

# Caracterización experimental y numérica de columnas de resina poliéster reforzadas con cascarilla de arroz y sometidas a carga axial

## *Experimental and numerical characterization of columns made of rice husk reinforced polyester resin and subjected to an axial load*

J.C. Chanchi Golondrino<sup>1\*</sup> y J. Duque Sierra<sup>1</sup>

### Palabras clave

resina poliéster;  
cascarilla de arroz;  
columnas cargadas  
uniáxialmente;  
polímeros reforzados  
con fibras naturales;  
resina poliéster reforzada  
con cascarilla de arroz;

### Resumen

Este artículo describe el comportamiento de columnas hechas a base de resina poliéster reforzada con cascarilla de arroz y sometidas a carga axial. Veintiuna columnas de sección recta 15mm x 30mm con longitudes en el rango 32.2mm - 676.9mm, y articuladas en ambos extremos, fueron sometidas a carga axial cuasi-estática hasta la carga de falla. Los resultados muestran que el comportamiento axial fuerza-deformación de las columnas se caracteriza por tres zonas lineales, y que el mecanismo de falla puede ser frágil para columnas con relación de esbeltez entre 0 y 23, y semi-dúctil para columnas con relación de esbeltez entre 23 y 200. Expresiones para cuantificar los esfuerzos de pandeo y último de las columnas, en función del área de la sección recta y la relación de esbeltez, fueron propuestas. Una metodología de diseño para predecir la capacidad axial de las columnas a partir de la información experimental disponible fue discutida.

### Keywords

polyester resin;  
rice husk;  
columns under  
uniaxial load;  
natural fibres-reinforced  
polymers;  
rice husk reinforced  
polyester resin.

### Abstract

*This paper describes the behaviour of columns made of rice husk polyester resin being subjected to an axial load. Twenty-one columns hinging at both ends, with a cross section of 15mm x 30mm, and length in the range of 32.2mm - 676.9mm, were quasi-statically tested under an axial load up to the column failure. Results show that the load-deformation axial behaviour of the columns is characterized by three linear zones; and that the failure mechanism can be either fragile for columns with slenderness ratio in the range of 0-23, or semi-ductile for columns with slenderness ratio in the range of 23-200. Expressions for quantifying the buckling and failure stresses of the columns, by taking into account both the area of the cross section and the slenderness ratio, were proposed. A design methodology for predicting the axial capacity of the columns from the available experimental data was discussed.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Una tendencia a remplazar los materiales convencionales tales como el acero, el concreto y el aluminio por materiales poliméricos en las industrias aeroespacial, automovilística y constructora se ha incrementado dramáticamente en los últimos años (López & Arroyo 2003, Olivares Santiago et al. 2003). El incremento en la adopción de esta tendencia está basado en el hecho de que los materiales poliméricos ofrecen ventajas sobre los materiales convencionales tales como: bajas densidades, bajos costos de producción e instalación y facilidad de manufactura (Nabi & Jog 1999). Con el fin de optimizar la aplicación de los polímeros en los campos industriales anteriormente mencionados, la inclusión de fibras como refuerzo para incrementar la resistencia y la ductilidad de los materiales poliméricos ha sido considerada en diferentes trabajos investigativos. Una de las alternativas actuales para reforzar materiales poliméricos es el uso de fibras naturales debido a que estas fibras ofrecen las siguientes ventajas cuando comparadas fibras sintéticas: bajo costo, baja densidad,

son no abrasivas, de amplia disponibilidad y requieren bajos consumos energéticos para la fabricación del polímero reforzado (Gómez et al. 1998, Quesada et al. 2005, Uma Devi et al. 1997, Zhu et al. 1995, Pothan et al. 1997). No obstante, el uso de fibras naturales como refuerzo de polímeros es atractivo en distintas aplicaciones industriales por las ventajas antes mencionadas, la aplicabilidad de estas fibras naturales como refuerzo puede ser limitada debido a desventajas tales como: el carácter hidrofílico, la baja estabilidad dimensional y la posible degradación de las fibras debido a microorganismos (Gómez et al. 1998). Tres grupos de fibras naturales pueden ser utilizados para el reforzamiento de polímeros: las fibras largas provenientes del sistema vascular de las hojas o el tallo de la planta, las fibras cortas provenientes de las semillas o el fruto de la planta y las fibras misceláneas provenientes de otras partes de la planta. Entre las fibras naturales consideradas como refuerzo de polímeros en diferentes trabajos investigativos se pueden mencionar: aserrín de pino, henequén, coco, palma de yuca, hoja de piña, tallo de banano, yute y sisal (Quesada et al. 2005). En la industria constructora la aplicación de las fibras naturales como refuerzo de polímeros se ha extendido únicamente al estudio de las propiedades mecánicas del material compuesto y al estudio de

\* Autor de contacto: [jcchanchigo@unal.edu.co](mailto:jcchanchigo@unal.edu.co)

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, Manizales-Caldas, Colombia.

factibilidad para la aplicación del material compuesto en diferentes sistemas estructurales. Por el contrario, la aplicabilidad de fibras sintéticas tales como la fibra de vidrio y la fibra de carbono como refuerzo de polímeros en la industria constructora data desde los años 40 donde casetas para el almacenamiento de radares hechas a base de poliéster reforzado con fibra de vidrio fueron construidos en Inglaterra. Subsecuentes aplicaciones de polímeros reforzados en la industria constructora se basaron en la construcción de elementos tales como cubiertas, cúpulas translúcidas, componentes de puentes, barandas, paneles de fachadas, mobiliario interior y formalería. Estas aplicaciones se caracterizaron por su baja densidad comparada con materiales convencionales, alta resistencia a la corrosión y su alta resistencia a la humedad (Olivares Santiago et al. 2003). En la actualidad en países tales como Estados Unidos, Canadá y Australia polímeros reforzados con fibras artificiales se han utilizado para la construcción de puentes, elementos de soporte de vías ferroviarias y postes. Estos elementos estructurales son monitoreados continuamente con el fin de desarrollar normativas de diseño que garanticen su adecuada y confiable aplicación en la industria constructora (O'Connor & Hooks 2003, Manalo et al. 2009, Olivares et al. 2003). Con el fin de promover la aplicación de polímeros reforzados con fibras vegetales en la industria constructora Chanchí et al. 2007 caracterizó mecánicamente el comportamiento de vigas I hechas a base de resina poliéster reforzada con cascarilla de arroz. Como una extensión de este proyecto el presente artículo describe el comportamiento axial de columnas hechas a base de resina poliéster reforzada con cascarilla de arroz y pretende resolver las siguientes preguntas:

