

CÓDIGO: 3.3.39**UTILIZACIÓN DE REFUERZOS DE FIBRA DE CARBONO EN LA
REHABILITACIÓN DE VIGUETAS DE MADERA DE *P. PINASTER* DE BAJA
CALIDAD****Acuña, Luis¹, Casado, Milagros¹, Spavento, Eleana², Basterra, Luis-Alfonso¹**1: Universidad de Valladolid, E.T.S.- Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal
maderas@iaf.uva.es

2: Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Cs. Agrarias y Forestales

PALABRAS CLAVE: Estructuras de madera; Madera reforzada, pino, fibra de carbono, Clases resistentes**RESUMEN**

En este trabajo se presenta la caracterización estructural de madera de *Pinus pinaster* Ait. rechazada visualmente para uso estructural según la norma UNE:56544:2010. Se trabajó con 160 viguetas (1200 x 60 x 40 mm) divididas en 3 grupos: 55 piezas de madera maciza, 55 piezas de vigas tipo dúo (adhesivo epoxi), y 55 piezas de madera tipo dúo reforzadas longitudinalmente con fibra de carbono (SIKAWRAP-230 C/45) situado en su centro y paralelo a la cara de la pieza. Los 3 grupos fueron ensayados (EN-408:2011) para determinar las propiedades resistentes: densidad, módulo de elasticidad (MOE) y resistencia a la flexión (MOR).

Los resultados obtenidos muestran un aumento considerable en las propiedades resistentes en las vigas reforzadas, consiguiéndose aumentos de más del 25% en el MOE y de prácticamente el 90% en el valor del MOR respecto a la madera maciza original.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, en la construcción de estructuras de madera se han empleado piezas de tamaños medianos y grandes, sin embargo la intrínseca heterogeneidad de este material y la dificultad de obtener piezas de estos tamaños en la actualidad, junto a la necesidad de caracterizar y ofrecer al mercado materiales de calidad conocida y contrastada (materiales normalizados), hizo surgir hace años la técnica de fabricación de la madera laminada encolada y, más recientemente, las vigas denominadas dúos y tríos. Los elementos estructurales de este tipo están formados por varias láminas de madera, de la misma o distinta naturaleza, pero con la dirección de la fibra sensiblemente paralela, encoladas bajo presión [1]. El resultado son vigas muy estables, minimizando las torsiones y grietas, y de dimensiones precisas, lo que simplifica los cálculos y planificaciones. Las uniones longitudinales de los tablonces se realizan mediante empalmes dentados, cuidando de que queden adecuadamente contrapeados en capas sucesivas. Si no hubiese restricciones en el transporte, esta técnica permitiría fabricar piezas de longitud indefinida partiendo de otras mucho más pequeñas, lo que optimiza el aprovechamiento del material obtenido en el aserrado de las trozas originales.

La cuestión del refuerzo de vigas de madera, ha sido abordada internacionalmente desde hace bastante tiempo por diversos autores [2], pero fundamentalmente aplicándose a madera puesta en obra, en intervenciones de restauración, rehabilitación o refuerzo de estructuras existentes. Se ha hecho utilizando como refuerzo diversos materiales: madera de la misma o distinta especie, varillas de acero o fibra de

vidrio embebidas en formulaciones epoxi, o elementos metálicos o de hormigón conectados mecánicamente. También se han publicado multitud de trabajos que abordan el refuerzo de vigas de madera encolando bandas de fibras de alto módulo de elasticidad, pero generalmente colocando el refuerzo en el canto inferior de la viga, en posición horizontal [3]. Esta disposición es sumamente inadecuada en caso de incendio, pues el refuerzo se sitúa en la cara normalmente más expuesta al fuego y a la vista, por lo que también es inconveniente desde el punto de vista estético [4]. En este trabajo se propone la colocación de las bandas de refuerzo encoladas en posición vertical entre los dos tablones que forman la viga dúo, que aunque perdiendo algo de eficacia mecánica, se consiguen evitar los problemas estéticos y de riesgo en caso de incendio, pues la banda de refuerzo queda protegida en el interior de la madera.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Los ensayos fueron llevados a cabo con tres series de vigas de *P. pinaster* Ait., una primera compuesta por vigas de madera maciza, una segunda compuesta por vigas dúo y una tercera compuesta por vigas dúo reforzadas con fibra de carbono (SIKAWRAP 230 C45). La madera de pino utilizada procede una misma partida de vigas de mayor tamaño, todas ellas clasificadas como “rechazo” según la norma de clasificación visual UNE-56544:2011 [5], que fueron aserradas para obtener unas dimensiones nominales finales de 40 x 60 x 120 mm, tabla 1.

