación de secciones compuestas como elemento de construcción*. 77 Págs.
- Oviedo Sarmiento, Ricardo Ramón. 2010. *Métodos de Reforzamiento en Edificios de Concreto Armado, Artículo de la especialización en Ing. Sismorresistente- UNI*. 110 Págs.
- Somoza, Luis. 2007. *LA MADERA LAMINADA ENCOLADA: HISTORIA y DEFINICION*, Artículo de la E.T.S. de Arquitectura de La Coruña. 52 Págs.
- Taylor, Robert. 2010. *Designing with LRFD for Wood*. LRFD Manual. 10 Págs.

XI. ANEXOS

A. ANEXO # 1

1. Datos de Ensayo de Flexión Estática

Probeta # 1	
Carga (lb)	Deformación (pulg.)
100	0.152
200	0.252
300	0.3
400	0.425
Carga última	450
	0.64

Probeta # 2	
Carga (lb)	Deformación (pulg.)
100	0.2
200	0.35
Carga última	300
	0.46

Probeta # 3	
Carga (lb)	Deformación (pulg.)
100	0.14
200	0.238
300	0.32
400	0.42
Carga última	445
	0.53

Probeta # 4	
Carga (lb)	Deformación (pulg.)
100	0.148
200	0.224
300	0.375
400	0.415
Carga última	428
	0.523

Probeta # 5	
Carga (lb)	Deformación (pulg.)
100	0.197
200	0.323
Carga última	322
	0.432

Probeta # 6	
Carga (lb)	Deformación (pulg.)
100	0.209
200	0.334
Carga última	308
	0.419

Probeta # 7		
	Carga (lb)	Deformación (pulg.)
	100	0.199
	200	0.327
Carga última	315	0.435

Probeta # 8		
	Carga (lb)	Deformación (pulg.)
	100	0.196
	200	0.332
Carga última	325	0.442

Probeta # 9		
	Carga (lb)	Deformación (pulg.)
	100	0.211
	200	0.345
Carga última	312	0.449

Probeta # 10		
	Carga (lb)	Deformación (pulg.)
	100	0.162
	200	0.222
	300	0.365
	400	0.424
Carga última	450	0.53

Probeta # 11		
	Carga (lb)	Deformación (pulg.)
	100	0.197
	200	0.341
Carga última	300	0.468

Probeta # 12		
	Carga (lb)	Deformación (pulg.)
	100	0.215
	200	0.347
Carga última	310	0.472

Probeta # 13		
	Carga (lb)	Deformación (pulg.)
	100	0.148
	200	0.246
	300	0.315
	400	0.421
Carga última	446	0.652

Probeta # 14		
	Carga (lb)	Deformación (pulg.)
	100	0.154
	200	0.247
	300	0.32
	400	0.428
Carga última	450	0.656

Probeta # 15		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
100	0.145	
200	0.256	
300	0.311	
400	0.418	
Carga última	445	0.638

Probeta # 16		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
100	0.198	
200	0.342	
Carga última	300	0.447

Probeta # 17		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
100	0.154	
200	0.255	
300	0.315	
400	0.422	
Carga última	450	0.652

Probeta # 18		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
100	0.15	
200	0.249	
300	0.298	
400	0.42	
Carga última	444	0.65

Probeta # 19		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
100	0.202	
200	0.355	
Carga última	304	0.464

Probeta # 20		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
100	0.203	
200	0.347	
Carga última	308	0.476

2. Datos de Ensayo de Compresión Paralela a la Fibra

Probeta # 1		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.032	
4,000	0.044	
6,000	0.048	
8,000	0.056	
10,000	0.06	
12,000	0.065	
14,000	0.074	
16,000	0.076	
18,000	0.08	
Carga última	22,500	0.088

Probeta # 2		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.022	
4,000	0.03	
6,000	0.04	
8,000	0.048	
10,000	0.058	
12,000	0.075	
Carga última	14,500	0.095

Probeta # 3		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.028	
4,000	0.041	
6,000	0.046	
8,000	0.053	
10,000	0.058	
12,000	0.062	
14,000	0.071	
16,000	0.075	
18,000	0.079	
Carga última	21,500	0.084

Probeta # 4		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.037	
4,000	0.04	
6,000	0.046	
8,000	0.061	
10,000	0.064	
12,000	0.068	
14,000	0.073	
16,000	0.078	
18,000	0.081	
Carga última	22,000	0.09

Probeta # 5		
	Carga (lb)	Deformación (pulg.)
	2,000	0.022
	4,000	0.035
	6,000	0.046
	8,000	0.053
	10,000	0.064
	12,000	0.075
	14,000	0.088
	16,000	0.105
	18,000	0.135
Carga última	22,500	0.21

Probeta # 6		
	Carga (lb)	Deformación (pulg.)
	2,000	0.014
	4,000	0.018
	6,000	0.021
	8,000	0.025
	10,000	0.03
	12,000	0.032
	14,000	0.035
	16,000	0.038
	18,000	0.043
	20,000	0.046
Carga última	24,000	0.065

Probeta # 7		
	Carga (lb)	Deformación (pulg.)
	2,000	0.011
	4,000	0.016
	6,000	0.02
	8,000	0.027
	10,000	0.032
	12,000	0.034
	14,000	0.036
	16,000	0.039
	18,000	0.045
	20,000	0.048
Carga última	22,000	0.05

Probeta # 8		
	Carga (lb)	Deformación (pulg.)
	2,000	0.016
	4,000	0.017
	6,000	0.02
	8,000	0.023
	10,000	0.028
	12,000	0.032
	14,000	0.036
	16,000	0.038
	18,000	0.04
	20,000	0.044
Carga última	21,000	0.049

Probeta # 9		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.018	
4,000	0.028	
6,000	0.032	
8,000	0.037	
10,000	0.042	
12,000	0.046	
14,000	0.05	
16,000	0.054	
18,000	0.061	
20,000	0.067	
Carga última	22,500	0.08

Probeta # 10		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.023	
4,000	0.035	
6,000	0.04	
8,000	0.045	
10,000	0.048	
12,000	0.054	
14,000	0.058	
16,000	0.064	
18,000	0.071	
20,000	0.085	
Carga última	20,500	0.12

