
Evaluación de la resistencia al impacto y a la tracción de un material compuesto de polietileno de alta densidad y guadua usando un diseño factorial 2^3

Evaluating the impact and tensile strength of a high density polyethylene and guadua composite material using a 2^3 factorial design

Diego F. Lemus^a
dir.estadisticaaplicada@usantotomas.edu.co

Jimmy A. Niño^b
jiniqo@uniandes.edu.co

Alberto Rojas^c
arojasr@dian.gov.co

Resumen

Este artículo presenta la evaluación de las fibras de guadua como material de refuerzo en la matriz termoplástica de polietileno de alta densidad, el cual contiene un agente de acople comercial (polybond 1009). Por medio de un diseño factorial 2^3 se evaluaron las diferencias entre el material compuesto (polietileno y guadua) y el material base (polietileno de alta densidad) para diferentes propiedades mecánicas. Como resultado se obtiene una disminución del 45 % en la resistencia al impacto y un aumento del 49 % en la resistencia a la tensión al comparar el material compuesto con el base. Resulta importante señalar que, a pesar de tener una menor resistencia al impacto, el módulo de elasticidad del material compuesto aumenta en un 234 % evidenciando el papel que desempeñan las fibras de guadua como material de refuerzo.

Palabras clave: agente de acople, diseño factorial, resistencia a la tensión, resistencia al impacto..

Abstract

This article presents the evaluation of Colombian bamboo fibres as a reinforce material in the polymer matrix created with a mixture of High Density-Polyethylene

^aDirector de Maestría en Estadística Aplicada. Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C., Colombia

^bEspecialista en Estadística Aplicada, Bogotá D.C., Colombia

^cEspecialista en Estadística Aplicada, Bogotá D.C., Colombia

and a commercial coupling agent (polybond 1009). Through a 2^3 factorial design it was studied the differences between a composite material (polyethylene and Colombian bamboo) and the base material (High Density-Polyethylene) for different mechanical properties. As a result, the composite material has a 45 % reduction in impact strength and a 49 % increase in tensile strength when is compared to the base material. It is important to note that, despite having less impact resistance, the modulus of elasticity of the composite material increases by 234 %, which is important evidence of the role of guadua fibers as a reinforcing material.

Keywords: coupling agent, factorial design, impact strength, tensile strength..

1. Introducción

En los últimos años el uso de materiales compuestos en la industria colombiana se ha incrementado notablemente. Esta tendencia se debe al hecho de que los materiales compuestos tienen ciertas características especiales, como son la relación resistencia-peso y rigidez-peso que resultan especialmente adecuados para estructuras en las que el peso constituye una variable fundamental en el proceso de diseño (Car et al. 2002).

Bajo esta línea, el Centro de Investigación en Procesamiento de Polímeros (CIPP) de la Universidad de los Andes ha venido desarrollando tecnologías en el campo de los compuestos naturales o lignocelulósicos, en reemplazo de la madera y algunos polímeros como el PVC con cisco de café, madera con polietileno de alta densidad y polietileno de alta densidad con fibras de algodón, piña, plátano y palma (Delgado & Medina 2003) (García 2003). En el ámbito industrial, Woodpecker ubicada en Cota, Cundinamarca, muestra el desarrollo de esta tecnología en la construcción de pisos, postes, guarda escobas, cerramientos y sistemas constructivos. Esta empresa produjo un material compuesto de PVC cisco de café con el que se construyó la primera casa de interés social encajando tabletas entre sí, su valor no rebasó los \$15 millones de pesos.

Investigaciones realizadas y presentadas en la revista *Materials and Designs* muestran información del desarrollo de nuevos materiales compuestos reforzados con fibras de guadua y también presentan los principales resultados en la metodología del proceso productivo. En (Abdul-Khalil et al. 2012) se exponen los últimos estudios de las propiedades de las fibras de guadua con matrices poliméricas y aplicaciones de diseños de nuevos productos. El desarrollo de un material compuesto invita a la reutilización de materias primas como el plástico reciclado y los residuos de los procesos de corte o laminado de la guadua, la idea fundamental es buscar un material que permita la sustitución de la madera en los compuestos y así evitar la tala innecesaria de árboles.