Tabla 1. Número y dimensiones de las vigas ensayadas

Serie de vigas	Número de ensayos	Dimensiones finales (mm)
Maciza	50	40 x 60 x 120
Dúo	50	40 x 60 x 120
Reforzada	50	40 x 60 x 120

La fibra de carbono utilizada es comercializada por la empresa SIKA, ‘SikaWrap-230 C/45’, Figura 1. Esta fibra es un tejido unidireccional a base de fibra de carbono. El tejido está compuesto en un 99% de su peso por una urdimbre longitudinal de fibras de carbono, unidas a través de una trama transversal de fibras termoplásticas fijadas por calor.¹

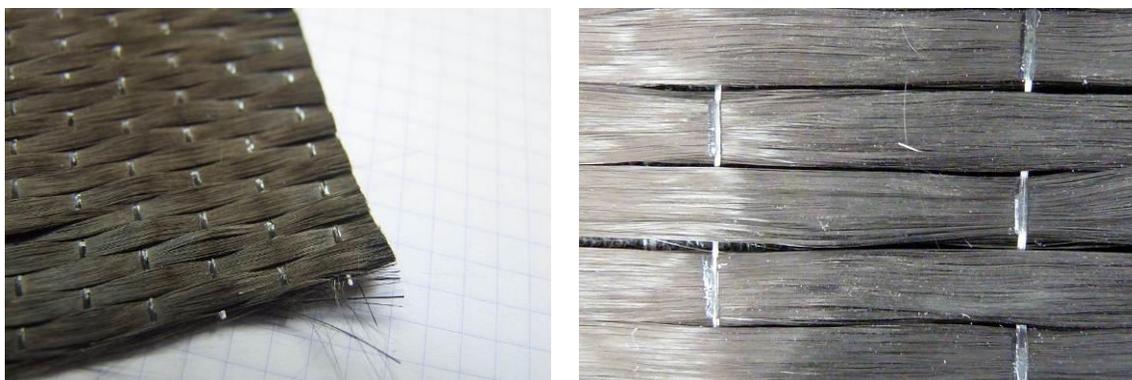


Figura 1. SikaWrap-230 C/45.

Con estos materiales de refuerzo se realizaron los ensayos de caracterización correspondientes con objeto de conocer su Módulo de Elasticidad en tracción y algunas otras características en su forma de matriz impregnada. Estos ensayos se han realizado de acuerdo a la norma norteamericana ASTM D 578–00 ‘Standart Specification for Glass Fiber Strands’ [6] por considerarla útil como patrón de referencia en

¹ URL: <http://www.sika.es/sika-doc/R2977.4.2.SikaWrap230C45.pdf> [acceso 08.08.11].

cuanto a terminología, instrumentos y sistemas de medición de diámetro de fibras, así como para realizar una clasificación normalizada del material de estudio. Los resultados más relevantes se muestran en la 0.

Tabla 2. Características de las fibras de refuerzo.