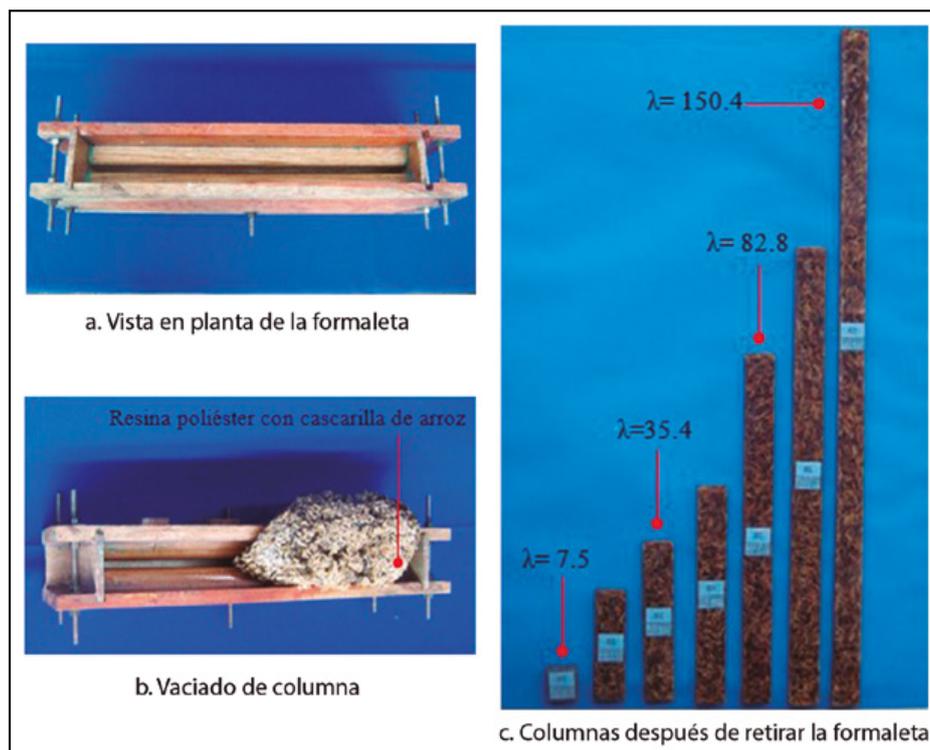
1. ¿Cómo es el comportamiento carga- deformación axial de columnas?

2. ¿Cuál es el mecanismo de falla de las columnas?
3. ¿Cuáles son las expresiones matemáticas que representan la variación de los esfuerzos axiales contra la relación de esbeltez de las columnas?
4. ¿Cuál es la expresión para el diseño axial de las columnas?

## 2. MATERIALES

### 2.1. Materiales básicos y dosificación

Un material compuesto por una matriz polimérica y un refuerzo fue usado para la elaboración de las columnas. La matriz polimérica fue constituida por una resina termofija denominada poliéster insaturado de apariencia liquido-viscosa, la cual para ser convertida a estado sólido requirió una reacción química exotérmica generada a través de la adición de Octoato de Cobalto y Metil-Etil-Cetona Peróxido, los cuales respectivamente constituyeron el acelerante y el catalizador de la reacción química. El refuerzo fue constituido por cascarilla de arroz, la cual corresponde a un material de desecho proveniente de la molienda del arroz. Pevio al proceso de mezclado la cascarilla de arroz fue secada al horno a una temperatura de 20°C hasta peso constante y su disposición durante el proceso de mezclado fue no orientada o al azar. La resina poliéster, la cascarilla de arroz, el catalizador y el acelerante fueron proporcionados con la dosificación en peso indicada en la tabla 1. En esta dosificación el porcentaje en peso de la cascarilla de arroz correspondió al 20% del volumen de la resina poliéster en estado líquido. Este porcentaje fue asumido de acuerdo al rango de porcentajes promedio de fibras naturales para materiales plásticos sugeridos por Gómez et al. 1998 y sin superar el porcentaje máximo entre el 20% y 40% sugerido por Olivares Santiago et al. 2003 en el caso de polímeros reforzados con fibras dispuestas aleatoriamente.



**Figura 1.** Proceso de ensamblaje de columnas hechas a base de resina poliéster y cascarilla de arroz con diferente relación de esbeltez ( $\lambda$ ).

**Tabla 1.** Dosificación en porcentaje de peso de la resina poliéster para la elaboración del polímero compuesto

Componente	Resina poliéster	Cascarilla de arroz	Catalizador	Acelerante
Porcentaje en peso (%)	100	2.61	0.53	0.79

## 2.2. Proceso de elaboración de los especímenes de columnas

Para elaborar las columnas se usó una formaleta desmontable de madera a la cual se le aplicó una fina capa de grasa con el fin de facilitar el proceso de desencofrado de las columnas (figura 1a). Una vez la resina poliéster, el catalizador, el acelerante y la cascarilla de arroz fueron dosificadas, esta mezcla se agitó manualmente durante dos minutos con el fin de remover burbujas de aire. La mezcla fue vaciada en varias capas a lo largo de la formaleta en un periodo máximo de quince minutos el cual equivale al tiempo en que la mezcla adquiere una consistencia que

