

## ENSAYOS DE VIGAS DE MADERA REFORZADAS CON FIBRA DE CARBONO Y CON FIBRA DE VIDRIO

### TESTING OF WOODEN BEAMS REINFORCED WITH CARBON FIBER AND FIBER OF GLASS

David Ayo<sup>(1)</sup>, Estuardo Peñaherrera<sup>(1)</sup>, Patricio Silva<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción  
Universidad de Fuerzas Armadas ESPE  
Av. Gral. Rumiñahui, Sangolquí - Ecuador  
[rraquir@espe.edu.ec](mailto:rraquir@espe.edu.ec)

<sup>(2)</sup> SP Structure. Sistema de Protección Estructural  
[www.spestructure.com](http://www.spestructure.com)  
Quito-Ecuador

#### RESUMEN

La madera es un material que es utilizado en diferentes estructuras las cuales por cambio de uso, años de servicio importancia histórica, etc. se encuentran en la necesidad de ser reforzadas. En este artículo se compara las cargas máximas y sus desplazamientos, obtenidos en ensayos experimentales de madera de Colorado (*Pouteria* sp) y la madera de Seique (*Cedrelinga cateniformis* D. Duke), reforzada con CFRP, GFRP, además de un análisis del comportamiento del material de refuerzo con ensayos de tracción del sistema epóxico-fibra y ensayo de pull off. Con ayuda de un modelo Teórico se analiza el desempeño del Sistema Compuesto de Refuerzo Estructural de Fibra de Carbono y Fibra de vidrio con la madera.

**Palabras clave:** refuerzo, sistema compuesto, estructural, fibra de carbono, fibra de vidrio, tensión.

#### ABSTRACT

Wood is a material which is used in different structures which use changes, historical significance years of service, etc. They are in need of strengthening. In this article the maximum loads and movements, from experimental trials Wood Colorado (*Pouteria* sp) and wood Seique (*Cedrelinga cateniformis* D. Duke), reinforced with CFRP, GFRP, plus a

Recibido: Febrero de 2015  
Aprobado: Agosto de 2015

behavior analysis compares reinforcing material with tensile testing of fiber-epoxy test system and pull off. Using a theoretical model performance composite structural reinforcement system of carbon fiber and fiber glass timber is analyzed.

**Keywords:** reinforcement, system composite, structural, carbon fiber, glass fiber, tension.

## 1. INTRODUCCIÓN

La madera ha estado presente desde siempre en el progreso de la humanidad en edificaciones y estructuras que hasta la actualidad con rehabilitación y reforzamiento han perdurado a lo largo de los años.

En la actualidad las edificaciones y estructuras de madera por motivos de cambio de uso, importancia cultural o histórica, años de servicio, etc. Están en la necesidad de ser reforzadas y rehabilitadas.

Como se puede ver en la Figura 1, en Escocia se realizó un reforzamiento de vigas de Techo en losa reticular en el Castillo Mansfeld el propósito fue el cambio de uso, se convirtió en un Hotel.



**Figura 1** Reforzamiento del Castillo Mansfeld.

En Italia el Palacio Farnesio Del siglo XVI uno de los edificios más atractivos del Renacimiento de Roma, se inició a construir en el año 1514. Antonio Sangallo, luego Miguel Ángel y, finalmente, Giacomo della Porta, fueron los encargados de su edificación, en la Figura 2, se puede apreciar que las vigas de su cubierta fueron reforzadas con CFRP , actualmente es la sede de la embajada de Francia en Roma



**Figura 2** Reforzamiento del Palacio Farnecio.

Como se puede apreciar en la Figura 3, En Alemania la torre de la catedral de Merseburg se reforzó con CFRP a causa de daños debido a elevadas cargas de viento y la intemperie.



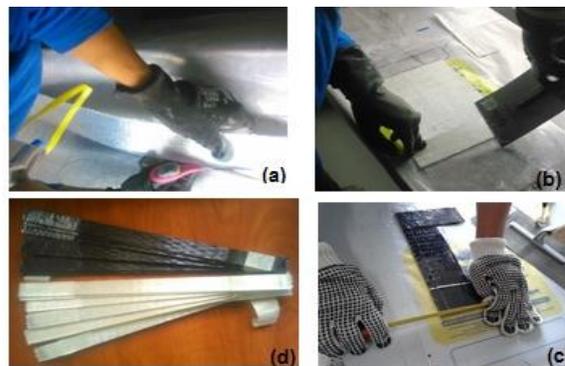
**Figura 3** Reforzamiento torre Catedral de Merseburg.

## **2. ENSAYO DE TRACCIÓN DE CFRP Y GFRP.**

El ensayo de tracción de CFRP se realizó bajo el criterio de la norma ASTM C-3039 Método de prueba para propiedades de tracción en Materiales Compuestos de matriz polimérica, siguiendo las recomendaciones se elaboraron las probetas para ser ensayadas en el Laboratorio de La Universidad de la Fuerzas Armadas- ESPE.

**Tabla 1** Geometrías recomendadas para ensayos de tracción en las fibras

| Geometrías recomendadas para ensayos de tracción en las fibras |            |                     |              |                          |                            |
|--|------------|---------------------|--------------|--------------------------|----------------------------|
| Orientación de las fibras                                      | Ancho (mm) | Longitud Total (mm) | Espesor (mm) | Longitud de pestaña (mm) | Espesor de la pestaña (mm) |
| 0° Unidireccional  | 15         | 250                 | 1            | 56                       | 1.5                        |
| 90° Unidireccional   | 25         | 175                 | 2            | 25                       | 1.5                        |
| Filos Discontinuos   | 25         | 250                 | 2.5          | --                       | --                         |



**Figura 4** (a) corte de la fibra; (b) Imprimación del epóxico en la fibra; (c) Corte de las probetas después de 24 horas; (d) Probetas

En la Figura 4, se puede distinguir los pasos para elaborar las probetas que fueron ensayadas:

- Se corta la fibra de acuerdo a las medidas indicadas en la tabla 1. Utilizando en todo momento guantes y equipo de protección.
- Una vez cortada la fibra, previamente mezclado el Sistema epóxico EPOFIX 300 Sistema Epóxico de dos componentes para refuerzo estructural, se procede a saturar la fibra con una cantidad generosa de Epóxico EPOFIX 300. Se retira los excesos y se deja secar.
- Se deja secar 24 horas. Con ayuda de un flexómetro o calibrador para ser más preciso en medidas se marca para ser cortadas.
- Una vez cortadas las probetas en base a las medidas especificadas en la tabla 1, se puede ensayarlas.

