Modelación del módulo de la resistencia a la flexión de un material compuesto cementicio a partir de propiedades en estado fresco

Modeling a bending resistance modulus for a cementitious material compound based on properties in fresh state

Fernando Toro*, Marisol Gordillo^{1**}, Silvio Delvasto***, Jr Holmer Savastano***

* Universidad San Buenaventura, Cali. COLOMBIA.

** Universidad Autónoma de Occidente, Cali. COLOMBIA

*** Universidad del Valle, Cali. COLOMBIA

**** Universidade de Sao Paulo. BRASIL

Fecha de Recepción: 02/08/2013

Fecha de Aceptación: 03/12/2013

PAG 115-127

Resumen

En la presente investigación se estudió la relación entre las propiedades del estado fresco y el estado endurecido de un material compuesto formado por una matriz de cemento Portland reforzado con fibra de fique dispuestas al azar, las propiedades evaluadas en estado fresco fueron: ondulabilidad, fluidez, drenabilidad y en estado endurecido el módulo de la resistencia a la flexión. Las muestras se prepararon con diferentes materias primas (Fibra de fique, Bentonita, Pulpa, Humo de Sílice y Acronal), las componentes se agregaron a una mezcladora a velocidad constante, luego se vertió la mezcla en una cámara de drenado donde se extrajo el agua y se conformó la lámina con dimensiones de 130x50x6 mm, luego se sumergió en una piscina de curado por 28 días para ser evaluado el módulo de la resistencia a la flexión. El modelo de regresión lineal que se propuso para predecir el módulo de la resistencia a la flexión, en función de las propiedades en estado fresco, se realizó a través del análisis de las interacciones entre las variables de la formulación de la mezcla utilizada. Como resultado del modelo de regresión se obtuvo que existe una clara correlación entre el módulo de la resistencia a la flexión y las propiedades predictoras ondulabilidad, fluidez y drenabilidad, además estas tienen un efecto negativo sobre el módulo de la resistencia a la flexión.

Palabras claves: Tejas onduladas, Modelos de regresión, compuesto laminar, módulo de la resistencia a la flexión.

Abstract

In this research we studied the relationship between fresh state and hardened state of a fiber reinforced laminate compound (MCLRF), respectively, based on a matrix of Portland cement. The variables that have been worked in the fresh state were undulation ability, flow ability and drain ability and hardened in the form of resistance to bending, (bending resistance modulus). The samples were prepared with different raw materials (fique fiber, bentonite, pulp, silica fume, and Acronal). The ingredients were grinded by a mixer working at a constant speed, after that, the mixture was poured into a drainage chamber, and the water was extracted, forming a sheet with dimensions 130x50x6 mm, finally, it was immersed in a curing chamber for 28 days, for bending evaluation. The linear regression model proposed to predict the bending resistance modulus, considering the properties of in fresh state, was performed through the analysis of interactions between variables in formulation of the mixture used. From the regression model it was found that there is a clear correlation between bending resistance modulus and the predictive variables: undulation ability, flow ability and drain ability. Furthermore, the variables have a negative effect on the bending resistance modulus

Keywords: Corrugated tiles, regression models, laminated composite, module flexural strength

1. Introducción

Los materiales de fibrocemento son elementos esbeltos de forma alargada y de bajo espesor, como por ejemplo: paneles, cielorrasos, divisiones de paredes, recipientes (silos y tanques), tejas planas y onduladas para cubiertas de viviendas y piezas de ferrocemento (Kaufmann, J. et al., 2004). Los procesos más usados en la producción de tejas han sido: Hatschek, Mazza y Magnani; estos procesos han predominado en la industria en el último siglo debido a sus ventajas, tales como: facilidad de procesamiento, materias primas económicas y excelentes propiedades finales. Estos procesos comúnmente utilizan como fibra el asbesto, material considerado de riesgo para la salud, por lo cual investigaciones en tecnología de los fibrocementos, ha venido evolucionando hacia la sustitución del asbesto y la innovación de formulaciones que aumenten la productividad y reduzcan el consumo de energía. (Savastano Jr. et al., 2000; Negro, C. et al., 2005; Roma Jr. et al., 2004).