Probeta # 11		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.021	
4,000	0.037	
6,000	0.042	
8,000	0.045	
10,000	0.047	
12,000	0.053	
14,000	0.057	
16,000	0.061	
18,000	0.068	
20,000	0.082	
Carga última	20,200	0.108

Probeta # 12		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.014	
4,000	0.026	
6,000	0.034	
8,000	0.039	
10,000	0.041	
12,000	0.044	
14,000	0.051	
16,000	0.057	
18,000	0.06	
20,000	0.065	
Carga última	21,000	0.082

Probeta # 13		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.016	
4,000	0.027	
6,000	0.032	
8,000	0.038	
10,000	0.044	
12,000	0.048	
14,000	0.053	
16,000	0.059	
18,000	0.064	
Carga última	20,000	0.078

Probeta # 14		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.029	
4,000	0.042	
6,000	0.051	
8,000	0.058	
10,000	0.066	
12,000	0.074	
14,000	0.083	
16,000	0.1	
Carga última	18,000	0.107

Probeta # 15		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.012	
4,000	0.022	
6,000	0.031	
8,000	0.036	
10,000	0.039	
12,000	0.041	
14,000	0.049	
16,000	0.052	
18,000	0.058	
20,000	0.063	
Carga última	20,500	0.076

Probeta # 16		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.019	
4,000	0.032	
6,000	0.041	
8,000	0.05	
10,000	0.06	
12,000	0.072	
14,000	0.084	
16,000	0.1	
18,000	0.116	
Carga última	21,800	0.12

Probeta # 17		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.01	
4,000	0.02	
6,000	0.029	
8,000	0.035	
10,000	0.04	
12,000	0.043	
14,000	0.048	
16,000	0.05	
18,000	0.06	
20,000	0.065	
Carga última	20,600	0.072

Probeta # 18		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.014	
4,000	0.021	
6,000	0.033	
8,000	0.039	
10,000	0.041	
12,000	0.044	
14,000	0.048	
16,000	0.054	
18,000	0.058	
20,000	0.061	
Carga última	21,000	0.069

Probeta # 19		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.02	
4,000	0.026	
6,000	0.033	
8,000	0.038	
10,000	0.044	
12,000	0.048	
14,000	0.052	
16,000	0.057	
18,000	0.064	
20,000	0.068	
Carga última	23,500	0.076

Probeta # 20		
Carga (lb)	Deformación (pulg.)	
2,000	0.022	
4,000	0.029	
6,000	0.037	
8,000	0.043	
10,000	0.049	
12,000	0.055	
14,000	0.059	
16,000	0.063	
18,000	0.072	
20,000	0.082	
Carga última	22,200	0.089

3. Datos de Ensayo de Compresión Perpendicular a la Fibra

No. Probeta	Carga última (lb)
1	6,000
2	6,600
3	5,500
4	4,800
5	7,000
6	6,200
7	6,200
8	7,000
9	5,800
10	6,500
11	6,200
12	5,750
13	6,300
14	6,000
15	5,800
16	6,800
17	6,200
18	5,500
19	6,200
20	6,000

4. Datos de Ensayo de Prueba Janka (Dureza Lateral)

No. Probeta	Carga última (lb)
1	398
2	540
3	405
4	330
5	450
6	525
7	495
8	360
9	420
10	510
11	465
12	540
13	488
14	368
15	443
16	503
17	533
18	525
19	480
20	503

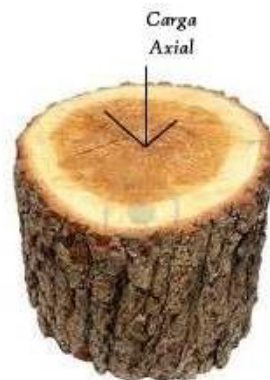
Tabla que describe el número de probeta ensayada con la carga última en la que la bala de acero de 0.44" penetró la parte lateral de la madera de dicha probeta hasta llegar a la mitad de su diámetro.



5. Datos de Ensayo de Prueba Janka (Dureza Axial)

No. Probeta	Carga última (lb)
1	788
2	585
3	615
4	825
5	750
6	675
7	690
8	660
9	593
10	825
11	863
12	900
13	825
14	743
15	668
16	788
17	840
18	750
19	900
20	840

Tabla que describe el número de probeta ensayada con la carga última en la que la bala de acero de 0.44" penetró la parte axial de la madera de dicha probeta hasta llegar a la mitad de su diámetro.



6. Datos de Ensayo de Prueba de Corte (Radial)

No. Probeta	Carga última (lb)
1	473
2	405
3	390
4	488
5	420
6	510
7	420
8	458
9	488
10	510
11	465
12	390
13	488
14	413
15	443
16	503
17	510
18	428
19	480
20	428

7. Datos de Ensayo de Prueba de Corte (Tangencial)

No. Probeta	Carga última (lb)
1	705
2	788
3	690
4	728
5	683
6	735
7	840
8	870
9	810
10	743
11	720
12	803
13	855
14	788
15	735
16	825
17	728
18	690
19	750
20	863

