

# 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<sup>1\*\*</sup>, Silvio Delvasto<sup>\*\*\*</sup>, Jr Holmer Savastano<sup>\*\*\*</sup>

\* 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. Introduction

*Fiber cement materials are slender elements in a stretched shape of thin thickness, such as panels, tin ceilings, walls divisions, containers (bins and tanks), plain and corrugated tiles used for housing covers and ferrocement pieces (Kaufmann, J. et al., 2004). The processes developed by Hatschek, Mazza and Magnani are the most popular ones in tiles production. Over the late century, such processes have predominated in this industry mainly due to their advantages; such as: processing simplicity, economical raw materials and excellent final properties. These processes generally employ asbestos as fiber material, which is considered as a health-risk element. Consequently, technology researches on fiber cements have evolved to replace asbestos and to develop new formulas, so as to improve productivity and reduce energy consumption (Savastano Jr. et al., 2000; Negro, C. et al., 2005; Roma Jr. et al., 2004).*

<sup>1</sup> 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 ( $3030 \text{ kg/m}^3$ ); 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.

*The production of corrugated tiles requires materials with appropriate usage properties, such as: adequate flow ability, which facilitates proper mixing and pouring processes; proper moldable capacity, so that tiles do not become cracked; dimensional stability; low density; high thermal isolation; reduced permeability and high flexural resistance (Dos Anjos M. A. et al., 2003; Onésippe C. et al., 2010; Delvasto S. et al., 2010). Summarizing, if there is a rheological properties imbalance during fresh state, provoked by variability of the mixture components and due to inappropriate parameters in the production process, then there will be problems to achieve hardened state properties.*

*The introduction of engineering statistical models is a tool progressively accepted, since it systematically enables the analysis of different variables over a given response variable. Modeling based on multiple regressions has been widely used to predict compression of fiber reinforced concretes and non-reinforced ones, which have achieved quite adequate settings ranging from 97 to 99% (P. Ramadoss, 2012; S. Eswari, P. et al., 2011; Mahmoud Sayed-Ahmed, 2012). It is worth mentioning that relationships between variables proposed by this article have not been found in literature available so far.*

*The purpose of the current research is to increase the knowledge on the relationship between rheological properties (such as undulation ability, flow ability and drain ability) and the bending resistance modulus of cementitious mixtures reinforced with fique fibers, which are adequate for corrugated tiles production. Based on the fact that bending resistance modulus is affected by fresh state properties, a multiple regression model is adopted and a predictive equation is proposed.*

## 2. Experimental program

### 2.1. Materials

*The research employed Portland cement type I, produced by Argos Company. Physical-chemical properties were evaluated in accordance with Colombian regulations NTC 221, 110, 111, 33, 118 and 220, respectively, for a specific weight ( $3030 \text{ kg/m}^3$ ); regular consistency (2.8%); flow ability (w/c) (0.63); Blaine fineness ( $336 \text{ m}^2/\text{kg}$ ); initial setting time (143 min) and final setting time (195 min); cement setting time with 4% addition; initial time (197 min) and final time (340 min); compressive resistance at 5 days (18.87 MPa), 7 days (21.17 MPa) and, 28 days (27.23 MPa). The cement chemical characterization is shown on Table 1.*



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

Componente/Component	Análisis Químico % en peso/ Chemical Analysis weight %
SiO <sub>2</sub>	21.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.95
CaO	56.85
MgO	1.44
SO <sub>3</sub>	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 µm (85), Contenido de agua higroscópico w (14%), Densidad de sólidos ρs (2.70 Mg/m<sup>3</sup>), Contenido de monmorillonita > 90%.

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

*Bentonite's chemical properties reported by the commercial technical datasheet are the following: Liquid limit wL (93), plastic limit wP (47%), material piece size < 75 µm (85), hygroscopic water content w (14%), solid density ρs (2.70 Mg/m<sup>3</sup>), montmorillonite content > 90%.*

*Table 2 shows the results from fique fiber characterization.*

**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 (µm)	48-438	300
Diámetro Crítico/Critical Diameter(µm)	86-120	106
Densidad/Density (g/cm <sup>3</sup> )	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.

*Table 3 shows the results from pulp characterization.*

**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 <sup>3</sup>	-	-	-	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.

*The sand employed is of rounded-edge grain and siliceous type, which has water absorption of 1.87%; fineness modulus of 2.95; and density of 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/cm<sup>3</sup>, pH 8.76 y Humedad 0.04%. También se realizó una granulometría láser: el área de superficie específica es de 1.77 m<sup>2</sup>/g, un diámetro (0.1): 1.226 μm, diámetro (0.5): 7.844 μm, diámetro (0.9): 26.305 μm, 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.