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:

Docente Departamento de Matemáticas Facultad de Ciencias Básicas,
Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia.
E-mail: mgordillo@uao.edu.co

La producción de tejas onduladas, requiere de un material que tenga propiedades adecuadas para su uso, tales como: fluidez apropiada, debido a que genera un buen mezclado y vaciado; buena capacidad de moldeabilidad para que no se produzcan fisuras en la teja; además de estabilidad dimensional, baja densidad, elevado aislamiento térmico, reducida permeabilidad y alta resistencia a la flexión (Dos Anjos M. A. *et al.*, 2003; Onésippe C. *et al.*, 2010; Delvasto S. *et al.*, 2010). En síntesis, si se posee un desajuste de las propiedades reológicas en el estado fresco por haber variabilidad de los componentes de la mezcla e inapropiados parámetros del proceso de producción, se generan problemas para cumplir las propiedades en el estado endurecido.

La aplicación de modelos estadísticos en ingeniería es una herramienta que cada vez tiene una mayor acogida, con el objetivo de analizar de manera sistemática el efecto de diferentes variables sobre una variable respuesta. La *modelación* por medio de la regresión múltiple, ha sido aplicada ampliamente en la predicción de la resistencia a la compresión de concretos reforzados con fibras y sin reforzar, en los cuales se ha obtenido ajustes muy buenos entre el 97 y 99 % (P. Ramadoss, 2012; S. Eswari, P. *et al.*, 2011; Mahmoud Sayed-Ahmed, 2012). Cabe resaltar que las relaciones entre las variables planteadas en este artículo han sido de difícil acceso en las referencias encontradas en la actualidad.

El objetivo del presente trabajo, es ampliar la comprensión, sobre la relación entre las propiedades reológicas tales como ondulabilidad, fluidez y drenabilidad con el módulo de la resistencia a la flexión de mezclas cementicias reforzadas con fibras de fique, apropiadas para la producción de tejas corrugadas. Partiendo de la base, que el módulo de la resistencia a la flexión es afectado por las propiedades en estado fresco, se adopta la metodología estadística de un modelo de regresión múltiple y se propone una ecuación de predicción.

2. Programa experimental

2.1. Materiales

La investigación utilizó cemento Pórtland tipo I, proveniente de la empresa Argos. Las propiedades físico-químicas del cemento fueron evaluadas siguiendo las normas técnicas colombianas NTC 221, 110, 111, 33, 118 y 220 respectivamente para el peso específico (3030 kg/m^3); Consistencia normal (2.8%); Fluidez (a/c) (0.63); Finura Blaine ($336 \text{ m}^2/\text{kg}$); Tiempo de fraguado Inicial (143 min) y final (195 min); Tiempo de fraguado cemento con 4% de aditivo, tiempo Inicial (197 min) y Final (340 min); Resistencia a la compresión a 5 días (18.87 MPa), 7 días (21.17 MPa), y 28 días (27.23 MPa). La caracterización química del cemento se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización Química del Cemento
Table 1. Cement Chemical Characterization

Componente/Component	Análisis Químico % en peso/ Chemical Analysis weight %
SiO ₂	21.87
Al ₂ O ₃	5.75
Fe ₂ O ₃	3.95
CaO	56.85
MgO	1.44
SO ₃	2.3
Pérdida al fuego/ Fire loss	7.5
Residuo insoluble/ Insoluble residue	4.77
CaO libre/ Free CaO	0.98

Las propiedades de la bentonita contenidas en la ficha técnica comercial son las siguientes: Límite líquido wL (93%), Límite plástico wP (47%), Porción de material con tamaño < 75 μ m (85), Contenido de agua higroscópico w (14%), Densidad de sólidos ρ_s (2.70 Mg/m³), Contenido de monmorillonita > 90%.

En la Tabla 2 se presentan los resultados de la caracterización de la fibra de fique.

