

CARACTERIZACIÓN COMPORTAMENTAL DE VIGAS I HECHAS DE UN MATERIAL CONSTITUIDO POR UNA MATRIZ POLIMÉRICA DE RESINA POLIÉSTER Y UN LLENANTE DE CASCARILLA DE ARROZ

Chanchí, J. ^(p); Salazar, A.; Jaramillo, A.; Villada, M.; Correa, J.; Bedoya, M.; Quintero, G.

Abstract

This article summarizes the researching process executed to develop a composite material consist of polyester resin like polymeric matrix and a vegetable fiber like filler. The vegetable fiber is a residue in Colombia known as rice husk. A dosing among polyester resin and rice husk has been proposed, from this a set of test pieces were made up in order to do an experimental work associated to the mechanical characterization of the composite material in two level, compression strength and bulk density. The other hand, a methodology has been developed to build I beams with the composite material, this methodology was used to make up a set of I beams in order to test them from a vertical load test focused to characterize mechanically the composite material in the level of modulus of rupture, modulus of elasticity and the description of load – deflection behaviour of the I beams. Finally a feasibility analysis related to one possibility of the I beam application in the structural field of civil engineering is argued.

Key Words: I beams, polyester resin, rice husk, load – deflection curve, modulus of rupture, compression strength, modulus of elasticity.

Resumen

El presente artículo resume el proceso de investigación ejecutado para el desarrollo de un material compuesto, constituido por una matriz polimérica de resina poliéster y un llenante de fibra vegetal denominado cascarilla de arroz, el cual es un material de desecho en Colombia. Se ha propuesto una dosificación entre la resina poliéster y la cascarilla de arroz, para la cual se elaboró un conjunto discreto de probetas sobre las que se realizó un trabajo experimental enfocado a la caracterización mecánica a nivel de resistencia a compresión y densidad del compuesto bajo estudio. De otro lado, se ha desarrollado una metodología para la construcción de vigas con sección I usando el material propuesto, la metodología en consideración fue aplicada a la construcción de una muestra finita de vigas, sobre las cuales se desarrolló una prueba de carga vertical destinada a la caracterización del material compuesto a nivel de módulo de rotura y módulo de elasticidad, al igual que a la descripción del comportamiento carga – deflexión de las vigas propuestas. Finalmente se analiza una posible aplicabilidad de las vigas I en el entorno estructural del campo de la Ingeniería Civil.

Palabras claves: Vigas I, resina poliéster, cascarilla de arroz, curva carga – deflexión, Módulo de Rotura, Módulo de elasticidad, Resistencia a Compresión.

1. Introducción

A lo largo de este artículo se describe el proceso de investigación desarrollado para la caracterización del comportamiento carga – deflexión de vigas I hechas a base de un material polimérico conformado por resina poliéster y cascarilla de arroz. En la fase inicial se describen los parámetros básicos y el proceso de fabricación a nivel de laboratorio del material compuesto, adicionalmente se ilustra la mecánica de ensamblaje de una viga de

sección I constituida por el material compuesto en consideración. En la fase intermedia se describe el proceso de implementación, ejecución y acopio de resultados de los ensayos de compresión ejecutados sobre cilindros y los ensayos carga – deflexión ejecutados sobre vigas. Estos permitieron a través de un análisis estadístico de los resultados, definir los rangos de variación de la resistencia a compresión, módulo de rotura y módulo de elasticidad como propiedades del material y el rango de variación de la curva carga – deflexión de una viga ensayada. En la fase final se evalúan las ventajas y desventajas que presenta las vigas propuestas al ser usadas en el contexto constructivo de edificaciones.

2. Materiales

Para el desarrollo del material compuesto objeto de esta investigación se usaron los siguientes materiales: resina poliéster y cascarilla de arroz, ver Figura 1. A continuación se describen las características típicas de cada uno de estos materiales.



a. Resina Poliéster



b. Cascarilla de Arroz

Figura 1. Materia prima para la elaboración del compuesto.

2.1 Resina Poliéster

Corresponde a una resina termofija llamada poliéster insaturado. Su apariencia física es la de un líquido viscoso, ver Figura 1a, el cual para convertirse a estado sólido requiere de una reacción química exotérmica denominada “curado”, que puede ser efectuada a temperatura ambiente con o sin presión a través de la adición de dos componentes químicos denominados catalizador y acelerante. La función de la resina poliéster en el proceso de conformación del material compuesto base de las vigas I, es la de constituir la matriz polimérica que aglutinara el refuerzo del poliéster (cascarilla de arroz).