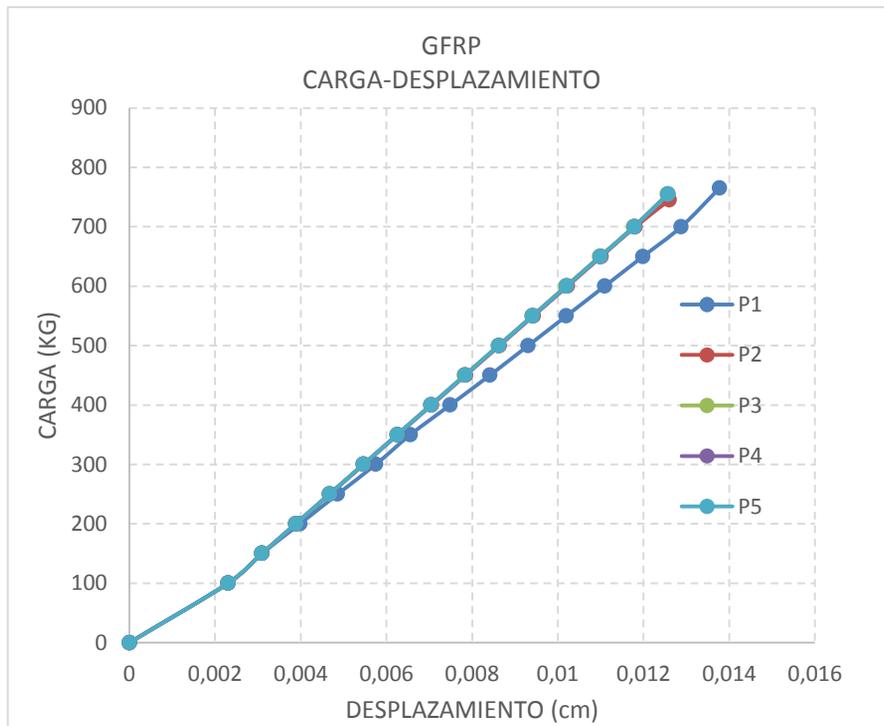


**Figura 5** (a) Dimensiones de Probeta ; (b) Instalación de Galga de deformación (Strain Gages) ; (c) Máquina de Lectura de Deformaciones OMEGA-22; (d) Probeta ensayada.

Se puede observar en la Figura 5, el procedimiento para el ensayo de tracción de las probetas de materiales compuestos de CFRP y GFRP que se detalla a continuación:

- a) Se toman las dimensiones de las probeta ancho , largo y espesor
- b) Se instala la galga de deformación en el centro de la probeta, con ayuda de cables y un cautín para soldarlos a los terminales de las galgas los cuales serán conectados a la máquina de lectura de deformaciones.
- c) Una vez instalada la galga de deformación se conecta a la máquina de lecturas de deformaciones.
- d) Conectada a la máquina de lectura de deformaciones, se ubica a la probeta en las mordazas de la máquina universal para ser ensayada.

Después del ensayo se obtuvieron los siguientes resultados como se puede distinguir en la figura 6 y figura 7.



**Figura 6** Carga – Desplazamiento Probetas de GFRP (EPOWRAP241).

En la tabla 2, se encuentran los valores de carga máxima de cada una de las probetas de GFRP EPOWRAP-241 DE SETMIX, el promedio es de 756 Kg. Esta carga dividida para 1.5 cm de ancho que tiene la probeta da como resultado 504 kg/cm ancho. Este valor supero el dado por el fabricante de 473 kg/cm de ancho.

**Tabla 2** Valores Máximos de carga de probetas de GFRP

| PROBETAS DE GFRP EPOWRAP-241 DE SETMIX |     | PROMEDIO | DESVIACIÓN STANDART | COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%) |
|--|-----|----------|---------------------|------------------------------|
| P1(kg)                                 | 755 | 756      | 7,42                | 0,98                         |
| P2(kg)                                 | 745 |          |                     |                              |
| P3(kg)                                 | 765 |          |                     |                              |
| P4(kg)                                 | 755 |          |                     |                              |
| P5(kg)                                 | 760 |          |                     |                              |

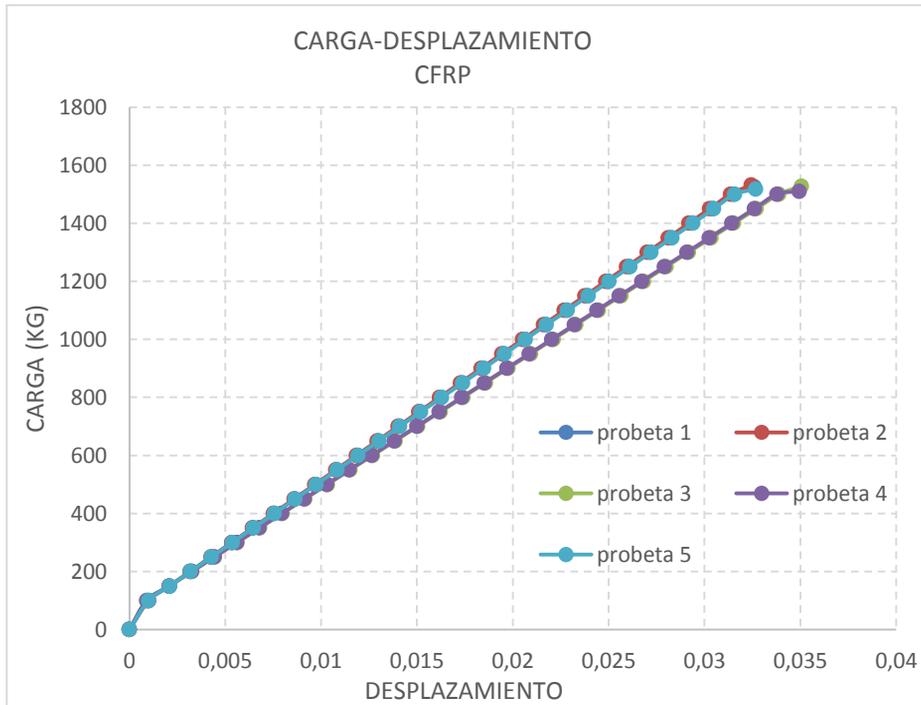


Figura 7.- Carga – Desplazamiento Probetas de CFRP (CARBOWRAP-600).

En la tabla 3, se encuentran los valores de carga máxima de cada una de las probetas de CFRP CARBOWRAP-600SETMIX, el promedio es de 1522.40 kg. Esta carga dividida para 1.5 cm de ancho que tiene la probeta da como resultado 1014.93 kg/cm ancho. Este valor supero el dado por el fabricante de 877 kg/cm de ancho.