Nombre	Tipo	Espesor (mm)	MOE tracción (N/mm ²)	Coef. var (%)
SIKAWRAP-230 C/45	Fibra de carbono	0,136	150.321	7,39

El encolado de las vigas dúo se ha realizado en una mesa horizontal utilizando un adhesivo de impregnación, a base de resina epoxi, bicomponente, tixotrópico y libre de disolventes comercializada por la empresa SIKA y denominada ‘SikaDur-330’. Para la elaboración de las vigas dúo se procedió aserrando una partida de tabloncillos de un tamaño nominal aproximado de 18 x 10 x 400 cm, para obtener finalmente 1500 piezas de 6 x 2 x 120 cm, realizándose una selección visual y desechándose aquellas que presentaban anomalías considerables, particularmente nudos y fendas, que pudiesen modificar de forma sustancial los resultados de los ensayos. Las piezas válidas fueron encoladas por pares, habiéndose seleccionado aleatoriamente, junto con el tejido correspondiente cuando se trataba de las series reforzadas.

Los ensayos de flexión se realizaron siguiendo la norma EN 408:2011+A1:2012 [7], con una máquina universal IBERTEST modelo ELIB-100W dotada de tres células de carga de 5, 50 y 100 kN. Para la determinación del módulo de elasticidad global de canto a flexión (MOEGTO) se situó el medidor de desplazamiento, Transformador Diferencial de Variación Lineal (LVDT), en el canto inferior de la pieza a ensayar. La Figura 2 muestra esquemáticamente las condiciones utilizadas en dicho ensayo.

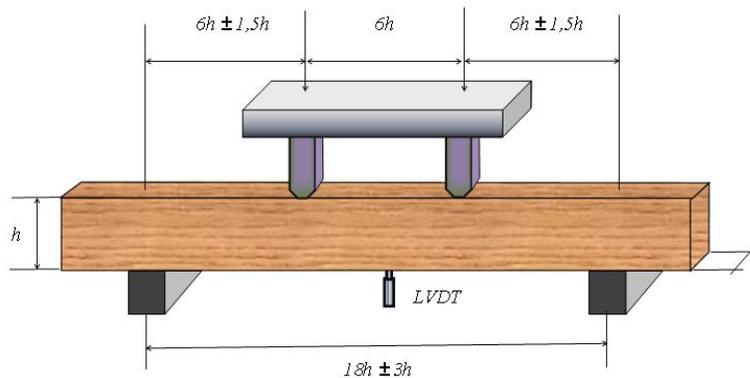


Figura 2. Dispositivo y condiciones de ensayo en máquina Universal (EN 408:2011).

Una vez alcanzada la carga preestablecida ($\approx 10\% F_{m\acute{a}x}$) que produce una deformación en la zona elástica, se retira el medidor de desplazamiento y se determina el módulo elástico. Tras ello se realiza el ensayo hasta rotura, obteniéndose el módulo de rotura (MOR). Los resultados fueron corregidos por el contenido en humedad y por la altura de canto, según establece EN 384:2010 [8]. Para la realización de los análisis estadísticos se comprobó la normalidad de los datos de todas las variables para cada una de las series, pudiendo aceptarse, sin excepción, su procedencia de una población normal.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis descriptivo de las propiedades estructurales

Los valores estadísticos de cada una de las poblaciones de vigas, macizas, dúo y dúo reforzadas, se recogen en la tabla 3.

Tabla 3. Propiedades estructurales de los diferentes tipos estructurales

Propiedad		Nº	Media	Coef. Var. %	Rango	Sesgo Stand.	Curtosis Stand.
MOE (MPa)	Maciza	49	8279,86	47,38	14361,6	2,088	-0,641
	Dúo	50	7848,75	27,38	8934,25	0,847	-0,254
	Reforzada	50	9961,61	25,11	10627,1	1,099	-0,800
MOR (MPa)	Maciza	49	38,44	52,61	88,03	2,546	0,939
	Dúo	50	46,30	29,39	56,33	-1,580	-0,178
	Reforzada	50	67,28	23,62	71,66	-0,047	-0,565
Densidad (kg/m ³)	Maciza	49	570,48	14,44	331,45	0,522	-1,213
	Dúo	50	587,55	10,94	242,85	0,265	-1,740
	Reforzada	50	556,75	8,56	222,01	2,141	1,421

En la figura 3 se representan los gráficos de caja y bigotes de cada una de las poblaciones para las propiedades estructurales analizadas (MOE, MOR y Densidad).