2.2 Cascarilla de Arroz

Es un material de desecho proveniente del proceso de molienda del arroz, ver Figura 1b, el cual se encuentra acumulado en las instalaciones molineras Colombianas debido a que es usado a baja escala respecto a su nivel de producción, por tal razón, se ha constituido en un latente problema de impacto ambiental regional colombiano. Para el caso de este proyecto la cascarilla de arroz hace las veces de CARGA O MATERIAL DE REFUERZO de la resina poliéster, se efectuó su adición en aras de disminuir la fragilidad de la matriz polimérica.

3. Dosificación de los materiales

El material polimérico compuesto asociado a esta publicación, fue elaborado a partir de los materiales descritos anteriormente. A continuación se esboza su proceso de elaboración.

3.1 Dosificación de componentes

En la elaboración de la resina poliéster intervienen tres componentes: la resina, el catalizador y el acelerante. Los autores definieron una dosificación que involucra los componentes, la cual es expresada a través de la **ecuación (1)**

$$\begin{array}{l} [1] \quad : \quad [0,0053] \quad : \quad [0,0079] \\ [Resina] \quad : \quad [Catalizador] \quad : \quad [Acelerante] \end{array} \quad (1)$$

De otro lado, a través de la metodología prueba – error, los autores determinaron los volúmenes necesarios para construir una viga I típica objeto de esta publicación. Mencionados volúmenes se ciñeron a la dosificación establecida en la **ecuación (1)** y son expresados a través de la **ecuación (2)**.

$$\begin{array}{l} [3284 \text{ gr}] \quad : \quad [17 \text{ gr}] \quad : \quad [26 \text{ gr}] \\ [Resina] \quad : \quad [Catalizador] \quad : \quad [Acelerante] \end{array} \quad (2)$$

3.2 Proceso de mezclado de componentes

A continuación se presenta la secuencia de pasos usada para la elaboración de la resina poliéster en estado líquido, usando la ecuación (2).

- Paso 1: Verter el acelerante sobre la resina y mezclar durante 5 minutos hasta obtener un color rosado uniforme en la mezcla.
- Paso 2: Verter sobre la mezcla del paso 1 el catalizador mezclando suavemente durante 5 minutos hasta obtener un color morado uniforme en la mezcla.

4. Elaboración de mezcla del polímero compuesto

La dosificación que gobierna la mezcla fue realizada en peso y se expresa en la **ecuación (3)**, donde se indica la proporción de cascarilla como función de la proporción de la resina poliéster y los pesos requeridos de los componentes para la elaboración de una viga I.

$$\begin{array}{l} [1] \quad : \quad [0,0264] \\ [3327,1 \text{ gr}] \quad : \quad [88,0 \text{ gr}] \\ [Resina Poliester en Estado Liquido] \quad : \quad [Cascarilla de arroz] \end{array} \quad (3)$$

La dosificación expresada en la **ecuación (3)** se elaboró considerando que el volumen de la cascarilla de arroz corresponde aproximadamente al 20% del volumen de la resina poliéster en estado líquido, éste porcentaje fue establecido atendiendo al rango de porcentajes promedio de participación de refuerzos naturales para materiales plásticos establecidos por experiencias análogas de otros autores, ver Referencia [3], rango que se encuentra entre el (20 y 40)% de la matriz polimérica usada como material plástico. La mezcla de cascarilla de arroz y la resina poliéster debe efectuarse inmediatamente después de adicionar el catalizador a la mezcla acelerante – resina, se determinó que en estas condiciones el tiempo que la mezcla tarda en volverse gel es aproximadamente 15 minutos, tiempo antes del cual, la cascarilla de arroz debe ser adicionada gradualmente mientras se mezcla homogéneamente; para este caso la disposición de la cascarilla en la matriz polimérica se considera como no orientada (al azar).

5. Elaboración de especímenes de prueba

Los especímenes de prueba asociados a esta publicación pueden dividirse en dos tipos: cilindros y vigas de sección I. A continuación se describe el proceso de elaboración de cada espécimen típico.

5.1 Proceso de elaboración de cilindros

Los cilindros objeto de investigación fueron elaborados a la luz de los requisitos establecidos por la Norma ASTM D695 – 02 a, ver Referencia [4]. Las dimensiones adoptadas fueron de 12,7mm de diámetro por 25,4mm de altura.

5.2 Proceso de elaboración de vigas

El proceso de elaboración de las vigas se aborda a través de los siguientes tópicos:

5.2.1 Definición de características geométricas

Las características básicas asociadas a la definición de una viga I son su sección recta y longitud. La sección recta utilizada es análoga a la de un perfil de acero cuyas dimensiones se presentan en la Figura 2a. La longitud de la viga se obtuvo suponiendo una relación altura de la viga: luz de 1:5, por cuanto a partir de esta, la influencia de los efectos del corte sobre la deflexión es mínima. En las Figuras 2b y 2c se muestra el modelo de la viga reproducido al nivel del laboratorio.