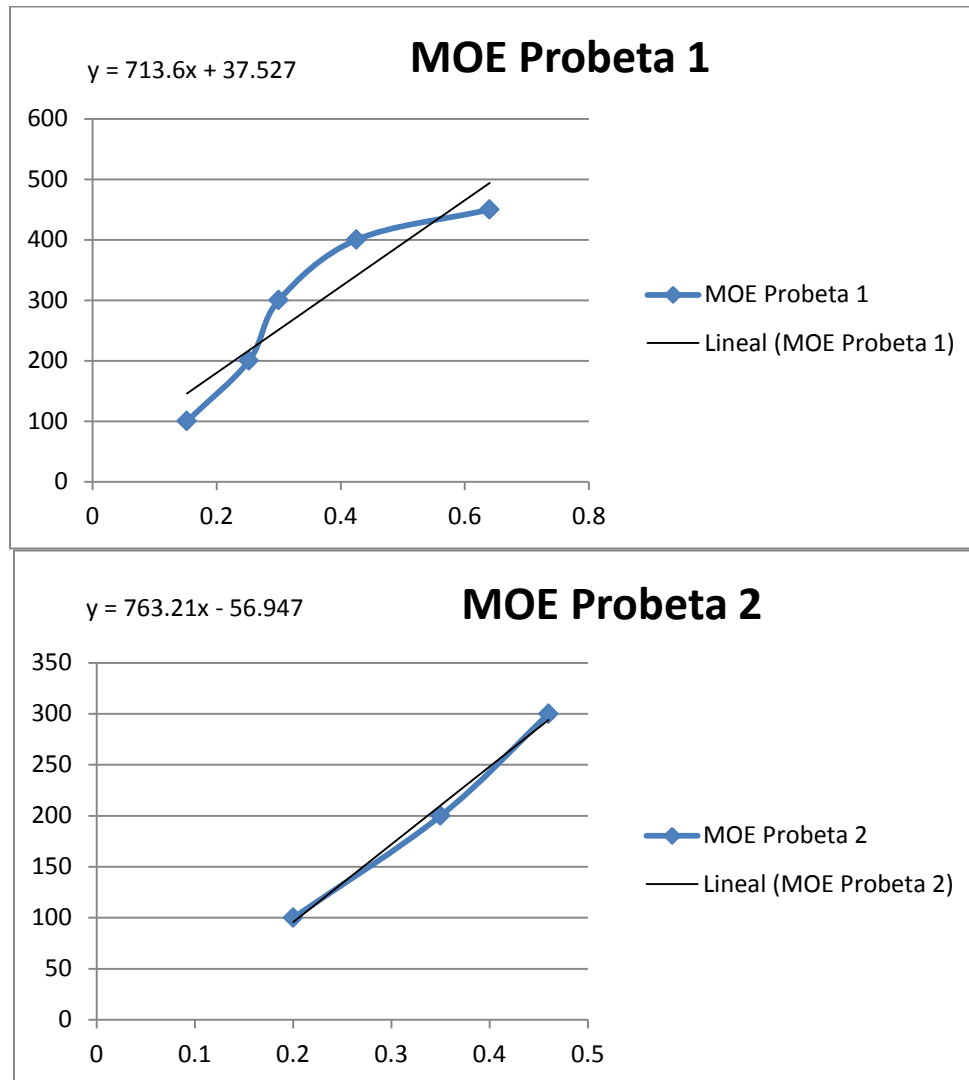
B. ANEXO # 2

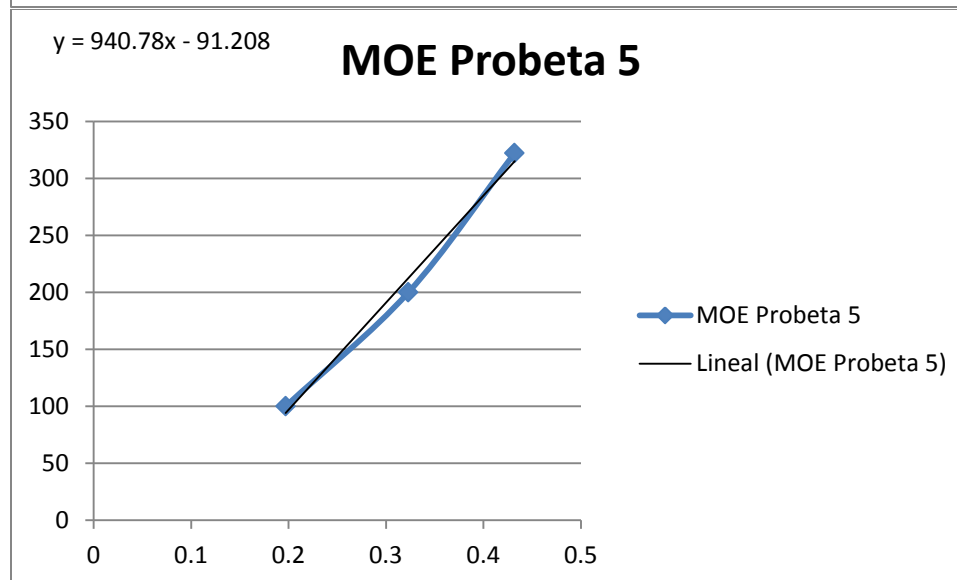
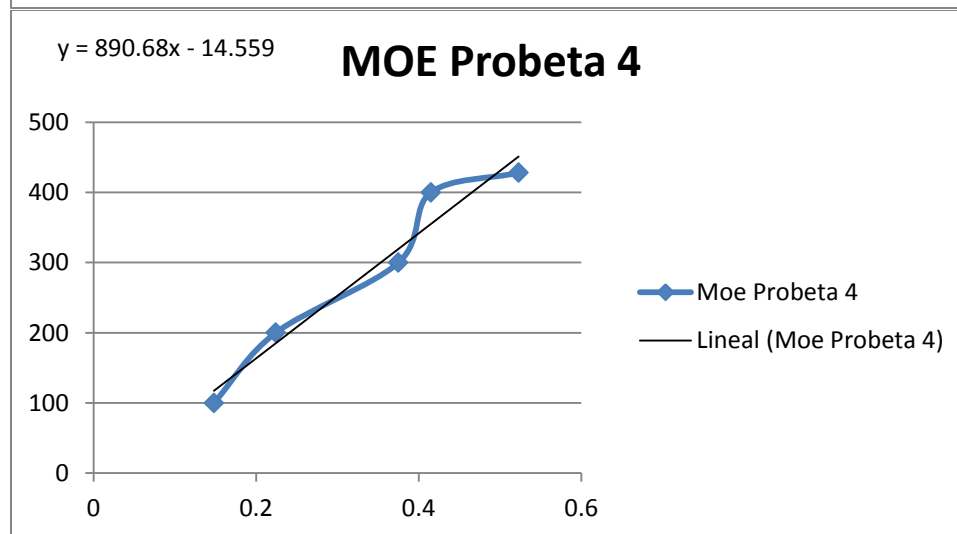
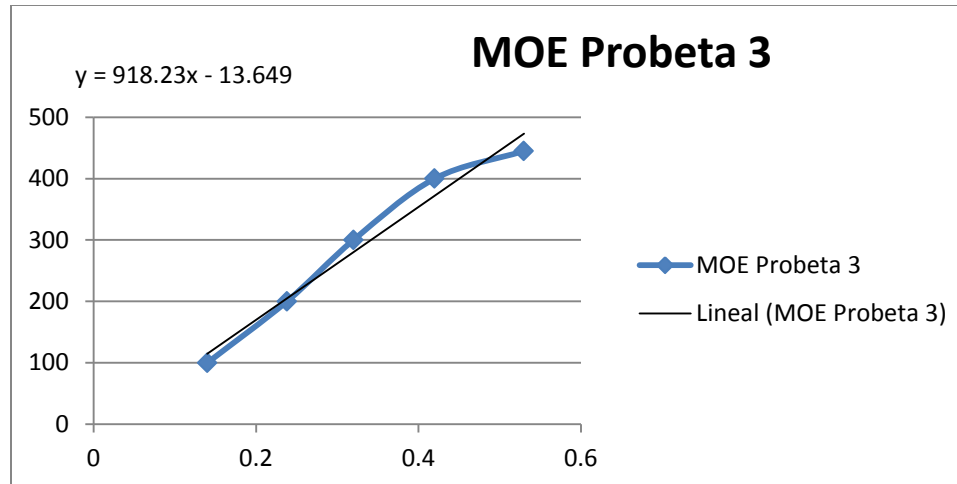
1. Valor del coeficiente $k\sigma$ para un percentil de 5%