Tabla 2. Características de la fibra de fique
Table 2. Characteristics of fique fiber

Propiedad/ Property	Rango/ Range	Promedio/ Average
Longitud/Length (mm)	1,1-5,3	2,4
Diámetro/Diameter (μ m)	48-438	300
Diámetro Crítico/Critical Diameter(μ m)	86-120	106
Densidad/Density (g/cm ³)	0.678-0.767	0.723
Humedad/Humidity (%)	5.08-8.43	7.08
Cenizas/Ashes (%)	-	0.58
Lignina/Lignin (%)	-	10.09
Celulosa/Pulp, (%)	-	70.00
Módulo de Elasticidad/Elasticity Modulus, (GPa)	-	9.2
Resistencia a la Tensión/Strain resistance (MPa)	285-688	324

En la Tabla 3 se presentan los resultados de la caracterización de la pulpa.

Tabla 3. Características de la pulpa de periódico
Table 3. Characterization of paper pulp

Característica/ Characteristic	Unidad/ Unit	Especificación/ Specification			Valor promedio/ Average value
		Estándar/ Standard	Mínimo/ Minimum	Máximo/ Maximum	
Humedad relativa/ Relative humidity	%	50	48	52	50
Espesor/ Thickness	Micra/ micron	80	75	85	83
Longitud/ Length	mm	-	-	-	0.05 – 0.77
Peso específico/ Specific weight	kg/m ³	-	-	-	588

La arena empleada tipo silíceo y grano de canto redondeado, presenta una adsorción de agua de: 1.87%; módulo de finura: 2.95; densidad: 2.66 g/ml.

El carbonato empleado fue el Omyacarb 8, con la siguiente composición química: Carbonato de Calcio 99.04 %, óxido de Magnesio 0.385 %, óxido de Silicio 0.315 %, Insolubles en HCl 0.26 %, con propiedades físicas: Peso específico 2.7 g/cm³, pH 8.76 y Humedad 0.04%. También se realizó una granulometría láser: el área de superficie específica es de 1.77 m²/g, un diámetro (0.1): 1.226 µmm, diámetro (0.5): 7.844 µmm, diámetro (0.9): 26.305 µmm, y una uniformidad de 1.02. El Acronal® empleado es una dispersión acuoso de copolímero a base de acrilato de butil-estireno. Este material es usado como una material de base para producir adhesivos para una gran variedad de aplicaciones como teja de cerámica y pisos de madera contra chapada.

2.2. Preparación de especímenes

El proceso de manufactura de la teja consistió en adicionar y mezclar los componentes, siguiendo un orden lógico y cronológico, con el objetivo de obtener una adecuada fluidez y homogeneidad, se trabajó con una relación agua/cemento de a/c: 0.9. Luego se vertió y se esparció la mezcla en la campana o cámara de drenado sobre el molde o marco con la tela de fondo; el equipo de drenado consta de la cámara de succión, la bomba de vacío, los moldes, el filtro y el sistema de tuberías y válvulas en donde se extrajo el agua por un vacío de -2 a -4 bares durante un tiempo aproximado de un minuto, después se generó la lámina en forma de placa de dimensiones de 130x50x6 mm y finalmente se conformó en forma de onda por su propio peso en el molde, posteriormente la pieza se situó en una cámara de curado por 28 días con una humedad relativa cercana al 100%. Se utilizaron 96 muestras para 32 mezclas distintas con dosificaciones que se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Dosificaciones utilizadas en las mezclas

Table 4. Dosages employed for mixtures

Componentes/ Components	Peso cemento/ Cement weight (%)	Peso/ Weight g	Restricciones/ Limitations Límite inferior – Límite superior/ Lower limit – higher limit	Peso total/ Total weight %	Densidad/ Density (g/cm ³)	Vol. %.	Vol. cm ³
Fibra/Fiber	0,03	45	0 - 1%	1,2	0,72	2,5	63
Bentonita/Bentonite	0,03	45	0 - 1%	1,2	1,85	1	24
Humo de sílice/Silica fume	0,025	37,5	0 – 0.9%	1,0	3,1	0,5	12
Pulpa/ Pulp	0,04	60	0 – 2.7%	1,5	0,5	4,9	120
Acronal ®/	0,075	112,5	0 - 5%	2,9	1	4,5	113
Cemento/Cement	1	1500	30 - 100%	38,5	3,1	19,6	484
Relación a/c/w/c ratio	0,9	1350		34,6	1	54,6	1350
Arena/cementante/ Sand/binder	0,5	750		19,2	2,43	12,5	309
Total		3900		100	2,43	100	2474