Tabla 3.- Valores Máximos de carga de probetas de GFRP

| PROBETAS DE CFRP CARBOWRAP-600 DE SETMIX |      | PROMEDIO | DESVIACIÓN STANDART | COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%) |
|--|------|----------|---------------------|------------------------------|
| P1(kg)                                   | 1525 | 1522,40  | 8,85                | 0,58                         |
| P2(kg)                                   | 1532 |          |                     |                              |
| P3(kg)                                   | 1528 |          |                     |                              |
| P4(kg)                                   | 1510 |          |                     |                              |
| P5(kg)                                   | 1517 |          |                     |                              |

### 3. ENSAYOS DE FLEXIÓN EN MADERA DE COLORADO SEIQUE SIN REFORZAMIENTO.

Se ensayaron 5 vigas de Colorado sin refuerzo, 5 vigas de Seique sin refuerzo. En la figura 8 y figura 9, se aprecia los resultados de los ensayos de flexión de madera sin refuerzo de Colorado y Seique.

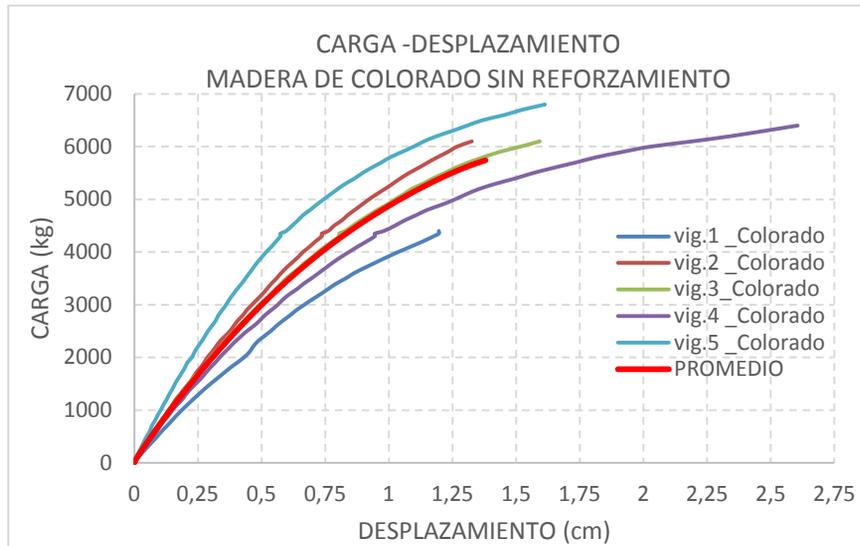


Figura 8.-Carga-Desplazamiento madera de colorado sin reforzamiento.

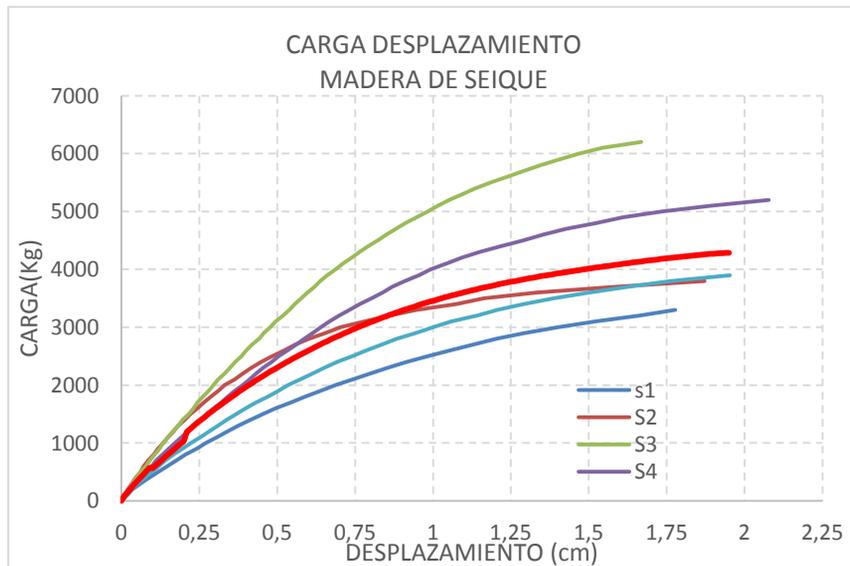


Figura 9.-Carga-Desplazamiento madera de Seique sin reforzamiento.

#### 4.-ENSAYOS DE FLEXIÓN EN MADERA DE COLORADO SEIQUE CON REFORZAMIENTO DE CFRP.

Se ensayaron 5 vigas de Colorado reforzadas con CFRP, 5 vigas de Seique reforzadas con CFRP, se utilizó el Sistema Compuesto de Refuerzo Estructural CARBOWRAP-600. En la figura 10 y figura 11, se puede ver los resultados del ensayo a Flexión de vigas de madera de Colorado y Seique reforzadas con CFRP- CARBOWRAP-600.

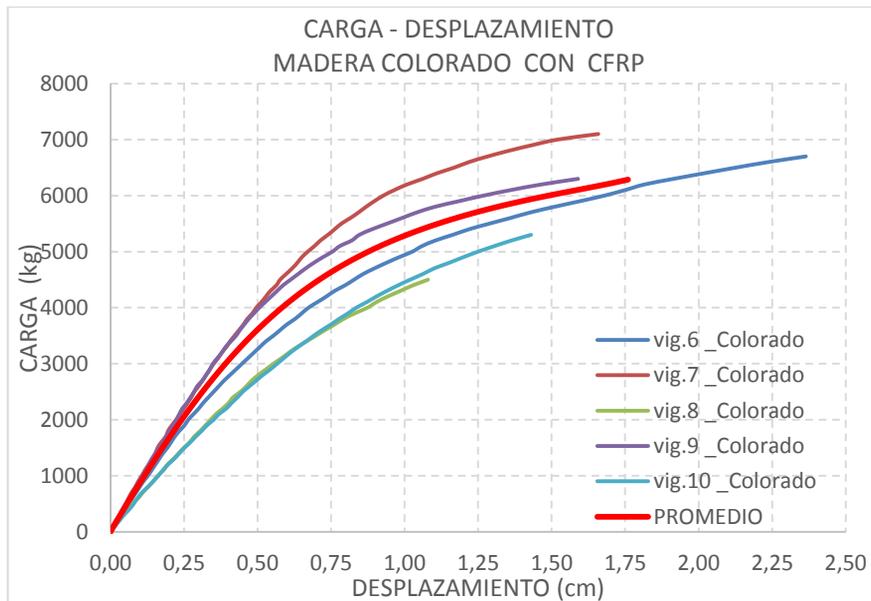


Figura 10.-Carga-Desplazamiento madera de Colorado con CFRP (CARBOWRAP-600).