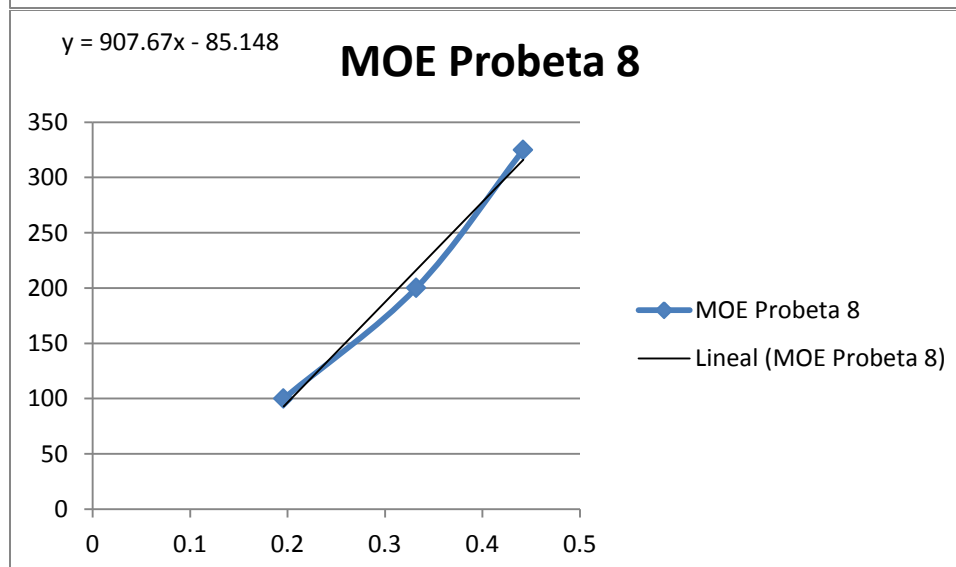
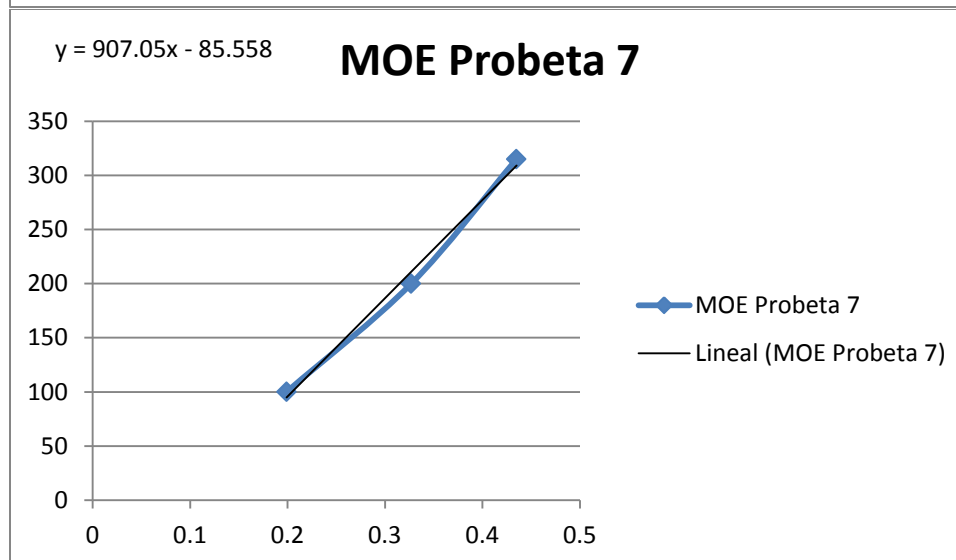
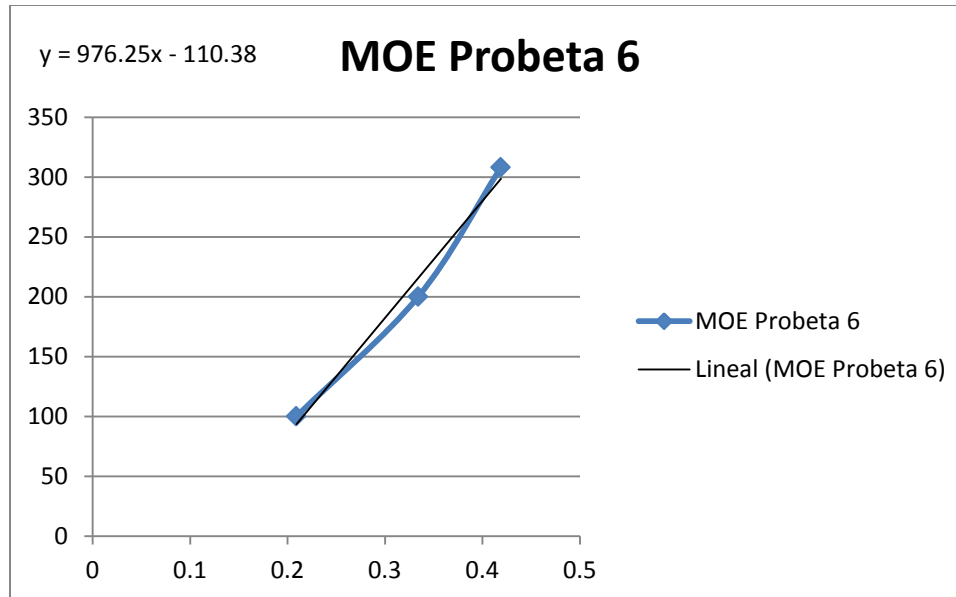
Tabla 30