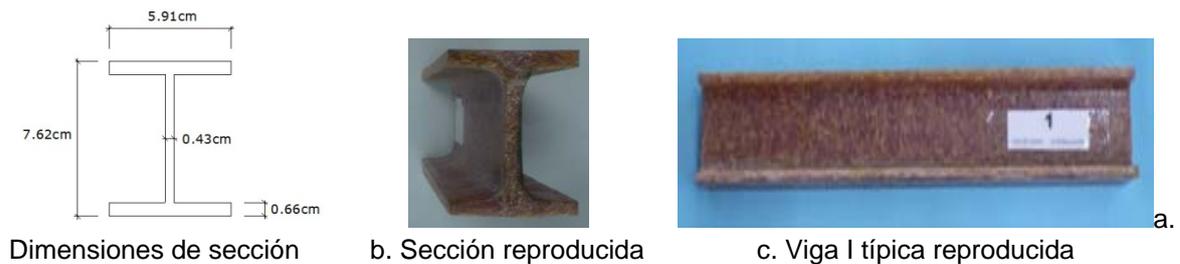


Figura 2. Sección recta de Vigas I elaboradas

5.2.2 Conformación de vigas

Para la conformación de las vigas se desarrolló un sistema de formaleta DESACOPLABLE hecho a base de piezas de madera y tornillos, estos últimos fueron dispuestos de tal manera que cumplieran doble función, permitir la conformación y la extracción del sistema, satisfaciendo condiciones de facilidad, rapidez y seguridad en el proceso de vaciado y desencofrado de la viga. En la secuencia de fotos de la Figura 3 se ilustra la formaleta desarrollada.

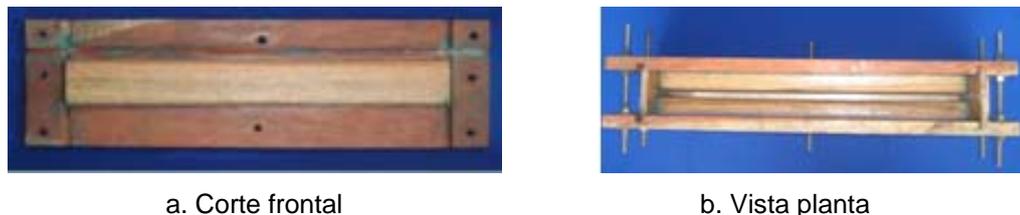


Figura 3. Detalles de la formaleta de la Viga

Previo al proceso de vaciado, sobre la formaleta se aplica una fina capa de grasa que facilite el proceso de desencofrado de la viga, una vez ejecutado este proceso, se

procede a verter la mezcla en la formaleta distribuyéndola de manera uniforme, para tal fin la formaleta es golpeada suavemente. El curado de la viga se realizó a temperatura ambiente, el tiempo estimado para éste fue de 48 horas, una vez finalizado la viga fue desencofrada. El proceso de conformación típico de una viga se aprecia en la Figura 4.

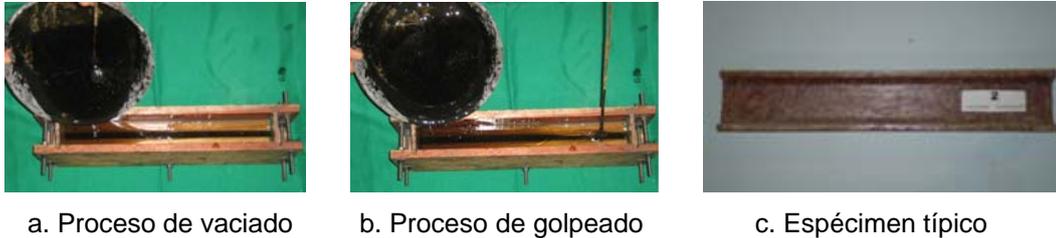


Figura 4. Proceso de elaboración de Viga

6. Caracterización de especímenes de prueba - fase experimental

La caracterización de los especímenes de prueba puede dividirse en dos tipos: mecánica y comportamental. A continuación se describen cada una de estas.

6.1 Caracterización mecánica

La caracterización mecánica del polímero compuesto se realizó a nivel de las siguientes propiedades mecánicas: resistencia a compresión, módulo de rotura y módulo de elasticidad. Seguidamente se detalla el proceso de obtención de las propiedades antes mencionadas.