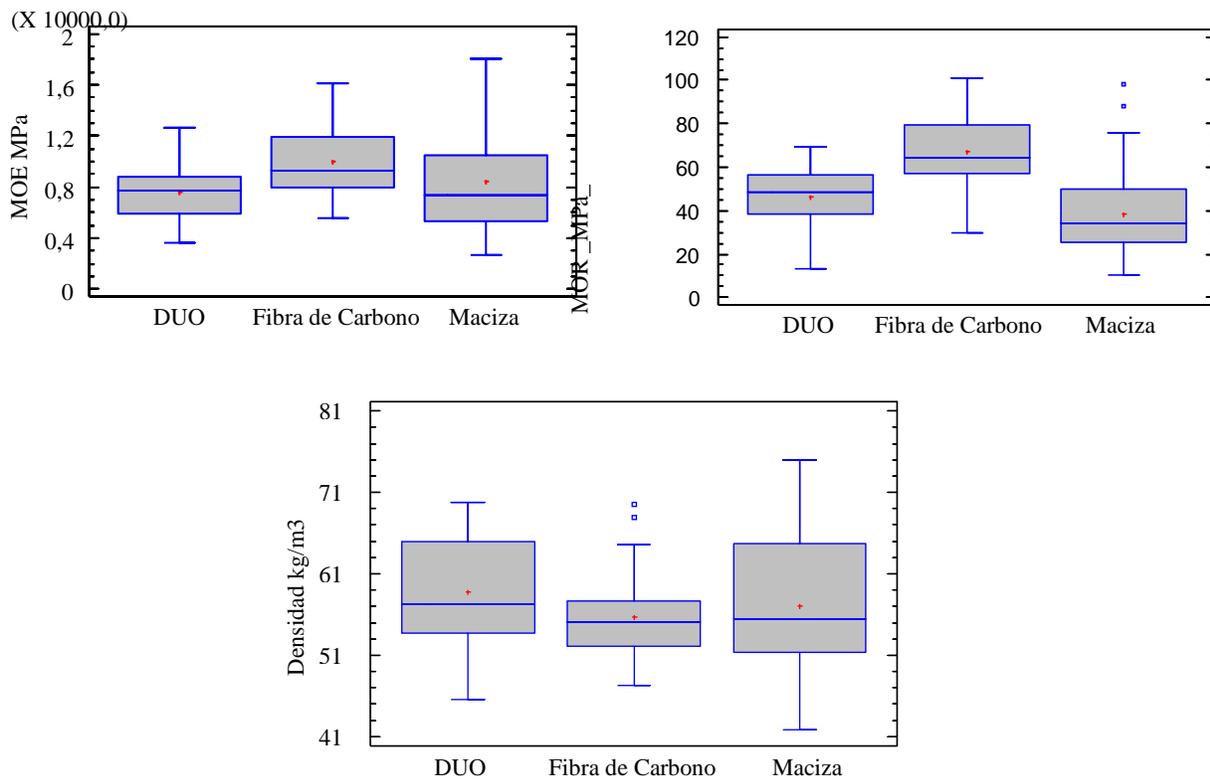


Figura 3. Gráfico de caja y bigotes del MOE, MOR y Densidad por tipo estructural

Del análisis descriptivo inicial, cabe destacar la considerablemente menor variabilidad que se observa en los valores de Módulo de elasticidad y Módulo de rotura, tanto en las vigas dúo, como en las dúo reforzadas. Habiéndose realizado la selección inicial del destino de la madera (maciza, dúo o dúo reforzada) de forma totalmente aleatoria, este diferente comportamiento no se puede achacar a que la existencia de defectos influya de forma decisiva en, únicamente, uno de los grupos de vigas, en este caso en la madera maciza, por lo que parece que pueda venir explicado por el hecho de que con el encolado se consiga una distribución interna de tensiones mucho más homogénea.