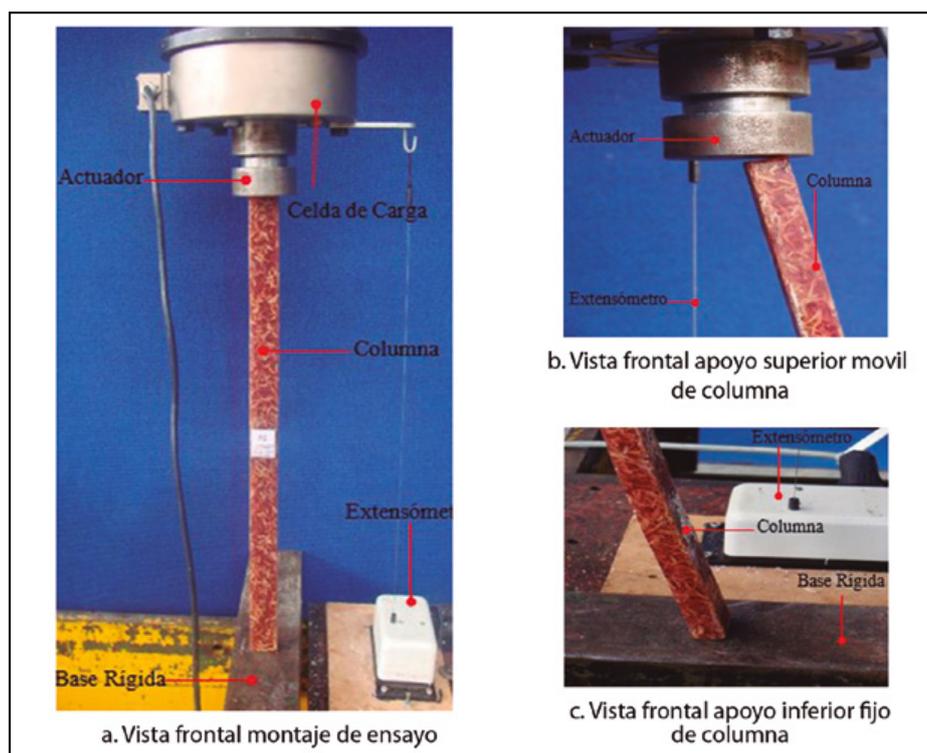
impide su distribución en la formaleta (tiempo gel) (figura 1b). Durante el proceso de vaciado, la formaleta fue vibrada suavemente con un martillo de caucho con el fin de uniformizar la distribución de la mezcla. Después de curar las columnas a temperatura constante de veinte grados centígrados por un periodo de cuarenta y ocho horas estas fueron desencofradas (figura 1c).

## 2.3. Cantidad y geometría de las columnas

Un total de veintiuna columnas de sección rectangular y con una relación de esbeltez ( $\lambda$ ) variando en el rango 7.5-150.4 fueron construidas. Las veintiún columnas se distribuyeron en siete grupos de tres columnas correspondientes a las siguientes relaciones de esbeltez: 7.5, 25.3, 35.4, 49.3, 82.8, 108.8, 150.4. En cada grupo de columnas el ancho de la sección recta ( $b$ ), la profundidad de la sección recta ( $h$ ) y la longitud de la columna ( $l$ ) fueron obtenidas a través del promedio de las dimensiones de las tres columnas pertenecientes al grupo. Las propiedades geométricas tales como área ( $A$ ), inercia ( $I$ ), radio de giro ( $r$ ) y relación de esbeltez

**Tabla 2.** Dimensiones promedio y propiedades geométricas para cada grupo de columnas

Grupo de columnas	Ancho	Profundidad	Área	Inercia	Longitud	Radio de giro	Relación de esbeltez
	$b$ mm	$h$ mm	$A$ mm <sup>2</sup>	$I$ mm <sup>4</sup>	$l$ mm	$r$ mm	$\lambda$ mm/mm
1	15.5	28.2	437.1	8751.1	676.9	4.5	150.4
2	14.5	30.2	437.9	7672.4	457.3	4.2	108.8
3	14.6	29.2	426.3	7572.9	347.6	4.2	82.8
4	15.3	29.2	446.8	8715.2	217.0	4.4	49.3
5	15.6	29.7	463.3	9396.1	159.3	4.5	35.4
6	15.0	29.2	438.0	8212.5	108.9	4.3	25.3
7	14.9	29.5	439.6	8132.0	32.2	4.3	7.5

**Figura 2.** Montaje para ensayo de columnas hechas a base de resina poliéster y cascarilla de arroz.

( $\lambda$ ) fueron obtenidas usando las dimensiones promedio definidas en cada grupo de columnas (tabla 2). La inercia ( $I$ ) se consideró como la menor inercia de la sección recta, la cual corresponde a la inercia calculada respecto al eje centroidal paralelo a la mayor dimensión de la sección recta (profundidad  $h$ ). En el caso de la relación de esbeltez las columnas se asumieron articuladas en sus extremos, por tal razón el factor de soporte ( $k$ ) asociado a la relación de esbeltez de la columna se asumió de valor unitario y la relación de esbeltez se reduce al cociente entre la longitud de la columna ( $l$ ) y el radio de giro ( $r$ ).

### 3. METODOS DE ENSAYO

#### 3.1. Descripción del montaje

Las columnas fueron ensayadas en un montaje dispuesto verticalmente en una prensa hidráulica servo-controlada (figura 2a). En este montaje las columnas fueron apoyadas en sus dos extremos a través de un soporte móvil y un soporte fijo. El soporte fijo fue localizado en el extremo inferior de la columna y se conformó apoyando directamente la sección recta de la columna sobre un elemento rígido apernado a la base inferior de la prensa hidráulica (figura 2b).

El soporte móvil fue constituido por un actuador dispuesto verticalmente y apoyado rígidamente en la base superior de la prensa. En este soporte el extremo superior de la columna fue apoyado de tal manera que la sección recta fue directamente localizada sobre el extremo del actuador (figura 2c). Este apoyo es denominado móvil debido a que el actuador puede desplazarse verticalmente en la medida que la columna es deformada en su dirección axial bajo la acción de la carga. Este montaje fue instrumentado con una celda de carga localizada en serie con el actuador y con un extensómetro localizado a lo largo de la columna y con sus extremos adosados en sus apoyos fijo y móvil (figura 2a).