6.1.1 Resistencia a Compresión del Polímero Compuesto

La resistencia a compresión fue obtenida a partir del ensayo de 30 cilindros. Para la ejecución del ensayo se usó como referencia la Norma ASTM D 695 – 02 a, ver Referencia [4]. En la Figura 5 se muestra el proceso típico de un ensayo de compresión y la falla presentada durante este.

Se evidenció que la falla típica de los cilindros es vertical, se estableció que ésta inicia en discontinuidades de la matriz polimérica debido a burbujas de aire atrapadas durante el proceso de mezclado del material o debido a la presencia de zonas de baja concentración de matriz polimérica dada la disposición al azar de la cascarilla.

Respecto al mecanismo de falla se puede afirmar que presenta características dúctiles, respecto a cilindros de matriz polimérica únicamente. Como reporte de los ensayos realizados se calculó la resistencia a compresión obtenida como el cociente entre la carga de falla del cilindro y el área inicial sobre la cual se aplicó la carga, en la Figura 6c, se presenta la totalidad de resistencias a compresión obtenidas.

Sobre la totalidad de los datos un análisis estadístico fue desarrollado, a partir del cual se encontró que la resistencia a compresión promedio del polímero compuesto es $810,0 \text{ kg/cm}^2$, de otro lado se determinó que el rango de variación para una confiabilidad del 90% es $(789,6 - 817,1) \text{ kg/cm}^2$. Datos provenientes de una distribución en la cual el coeficiente de variación fue del 7.1%, condición que garantiza las adecuadas condiciones de repetitibilidad sobre las cuales fue ejecutado el ensayo asociado a la determinación de esta propiedad.

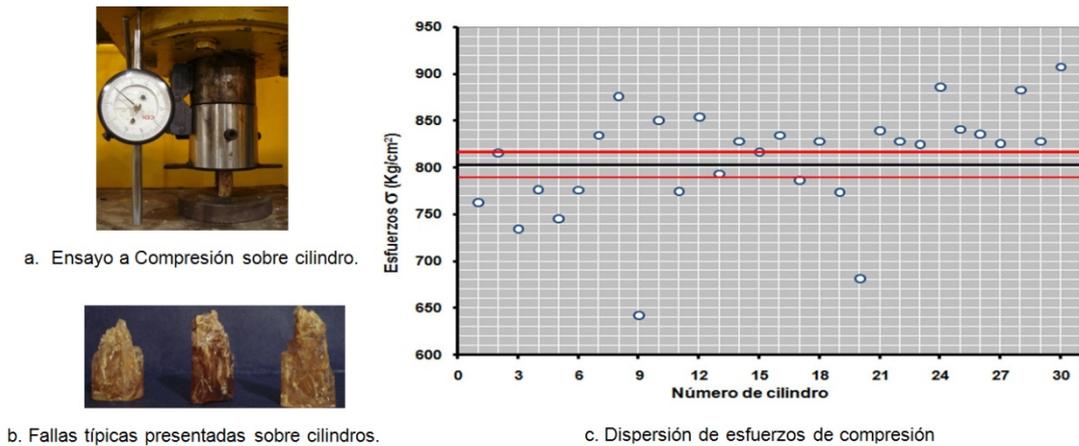


Figura 5. Resistencias a compresión obtenidas sobre la totalidad de cilindros.

6.2 Módulo de elasticidad y módulo de rotura del polímero compuesto

El Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura fueron obtenidos a través del ensayo de 18 vigas las cuales fueron sometidas a carga vertical. Algunos apartes de la metodología propuesta por la norma ASTM D 790 – 02, ver Referencia [5] fueron usados para plantear en ensayo; el principio básico de este consistió en tomar una viga I y apoyarla en dos soportes que permiten el giro a flexión en el plano vertical (plano de las cargas) y restringe el giro en el plano horizontal con el fin de prevenir el pandeo lateral torsional propio de este tipo de vigas sometidas a carga vertical, ver Figura 6a. El sistema de cargas consistió en dos cargas verticales puntuales localizadas en los tercios de la viga, condición que permitió someter la viga en el tercio central a un estado de flexión pura (presencia de momento con ausencia de corte), estado que garantiza la coherencia en la obtención del módulo de rotura. Este sistema se materializó a través del tren metálico presentado en la Figura 6b.



Figura 6. Ensayo sobre vigas I para obtención de Módulo de Elasticidad y Módulo de Rotura.

En la ejecución del ensayo, ver Figura 6c, dos variables fueron sensibilizadas, la carga y la deflexión, a partir de las cuales fue posible elaborar la curva carga – deflexión asociada a la viga ensayada. En la Figura 7 se presentan las curvas carga – deflexión obtenidas sobre las 18 vigas ensayadas y una curva típica carga – deflexión. A partir de estas fue posible obtener el Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura del polímero compuesto, a continuación se describe el procedimiento seguido en cada caso.