3.2. Valores característicos de los tipos estructurales.

Los valores característicos estructurales se definen como un valor de la propiedad en cuestión, que permiten representar el comportamiento general de la población asegurando el comportamiento eficaz y estable de una estructura. Los valores característicos vienen establecidos en la norma EN-384:2010, que expresa que para el MOE se tomará el valor característico como la media poblacional, mientras que para el módulo de rotura y la densidad se tomará el valor del 5º percentil de la población objeto de análisis, tabla 4.

Tabla 4. Valores medios y característicos de los tres tipos estructurales

	MOE (MPa)		MOR (MPa)		Densidad Kg/m ³	
	Media	Valor característico	Media	Valor característico	Media	Valor característico
Maciza	8279,86	8279,86	38,44	11,92	570,48	437,14
Dúo	7848,75	7848,75	46,30	21,39	587,55	497,10
Reforzada	9961,61	9961,61	67,28	41,14	556,75	474,20

Los valores característicos recogidos en la Tabla 4 muestran la trascendente influencia que tiene la tipología de las poblaciones de vigas dúo, sean reforzadas o sin reforzar, en el enorme aumento del valor característico del Módulo de Rotura, llegando prácticamente a triplicarse en el caso de las piezas reforzadas con fibra de carbono, respecto a los valores de las vigas macizas, figura 4.