2.3. Ensayos realizados en morteros

La prueba de la flexión del elemento laminar fibro-reforzado se determinó mediante la aplicación de carga a un elemento laminar de sección transversal y una luz de mínimo tres veces el espesor. La configuración de la prueba de la flexión, de tres puntos de carga y una velocidad del ensayo de 1.5 mm/min (Figura 1). Los valores del módulo de la resistencia a la flexión (*MOR*) del material se calcularon siguiendo la Fórmula 1, (Odera, R.S. *et al.*, 2011).

$$MOR = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

Donde: P es la Carga Máxima aplicada, L: luz entre puntos, b: largo, d: espesor.

Figura 1. (a) Configuración de los tres puntos de carga para tejas onduladas. (b) Representación de la medición de las flechas
Figure 1. (a) Configuration of three loading points for corrugated tiles. (b) Representation of arrows measurements

La fluidez es la capacidad que posee la mezcla de esparcirse sobre una superficie libre de obstáculos, esta propiedad se mide por medio del equipo llamado mini- asentamiento o *minislump*, el cual es empleado para medir la trabajabilidad de los morteros fluidos, tal como se observa en la Figura 2, (Kuder K. G. *et al.*, 2007; Martinie L., *et al.*, 2010).

Figura 2. Equipo para medir miniasentamiento o *minislump*
Figure 2. Equipment used to measure *minislump*

La drenabilidad es la capacidad de la mezcla fibrorreforzada de eliminar agua por medio del vacío. Esta propiedad se evalúa sometiendo a la mezcla con una alta consistencia a una presión de vacío aplicada durante un tiempo contante; luego se determina el agua evacuada en el drenado, saturando la mezcla en alcohol y secado térmico.

La mezcla se preparó con una relación agua/cemento de 0.9, con el objetivo de obtener una distribución uniforme de la fibra en la mezcla, para su posterior conformado en forma de lámina, el vacío aplicado fue $(3 \pm 0,5 \text{ bares})$ a un tiempo de $(1 \text{ min} \pm 1 \text{ s})$, luego se tomaron tres muestras de 50 g y se saturaron en alcohol al 99% de pureza y se secaron en un horno con ventilación a 70°C durante 24 h, para finalmente ser pesadas.

Ondulabilidad: El Ondulometro es un aparato o equipo, cuyo diseño surgió de la necesidad de medir durante esta investigación la capacidad de moldeabilidad o de conformación de una lámina de fibrocemento en estado fresco. El dispositivo está formado por tres bandas o cintas transportadoras. Cada banda o cinta continua se mueve al ser traccionada por dos rodillos o poleas de un diámetro determinado, sobre las cuales descansan. Uno de los rodillos de cada cinta transportadora es movido manualmente haciéndolo girar a una velocidad constante por medio de una manivela. Sobre la banda se monta una placa cementicia en estado fresco, la cual se transporta hacia el extremo de uno de los rodillos (Figura 3). Cuando las placas cementicias bajan o caen, se encorvan por su propio peso con su respectivo radio de redondez, que corresponde al diámetro del rodillo de la respectiva cinta. Así, el dispositivo permite ejercer tensiones diversas sobre el material de la placa, siendo más elevadas a medida que el radio de giro disminuye.

Figura 3. Ondulometro: a) Equipo de ondulado de lado y b) perfil de los cilindros
Figure 3. Undulation meter. a) Undulation device seen from the side. b) Contour of cylinders

2.4 Descripción de la metodología estadística asociada a los modelos de regresión múltiple

La variable de interés (Y) o variable de respuesta es a menudo influenciada por más de una variable predictora (X). Las variables Xs pueden ser controladas o no por el investigador. En un modelo de regresión lineal se plantea la relación entre Y y las Xs, (Fórmula 2) la expresión general que las relaciona es de la forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2)$$

Donde $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ son los parámetros del modelo, conocidos como los coeficientes de regresión, ε es el error aleatorio que no es explicada por las predictoras Xs. Las suposiciones para ε son las siguientes: Los $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$, σ^2 constante y los ε_i independientes.