### 3.2. Metodología de Ensayo

Cada columna fue sometida a una carga axial aplicada cuasi-estáticamente. Esta carga axial fue incrementada progresivamente hasta lograr la falla de la columna. La variación de la carga y del acortamiento fueron registrados en tiempo real a través de la celda de carga y el extensómetro respectivamente. Los datos de carga y deformación se graficaron simultáneamente con el fin de obtener una curva carga-deformación que representara el comportamiento axial de cada columna. Un total de veintinueve ensayos correspondientes a tres columnas para cada uno de los siete grupos de columnas descritos en la tabla 2 fueron realizados.

### 4. RESULTADOS Y ANALISIS

#### 4.1. Comportamiento carga-deformación axial

Los siete grupos de columnas definidas en la Sección 2.3 fueron clasificadas en tres categorías donde la relación de esbeltez varió en los siguientes rangos: 0-23, 23-90 y 90-200. Las columnas pertenecientes a estas tres categorías fueron denominadas columnas cortas (grupos 6 y 7), columnas intermedias (grupos 3, 4 y 5) y columnas largas (grupos 1 y 2) respectivamente. Para las tres categorías de columnas definidas anteriormente la curva carga-deformación axial se caracterizó por tres zonas de tendencia lineal.

La primera zona corresponde al comportamiento de las columnas hasta el inicio del pandeo. En esta zona las columnas exhiben su máxima rigidez. La segunda zona corresponde al comportamiento de las columnas desde el inicio del pandeo y hasta lograr la carga última. En esta zona las columnas exhiben reducción en su rigidez debido al cambio de alineamiento inducido por el pandeo. La tercera zona corresponde al comportamiento de las columnas desde la carga última hasta lograr el punto de falla. Esta zona se caracteriza por rigideces negativas

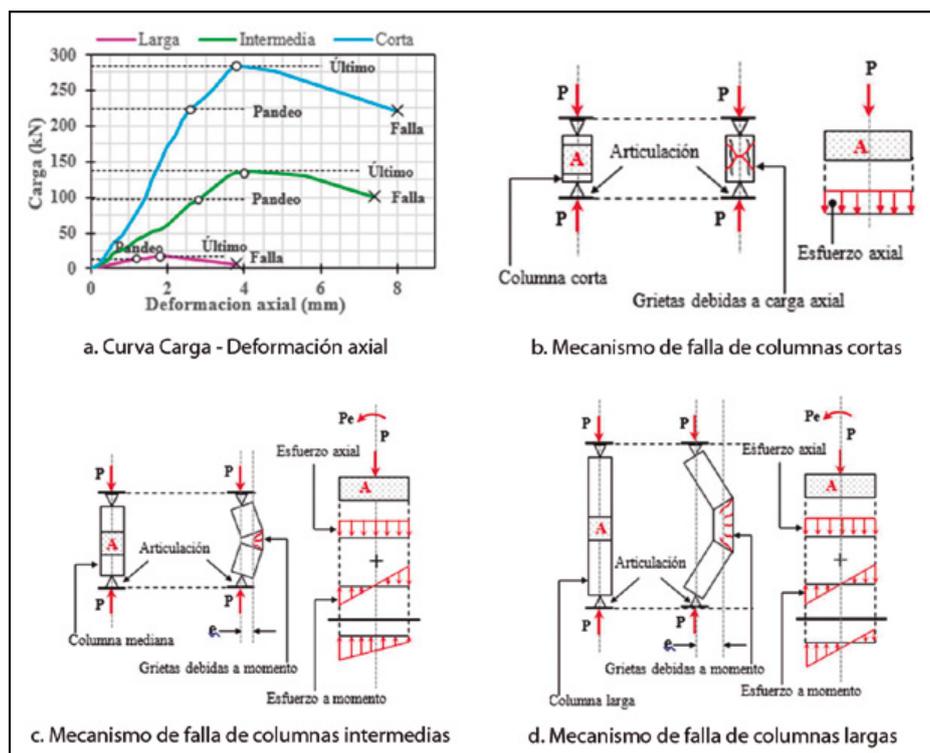


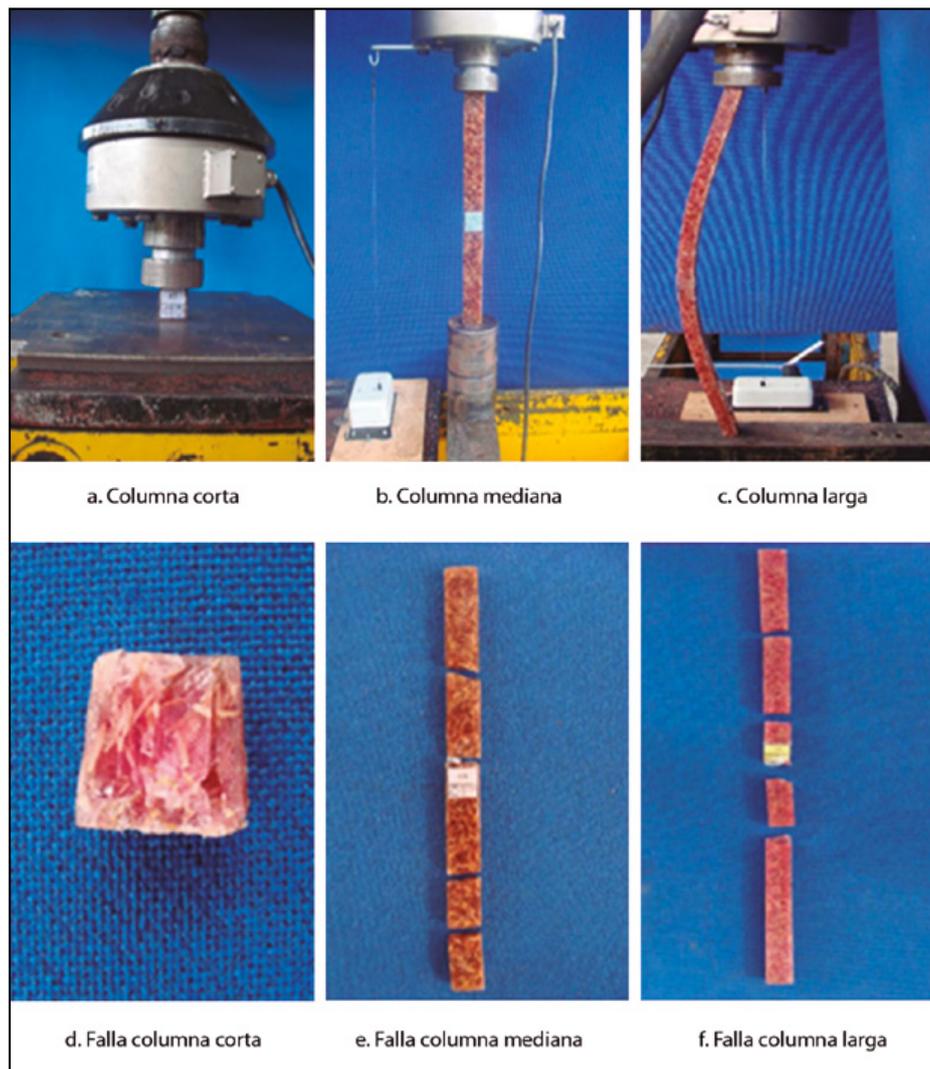
Figura 3. Descripción del mecanismo de falla de columnas cortas, intermedias y largas.