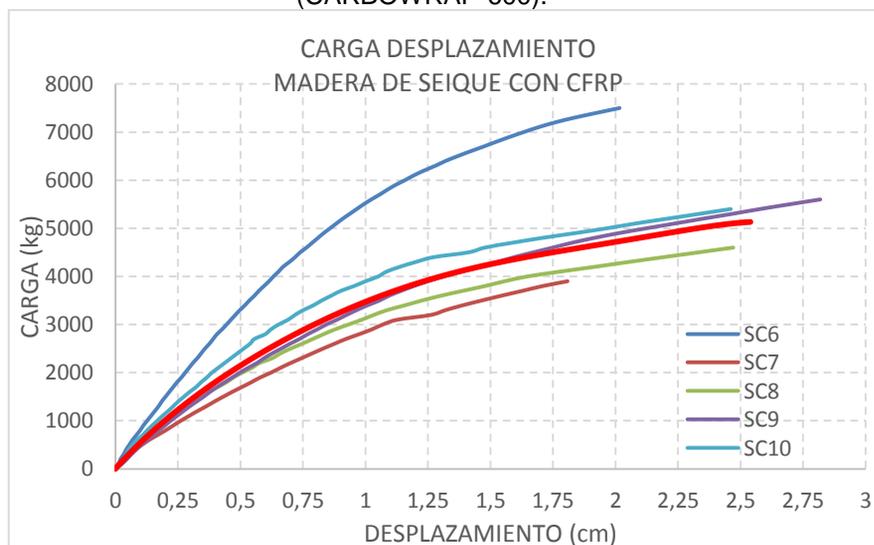


Figura 11.-Carga-Desplazamiento madera de Seique con CFRP (CARBOWRAP-600).

## 5.- ENSAYOS DE FLEXIÓN EN MADERA DE COLORADO SEIQUE CON REFORZAMIENTO DE GFRP.

Se ensayaron 5 vigas de Colorado reforzadas con GFRP y 5 vigas de Seique reforzadas con GFRP, se utilizó el Sistema Compuesto de Refuerzo Estructural EPOWRAP-241. En la figura 12 y figura 13, se aprecia los resultados del ensayo a flexión de vigas de madera de colorado y Seique reforzadas con GFRP EPOWRAP-241.

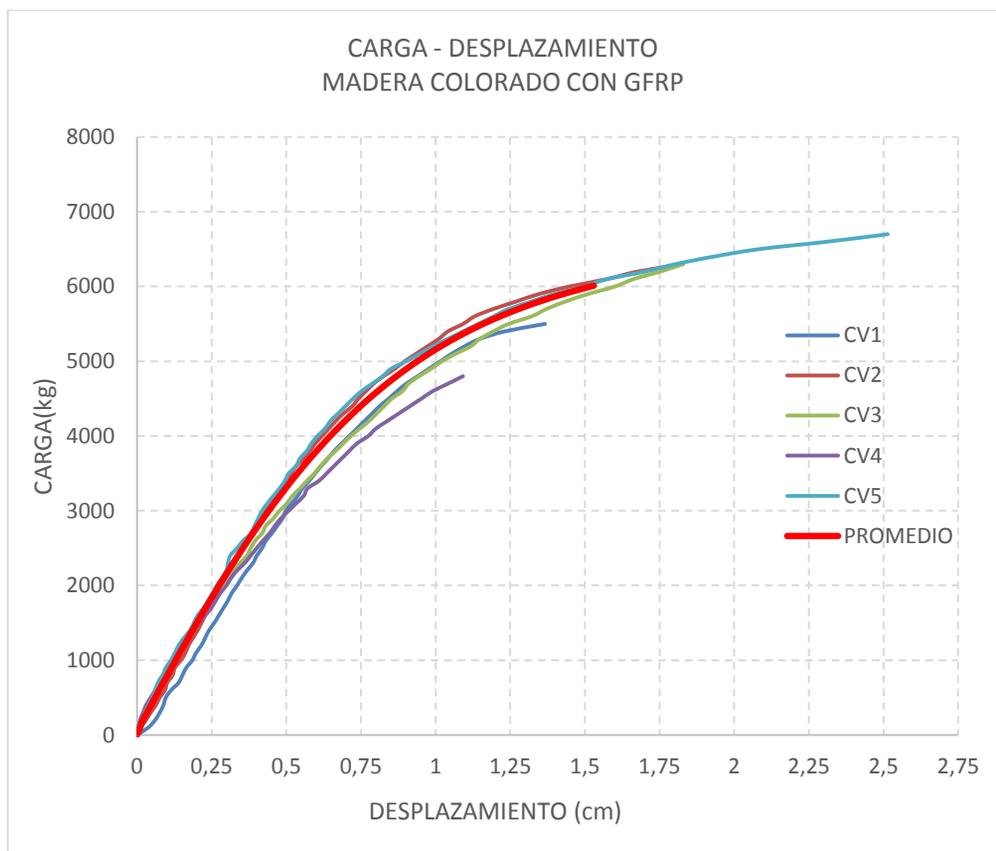


Figura 12.-Carga-Desplazamiento madera de Colorado con GFRP (EPOWRAP-241).