En Colombia existen grandes extensiones de cultivos de guadua que han sido usualmente utilizados en la construcción de casas, puentes, muebles y otros artículos de consumo individual y masivo. El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar las propiedades de la guadua como material compuesto (por ser un material con una fuente de aprovisionamiento abundante en el país), estudiado las diferencias entre el material generado (polietileno, guadua y agente de acople) y el material base (polietileno de alta densidad) para diferentes propiedades mecánicas de interés. Puntualmente, se identificarán los factores e interacción entre estos que tienen un efecto significativo en la resistencia al impacto y a la tensión del material compuesto respecto al base. El artículo tiene la siguiente estructura: en la segunda sección se presenta una breve descripción del diseño factorial 2^3 , en la tercera los materiales factores y niveles considerados en el estudio; en la cuarta sección se presentan los contrastes de hipótesis de interés en el estudio; finalmente, en las secciones 5 y 6 se presentan los resultados y las conclusiones del trabajo respectivamente.

2. Diseño factorial 2^3

La región experimental del diseño factorial 2^3 es un cubo regular centrado en el origen $(0,0,0)$, cuyos vértices son los ocho tratamientos. La matriz de diseño se construye alternando el signo menos y el signo más en la primera columna, dos menos y dos más en la segunda columna, y cuatro menos y cuatro más en la tercera; dicho diseño corresponde al orden estándar o de Yates. (Figura 1).

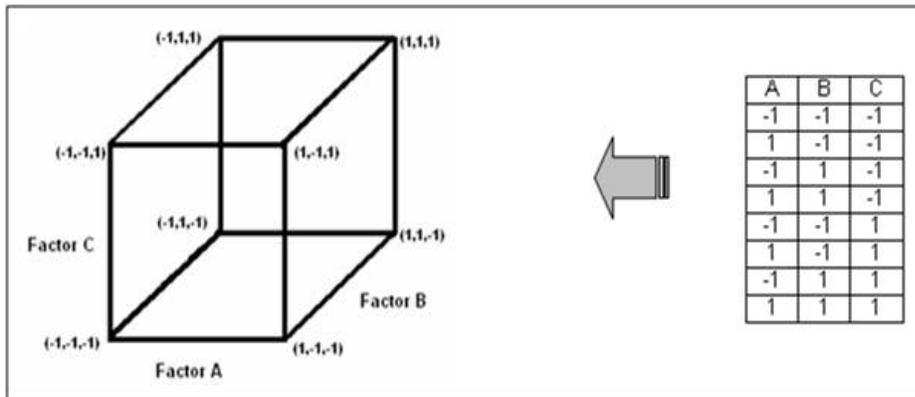


Figura 1: *Diseño factorial 2^3 y su representación geométrica.*

Fuente: Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2005), p. 222.

Con este diseño se pueden estudiar $2^3 - 1 = 7$ efectos: tres efectos principales A, B, C; tres interacciones dobles AB, AC, BC y una interacción triple ABC. Por lo general, el interés se centra en estudiar los efectos principales y las interacciones

dobles; las interacciones de mayor orden (de tres o más factores) generalmente no influyen de manera significativa, y cuando lo hacen son difíciles de reproducir en la práctica (Gutiérrez & de la Vara 2005). Resulta importante señalar que, en la literatura relacionada, existen diferentes notaciones para representar los niveles alto y bajo de los factores para el diseño 2^3 . En (Montgomery 2004) se puede encontrar la siguiente tabla resumen (Tabla 1):

Tabla 1: *Notación de los niveles de los factores*

Corrida	A	B	C	Etiquetas	A	B	C
1	-	-	-	(1)	0	0	0
2	+	-	-	a	1	0	0
3	-	+	-	b	0	1	0
4	+	+	-	ab	1	1	0
5	-	-	+	c	0	0	1
6	+	-	+	ac	1	0	1
7	-	+	+	bc	0	1	1
8	+	+	+	abc	1	1	1

Al multiplicar las columnas de signo por la columna de totales de la notación de Yates se obtienen los contrastes para los siete efectos considerados. A continuación se presentan las ecuaciones obtenidas:

$$\begin{aligned}
 \text{Contraste A} &= [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] \\
 \text{Contraste B} &= [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] \\
 \text{Contraste C} &= [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] \\
 \text{Contraste AB} &= [abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)] \\
 \text{Contraste AC} &= [(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc] \\
 \text{Contraste BC} &= [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc] \\
 \text{Contraste ABC} &= [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)]
 \end{aligned}$$

Si se hacen n réplicas de cada tratamiento, los efectos de un diseño 2^3 se estiman dividiendo los contrastes entre $4n$, así por ejemplo, el efecto principal de A se estima de la siguiente manera:

$$\text{Efecto A} = \frac{\text{Contraste A}}{4n}$$

Las sumas de cuadrados de los efectos pueden ser calculadas a partir de sus contrastes empleando la siguiente relación:

$$SC_{Efecto} = \frac{(\text{Contraste}_{Efecto})^2}{8n}$$

La suma total de cuadrados se obtiene empleando la siguiente expresión:

$$SCT = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^n y_{ijlm}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{8n}$$

Donde y_{ijlm} denota es la m-ésima resistencia al impacto/tensión observada para la i-ésima composición polietileno guadua, con el j-ésimo porcentaje de agente de acople y el l-ésimo tamaño de fibra, $y_{\dots} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^2 \sum_{m=1}^n y_{ijlm}$ denota el total general de la resistencia al impacto/tensión y n corresponde al número de réplicas realizadas. Finalmente, la suma de cuadrados del error se calcula por sustracción y con esta información se puede construir la tabla ANOVA que se presenta a continuación (Tabla 2).