asociadas con la disgregación que sufre el material después de haber alcanzado su resistencia última. En la (figura 3a) se puede observar que las columna cortas e intermedias exhibieron cargas ultimas considerablemente superiores a las cargas últimas exhibidas por las columna largas. En la (figura 3a) también se puede observar que la relación entre la carga última y la carga de pandeo exhibida por columnas cortas e intermedias es considerablemente superior a la exhibida en columnas largas. En tal sentido, la capacidad de las columnas cortas e intermedias está limitada por la resistencia ultima a compresión de la resina poliéster debido a que en este tipo de columnas la sección recta se encuentra sometida predominantemente a esfuerzos compresivos como resultado de la alta incidencia de los esfuerzos compresivos de la carga axial con respecto a los esfuerzos de tensión y compresión inducidos por el momento. Debido a que los esfuerzos de momento son despreciables para columnas cortas y muy bajo para columnas intermedias se genera un estado de esfuerzos de compresión a lo largo de toda la sección (figura 3b, 3c). En el caso de columnas largas la capacidad está limitada por la resistencia ultima a tensión de la resina poliéster debido a que en este tipo de columnas la incidencia del momento sobre los esfuerzos de la sección recta es considerable en comparación con los esfuerzos inducidos por la carga axial, invirtiendo de esta manera los esfuerzos compresivos debidos a la carga axial en esfuerzos tensionantes a

un lado de la sección de la columna (figura 3d). Basados en las anteriores consideraciones para aplicaciones prácticas donde se requieran columnas de gran capacidad axial es conveniente usar relaciones de esbeltez ( $\lambda$ ) entre 0 y 90 en donde la capacidad a compresión de la resina poliéster es aprovechada en su totalidad y los esfuerzos tensionantes sobre la sección de la columna son mínimos.

#### 4.2. Mecanismo de falla

Un mecanismo de falla frágil y un mecanismo de falla semi-ductil fueron identificados para columnas de resina poliéster reforzadas con cascarilla de arroz. El mecanismo de falla frágil corresponde a columnas cortas donde la relación de esbeltez ( $\lambda$ ) varía en el rango 0-23. En este mecanismo las columnas absorben la carga axial sin evidenciar deformación lateral alguna asociada a pandeo. La falla de las columnas es súbita y explosiva y se caracteriza por grietas transversales y verticales inducidas por esfuerzos axiales compresivos (figura 4b). Las grietas transversales se localizan en la zona central de la columna y son debidas a esfuerzos cortantes inducidos por los esfuerzos axiales de compresión. Las grietas verticales se prolongaron a lo largo de la columna y son debidas a fallas de adherencia entre la matriz polimérica y la resina poliéster (figura 4a,4d). El mecanismo de falla frágil no es recomendable



**Figura 4.** Vista lateral y detalle lateral de las fallas de columnas de resina poliéster reforzadas con cascarilla de arroz.

en aplicaciones prácticas debido a que las columnas fallan de manera explosiva y el inicio de la falla no se puede apreciar fácilmente. El mecanismo de falla semi-ductil corresponde a columnas intermedias y largas donde la relación de esbeltez ( $\lambda$ ) varía en los rangos 23-90 y 90-200 respectivamente. En este mecanismo de falla las columnas absorben la carga axial y se deforman lateralmente como resultado del momento generado por la acción excéntrica de la carga. La falla de las columnas es semi-explosiva y se caracteriza por la presencia de grietas transversales y horizontales inducidas por los esfuerzos de tensión y cortantes (figura 3c, 3d). Las grietas se inician en la cara a tensión de la sección central de la columna debido a que en esta zona el momento generado por la acción excéntrica de la carga es máximo. Estas grietas se propagan hacia el interior de la sección hasta generar una zona de compresión de dimensiones pequeñas que finalmente falla a compresión. Previamente a la falla total de la sección central, un mecanismo similar de falla a la anteriormente descrito se reproduce en los tercios iniciales de la columna (figura 4b, 4c, 4e, 4f). El mecanismo de falla semi-ductil es recomendable en aplicaciones prácticas debido a que las grietas surgen paulatinamente dotando a la columna de un cierto grado de ductilidad.