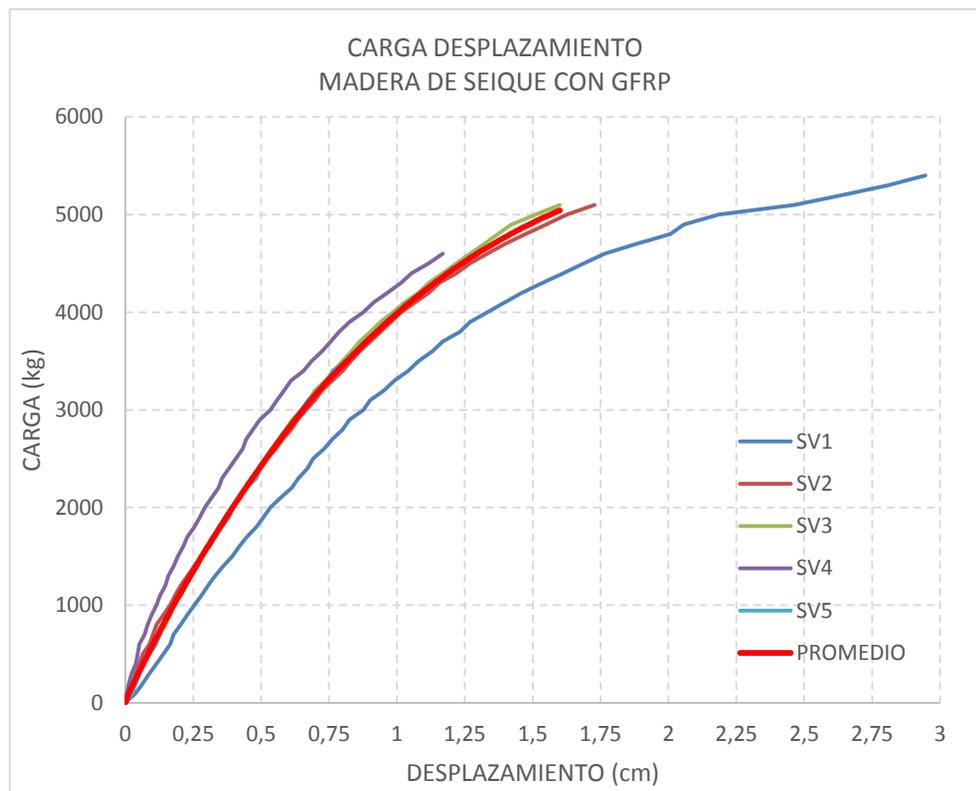


Figura 13.-Carga-Desplazamiento madera de Colorado con GFRP (EPOWRAP-241).

## 6.- MODELO ANALÍTICO.

### 6.1 Cálculo de la sección transformada

Es un método para la determinación de la rigidez teórica de vigas de madera reforzado con fibra formada para evaluar vigas con sección rectangular (BXH). Las vigas de madera sin refuerzo, tienen momentos de inercia ( $I$ ) igual a:

$$I = \frac{b * h^3}{12} \quad (1)$$

Las vigas reforzadas fueron analizadas de acuerdo con la teoría clásica de la flexión.

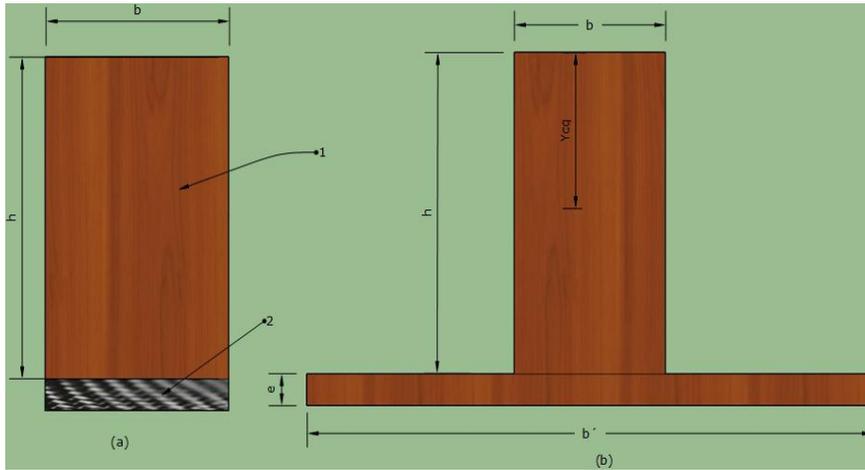


Figura 14: (a) Viga Constituida por dos materiales; (b) Sección equivalente

Según Fiorelli J , Alves Dias A. La sección transversal equivalente mostrado en la Figura 14 (b) se considera que está formada sólo por el material 1 (madera). El ancho  $b'$  se determina multiplicando la relación del módulo de Elasticidad de la fibra ( $E_2$ ) y madera ( $E_1$ ) para el ancho  $b$ .

$$b' = b \cdot \frac{E_2}{E_1} \quad (2)$$

Para la sección equivalente, se determinó la posición del centro de gravedad de la pieza ( $Y_{cg}$ ), dimensionada en relación con el borde superior de la viga de madera.

$$Y_{cg} = \frac{(b \cdot h) \cdot \left(\frac{h}{2}\right) + (b \cdot \frac{e}{E_1} \cdot E_2) \cdot (h + \frac{e}{2})}{(b \cdot h) + (b \cdot e \cdot \frac{E_2}{E_1})} \quad (3)$$

Llamando a la relación entre el espesor de la fibra y la altura de la viga ( $n = e / h$ ), se obtiene:

$$Y_{cg} = \frac{\left(\frac{h}{2}\right) + \left(1 + \frac{n}{2}\right) \cdot \left(n \cdot \frac{E_2}{E_1}\right)}{\left(1 + \left(n \cdot \frac{E_2}{E_1}\right)\right)} \quad (4)$$

El valor del momento de inercia de la sección equivalente de la viga con un refuerzo ( $I_r$ ) viene dada por:

$$I_r = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \left( Y_{cg} - \frac{h}{2} \right)^2 + \frac{b \cdot E_2 \cdot n \cdot h^3}{E_1 \cdot 12} + b \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot n \cdot h \cdot \left( \frac{n \cdot h}{2} + (h - Y_{cg}) \right)^2 \quad (5)$$

En las figuras: 15, 16, 17, 18,19 y figura 20, se puede observar que el modelo teórico es muy similar al experimental con valores muy cercanos entre sí.

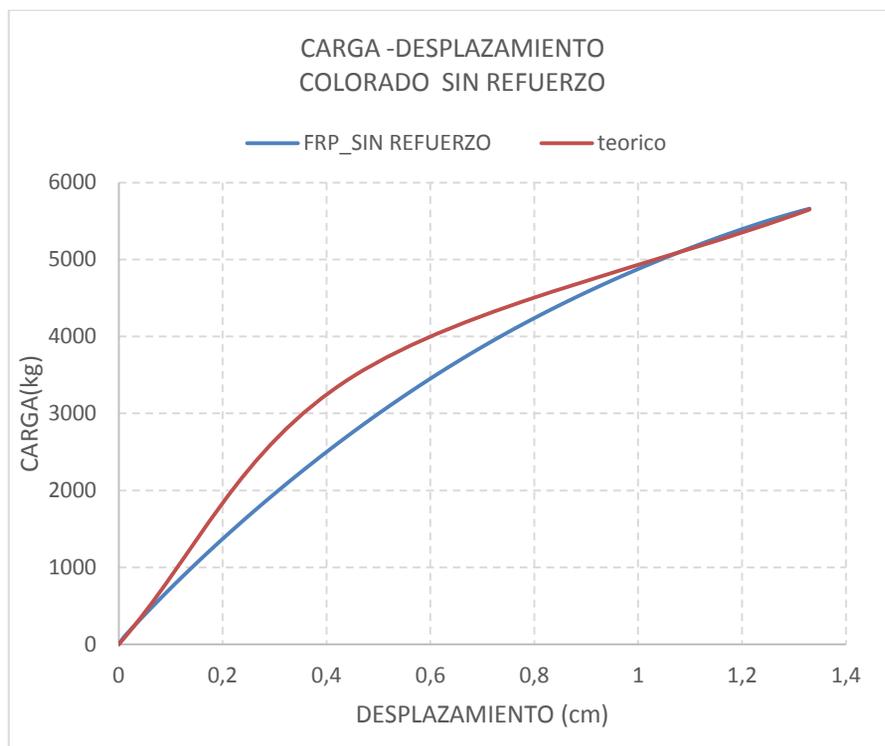


Figura 15.-Carga-Desplazamiento madera de Colorado sin Refuerzo Analítico y Experimental.