Tabla 2: ANOVA para el diseño 2^3 .

Factor de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Estadístico F_0
Factor A	SC_A	1	CM_A	CM_A/CME
Factor B	SC_B	1	CM_B	CM_B/CME
Factor C	SC_C	1	CM_C	CM_C/CME
A × B	SC_{AB}	1	CM_{AB}	CM_{AB}/CME
A × C	SC_{AC}	1	CM_{AC}	CM_{AC}/CME
B × C	SC_{BC}	1	CM_{BC}	CM_{BC}/CME
A × B × C	SC_{ABC}	1	CM_{ABC}	CM_{ABC}/CME
Error	SCE	$8(n-1)$	CME	
Total	SCT	$8n-1$		

Fuente: Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2005), p. 224.

Aquellos efectos cuyos valores p sean menores a un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$) se consideran activos y son los efectos a interpretar para conocer mejor cómo está operando el proceso y para determinar cuál es el mejor tratamiento. Según (Montgomery 2004), el diseño 2^3 requiere de al menos dos réplicas ($n \geq 2$) para poder calcular el cuadrado medio del error, puesto que la SCE, entendida esta sigla como la suma del cuadrado del error, tiene 0 grados de libertad cuando $n=1$. Con la finalidad de encontrar la combinación lignocelulósica con mejores propiedades mecánicas respecto al polietileno de alta densidad, se realizará un diseño con tres factores de efectos fijos para estudiar las diferencias observadas con el material generado (polietileno, guadua y agente de acople).

3. Materiales considerados

A continuación se presenta un breve resumen de los materiales empleados en el desarrollo del estudio.

3.1. Polietileno de alta densidad

El polietileno de alta densidad usado en este proceso es el GF4950 producido por Ipiranga Petroquímica. Este polietileno es un copolímero de peso molecular medio, desarrollado para el área de soplado con alta resistencia al impacto y buena rigidez. Presenta buena resistencia a la tensión, adecuado para contacto con sustancias tensoactivas y productos químicos.

3.2. Agente de acople

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó como agente de acople, entre la matriz termoplástica y el refuerzo lignocelulósico guadua, el polybond 1009 distribuido por Addivant (Tabla 3). El agente de acoplamiento denominado polybond 1009 (Ethylene-acrylic copolymer) es un polietileno reforzado con vidrio y mica que proporciona buena adherencia a una variedad de materiales incluso aluminio, acero limpio y estaño.

Tabla 3: *Propiedades generales del polybond 1009*

Composición	Polietileno de alta densidad modificado con ácido acrílico
Forma Física	Pellets
Índice de fluidez (190°C/2.16 kg)	5 g/10 min (ASTM D 1238)
Densidad a 23°C	0.95 (ASTM D-792)
Punto de fundición	127°C (DSC)
Nivel de ácido acrílico	6 % en peso

Fuente: Página web de Addivant.

3.3. Guadua

En el presente estudio, de las dos especies nativas de guadua en Colombia, se empleó la clase angustifolia por ser la de mayor uso comercial. Dentro de esta especie se tienen las variedades denominadas *macana*, *cebolla* y *rayada*. En la investigación se empleó la guadua macana por ser la variedad de paredes más gruesas, característica que hace que sea la variedad de uso más frecuente en el sector construcción.

4. Factores y niveles

En el presente trabajo se empleó el método para determinar las propiedades de tensión en plásticos presentado por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (?) y la propuesta para calcular la resistencia al impacto en plásticos expuesto por el mismo instituto (?) con la finalidad de garantizar la replicación de los experimentos. Los factores considerados en este estudio se basan en los

diseños experimentales implementados en (Rodríguez et al. 2003) y (García 2003). Los niveles fueron seleccionados teniendo en cuenta que estos últimos son los de mayor importancia en compuestos lignocelulósicos. En la Figura 2 se presentan los factores (A, B y C) considerados importantes en la formulación de la mezcla del compuesto: la proporción de la matriz de refuerzo, la cantidad de polybond 1009 en la mezcla y el tamaño del grano de guadua. Dentro de estos factores se comprueban 2,2,2 niveles, los cuales son: 50 % HDPE - 50 % guadua y 60 % HDPE - 40 % guadua, para la matriz de refuerzo; 5 % y 10 %, para el polybond 1009; 0.2108 mm (pequeño) y 0.4191 mm (grande), para el tipo de grano.