*Carbonate employed is Omyacarb 8, with the following chemical composition: Calcium Carbonate; 99.04 %; Magnesium oxide 0.385 %, Silicon oxide 0.315 %, HCl Insoluble components 0.26 %; with the following physical properties: Specific weight 2.7 g/cm<sup>3</sup>, pH 8.76 and humidity 0.04%. Laser grain size distribution was also performed delivering a specific surface area 1.77 m<sup>2</sup>/g, diameter (0.1): 1.226 μm, diameter (0.5): 7.844 μm, diameter (0.9): 26.305 μm; and uniformity of 1.02. Acronal® employed is an aqueous dispersion copolymer made of butyl-styrene acrylate. This material is used as base material to produce adhesive materials for a wide variety of applications, such as roofing tiles and wooden floors.*

## 2.2. Specimens preparation process

*The tiles production process consisted in adding and mixing the components, following a logical and chronological order. A water cement ratio 0.9w/c was employed in order to obtain an adequate flow ability and homogeneity. The mixture was poured into a mould covered with a piece of clothing on the base and then immersed in a drainage chamber. Drainage equipment consisted of a suction chamber, vacuum pump, moulds, filter, piping system and valves. Water was drained at a ratio of -2 to -4 bars during approximately one minute. Then a 130x50x6 mm plate was elaborated following its own weight waveform inside the mould. Afterwards the plate was immersed in a curing chamber for 28 days, at a relative humidity close to 100%. 96 samples were employed for 32 different mixtures, which dosages are shown on Table 4.*

**Tabla 4.** Dosificaciones utilizadas en las mezclas  
*Table 4.* Dosages employed for mixtures

Componentes/ Components	Peso cemento/ Cement weight	Peso/ Weight	Restricciones/ Limitations	Peso total/ Total weight	Densidad/ Density	Vol.	Vol.
	(%)	g	Límite inferior – Límite superior/ Lower limit – higher limit	%	(g/cm <sup>3</sup> )	%.	cm <sup>3</sup>
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
<b>Total</b>		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).

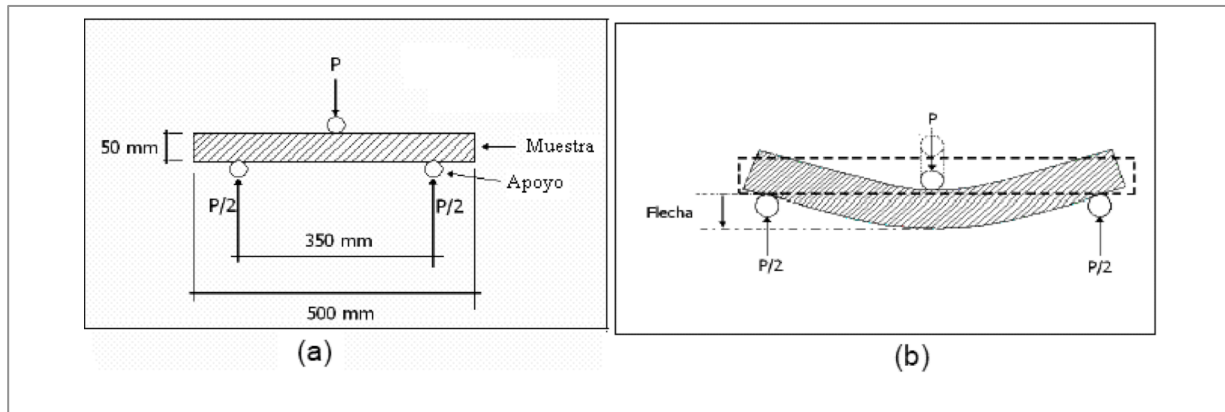
$$MOR = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

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

### 2.3. Tests developed with mortars

Bending resistance test carried out on the fiber reinforced laminate element was determined by loading a transversal section laminate element with a span of three times its thickness. The configuration of bending resistance test considered three loading points and a speed of 1.5 mm/min (Figure 1). The values of the material bending resistance modulus (MOR) were calculated in accordance with Equation 1 (Odera, R.S. et al., 2011).

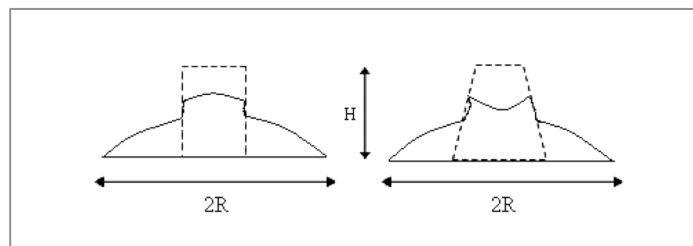
Where P is the maximum loading applied, L is the span between points, b: length, d: thickness



**Figura 1.** (a) Configuración de los tres puntos de carga para tejas onduladas. (b) Representación 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 miniasentamiento 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).