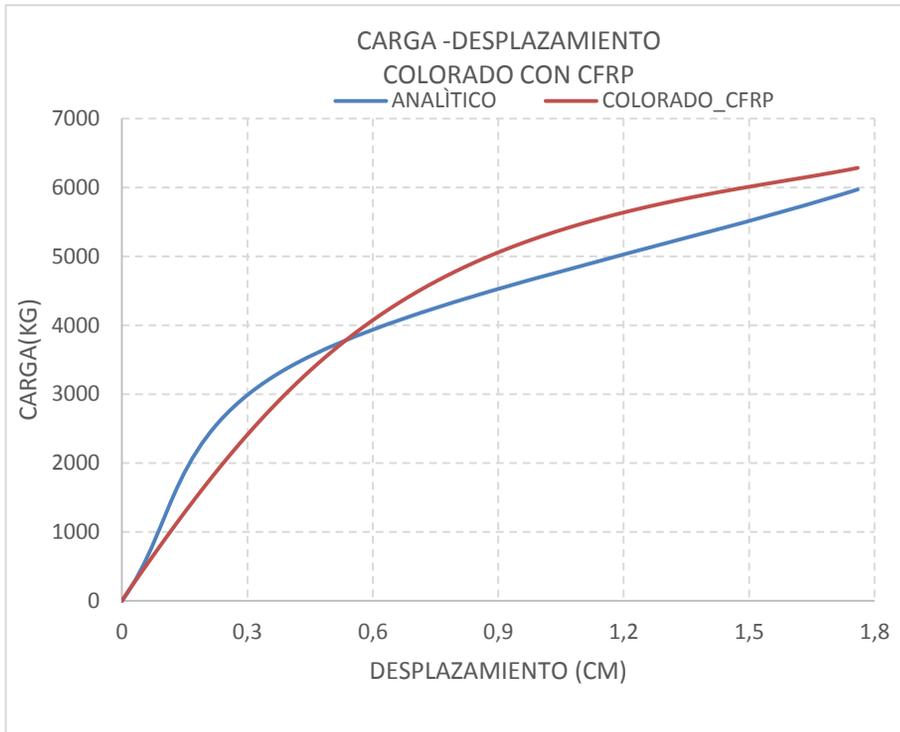


Figura 16.-Carga-Desplazamiento madera de Colorado con Refuerzo CFRP (CARBOWRAP-600) Analítico y Experimental.

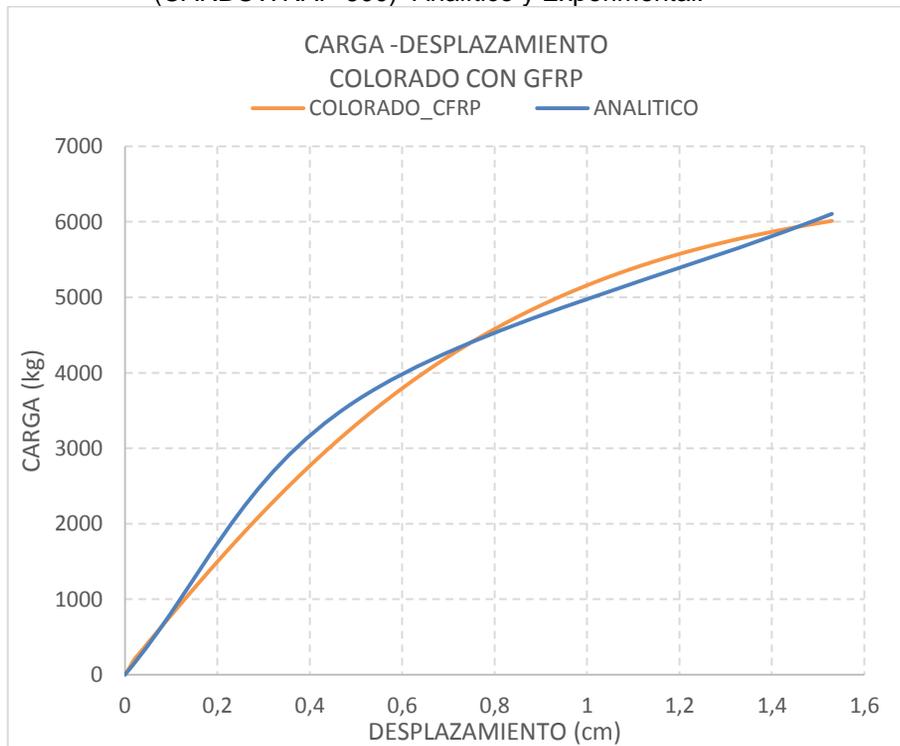


Figura 17.-Carga-Desplazamiento madera de Colorado con Refuerzo GFRP (EPOWRAP241) Analítico y Experimental.

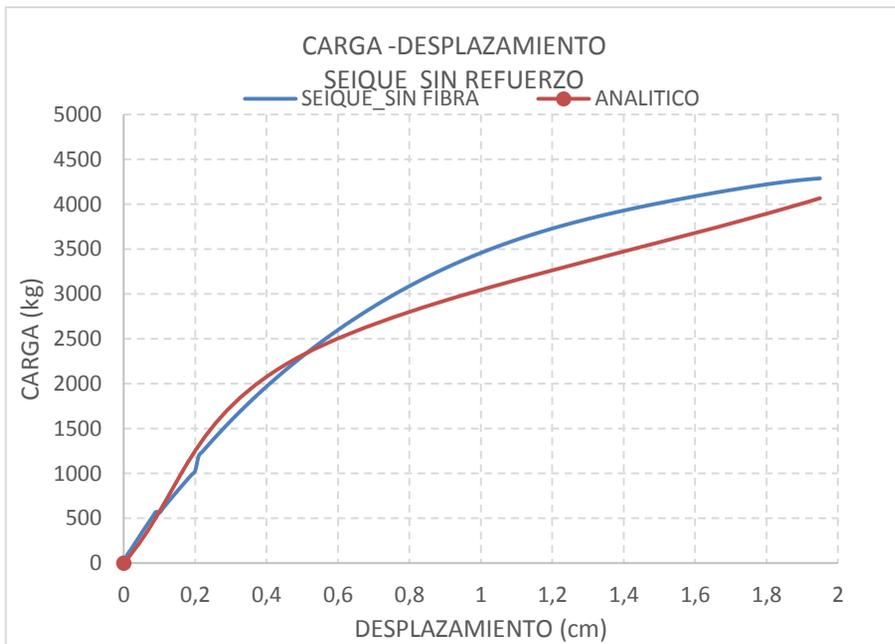


Figura 18.-Carga-Desplazamiento madera de Seique sin Refuerzo Analítico y Experimental.