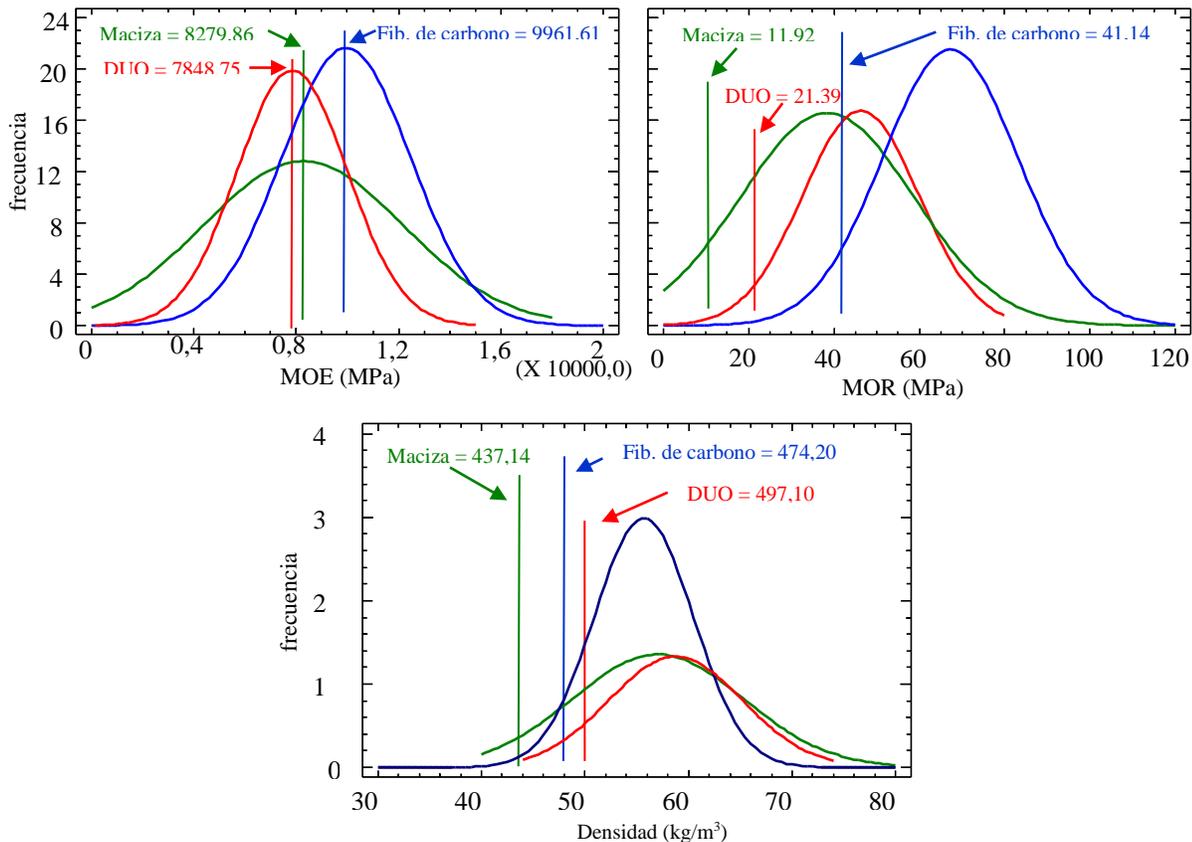


Figura 4. Valores característicos poblacionales para MOE, MOR y Densidad

3.3. Análisis comparativo de las propiedades elasto-resistentes de los tres tipos estructurales.

3.3.1. Módulo de elasticidad

Dado que al realizar la prueba de verificación de igualdad de varianzas mediante el test de Levene's el p-valor de la prueba presenta un valor de 0,00022868 ($< 0,05$), incumpléndose la hipótesis de igualdad de varianzas para poder utilizar ANOVA, se ha utilizado al test no paramétrico de Kruskal-Wallis, tabla 5, para comprobar la igualdad de medianas de las muestras.

Tabla 5. Prueba de Kruskal-Wallis para MOE (MPa) por tipo estructural

TIPO	Tamaño Muestra	Rango Promedio	Estadístico	P- valor
DUO	50	63,53	16,872	0,000216851
Fibra de Carbono	50	95,39		
Maciza	49	65,90		

Puesto que el p valor es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza, figura 5.

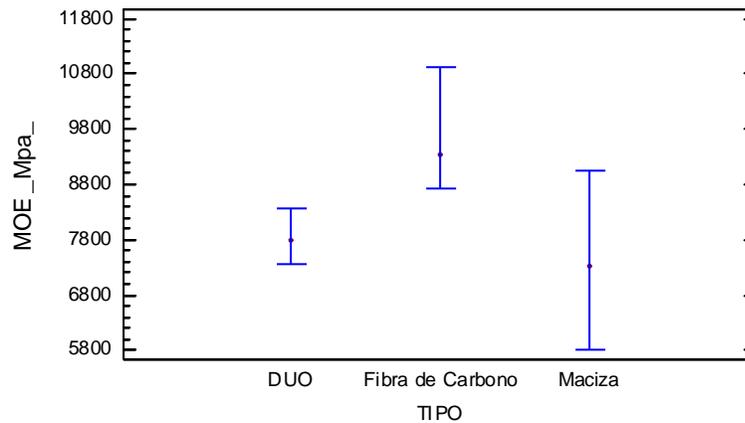


Figura 5. Gráfico de medianas del MOE con intervalos de confianza al 95% para los tipos estructurales.

3.3.2. Módulo de rotura

Para determinar las diferencias existentes entre los Módulos de rotura (MOR) de los 3 tipos de piezas estructurales, cumpliéndose las condiciones de homocedasticidad, se recurre al análisis de varianza, tabla 6, del que se obtiene un p valor $< 0,05$, por lo que existen diferencias significativas entre las 3 poblaciones al 95% de confianza.

Tabla 6. Tabla ANOVA para MOR _Mpa_ por TIPO

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	22071,2	2	11035,60	39,21	0,0000
Intra grupos	41092,6	146	281,46		
Total (Corr.)	63163,7	148			

Para determinar entre qué poblaciones existen diferencias, se recurre a la prueba de múltiple rango, tabla 7, en la que no se aprecian diferencias significativas entre las vigas macizas y las vigas dúo, existiendo, sin embargo, diferencias entre cualquiera ellas y las piezas reforzadas con fibra de carbono, que presentan un valor medio considerablemente más elevado, figura 6.