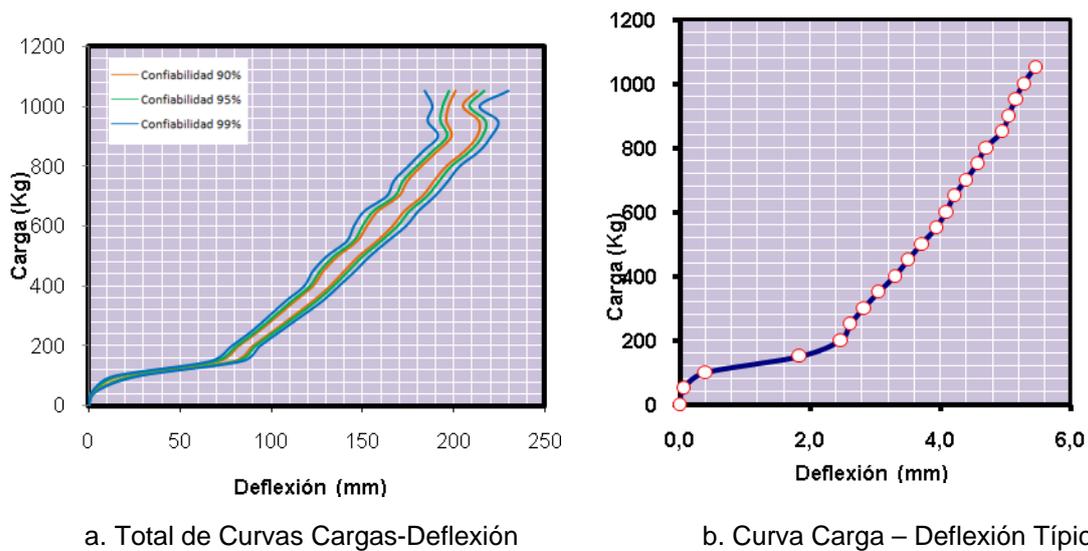


Figura 7. Curvas Carga – Deflexión obtenidas en el proceso experimental

6.3 Módulo de Rotura

El Módulo de Rotura fue obtenido usando la carga de falla o de rotura de la viga. Debido a que el mayor porcentaje de la curva carga deflexión de la viga es lineal, puede suponerse sin cometer un error apreciable que el material se comporta ELÁSTICAMENTE, condición que permite considerar una distribución de esfuerzos lineal en la altura de la sección como se aprecia en la Figura 8.

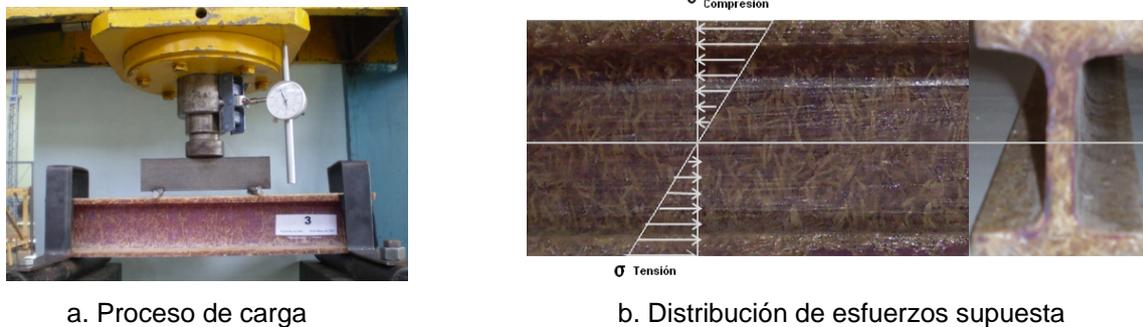


Figura 8. Comportamiento de viga I durante el ensayo

La anterior condición, sumada a la falla típica presentada en el tercio central de la viga, permitió el cálculo del módulo de rotura como un esfuerzo de flexión pura. En la Figura 9 se presentan la totalidad de módulos de rotura obtenidos en el espacio muestral.

Sobre la totalidad de los datos un análisis estadístico fue ejecutado, a partir del cual se encontró que el módulo de rotura promedio del polímero compuesto es $145,0 \text{ kg/cm}^2$, de otro lado se determinó que el rango de variación para una confiabilidad del 90% es $(142,1 - 148,8) \text{ kg/cm}^2$, datos provenientes de una distribución en la cual el coeficiente de variación fue del 8.0%, condición que garantiza las adecuadas condiciones de repetitibilidad sobre las cuales fue ejecutado el ensayo asociado a la determinación de esta propiedad.