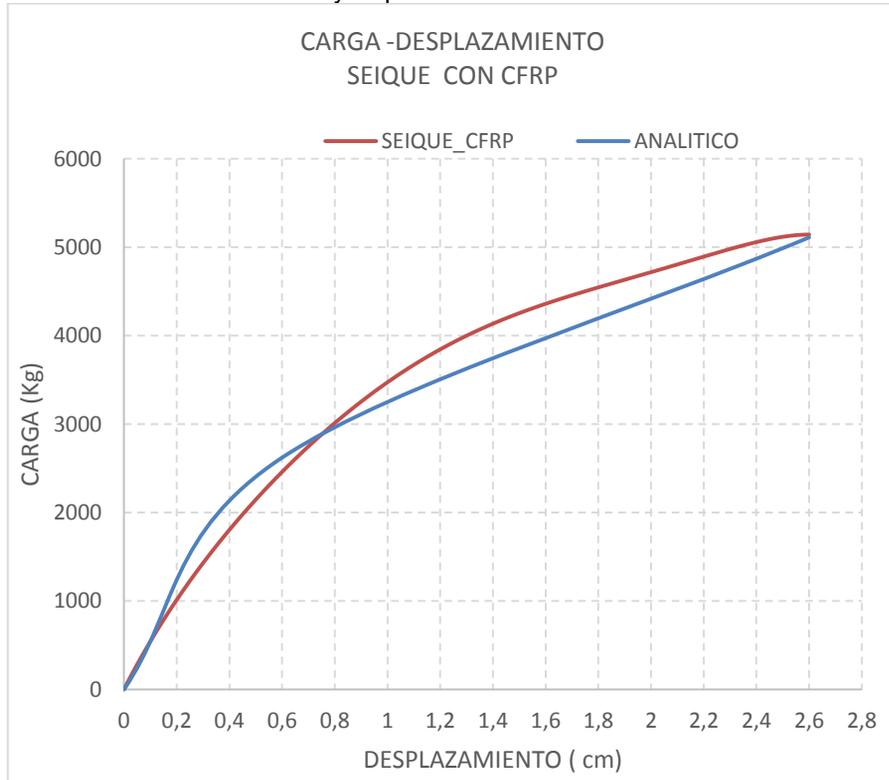


Figura 19.-Carga-Desplazamiento madera de Seique con Refuerzo CFRP (CARBOWRAP-600) Analítico y Experimental.

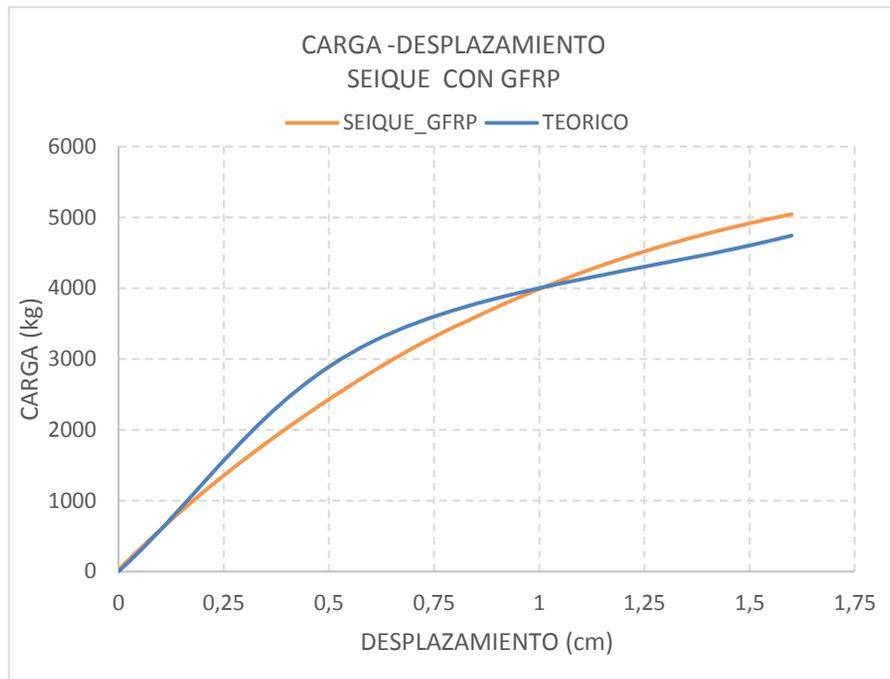


Figura 20.-Carga-Desplazamiento madera de Seique con Refuerzo GFRP (EPOWRAP241) Analítico y Experimental.

En la tabla 4 y tabla 5, se puede apreciar que los valores analíticos y experimentales de carga son muy cercanos.

Tabla 4.- Carga de Falla Analítico y Experimental de madera de Colorado

|                           | COLORADO ANALITICO |                     | COLORADO EXPERIMENTAL |                     | CARGA              |
|---------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|
|                           | CARGA (Kg)         | DESPLAZAMIENTO (cm) | CARGA (Kg)            | DESPLAZAMIENTO (cm) | Exper. / Analítico |
| <b>SIN REFUERZO</b>       | 5660.64            | 1.33                | 5649.98               | 1.33                | 0.998              |
| <b>CFPR CARBOWRAP 600</b> | 5976.6             | 1.76                | 6286.55               | 1.76                | 1.051              |
| <b>GFPR EPOWRAP-241</b>   | 6104.59            | 1.53                | 6011.41               | 1.53                | 0.986              |

Tabla 5.- Carga de Falla Analítico y Experimental de madera de Seique

|                           | SEIQUE ANALITICO |                     | SEIQUE EXPERIMENTAL |                     | CARGA              |
|---------------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
|                           | CARGA (kg)       | DESPLAZAMIENTO (cm) | CARGA (kg)          | DESPLAZAMIENTO (cm) | Exper. / Analítico |
| <b>SIN REFUERZO</b>       | 4066.59          | 1.95                | 4287.47             | 1.95                | 1.054              |
| <b>CFPR CARBOWRAP 600</b> | 5109.97          | 2.60                | 5142.35             | 2.60                | 1.006              |
| <b>GFPR EPOWRAP-241</b>   | 4744.04          | 1.60                | 5043.96             | 1.60                | 1.063              |

## 7. CONCLUSIONES

La madera tiene un peculiar comportamiento por sus propiedades físicas y mecánicas, ha estado siempre presente en el ámbito de la construcción y el desarrollo de la sociedad en los diferentes tipos de estructuras como puentes, edificaciones, etc. Que existen hasta la actualidad y algunos de los cuales, tienen un alto valor histórico en los diferentes países donde se utilizó a la madera como material para construcción.