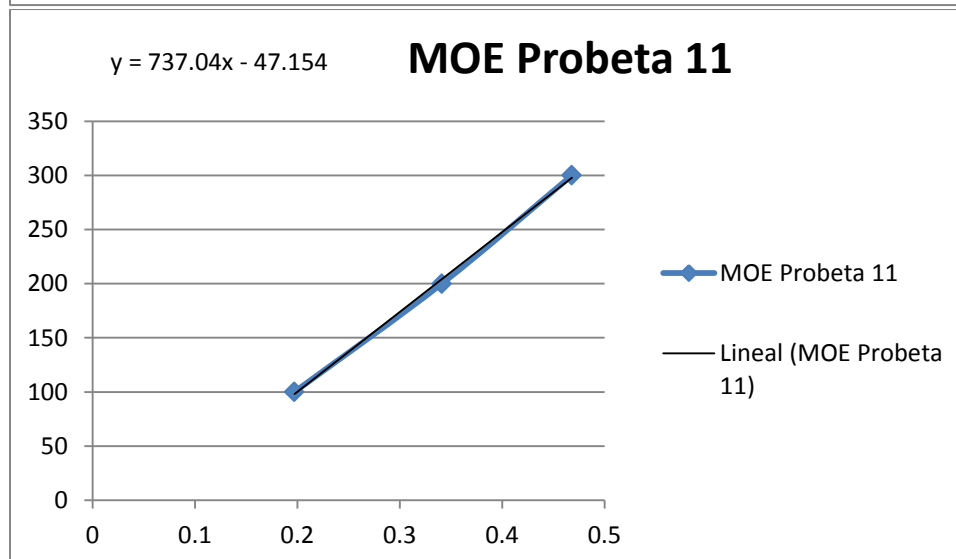
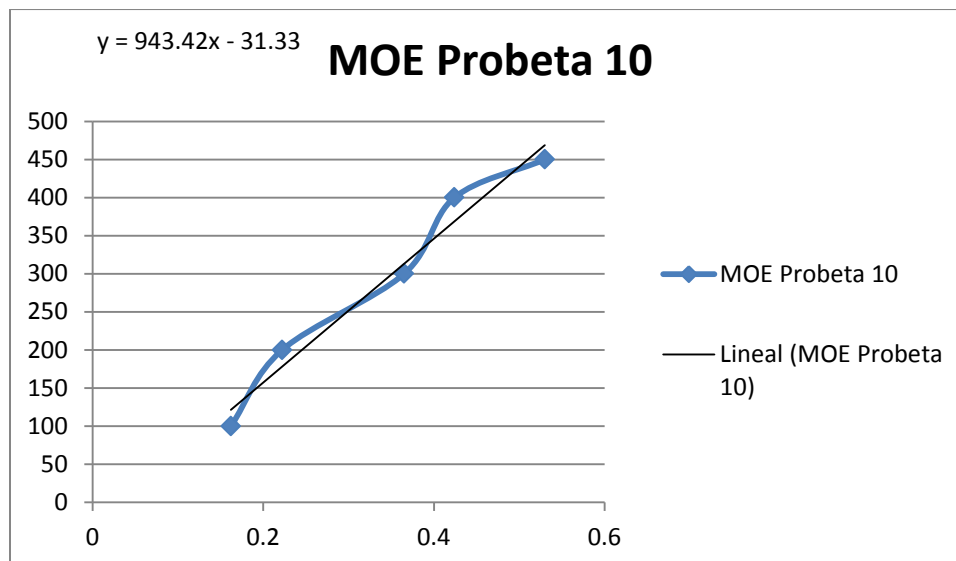
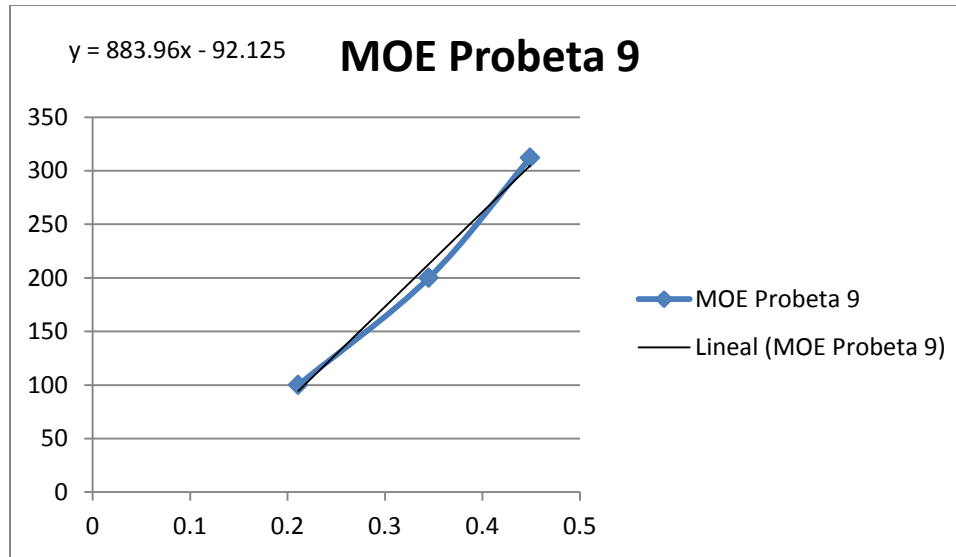
	Desviación típica	Desconocida	Previamente conocida
Numero de ensayos, n	3	3.15	2.03
	4	2.68	1.98
	6	2.34	1.92
	8	2.19	1.88
	10	2.1	1.86
	20	1.93	1.79
	30	1.87	1.77
	100	1.76	1.71
	infinito	1.64	1.64