Tabla 7. Pruebas de Múltiple Rango para MOR (MPa) por TIPO. Método: 95,0 % Tukey HSD

TIPO	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Maciza	49	38,445	A
DUO	50	46,303	A
Fibra de Carbono	50	67,281	B

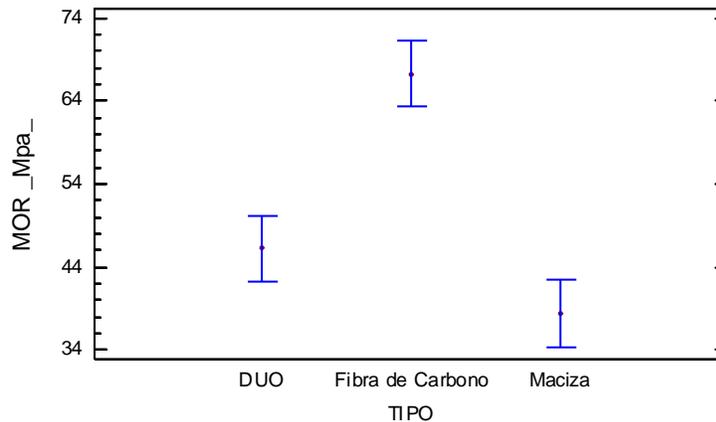


Figura 6. Gráfico de medias e intervalos 95% de Tukey para el MOR por tipo estructural

3.3.3. Densidad

Para determinar las diferencias existentes entre las Densidades de los 3 tipos de piezas estructurales, cumpliéndose las condiciones de homocedasticidad, se recurre al análisis de varianza, tabla 8, del que se obtiene un p valor >0,05, por lo que no existen diferencias significativas entre los valores de densidad en las 3 poblaciones, al 95% de confianza.

TABLA 8: Tabla ANOVA para Densidad por TIPO

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	23803,8	2	11901,9	2,71	0,0696
Intra grupos	640078,0	146	4384,1		
Total (Corr.)	663881,0	148			

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para los valores medios característicos de MOE en madera maciza, dúo y dúo reforzadas fueron: 7899,6 MPa, 7710,75 MPa y 9961,61 MPa respectivamente, obteniéndose un aumento de un 26 % en las vigas dúos reforzadas respecto a la madera maciza original.

Los valores medios de MOR de los grupos anteriores resultaron 37,44 MPa, 46,50 MPa, y 67,28 MPa, encontrándose un incremento del 79 % en la madera dúo reforzada respecto a la maciza original, mientras que los valores característicos de dicho parámetro fueron: 10,46 MPa, 21,69 MPa y 41,14 MPa respectivamente, observándose un aumento del 90 % en el valor característico de las vigas dúos reforzadas.

Los valores medios de densidad no resultaron estadísticamente significativos, mientras que los valores característicos de dicho parámetro fueron: 437,14 Kg/m³, 497,1 Kg/m³ y 474,20 Kg/m³; observándose un ligero aumento, 8 %, en las vigas dúos reforzadas respecto a la madera maciza.

Estos valores característicos obtenidos para la madera reforzada con fibras de carbono permitiría asignar, prácticamente, a ese lote de madera una clase estructural C20, mientras que la madera de partida, por sus valores de ensayo, correspondería a una clase estructural C14.

5. REFERENCIAS

[1] Castro, G.; Paganini, F. (2003) Mixed glued laminated timber of poplar and Eucalyptus grandis clones. *Holz Roh Werkstoff*; 61(4):291–8.

[2] Fiorelli, J.; Alves, A. (2003) Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber. *Mater Res*; 6(2):193–202.

[3] Basterra, L.A.; Acuña, L.; Casado, M.; López, G.; Bueno, A.; Relea, E.; Martínez, C.; González, A. (2012) Strength testing of Poplar duo beams, *Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv.I-214, with fiber reinforcement. *Construction and Building Materials*.36,pp. 90 - 96.ELSEVIER.

[4] Castro G, Zanuttini R. (2004) Multilaminar wood: manufacturing process and main physical–mechanical properties. *Forest Prod J*; 54(2):61–7.

[5] UNE 56544:2011. Visual grading of structural sawn timber.

[6] ASTM D 578 – 00. Standard specification for glass fibre strands.

[7] EN 408:2011+A1:2012. Timber structures – structural timber and glued laminated timber – determination of some physical and mechanical properties.

[8] EN 384:2010. Structural timber – determination of characteristic values of mechanical properties and density.