Las vigas de madera de Seique y Colorado reforzadas con CFRP (CARBOOWRAP-600) y GFRP (EPOWRAP-240) con una capa bajo la cara inferior, obtuvieron un incremento en su carga última como se puede observar en la tabla 6.

Tabla 6.- Carga Ultima

|                             | COLORADO   |      | SEIQUE     |      |
|-----------------------------|------------|------|------------|------|
|                             | CARGA (kg) | %    | CARGA (kg) | %    |
| <b>SIN REFUERZO</b>         | 5649.98    |      | 4287.47    |      |
| <b>CFPR(CARBOOWRAP-600)</b> | 6286.55    | 1.11 | 5142.35    | 1.20 |
| <b>GFPR (EPOWRAP-241)</b>   | 6011.41    | 1.06 | 5043.96    | 1.18 |

Se alcanzó un mejor desempeño de resistencia de carga en la madera de Seique con 20% más con refuerzo de CFRP (CARBOWRAP-600) y 18 % más con refuerzo de GFRP(EPOWRAP -240).

En la madera de Colorado se obtuvo un incremento de 11% con refuerzo de CFRP (CARBOWRAP-600) y 6 % más con refuerzo de GFRP(EPOWRAP -241).

El Sistema Compuesto de Refuerzo Estructural CFRP (CARBOOWRAP-600) y GFRP (EPOWRAP-241) obtuvo buenas prestaciones comparándolas con datos de las hojas técnicas del fabricante, según los resultados en los ensayos de tracción donde se logró

un incremento de 6.56 % en el sistema de GFRP (EPOWRAP-241) y 15% más en el sistema CFRP (CARBOOWRAP-600) dentro de lo que es Resistencia ultima a la tensión en dirección principal de la fibra.

El modelo de cálculo utilizado para obtener valores analíticos alcanzo muy de cerca a los a los resultados experimentales.

## AGRADECIMIENTOS

El primer autor desea expresar su agradecimiento Al Ing. Patricio Silva Garcés coautor y auspiciante bajo cuyo financiamiento se pudo desarrollar esta investigación, De igual manera al Dr. Roberto Aguiar Falconí e Ingeniero Estuardo Peñaherrera Gallegos.

## REFERENCIAS

1. Juliano Fiorelli ,(2003) , Análisis De La Resistencia Y Rigidez De Las Vigas De Madera Reforzada Con Fibra De Carbono Y Fibra De Vidrio,Sao Paulo, Brasil.
2. Yanxi , Cai ,( 2009) , Flexural Study and Design of Timber Beams Reinforced With High Modulus Fibers, New Jersey , E.E.U.U. , 2009.
3. García, Pilar de la Rosa, (2013), Analisis de Elemntos de Madera Reforzados con Materiales Compuestos, Madrid, España, 2013.
4. T. Russell Gentry , (2011) performance of glued-laminated timbers with frp shear and flexural reinforcement, journal of composites for construction © ASCE / september/october 2011, pp 861-870.
5. Thanasis C. Triantafillou, associate member, ASCE, (1992) , Nikola Deskovic, student member, ASCE , Prestressed Frp Sheets As External Reinforcement Of Wood Members , journal of structural engineering, vol. 118, no. 5, may, 1992. © ASCE, issn 0733-9445/92/0005-127g7, pp 1270-1284.
6. Nikolaos Plevris, associate member, ASCE, and Thanasis c. Triantafillou,member ASCE,(1995) , Creep Behavior Of Frp-Reinforced Wood Members, journal of structural engineering. vol. 121. no.2. february. 1995. ©asce. issn 0733-9445/95/0002-0174-0ih6 , pp 980-981.
7. R. M. Gutkowski, A.M.ASCE, TJ T. Schilling , J. Balogh and D. W. Radford ,(2008), FRP Z-Spike Repairing of Wood Railroad

---

Crossties , Journal Of Structural Engineering © ASCE / FEBRUARY 2008 , pp 248-257.

8. Sociedad Americana para Pruebas y Materiales. Método de prueba estándar para propiedades de tracción de matriz polimérica de Materiales Compuestos. D3039-95 ASTM.
9. Nikolaos Plevris and Thanasis C. Triantafillou, Associate Member, ASCE,(1992) , Frp-Reinforced Wood As Structural Material , Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 4, No. 3, August, 1992. ©ASCE pp 300-317.
10. Dwight D. Dempsey and David W. Scott ,(2006), Wood Members Strengthened with Mechanically Fastened FRP Strips , Journal of Composites for Construction, Vol. 10, No. 5, October 1, 2006. ©ASCE pp 392-398.
11. E.P. Battles, H.J. Dagher, B. Abdel-Magid ,(2004), Durability Of Wood-Frp Composite Bridges , Advanced Technology in Structural Engineering , 2004. ©ASCE .
12. H. J. Dagher, M. ASCE, P.E. and R. Lindyberg, P.E. , (2004), FRP-Wood Hybrids for Bridges: A Comparison of E-Glass and Carbon Reinforcements , Advanced Technology in Structural Engineering , 2004. ©ASCE.
13. John Brody, Annette Richard, Kenneth Sebesta, Kenneth Wallace, Yong Hong, Roberto Lopez Anido, William Davids, and Eric Landis Advanced Engineered Wood Composites Center University of Maine, Orono, ME,(2004), FRP-Wood-Concrete Composite Bridge Girders , Advanced Technology in Structural Engineering , 2004. ©ASCE.
14. H.J. Dagher, Ph.D. , P.E. , Melanie Bragdon , (2004), Advanced FRP-Wood Composites in Bridge Applications , Advanced Technology in Structural Engineering , 2004. ©ASCE.
15. Andrew Hamilton Buchanan,( 1984) , Strength Model And Design Methods For Bending And Axial Loads Interaction In Timber Members, Vancouver, Canada , January 1984.