Este modelo es estimado por medio de la expresión:
 $\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_k x_k$. El modelo puede expresarse en
 forma matricial (Fórmula 3), como: $y = X\beta + \varepsilon$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

La matriz X , es de n filas por $k+1$ columnas, de manera tal que las columnas son linealmente independientes, por lo tanto es posible usar la estimación por mínimos cuadrados (Montgomery D. C., 2004). Dado que la matriz X contiene k columnas, correspondientes a los k parámetros del modelo, y n filas, correspondientes al número de observaciones, existe otro supuesto que debe de cumplirse en todo análisis multivariado y es que el número de observaciones, n , debe ser igual o mayor que el número de parámetros, (k). Esto tiene sentido debido a que para estimar k parámetros, se necesita al menos k observaciones (Uriel E. 2013).

Estimación de Parámetros: El más común de los métodos de estimación de parámetros es mínimos cuadrados, donde las ecuaciones normales se expresan como $(X^T X)B = X^T Y$ de la cual se deriva que la ecuación estimada de regresión es $\hat{Y} = XB$. El razonamiento de la técnica de mínimos cuadrados considera las desviaciones de las observaciones Y_i de su valor medio y determina los valores de los β s que minimizan la suma de cuadrados de estas desviaciones (Montgomery D. C., 2004; Gelman, A. 2005).

Hipótesis Asociadas al Modelo de Regresión: Las hipótesis se plantean sobre los parámetros del modelo: $H_0: \beta_i = 0$, para la cual se utiliza como estadístico de la prueba la *t-student*. Cuando se trata de probar la hipótesis $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$, se debe de considerar la técnica de análisis de varianza.

El modelo se aplicó inicialmente con todas las variables consideradas, (X_1 : Ondulabilidad o moldeabilidad, X_2 : Drenabilidad, X_3 : Fluidez) y que tuviera un nivel de significancia pequeño (< 0.05), es decir las variables introducidas en la ecuación de regresión se eliminan de ella si su nivel de significancia es grande (> 0.05).

Análisis de Varianza: El análisis de varianza (anova) es una técnica que resume el modelo y consiste en dividir la variación total de las observaciones en sus fuentes de variación de acuerdo con el modelo que se postule (Gelman, A. 2005, Montgomery D. C. 2004). En el anova la variación total está contenida en la suma de cuadrados del total (SCT), la cual está compuesta por la suma de cuadrados de la regresión (SCR), $B^T X^T Y - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}$ y la suma de cuadrados de los errores (SCE), $Y^T Y - B^T X^T Y$.

Coefficiente de Determinación Múltiple: Una medida de la fuerza de una asociación lineal entre las variables aleatorias es el coeficiente de determinación múltiple (Fórmula 4), es un valor que oscila entre 0 y 1, valores cercanos a uno indican que las variables predictoras explican la mayor cantidad de variación.

$$R^2 = 1 - \frac{SCError}{SCTotal} \quad (4)$$

Selección del Mejor Conjunto de Variables: Inicialmente se asume todas las variables que el investigador considera que pueden estar relacionadas con la variable de respuesta, pero es necesario un método para determinar que variables deben de estar incluidas por describir un cambio en la respuesta promedio. Para la selección se analizan las pruebas de hipótesis individuales de cada parámetro y se excluyen las no significativas (valores $p > 0.05$) y que el R^2 sufre una disminución considerable cuando ellas no están presentes en el modelo. (Montgomery D. C., 2004; Gelman, A. 2005).

Todos los cálculos que involucra la regresión múltiple fueron obtenidos en el paquete estadístico, *Minitab 16* (Minitab® statistical software (versión 16)).

3. Resultados

3.1. Comportamiento de la fibra en la matriz

La visualización longitudinal de la fibra embebida en la matriz cementicia se muestra en la Figura 4, la cual permite determinar las características principales de las zonas de transición en el compuesto, tal como la adhesión parcial y el micro-agrietamiento de la matriz. El tratamiento realizado, baño de hidróxido de calcio, a la fibra aumentó el área de contacto entre la fibra y el perímetro de la matriz cementicia. El análisis EDS (Figura 4a, b, c) detectó los elementos químicos normalmente presentes en los productos de hidratación de cemento con las proporciones de calcio-sílice entre 1.2 y 2.0. (Roma Jr. *et al.*, 2008; De Andrade S. *et al.*, 2009).