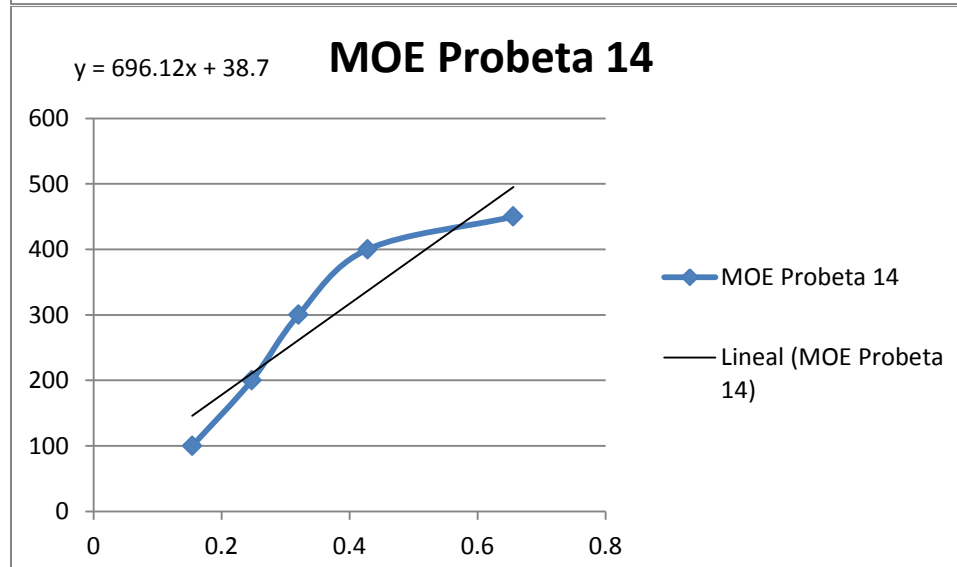
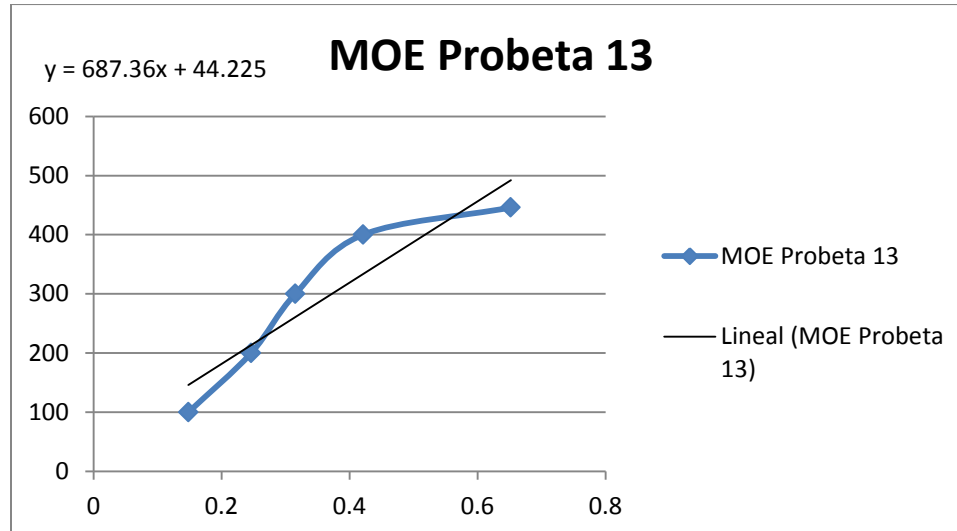
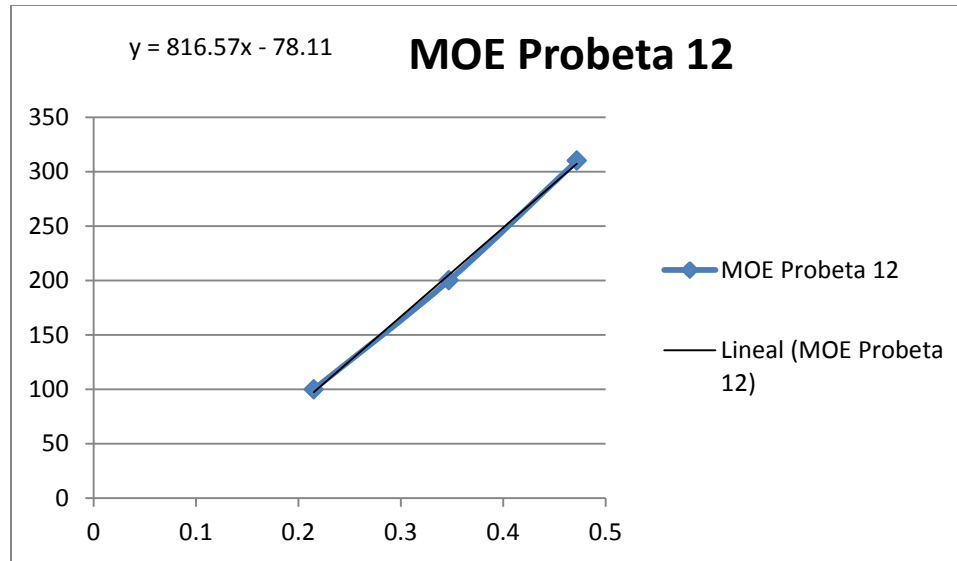
2. Graficas de carga y deformación de cada probeta sometida a flexión