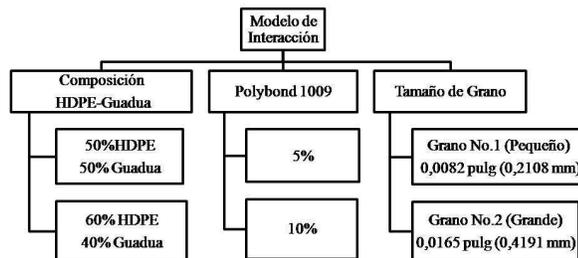


Figura 2: Diseño factorial 2^3 - Modelo de interacción de factores
Fuente: elaboración propia.

En la proporción de matriz-refuerzo se seleccionaron los niveles que son recomendados en las composiciones patentadas por AEART (*Advanced Enviromental Recycling Technologies Inc.*) asumiendo niveles de material de relleno entre el 40 % y 60 % (Delgado & Medina 2003). Para el agente de acople los niveles se determinaron siguiendo las sugerencias de (García 2003), puesto que niveles fuera del rango de 1 % al 25 % no mejoran el comportamiento del material. Finalmente, en el estudio se empleó un grano de guadua de tamaño grande (0.0165 pulg/425 μm) y grano de guadua de tamaño pequeño (0.0082 pulg/212 μm), pues estos niveles están sustentados por la AEART quienes recomiendan manejar tamaños de partículas que pasen por un tamiz No. 30 o menor.

4.1. Variables de interés

En ingeniería, la resistencia de un elemento es definida como la capacidad de este para ser sometido a fuerzas y esfuerzos sin romperse, adquirir deformaciones permanentes o presentar algún grado de deterioro.

En el área de resistencia de materiales, la tensión se define como la relación entre la fuerza aplicada y el área del material sobre la cual se aplica; puntualmente, la

resistencia a la tensión es el esfuerzo tensional por unidad de área a la que el material se rompe o falla por fracturación. Esta propiedad resulta de gran importancia puesto que mide el grado de coherencia del material para resistir fuerzas tirantes. La resistencia al impacto se define como la capacidad del material a absorber golpes y energía sin romperse, esta propiedad depende de la temperatura y la forma del material. Finalmente, el módulo elástico es una constante que involucra una medida relacionada con la tensión y una medida relacionada con la deformación de un material; estas propiedades resultan de gran interés a nivel industrial pues forman parte del conjunto de características que hacen que un material se comporte de una manera determinada ante estímulos externos.

Finalmente, se mantuvieron las condiciones experimentales todas las mezclas para medir las propiedades del material bajo estudio. Puntualmente, las mezclas se realizaron en un mezclador interno (Banbury), provisto de dos tornillos contrarotantes, a una temperatura de 180°C y una velocidad de 31 rpm durante 12 minutos. Las pruebas mecánicas fueron realizadas a una temperatura de 23°C y 50 % de humedad relativa. Las pruebas de resistencia al impacto Izod se realizaron en una máquina Testing Machine Inc.(TMI No. 43-1), con un péndulo de 2 lb.pie y siguiendo el método A según norma NTC 943-2003. Las pruebas de tensión se realizaron en una máquina Instron 5586 con una velocidad de 5 mm/min; probeta tipo I según lo especificado en la norma NTC 595-2003.

5. Hipótesis bajo estudio

El modelo estadístico para un diseño 2^3 de efectos fijos describe el comportamiento de la variable respuesta por medio de la ecuación (1) (Montgomery 2004):

$$y_{ijlm} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{il} + (\beta\gamma)_{jl} + (\alpha\beta\gamma)_{ijl} + \varepsilon_{ijlm}$$

para $i = \{1, 2\}$; $j = \{1, 2\}$; $l = \{1, 2\}$; $m = \{1, 2, \dots, 5\}$ (1)

Donde:

- y_{ijlm} = es la m-ésima resistencia al impacto/tensión observada para la i-ésima composición polietileno guadua, con el j-ésimo porcentaje de agente de acople y el l-ésimo tamaño de fibra.
- μ = media general.
- α_i = efecto de la i-ésima composición de polietileno con guadua sobre la resistencia al impacto/tensión.
- β_j = efecto del j-ésimo porcentaje de agente de acople sobre la resistencia al impacto/tensión.
- γ_l = efecto del l-ésimo tamaño de fibra sobre la resistencia al impacto/tensión.