Figura 4. Microfotografía de ESEM de 193 días, a 200 μm (punzonada en 1 centro de la fibra), (punzonada en 2 fuera de la fibra) y (punzonada en 3 fuera de la fibra)

Figure 4. ESEM Microphotography at 193 days, 200 μm (punched the fiber center in 1), (punched outside the fiber in 2) and (punched outside the fiber in 3)

Figura 4. a. EDS Punzonada en 1 centro de la fibra
Figure 4. a. EDS Punched the fiber center in 1

Figura 4. b. Punzonada en 2 fuera de la fibra
Figure 4. b. Punched outside the fiber in 2

Figura 4. c. Punzonada en 3 fuera de la fibra
Figure 4. c. punched outside the fiber in 3

3.2. La relación entre la reología y el módulo de la resistencia a la flexión

La relación entre la reología y el módulo de la resistencia a la flexión, se determinó por medio del modelo de regresión múltiple, para el análisis del comportamiento del mortero fibro-reforzado, específicamente, se trabajó con módulo de la resistencia a la flexión en el estado endurecido (y) como variable predicha y como variables de interés que posiblemente podrían explicar su comportamiento están la Ondulabilidad o moldeabilidad (X_1), Drenabilidad (X_2) y Fluidez (X_3) en el estado fresco.

A partir del análisis estadístico aplicando un modelo lineal se obtienen los valores de significancia de los coeficientes de regresión para cada una de las variables anteriormente mencionadas y los niveles de significancia (P) (Tabla 5) obtenidos para verificar las hipótesis individuales de la significancia de las variables predictoras (Xs) sobre la regresión lineal. Igualmente se observa que a niveles de significancia menores a 0.011, el módulo de resistencia a la flexión es explicado por las variables ondulabilidad, fluidez y drenabilidad. Por otra parte la bondad del ajuste es excelente ($R^2 = 98.3\%$), indicando que la muestra experimental se ajusta muy bien al modelo planteado. Tanto la ondulabilidad como la fluidez y drenabilidad tienen un efecto negativo sobre el módulo de la resistencia a la flexión (coeficientes -1.27, -0.65 y -0.66 respectivamente). Sin embargo las interacciones entre la ondulabilidad-fluidez y fluidez-drenabilidad indican efectos positivos sobre el módulo de resistencia a la flexión, mientras el módulo de resistencia a la flexión tiene un incremento por cada aumento en las interacciones en cuestión.

Tabla 5. Contraste de los coeficientes de regresión de las posibles variables que afectan módulo de la resistencia a la flexión
Table 5. Contrast of the regression coefficients of potential variables affecting the bending resistance modulus

Predictores/ Predictors	Coeficientes/ Coefficients	P
Constante/ Constant	19.25	0.000
Ondulabilidad/ Undulation ability	-1.27	0.005
Fluidez/ Flow ability (cm)	-0.65	0.000
Drenabilidad/ Drain ability (%)	-0.66	0.011
Ondulabilidad x Fluidez/ Undulation ability x Flow ability	0.083	0.000
Ondulabilidad x Drenabilidad/ Undulation ability x Drain ability	-0.103	0.007
Fluidez x Drenabilidad/ Flow ability x Drain ability	0.032	0.006

La regresión se plantea en la Fórmula 5, donde el módulo de resistencia a la flexión esta expresada en MPa, ondulabilidad es adimensional, la drenabilidad en porcentaje y la fluidez en cm. Lo anterior plantea que conocida estas variables en el estado fresco del mortero, es posible determinar el módulo de resistencia a la flexión que este podría presentar en estado endurecido.

$$\hat{y} = 19.3 - 1.27x_1 - 0.655x_2 - 0.653x_3 - 0.103x_1x_2 + 0.0836x_1x_3 + 0.032x_2x_3 \quad (5)$$

Dónde: X_1 : Ondulabilidad o moldeabilidad, X_2 : Drenabilidad, X_3 : Fluidez y Y: es el módulo de rotura de la resistencia a la flexión.