### 4.3. Relación entre esfuerzo axial y esbeltez

La relación entre esfuerzo axial y esbeltez fue obtenida suponiendo que la columna estaba articulada en ambos extremos. Por tal razón el factor de soporte ( $k$ ) asociado a la relación de esbeltez de la columna se consideró de valor unitario. En este caso la relación de esbeltez correspondió al cociente entre la longitud de la columna ( $l$ ) y el radio de giro ( $r$ ) (ecuación 1).

$$\lambda = \frac{l}{r} \tag{1}$$

$$F_b = \frac{P_b}{A} \tag{2}$$

$$F_u = \frac{P_u}{A} \tag{3}$$

El esfuerzo axial se definió a través del esfuerzo de pandeo ( $F_b$ ) y el esfuerzo último ( $F_u$ ). El esfuerzo de pandeo fue calculado como la relación entre la carga de pandeo ( $P_b$ ) y el área de la sección recta ( $A$ ) (ecuación 2) y el esfuerzo último como la relación entre la carga última ( $P_u$ ) y el área de la sección recta ( $A$ ) (ecuación 3).

Las cargas última y de pandeo fueron leídas directamente desde las curvas carga contra desplazamiento obtenidas experimentalmente. La carga última correspondió a la máxima carga axial que alcanzó la columna y la carga de pandeo a una carga inferior a la última donde la curva carga-desplazamiento presenta un cambio abrupto de rigidez (figura 3a). Para los grupos de columnas 1 al 7 mencionados en la tabla 2 y conformados por tres columnas cada uno, los esfuerzos de pandeo y último se calcularon con las expresiones anteriormente mencionadas y se graficaron contra la relación de esbeltez (figura 5a, 5b). En la figura 5 se puede observar que los esfuerzos último y de pandeo se reducen con aumentos en la relación de esbeltez ( $\lambda$ ). Estas reducciones en los esfuerzos últimos y de pandeo son menos acentuadas para columnas cortas con relaciones de esbeltez 0-23 que para columnas intermedias y largas con relaciones de esbeltez 23-90 y 90-200 respectivamente. Las reducciones en los esfuerzos últimos y

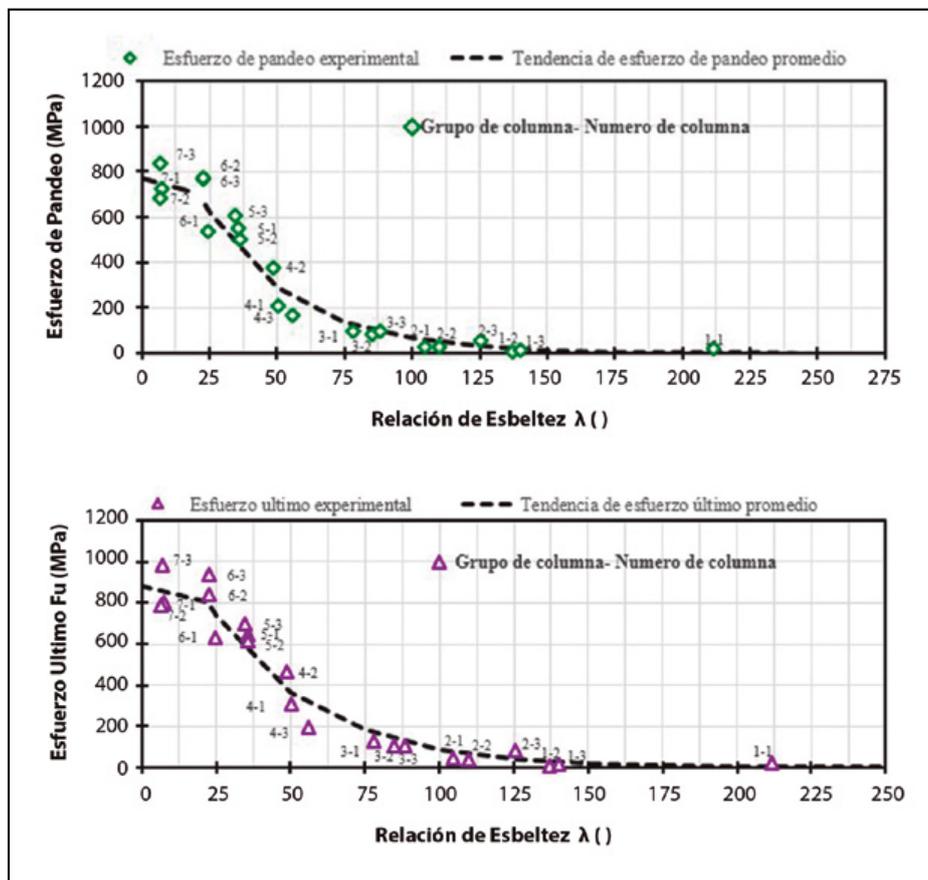


Figura 5. Curva Esfuerzo- Relación de Esbeltez.

de pandeo con respecto a la relación de esbeltez son debidas a que aumentos en la relación de esbeltez generan incrementos en los desplazamientos laterales y consecuentemente en la acción excéntrica de la carga, la cual a su vez genera esfuerzos de tensión por momento que impiden que la sección de la columna pueda desarrollar la totalidad su capacidad a compresión. La variación de los esfuerzos últimos y de pandeo fue representada por un modelo lineal para el caso de las columnas cortas. Para el caso de las columnas intermedias y largas la variación de los esfuerzos últimos y de pandeo fue representado con un modelo exponencial. Estos modelos lineal y exponencial corresponden a las ecuaciones 4 y 5 y fueron ajustados a la tendencia de esfuerzo promedio obtenida a partir del promedio de los esfuerzos de las tres columnas en cada uno de los grupos de columnas (figura 5). Las ecuaciones 4 y 5 pueden ser extrapoladas a aplicaciones prácticas donde las columnas tengan una condición de apoyo diferente al caso articulado-articulado si la relación de esbeltez se calcula con el factor de soporte (k) apropiado. Este factor de soporte puede variar en el rango (0.5-2) y presenta los valores mínimo y máximo en las condiciones de soporte empotrado en ambos extremos y empotrado en un extremo y libre en el otro extremo respectivamente.