- $(\alpha\beta)_{ij}$ = efecto de la interacción entre la i -ésima composición polietileno-guadua y el j -ésimo porcentaje de agente de acople sobre la resistencia al impacto/tensión.
- $(\alpha\gamma)_{il}$ = efecto de la interacción entre la i -ésima composición polietileno-guadua y el l -ésimo tamaño de fibra sobre la resistencia al impacto/tensión.
- $(\beta\gamma)_{jl}$ = efecto de la interacción entre el j -ésimo porcentaje de agente de acople y el l -ésimo tamaño de fibra sobre la resistencia al impacto/tensión.
- $(\alpha\beta\gamma)_{ijl}$ = efecto de interacción entre la i -ésima composición polietileno-guadua, el j -ésimo porcentaje de agente de acople y el l -ésimo tamaño de fibra sobre la resistencia al impacto/tensión.
- ε_{ijlm} = error aleatorio en la m -ésima observación para la i -ésima composición polietileno-guadua, el j -ésimo porcentaje de agente de acople y el l -ésimo tamaño de fibra sobre la resistencia al impacto/tensión.

La pruebas de hipótesis planteadas en el estudio fueron se presentan a continuación.

1. Sobre el efecto de la composición de polietileno y guadua:

H_0 : la composición polietileno y guadua no tiene un efecto significativo sobre la resistencia al impacto/tensión ($H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = 0$) contra H_1 : la composición polietileno y guadua sí tiene un efecto significativo sobre la resistencia al impacto/tensión ($H_1: \exists \alpha_i = 0$, donde $i = \{1, 2\}$).

2. Sobre el efecto del porcentaje de agente de acople:

H_0 : el porcentaje de agente de acople no tiene un efecto significativo sobre la resistencia al impacto/tensión ($H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$) contra H_1 : el porcentaje de agente de acople sí tiene un efecto significativo sobre la resistencia al impacto/tensión. ($H_1: \exists \beta_j = 0$, donde $j = \{1, 2\}$).

3. Sobre el tamaño de la fibra:

H_0 : el tamaño de fibra no tiene un efecto significativo sobre la resistencia al impacto/tensión ($H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = 0$) contra H_1 : el tamaño de fibra sí tiene un efecto significativo sobre la resistencia al impacto/tensión. ($H_1: \exists \gamma_l = 0$, donde $l = \{1, 2\}$).

4. Sobre la interacción entre la composición polietileno-guadua y el porcentaje de agente de acople:

H_0 : la interacción entre la composición polietileno-guadua y el porcentaje de agente de acople no tiene un efecto significativo sobre la resistencia al impacto/tensión ($H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0, \forall i, j = \{1, 2\}$) contra H_1 : la interacción entre la composición polietileno-guadua y el porcentaje de agente de acople sí tiene un efecto significativo sobre la resistencia al impacto/tensión. ($H_1: \exists (\alpha\beta)_{ij} \neq 0, .$).

5. Sobre la interacción entre la composición polietileno-guadua y el tamaño de la fibra:

H_0 : la interacción entre la composición polietileno-guadua y el tamaño de la fibra no tiene un efecto significativo sobre la resistencia al impacto/tensión ($H_0: (\alpha\gamma)_{il} = 0, \forall i, l = \{1, 2\}$) contra H_1 : la interacción entre la composición polietileno-guadua y el tamaño de la fibra sí tiene un efecto significativo sobre la resistencia al impacto/tensión. ($H_1: \exists(\alpha\gamma)_{il} \neq 0,)$.

6. Sobre la interacción entre el porcentaje de agente de acople y el tamaño de la fibra:

H_0 : la interacción entre el porcentaje de agente de acople y el tamaño de la fibra no tiene un efecto significativo sobre la resistencia al impacto/tensión ($H_0: (\beta\gamma)_{il} = 0, \forall j, l = \{1, 2\}$) contra H_1 : la interacción entre el porcentaje de agente de acople y el tamaño de la fibra sí tiene un efecto significativo sobre la resistencia al impacto/tensión. ($H_1: \exists(\beta\gamma)_{jl} \neq 0,)$.