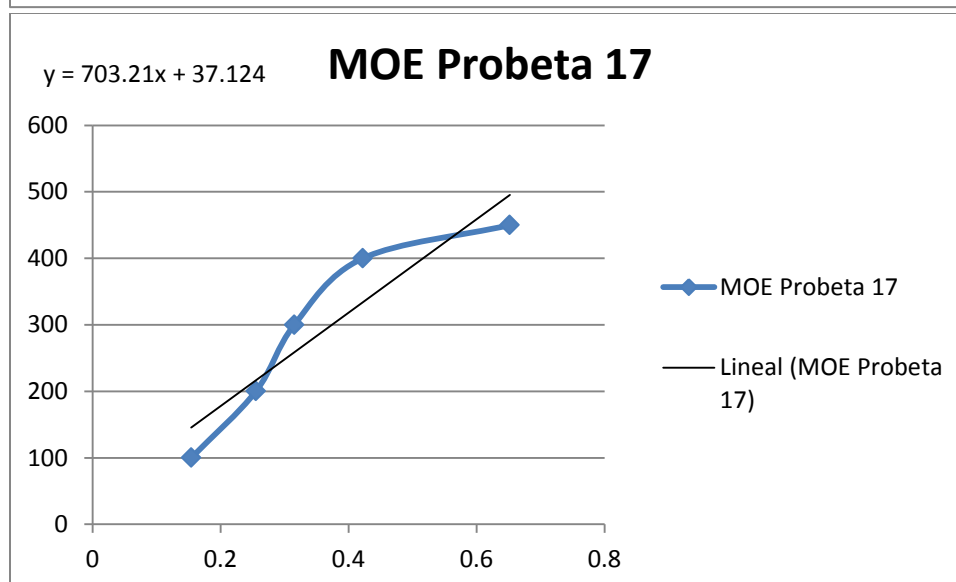
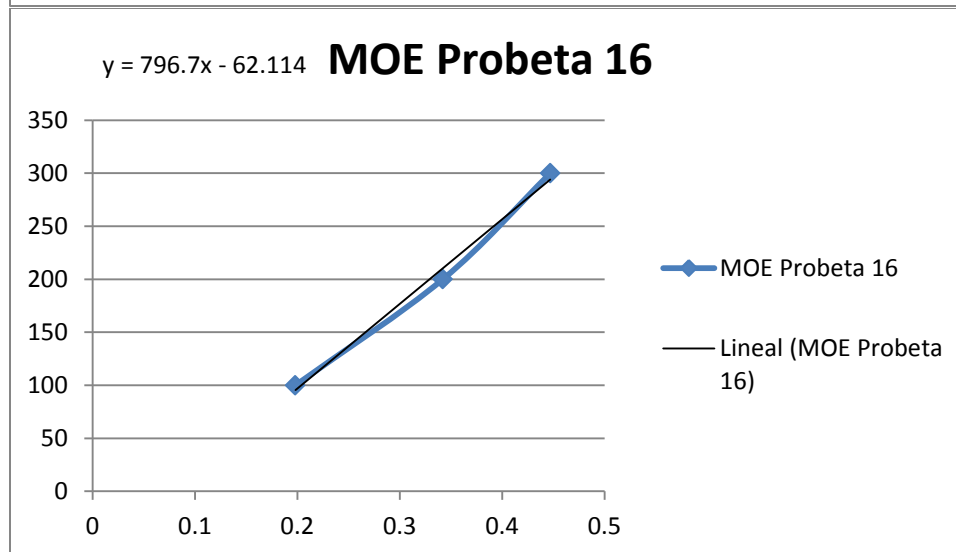
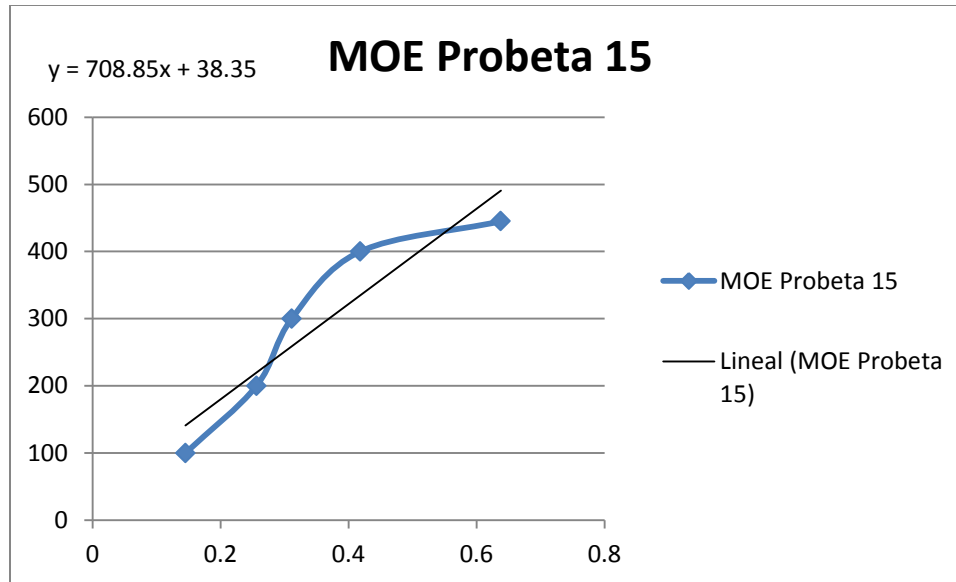