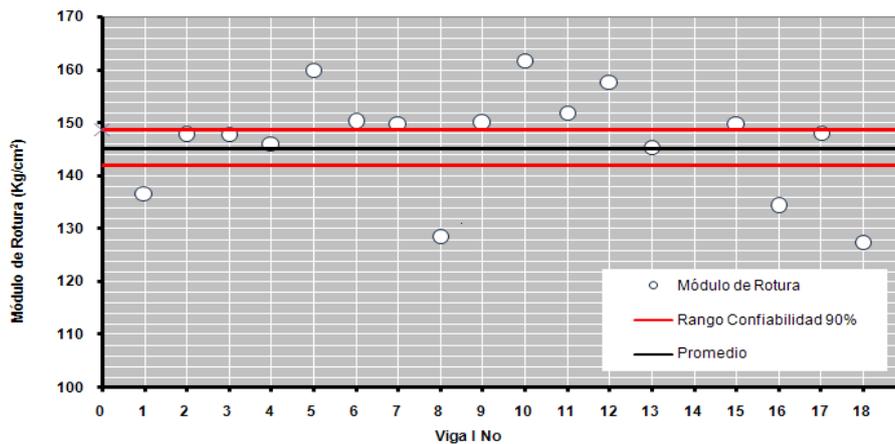


Figura 9. Módulos de Rotura obtenidos sobre la totalidad de las vigas I.

6.4 Módulo de Elasticidad

A partir del análisis de la Figura 7b se consideró que el módulo de elasticidad que caracterizaba al material compuesto correspondía al asociado a la zona lineal de la curva carga - deflexión dado el porcentaje de incidencia de esta zona sobre la curva (85%).

6.4.1 Módulo de Elasticidad Zona Lineal (E_L)

Para la obtención de este, sobre cada curva carga – deflexión se definieron los rangos de variación de la carga en la zona lineal y el de deflexión asociado. A partir de estos y teniendo en cuenta que el comportamiento de la viga en la zona puede considerarse elástico, el módulo de elasticidad se calculó usando la expresión de la deformación elástica de la viga cuando es sometida al tren de cargas usado en esta publicación. La totalidad de datos obtenidos se presenta en la Figura 10.

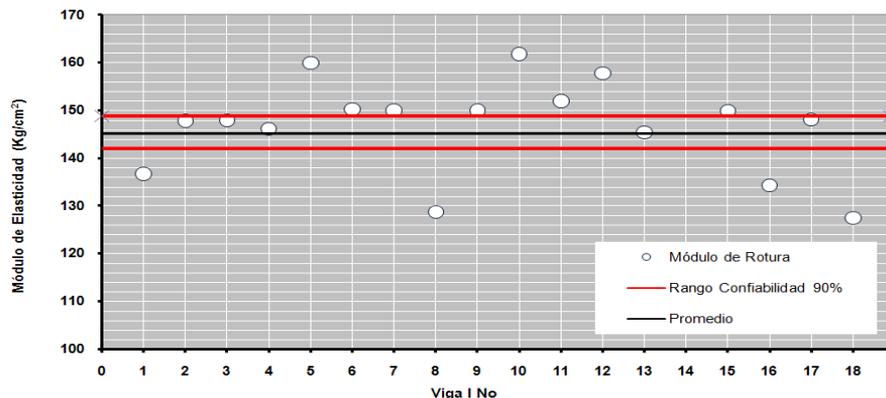


Figura 10. Módulos de Elasticidad obtenidos sobre la totalidad de las vigas.

Sobre la totalidad de los datos fue realizado un análisis estadístico, a partir del cual se encontró que el módulo de elasticidad en la zona lineal (E_L) promedio del polímero compuesto es $17955,0 \text{ kg/cm}^2$, también se encontró que el rango de variación de este para una confiabilidad del 90% es $(17430,0 - 19020,0) \text{ kg/cm}^2$, datos provenientes de una distribución en la cual el coeficiente de variación fue del 15,0%, condición que garantiza las adecuadas condiciones de repetitibilidad sobre las cuales fue ejecutado el ensayo asociado a la determinación de esta propiedad.

6.5 Caracterización Comportamental

La caracterización comportamental de las vigas I se realizó a nivel de su desempeño en la relación carga – deflexión, este desempeño se abordó a partir de dos tópicos: comportamiento carga – deflexión promedio de una viga I y mecanismo de falla típico de vigas I. A continuación se describe cada uno de los anteriores.