$$\left\langle \begin{aligned} F_b &= -3.541\lambda + 774.16 \longrightarrow \lambda(0-23) \\ F_b &= 1312.9e^{-0.03\lambda} \longrightarrow \lambda(23-200) \end{aligned} \right\rangle \quad [4]$$

$$\left\langle \begin{aligned} F_u &= -3.42\lambda + 882.05 \longrightarrow \lambda(0-23) \\ F_u &= 1484.1e^{-0.028\lambda} \longrightarrow \lambda(23-200) \end{aligned} \right\rangle \quad [5]$$

#### 4.4. Ecuación de diseño para capacidad axial

Con el fin de facilitar el diseño de columnas de resina poliéster reforzadas con cascarilla de arroz y sometidas a carga axial, dos ecuaciones que predicen la capacidad axial de la columna fueron propuestas (ecuaciones 6 y 7). La capacidad axial de la columna fue formulada en términos de la carga que lleve la columna al pandeo y en términos de la carga que inicie la falla de la columna. Estas dos cargas fueron denominadas respectivamente carga nominal de pandeo ( $\phi P_{nb}$ ) y carga nominal última ( $\phi P_{nu}$ ). En las ecuaciones 6 y 7 la carga nominal de pandeo y la carga nominal última fueron expresadas en función del área de la sección recta de la columna ( $A$ ), del esfuerzo promedio de pandeo ( $F_b$ ), del esfuerzo promedio último ( $F_u$ ), y un factor no dimensional denominado factor de dispersión ( $\phi$ ).

$$\phi P_{nb} = \phi \times F_b \times A \quad [6]$$

$$\phi P_{nu} = \phi \times F_u \times A \quad [7]$$

El esfuerzo promedio de pandeo ( $F_b$ ) y el esfuerzo promedio último ( $F_u$ ) se pueden estimar a través de las ecuaciones 4 y 5 usando la relación de esbeltez de la columna ( $\lambda$ ) evaluada a través de la ecuación 1. Las ecuaciones 4 y 5 fueron previamente definidas en la Sección 4.3. El factor de dispersión  $\phi$  es un factor no dimensional que amplifica o deamplifica la curva de los esfuerzos promedio contra la relación de esbeltez. Este factor fue definido con el fin de abarcar la totalidad de los datos experimentales en una banda de esfuerzos contra relación de esbeltez definida por una curva envolvente superior de esfuerzos máximos

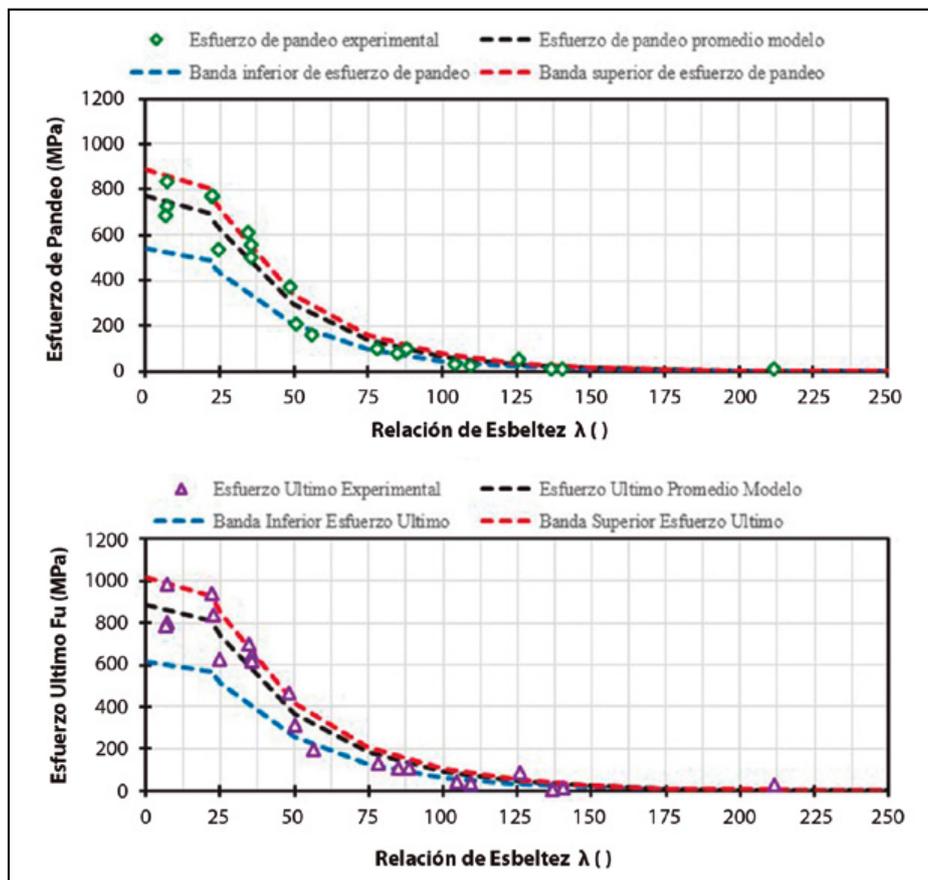


Figura 6. Banda de esfuerzos de diseño contra relación de esbeltez.

y una curva envolvente inferior de esfuerzos mínimos (figura 6a, 6b).