Validación de supuestos sobre el error del modelo: El modelo planteado cumple con los supuestos sobre los errores, dado que provienen de una población que se distribuyen normales con media cero y varianza σ^2 , además la varianza es constante y los errores son independientes, con niveles de significancia mayores a 15%. Así mismo se cumplió con la condición de mayor número de observaciones que parámetros a estimar.

En la Tabla 6, se presenta el análisis de la varianza de la regresión planteada (Fórmula 5) donde se evidencia que ésta es significativa (p-valor de 0.000). Lo cual indica que al menos uno de los coeficientes es diferente de cero. Lo anterior expresa que la regresión no solo es significativa en la muestra, sino que en la población también lo es. Asimismo se resalta que la explicación de los efectos fue mínima (0.073) frente a la regresión (4.269).

Tabla 6. Análisis de la varianza de la regresión planteada
Table 6. Variance analysis of the proposed regression

	Suma de cuadrados/ <i>Squares Addition</i>	F	p-valor/p-value
Regresión/ <i>Regression</i>	4.269	67.94	0.000
Residual	0.073		
Total	4.3424		

La optimización para conocer los valores de la ondulabilidad, fluidez y drenabilidad (Figura 5) que hacen máximo el módulo de resistencia a la flexión se produce cuando se tienen valores bajos tanto de ondulabilidad con valores menores de aproximadamente 3 como fluidez con valores bajos de aproximadamente 16 cm y drenabilidad con valores bajos de aproximadamente 4.7%, predice resistencias a la flexión mayores a 6 MPa.

Figura 5. Gráfico de contornos del módulo de resistencia a la flexión
Figure 5. Contour Graph of bending resistance modulus

Verificación de las predicciones que arroja el modelo: Con el fin de verificar la capacidad de predicción del modelo, se realizaron 3 mezclas (Tabla 7), con las cuales se halló que los valores predichos por la ecuación de regresión son muy parecidos a los valores reales que se hallan en el laboratorio, lo anterior se debe al ajuste tan exacto que se determinó en la modelación; además se aproxima a los resultados que se muestran en la Figura 5.

Tabla 7. Verificación de capacidad de predicción del modelo de regresión
Table 7. Verification of the forecast ability of the regression model

Propiedades/ Properties	Valores/ Values		
Ondulabilidad/ Undulation ability	4	4,4	4,7
Fluidez/ Flow ability (cm)	27,9	25,5	26,67
Drenabilidad/ Drain ability (%)	6,7	6,49	6,58
Módulo de resistencia a la flexión/ Bending resistance modulus (MPa)	Predicho por el modelo/ Predicted by the model		
	4,1	4,3	4,3
	Real en laboratorio/ Actual at the laboratory		
	4,2	4,5	4,4

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten concluir que:

- Con el análisis de resultados se estableció un modelo predictivo del módulo de la resistencia a flexión en base a las propiedades en estado fresco de un mortero de fibrocemento destinado a fabricar tejas corrugadas o onduladas, permitiendo predecir a 28 días en el estado endurecido la resistencia mecánica con las mediciones de ondulabilidad, fluidez y drenabilidad en los primeros minutos de mezclado y conformado con las siguientes materias primas: (cemento, Fibra de fique, Bentonita, Pulpa, Humo de Sílice y Acronal).
- El modelo de la regresión lineal múltiple aplicado representa razonablemente bien la relación o asociación existente entre la ondulabilidad, fluidez y drenabilidad con el módulo de resistencia a la flexión ($R^2 = 98.3\%$) de los morteros fibro-reforzados producidos en esta investigación para producir tejas.
- Se demuestra la posibilidad de usar modelos de regresión múltiple, para realizar el diagnóstico a priori del módulo de resistencia a la flexión, por medio de propiedades como ondulabilidad, fluidez y drenabilidad, con una buena aproximación a los datos reales.
- Mediante ensayos de Microfotografía se observó que las fibras están firmemente incrustadas en la matriz demostrando la fuerza de adherencia entre la fibra y la matriz (Pull out). El tratamiento realizado (inmersión en caliente en una suspensión de hidróxido de calcio) hace que el área de contacto entre la fibra y el perímetro de la matriz cementicia aumente, con lo que se presume una buena resistencia a la flexión.

5. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Universidad del Valle (Colombia), al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José de Caldas" (COLCIENCIAS), al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) por el soporte para el desarrollo de este estudio y al Grupo de Construcciones y Ambiente de la Facultad de Zootecnia e Ingeniería de Alimentos (FZEA) de la Universidad de São Paulo (USP).

6. Referencias/References

- De Andrade S. F., Mobasher B., Dias T. F. R. (2009)**, Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites, *Cement & Concrete Composites* 31, 721–730.
- Delvasto S., Toro E. F., Perdomo F., Mejía de Gutiérrez R. (2010)**, An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. *Construction and Building Materials*, In Press, Corrected Proof, Available online 12 September.
- Dos Anjos M. A., Ghavami, K., Barbosa N. P. (2003)**, Compósitos à base de cimento reforçado com polpa celulósica de bambu. Parte arte I: Uso de resíduos cerâmicos na matriz. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Volumen 7(2), p.346-349.
- Gelman A. (2005)**, Analysis of variance: why it is more important than ever (with discussion). *Annals of statistics* 33, 1–53.
- Kaufmann J., Winnefeld F., and Hesselbarth D. (2004)**, Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 26, 541-549.
- Kuder K. G., Ozyurt N., Mu E. B., Shah S. P. (2007)**, Rheology of fiber-reinforced cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 37, 191–199.
- Mahmoud Sayed-Ahmed (2012)**, Statistical Modelling and Prediction of Compressive Strength of Concrete. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Architecture & Science Ryerson University, Canada. Volumen 3 (2).
- Martinie L., Rossi P., Roussel N. (2010)**, Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. *Cement and Concrete Research*, 40, 226–234.
- Montgomery D. C. (2004)**, Diseño y análisis de experimentos. México: Limusa Wiley.
- Negro C., Sanchez L., Fuente H., Blanco Ángeles (2005)**, Effects of flocculants and sizing agents on bending strength of fiber cement composites. *Cement and Concrete Research* 35 2104 – 2109.
- Odera R.S., Onukwuli O.D. and Osoka E.C. (2011)**, Optimization of the Flexural Strength of Raffia Palm Fibre-Cement Composites. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)*, Volumen 2(2): 294-297.
- Onésippe C., Passe-Couturin N., Toro F. E., Delvasto S., Bilba K., Arsène M. A. (2010)**, Sugar cane bagasse fibres reinforced cement composites: Thermal considerations. *Composites: Part A* 41, 549–556.
- P. Ramadoss (2012)**, Modeling for the evaluation of strength and toughness of high-performance fiber reinforced concrete. *Journal of Engineering Science and Technology*
- Roma Jr. L. C., Martello L. S., Savastano Jr. H. (2008)**, Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers. *Construction and Building Materials* 22, 668–674.
- Roma Jr., Luis C. (2004)**, Coberturas de fibrocemento y sistemas de climatización: influencia del desempeño de terneros mestizos y la raza holandesa. Dissertação apresentada á Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para lá obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
- S. Eswari, P. N. Raghunath and S. Kothandaraman (2011)**, Regression modeling for strength and toughness evaluation of hybrid fibre reinforced concrete *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, Asian Research Publishing Network (ARNP). All rights reserved. www.arnpjournals.com Volumen 6(5), ISSN 1819-6608.
- Savastano Jr. H., Pimentel L. L. (2000)**, Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibras vegetais para fins de obtenção de material de construção. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Volumen 4(1), 103-110.
- Software Minitab 16. Minitab® statistical software (version 16). (2012)**, “Minitab® and all other trademarks and logos for the company’s products and services are the exclusive property of Minitab Inc. All other marks referenced remain the property of their respective owners. See minitab.com for more information”, Volumen 7(3), 280 – 291.
- Uriel E. (2013)**, Regresión lineal múltiple: estimación y propiedades. Universidad de Valencia Versión 09-2013