6.5.1 Comportamiento Carga – Deflexión promedio de una Viga I

A partir de las curvas carga – deflexión, se efectuó un análisis estadístico sobre puntos característicos que definen los límites de las tres zonas de la curva: zona no lineal, zona de transición y zona elástica; éste fue enfocado a definir el rango de variación de la curva para una confiabilidad del 90% y la curva promedio para el espacio muestral usado. En la Figura 11 se ilustran los resultados obtenidos a partir del análisis antes mencionado, a partir de ésta, se describió el comportamiento carga – deflexión de una viga I típica como sigue: en la parte inicial (ZONA NO LINEAL) la viga presenta la rigidez flexionante más alta durante todo el proceso de carga, condición que genera bajas deflexiones; posteriormente se generan deflexiones mucho mayores a las de la zona anterior (10 veces), aunque el incremento de carga es mínimo, lo cual le permite describir una plataforma que caracteriza la ZONA DE TRANSICIÓN, en ésta el comportamiento de la viga es análogo al de un material dúctil. Finalmente se desarrolla una etapa de aumento progresivo de carga y deflexión cuya proporcionalidad es lineal, este comportamiento está asociado a la ZONA LINEAL de la curva y corresponde aproximadamente al 85% de la misma. La viga finaliza su comportamiento con una falla NO EXPLOSIVA cuyas características se describen en el siguiente numeral.

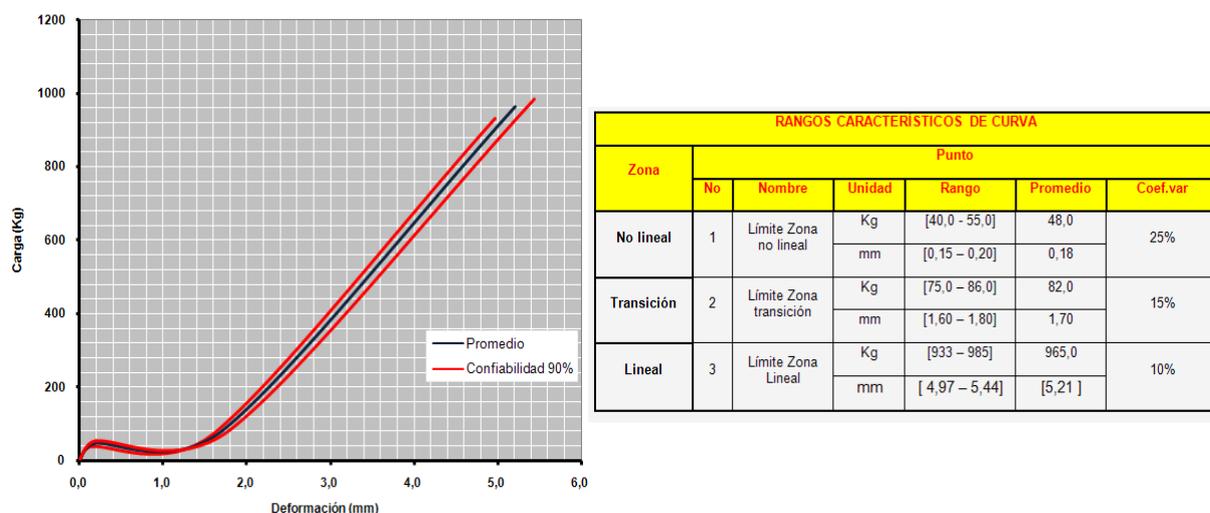


Figura 11. Análisis Estadístico sobre la curva Carga- Deflexión

6.5.2 Mecanismo de Falla Típico de Vigas I

La causa fundamental de las fallas de las vigas son los ESFUERZOS DE TENSIÓN generados por la acción interna de MOMENTO, este fenómeno se evidenció debido a que la totalidad de las fallas se produjeron en el tercio central de la viga donde la única acción interna es el momento cuya cuantía es constante. Se presentaron dos tipos de trayectorias, una totalmente vertical y otra vertical ramificada debida al efecto de discontinuidad del material, ver Figura 12.



Figura 12. Ilustración del Mecanismo de Falla de una viga

7. Aplicabilidad de las vigas I en el contexto estructural y constructivo

A partir de las observaciones y del trabajo a nivel experimental efectuado sobre las vigas I, se recomienda impulsar investigaciones dirigidas a estudiar la aplicación de éstas como componentes de puentes de corta luz o como parte de marcos o pórticos resistentes a cargas sísmicas, los cuales sean parte de estructuras de edificación tales como viviendas o bodegas industriales.