7. Sobre la interacción entre la composición polietileno-guadua, el porcentaje de agente de acople y el tamaño de la fibra:

H_0 : la interacción entre la composición polietileno-guadua, el porcentaje de agente de acople y el tamaño de la fibra no tiene un efecto significativo sobre la resistencia al impacto/tensión ($H_0: (\beta\gamma)_{il} = 0, \forall j, l = \{1, 2\}$) contra H_1 : la interacción entre la composición polietileno-guadua, el porcentaje de agente de acople y el tamaño de la fibra sí tiene un efecto significativo sobre la resistencia al impacto/tensión. ($H_1: \exists(\beta\gamma)_{jl} \neq 0,)$

Al realizar las pruebas de hipótesis previamente mencionadas se determinará si el tamaño de la fibra, la concentración de agente acoplante en la mezcla y/o la proporción del refuerzo presente en la mezcla polietileno-guadua tiene algún efecto sobre la resistencia al impacto y la resistencia a la tensión del compuesto, también se podrá verificar si hay alguna interacción entre los factores considerados.

6. Resultados

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos en el estudio para las propiedades mecánicas de interés en el material compuesto.

6.1. Resistencia al impacto

En la Tabla 4 se presentan los resultados del análisis de varianza para la prueba de resistencia al impacto.

Tabla 4: ANOVA para la resistencia al impacto

Factor de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Estadístico F_0	Valor P
Modelo corregido	0.747	7	0.107	27.578	0.000
Intersección	70.344	1	70.344	18179.347	0.000
Factor A	0.108	1	0.108	27.925	0.000
Factor B	0.294	1	0.294	75.967	0.000
Factor C	0.144	1	0.144	37.183	0.000
A × B	0.102	1	0.102	26.441	0.000
A × C	0.048	1	0.048	12.322	0.001
B × C	0.042	1	0.042	10.936	0.002
A × B × C	0.009	1	0.009	2.272	0.142
Error	0.124	32	0.004		
Total	72.215	40			
Total corregida	0.871	39			

Fuente: Resultados obtenidos en el software IBM-SPSS-Statistics versión 19.

Teniendo en cuenta que el nivel de significancia considerado en el estudio es del 5 % ($\alpha = 0.05$), se puede concluir de acuerdo a las hipótesis planteadas en la etapa del diseño del experimento que los tres factores con las respectivas interacciones dobles tienen un efecto significativo sobre la resistencia al impacto. La ecuación para la variable resistencia al impacto es la siguiente:

$$\hat{y} = 70.344 + 0.108x_1 + 0.294x_2 + 0.144x_3 + 0.102x_1x_2 + 0.048x_1x_3 + 0.042x_2x_3 \quad (2)$$

Donde las variables codificadas x_1 , x_2 y x_3 representan los factores A, B y C, respectivamente. De igual manera, x_1x_2 , x_1x_3 y x_2x_3 son la codificación de las interacciones AB, AC y BC, respectivamente. Las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y de Kolmogorov-Smirnov no rechazan el supuesto de normalidad de los residuales. Lo anterior valida así los supuestos fundamentales del análisis y garantiza que el modelo presentado en la ecuación (5) es apropiado para predecir la resistencia al impacto del material compuesto. La composición que tuvo mejor desempeño para la variable resistencia al impacto es 60 % de polietileno, 40 % de guadua, 10 % de polybond y tamaño de fibra grande (Figura 3).

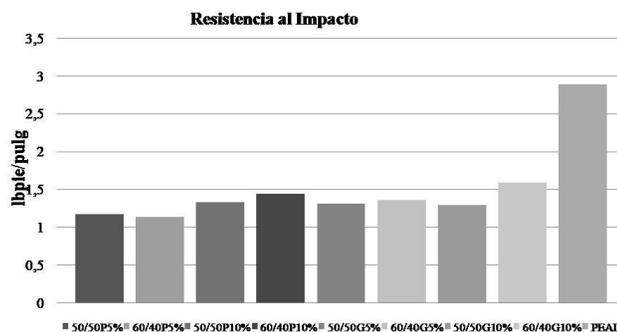


Figura 3: Resultados para la resistencia al impacto

Fuente: Resultados obtenidos en el software IBM-SPSS-Statistics versión 19

En la Figura 3, se puede observar que la máxima resistencia al impacto promedio es de 1.869 lb.pie/pulg (con la configuración previamente mencionada) que es inferior a la observada para el polietileno de alta densidad (PEAD) , el cual en promedio es de 2.710 lb.pie/pulg. Finalmente, se especificó de nuevo el diseño considerado ajustando la tabla ANOVA sin incluir la interacción ABC. En los resultados obtenidos no se observan cambios notables a lo exhibido en la presente subsección y están a disposición del lector bajo solicitud.

6.2. Resistencia a la tensión

A continuación se presentan los resultados del análisis de varianza para la prueba de resistencia a la tensión (Tabla 5).