Factores de dispersión  $\phi$  de 0.7 y 1.15 fueron asignados a las envolventes de esfuerzos mínimos y máximos respectivamente. Usando los factores de dispersión mencionados anteriormente y las expresiones generales de la carga de pandeo y de la carga de falla (ecuaciones 6 y 7) se definieron las cargas mínimas y máximas que llevan a la columna a la condición de pandeo y a la condición de falla (ecuaciones 8, 9, 10 y 11). Estas expresiones son aplicables al diseño de columnas de resina poliéster reforzadas con cascarilla de arroz construidas con las especificaciones definidas en la Secciones 2.1 y 2.2 y con relaciones de esbeltez ( $\lambda$ ) entre 0 y 200. Para efectos de diseño los factores de dispersión asociados a las cargas mínimas pueden ser incrementados en un 20% y los factores de dispersión asociados a las cargas máximas pueden ser disminuidos en un 20%. Este porcentaje reduce la banda de esfuerzos experimentales a una banda de esfuerzos de diseño que considera la posibilidad de la presencia de pequeñas variaciones geométricas y mecánicas generadas durante el proceso constructivo de las columnas.

$$\phi P_{nb_{min}} = 0.7 \times F_b \times A \quad [8]$$

$$\phi P_{nb_{max}} = 1.15 \times F_b \times A \quad [9]$$

$$\phi P_{nu_{min}} = 0.7 \times F_u \times A \quad [10]$$

$$\phi P_{nu_{max}} = 1.15 \times F_u \times A \quad [11]$$

## 5. CONCLUSIONES

Este artículo caracteriza experimental y numéricamente el comportamiento axial de columnas en resina poliéster reforzado con cascarilla de arroz, se demostró que:

1. El comportamiento carga-deformación axial de columnas en resina poliéster reforzado con cascarilla de arroz se caracteriza por tres zonas de tendencia lineal. Una zona inicial hasta la carga de pandeo donde las columnas exhiben su máxima rigidez, una zona intermedia entre la carga de pandeo y la carga última donde las columnas exhiben una reducción en su rigidez inicial y una zona final entre la carga última y la carga de falla donde las columnas exhiben una rigidez negativa.
2. Dos mecanismos de falla gobiernan el comportamiento axial de columnas de resina poliéster reforzado con cascarilla de arroz. Un mecanismo de falla frágil asociado a columnas cortas con relación de esbeltez entre 0 y 23 y un mecanismo de falla semi-ductil asociado a columnas intermedias y largas con relación de esbeltez entre 23 y 200. Mientras en el mecanismo de falla frágil las columnas fallan súbitamente por esfuerzos de compresión, en el mecanismo de falla semi-ductil las columnas fallan paulatinamente con una combinación de esfuerzos de tensión y compresión.
3. Los esfuerzos de pandeo y último disminuyen con incrementos en la relación de esbeltez. Para columnas cortas con relación de esbeltez entre 0 y 23 los esfuerzos de pandeo y último varían linealmente con la relación de esbeltez y exponencialmente para columnas intermedias y largas con relaciones de esbeltez entre 23 y 200. Expresiones matemáticas para

la variación lineal y exponencial de los esfuerzos de pandeo y último fueron propuestas.

4. La capacidad axial de columnas de resina poliéster reforzadas con cascarilla de arroz puede expresarse en términos de la carga que lleva a la columna al estado de pandeo o en términos de la carga que inicia el estado de falla de columna. Expresiones para cada una de estas cargas fueron propuestas en función del área de la sección recta, de la relación de esbeltez y de un factor no dimensional que varía entre 0.7 y 1.15. Factores no dimensionales de 0.7 son usados para estimar la capacidad axial mínima y 1.15 para estimar la capacidad axial máxima de la columna.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a los Ingenieros Civiles egresados de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales: María Elisa Bedoya Vélez, Adriana Cúbides Cruz, Juan Camilo Morillo Mera, Cristian Mutis Ortega y Mario Alberto Villada Ríos, quienes contribuyeron activamente en el desarrollo experimental de este proyecto.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Amigó V., Salvador, D., y Sahuquillo, O. (2000). Aprovechamiento de residuos de fibras naturales como elementos de refuerzo de materiales poliméricos. *Quinto Congreso Internacional de Fibras Naturales con énfasis en Materiales de Construcción*, Instituto de Tecnología de Materiales Universidad Politécnica de Valencia (España).
- Chanchí, J., Salazar, A., Jaramillo, A., Villada, M., Correa, J., Bedoya, M., y Quintero, G. (2007). Caracterización Comportamental de Vigas I Hechas de un Material Constituido por una Matriz Polimérica de Resina Poliéster y un Llenante de Cascarilla de Arroz. *12th International Conference on Project Engineering*, Zaragoza (España), 7-11 julio.
- Gómez, J. L., Jarones, C., y Gañan, P. (1998). Refuerzos naturales para materiales plásticos, *Revista de Plásticos Modernos*, 76 (506), 183-189.
- Lopez, M., y Arroyo, M. (2003). Fibras naturales como refuerzos de matrices poliméricas, *Revista de Plásticos Modernos*, 85 (564), 594-600
- Nabi, D., y Jog, J. (1999). *Natural Fiber Polymer Composites: A Review*. *Advances in Polymer Technology*, 18 (4), 351-363.
- O'Connor, J., y Hooks, J. M. (2003). *USA's experience using fiber reinforced polymer (FRP) composite bridge decks to extend bridge service life*. Technical Memorandum of Public Works Research Institute.
- Olivares, S., Galan, M., y Roa, J. (2003). Los composites: características y aplicaciones en la edificación. *Informes de la construcción*, 54 (484), 45-62. DOI:10.3989/ic.2003.v54.i484.568
- Pothan, L., Thomas, S., y Neelakantan, N. (1997). Short Banana Fiber Reinforced Polyester Composites: Mechanical, Failure and Aging Characteristics. *Journal of reinforced plastic and composites*, 16 (8), 744-765.
- Quesada, K., Alvarado, P., Sibaja, R., y Vega, J. (2005). Utilización de las Fibras del Rastrojo de Piña como Material de Refuerzo en Resinas Poliéster. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 6 (2), 157-179.
- Manalo, A., Aravinthan, T., Karunasena, W., y Ticoalu, A. (2010). A review of alternative materials for replacing existing timber sleepers. *Composite Structures*, 92 (3), 603-611.
- Uma Devi, L., Bhagawan, S., y Thomas, S. (1997). Mechanical Properties of Pineapple Leaf Fiber-Reinforced Polyester Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 64 (9), 1739-1748.
- Zhu, W., Tobias, B., y Coutts, R. (1995). Banana fibre strands reinforced polyester composites. *Journal of Materials Science Letters*, 14 (7), 508-510.