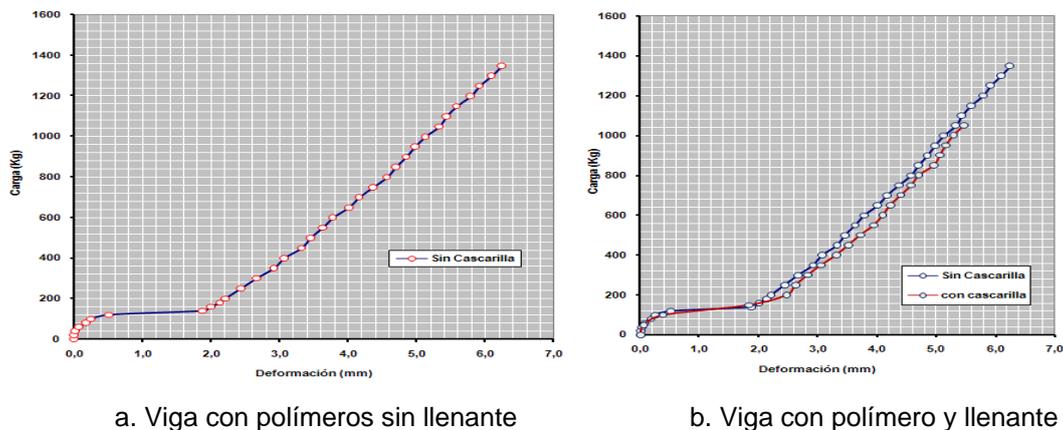


Figura 13. Comportamiento Carga – Deflexión de Viga con y sin llenante de cascarilla de arroz.

La anterior sugerencia se efectúa teniendo en cuenta algunos esbozos del adecuado comportamiento estructural que presentaron las vigas I, el cual estuvo asociado a la ductilidad adquirida por la matriz polimérica como consecuencia de la adición de la cascarilla de arroz, ver Figura 13, condición que habilita al polímero compuesto a visualizarse como un material potencialmente aplicable en el campo de la ingeniería estructural.

8. Conclusiones

- Se ha propuesto la elaboración de un material constituido por una matriz polimérica de resina poliéster y un llenante de cascarilla de arroz dispuesto al azar, cuya dosificación está basada en efectuar una mezcla en volumen constituida por el 80% de resina poliéster y el 20% de cascarilla de arroz. La adición de esta última, genera disminuciones en la capacidad de carga y deformación de la matriz polimérica, sin

embargo ofrece al material compuesto un comportamiento con características dúctiles.

- El material compuesto desarrollado presenta las siguientes características mecánicas: compresión 810 kg/cm², módulo de rotura 145 kg/cm², módulo de elasticidad zona lineal 17955 kg/cm². Estas características son inferiores a las respectivamente asociadas de la resina poliéster que actuó como matriz polimérica del material compuesto, lo cual permite deducir la influencia que ejerce el llenante sobre el material.
- Los modelos de vigas ensayados definen una curva carga – deflexión conformada por tres zonas: no lineal, transición y lineal, siendo predominante la zona lineal con un porcentaje de incidencia del 85% condición que permite definir el material como aproximadamente lineal. Las vigas en consideración exhibieron un comportamiento dúctil a la falla (no explosiva), encontrando que el mecanismo de falla está asociado a esfuerzos de tensión inducidos por momento puro.

Referencias

[1] QUESADA, S – ALVARADO, A – VEGA, B. “Utilización de la fibras del rastrojo de piña (Anana comusus, variedad champaka) como material de refuerzo en resinas de poliéster”, Revista Iberoamericana de Polímeros, Volumen 6(2), 2005.

[2] LOPEZ, M – ARROYO, M., “Fibras naturales como refuerzos de matrices poliméricas”, Revista de Plásticos Modernos, Volumen 85, 2003, número 564.

[3] GOMEZ, J. L – JARONES, C – GAÑAN, P., “Refuerzos naturales para materiales plásticos”, Revista de Plásticos Modernos, Volumen 76, 1998, número 506.

[4] ASTM – INTERNATIONAL, ASTM D695 – 02 a., “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics”.

[5] ASTM – INTERNATIONAL, ASTM D790 – 02., “Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics”.

Agradecimientos

Es loable agradecer a los integrantes del Grupo de Investigación ESTRUCTURAL adjunto al Laboratorio de Estructuras de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, por su apoyo logístico en el planeamiento, ejecución y producción de los resultados de la investigación soporte de esta publicación.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre: José Christian Chanchí Golondrino.

Director Laboratorio de Estructuras

Dirección: Universidad Nacional de Colombia- Sede Manizales, Departamento de Ingeniería Civil, Campus la Nubia, Oficina V224, Manizales (Caldas) – Colombia.

Teléfono: +(57)6-8879400 ext. 55799/55809

Fax +(57)6-8879300 ext. 50238

Email: jcchanchigo@unal.edu.co