Tabla 5: ANOVA para la resistencia a la tensión

Factor de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Estadístico F_0	Valor P
Modelo corregido	48.064	7	6.866	0.649	0.712
Intersección	32847.169	1	32847.169	3104.475	0.000
Factor A	3.210	1	3.210	0.303	0.586
Factor B	11.585	1	11.585	1.095	0.303
Factor C	0.356	1	0.356	0.034	0.856
A × B	5.698	1	5.698	0.539	0.468
A × C	9.887	1	9.887	0.934	0.341
B × C	16.270	1	16.270	1.538	0.224
A × B × C	1.058	1	1.058	0.100	0.754
Error	338.579	32	10.581		
Total	33233.812	40			
Total corregida	386.643	39			

Fuente: Resultados obtenidos en el software IBM-SPSS-Statistics versión 19.

Teniendo en cuenta que el nivel de significancia considerado en el estudio es del 5% ($\alpha = 0.05$), se puede concluir de acuerdo a las hipótesis planteadas en la etapa del diseño del experimento que ninguno de los factores considerados y ninguna de sus interacciones tienen un efecto significativo sobre la resistencia a la tensión, también se puede concluir que el modelo corregido no es estadísticamente significativo. En la Figura 4, se puede observar que la composición que tuvo mejor desempeño para la variable resistencia al impacto es 50% de polietileno, 50% de guadua, 10% de polybond y tamaño de fibra grande y que la máxima resistencia a la tensión es de aproximadamente 30 MPa que es superior a la observada para el polietileno de alta densidad (20 MPa para una deformación de 0.025 mm/mm).

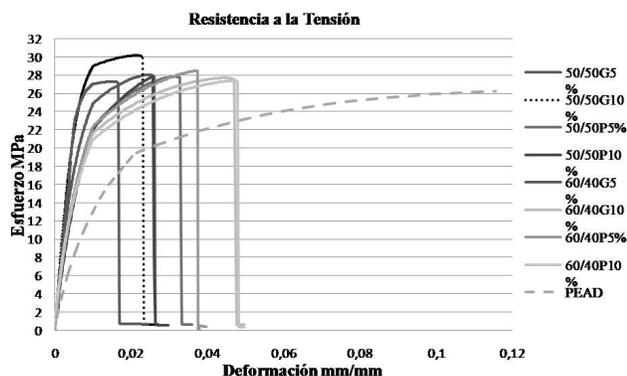


Figura 4: Resultados de interacciones para resistencia a la tensión.

6.3. Módulo de elasticidad

A continuación se presentan los resultados del análisis de varianza para el módulo de elasticidad del compuesto (Tabla 6).

Tabla 6: ANOVA para la resistencia a la tensión

Factor de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	Estadístico F_0	Valor P
Modelo corregido	8841556.492	7	1263079.499	3.094	0.013
Intersección	314901269.497	1	314901269.497	771.297	0.000
Factor A	1852354.230	1	1852354.230	4.537	0.041
Factor B	28475.938	1	28475.938	0.070	0.793
Factor C	3028455.536	1	3028455.536	7.418	0.010
A × B	1152670.061	1	1152670.061	2.823	0.103
A × C	518425.767	1	518425.767	1.270	0.268
B × C	2254350.875	1	2254350.875	5.522	0.025
A × B × C	6824.085	1	6824.085	0.017	0.898
Error	13064803.205	32	408275.100		
Total	336807629.194	40			
Total corregida	21906359.698	39			

Fuente: Resultados obtenidos en el software IBM-SPSS-Statistics versión 19

Teniendo en cuenta que el nivel de significancia considerado en el estudio es del 5 % ($\alpha = 0.05$) se puede concluir de acuerdo con las hipótesis planteadas en la etapa del diseño del experimento que los factores A, C y la interacción $B \times C$ tienen un efecto significativo sobre el módulo de elasticidad. La ecuación del diseño experimental para el módulo de elasticidad es la siguiente:

$$\hat{y} = 314901269.497 - 1852354.2300x_1 + 3028455.536x_3 - 2254350.875x_2x_3 \quad (3)$$

Donde las variables codificadas x_1 y x_3 representan los factores A y C, respectivamente. De igual manera, x_2x_3 es la codificación de la interacción BC. Mediante la ecuación (4) se puede calcular el módulo de elasticidad del compuesto en un punto dado, entendido como un estimador de la respuesta promedio en dicho punto. Los valores a sustituir en la ecuación serán 1 y -1 de acuerdo con cada combinación.