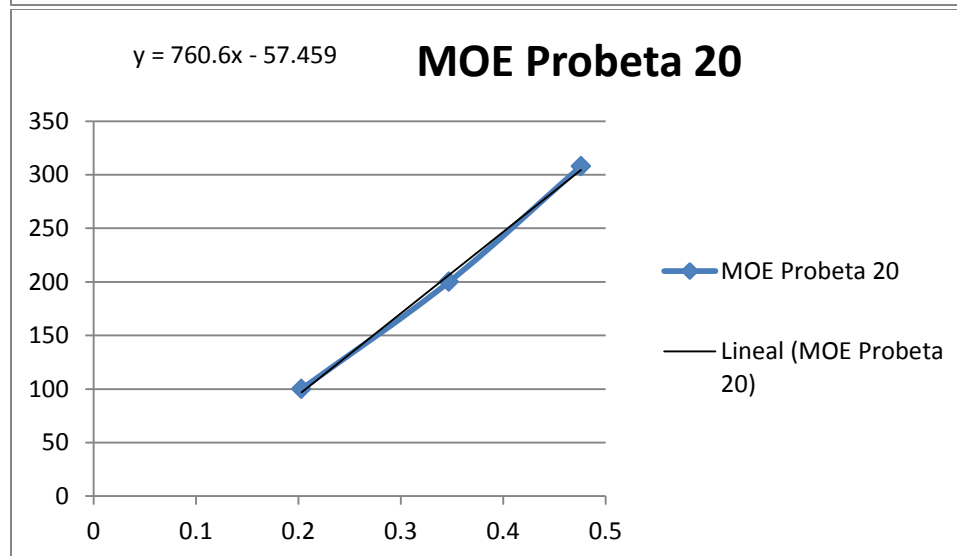
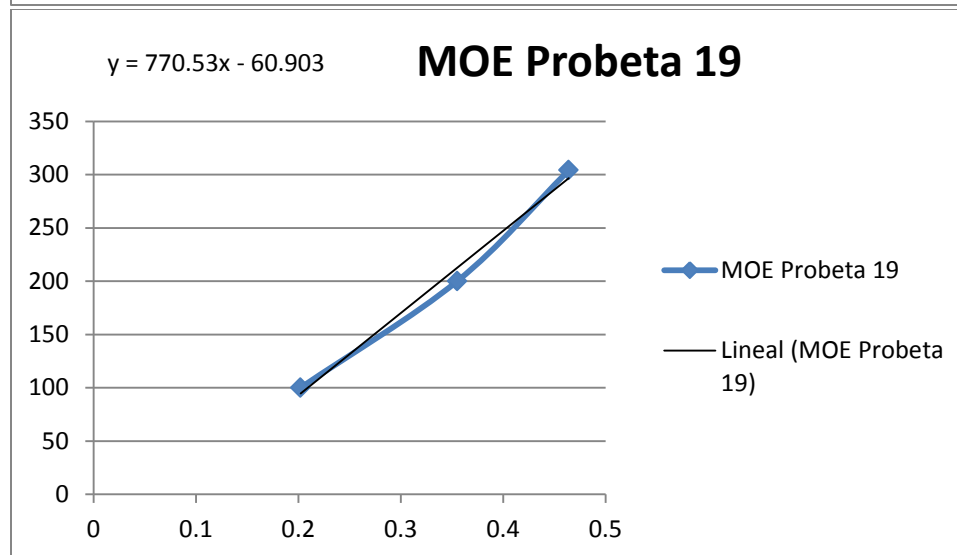
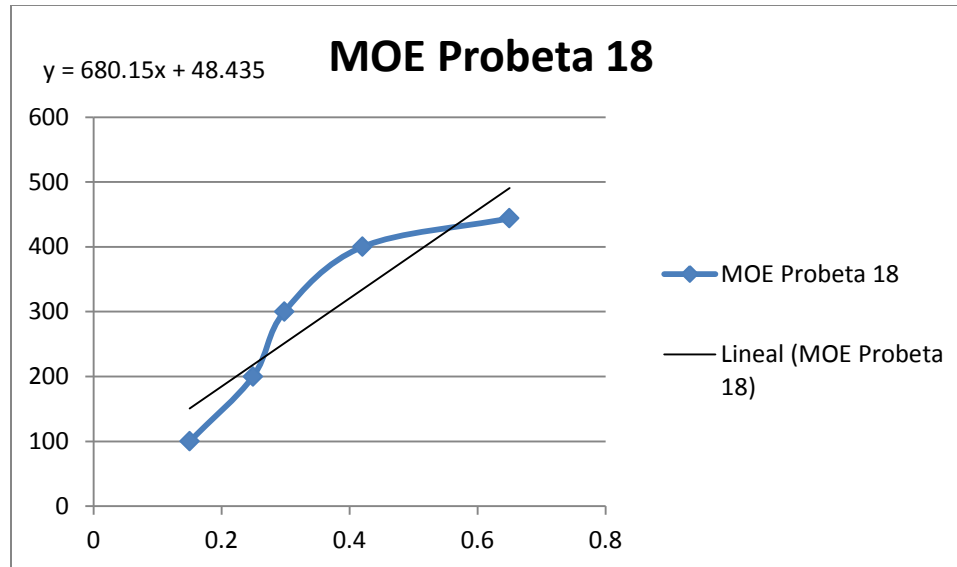












C. ANEXO # 3

1. Propiedades mecánicas y físicas de la lámina de fibra de carbono Sika Carbodur

Typical Data				
Base	Carbon fiber reinforced polymer with an epoxy resin matrix.			
Shelf Life	Unlimited (no exposure to direct sunlight).			
Color	Black			
Tensile Strength				
Mean Value	4.49 x 10 ⁵ psi (3,100 MPa)			
Design Value	4.06 x 10 ⁵ psi (2,800 MPa)			
Modulus of Elasticity				
Mean Value	23.9 x 10 ⁶ psi (165,000 MPa)			
Design Value	23.2 x 10 ⁶ psi (160,000 MPa)			
Elongation at Break	1.69%			
Design Strain	0.85%			
Thickness	0.047 in. (1.2 mm)			
Temperature Resistance	>300°F (>150°C)			
Fiber Volumetric Content	>68%			
Density	0.058 lbs./in ³ (1.60 g/cm ³)			
Physical Properties				
<i>Product</i>	<i>Thickness (mils)</i>	<i>Width (inches)</i>	<i>Cross Sectional Area</i>	<i>Tensile Strength</i>
Type S 512	47.2 (1.2 mm)	1.97 (50 mm)	0.093 sq. in. (60 mm ²)	37.8 x 10 ³ lbs. (168 kN)
Type S 812	47.2 (1.2 mm)	3.15 (80 mm)	0.149 sq. in. (96 mm ²)	60.4 x 10 ³ lbs. (269 kN)
Type S 1012	47.2 (1.2 mm)	3.94 (100 mm)	0.186 sq. in. (120 mm ²)	75.5 x 10 ³ lbs. (336 kN)