Las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y de Kolmogorov-Smirnov no rechazan el supuesto de normalidad de los residuales. Lo anterior valida así los supuestos fundamentales del análisis y garantiza que el modelo presentado previamente es apropiado para predecir la resistencia al impacto del material compuesto. Para el módulo de elasticidad la composición que tuvo un mejor comportamiento es 50 % de polietileno, 50 % de guadua, 10 % de polybond y tamaño de fibra grande (Figura 5).

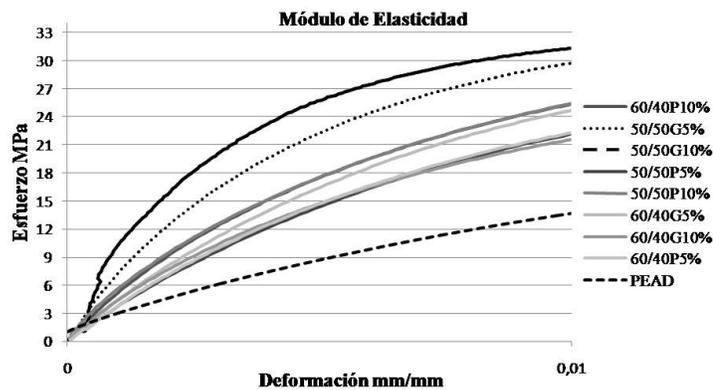


Figura 5: Resultados de interacciones para módulo de elasticidad.

En la Figura 5, se puede observar que el máximo valor del módulo de elasticidad es de 31.5 MPa (con la configuración previamente mencionada) que es superior a la observada para el polietileno de alta densidad (PEAD) con 13.15 MPa.

De manera similar, se especificó nuevamente el diseño considerado para el módulo de elasticidad y se ajustó la tabla ANOVA sin incluir la interacción ABC y sin la interacción doble AC, de manera análoga se puede concluir que el modelo corregido y respecificado es estadísticamente significativo. Los resultados de la respecificación y ajuste del diseño considerado para el módulo de elasticidad están a disposición del lector bajo solicitud.

7. Conclusiones

Al comparar el material base, polietileno de alta densidad, con la composición 50 % de guadua 50 % de polietileno 10 % de polybond y una partícula de tamaño grande (0.4191 mm), se obtiene el máximo módulo de elasticidad promedio de 30.77 Mpa, es decir, el módulo de elasticidad aumenta en un 234 % al compararlo con el polietileno de alta densidad, evidencia del importante papel que desempeñan las fibras de guadua como material de refuerzo.

Bajo el modelo ajustado y realizando una comparación gráfica entre el material base, polietileno de alta densidad, con la composición 50 % de guadua 50 % de polietileno 10 % de polybond y una partícula de tamaño grande (0.4191 mm), se obtiene la máxima resistencia a la tensión promedio de 39,119 Mpa; es decir, la resistencia máxima a la tensión aumenta un 49 % al compararla con el polietileno de alta densidad.

Según lo enunciado previamente, el material compuesto obtenido tiene un conjunto de características que lo hacen atractivo para ser desarrollado industrialmente y ser utilizado para ciertas aplicaciones prácticas. Resulta importante aclarar que se requieren otros ensayos más especializados para poder dar conclusiones más contundentes sobre sus posibles usos.

Recibido: 20 de julio de 2017
Aceptado: 14 de febrero de 2018

Referencias

- Abdul-Khalil, H. P. S., Bhat, I. U. H., Jawaid, M., Zaidon, A., Hermawan, D. & Hadi, Y. S. (2012), 'Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review', *Materials and Designs* **42**(12), 353–368.
- Car, E. D., Oller, S. & Oñate Ibañez, E. (2002), *Análisis y cálculo de estructuras de materiales compuestos*, 1 edn, CIMNE, Barcelona:.
- Delgado, O. F. & Medina, J. A. (2003), 'Extrusión de perfiles espumados de madera plástica', *Revista de ingeniería* **18**(8), 56–63.
- García, D. I. (2003), Estudios de procesabilidad para polietileno de alta densidad reforzado con cisco de café, Master's thesis, Universidad de los Andes, Colombia.
- Gutiérrez, H. & de la Vara, R. (2005), *Análisis y diseño de experimentos*, 2 edn, McGraw-Hill, Ciudad de México:.
- Montgomery, D. C. (2004), *Diseño y Análisis de Experimentos*, 2 edn, Limusa S.A, Ciudad de México:.

Rodríguez, C. A., Medina, J. A. & Reinecke, H. (2003), 'New thermoplastic materials reinforced with cellulose based fibers', *Journal of Applied Polymer Science* **90**(13), 3466–3472.