Flow ability is the mixture ability to spread itself on a smooth surface. This ability is measured by the equipment called *minislump*, which is employed to evaluate flow ability on fluid mortars, as shown on Figure 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.

Drain ability is the ability the fiber-reinforce mixture has to eliminate water by means of vacuum drainage. Such ability is measured by exposing a high consistency mixture at a high vacuum pressure during a constant period of time. Then the water poured from drainage is determined by saturating the mixture with alcohol and employing thermal drying.



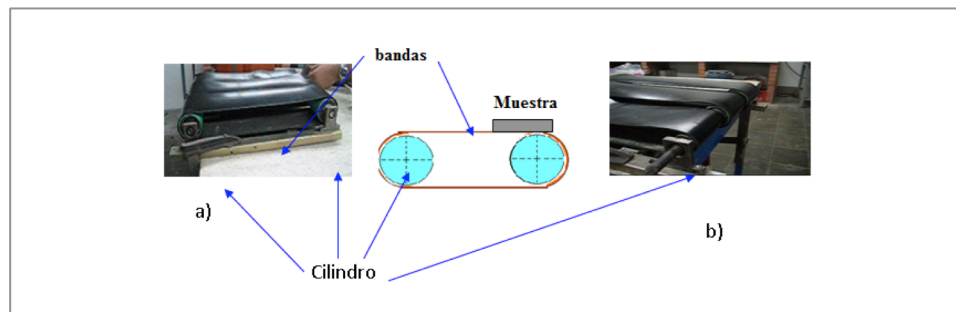


La mezcla se preparó con una relación agua/cemento de 0.9, con el objetivo de obtener una distribución uniforme de la fibra en la mezcla, para su posterior conformado en forma de lámina, el vacío aplicado fue ( $3 \pm 0,5$  bares) a un tiempo de ( $1 \text{ min} \pm 1 \text{ s}$ ), luego se tomaron tres 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.

*The mixture was prepared with a water/cement ratio of 0.9, so as to obtain the fiber homogeneous distribution to make up the plate; vacuum applied was ( $3 \pm 0.5$  bars) for a period of ( $1 \text{ min} \pm 1 \text{ s}$ ); then three 50g-samples were saturated in 99% pure alcohol and they were dried inside a ventilated furnace at 70°C for 24 hours. Samples were finally weighted.*

*Undulation ability: the undulation meter is a device, which design was developed during this research in order to measure molding ability or the ability to make up a fiber-cement plate in fresh state. The device is made up of three bands or conveyor belts. Each band or continuous belt is driven by two rollers or pulleys of a given diameter, which support the belts. One roller of each conveyor belt is manually moved by using a crank pulley at a constant speed. A fresh state cementitious plate is placed on the band and conveyed towards one of the rollers (Figure 3). When cementitious plates descend or fall down, they bend themselves in accordance to their weight and the corresponding rounded radius, which corresponds to the roller diameter of the belt employed. Consequently, the device allows the application of diverse loads on the material plate, which increase as long as the spinning radius decreases.*



**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:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k X_{k+1} + \varepsilon \quad (2)$$

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

#### 2.4 Description of the statistical methodology associated to the multiple regression models

The interest variable (Y) or response variable is often influenced by more than one predictive variable (X). The Xs variables can be controlled by the researcher or not. The linear regression model presents the relationship between Y and Xs, (Equation 2). The general expression is as follows:

Where  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta$  correspond to the model parameter, known as regression coefficients,  $\varepsilon$  is the random error which is not explained by predictive Xs. Assumptions for  $\varepsilon$  are the following ones:  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ ,  $\sigma^2$  are constant and  $\varepsilon_i$  are independent.



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:  $y = X\beta + \varepsilon$

This model is calculated by means of the expression:  
 $\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_k x_k$ . The model can be expressed as a matrix (Equation 3) as:  $y = X\beta + \varepsilon$

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

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).

Matrix X has n rows per k+1 column; therefore, columns are literally independent. Consequently, it is possible to employ the least squares method (Montgomery D. C., 2004). Since the X matrix contains k columns corresponding to the model's k parameters and n rows corresponding to the number of records, there is another assumption to be met during the whole analysis, that is to say the number of records, n, shall be equal or higher than the number of parameters (k). It really makes sense because when estimating k parameters, it is necessary to count at least with k records (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  $\beta_s$  que minimizan la suma de cuadrados de estas desviaciones (Montgomery D. C., 2004; Gelman, A. 2005).

**Estimation of Parameters:** The most common parameters estimation method is the least squares technique, where regular equations are expressed as  $(X^T X)B = X^T Y$ , from which arises that the estimated regression equation is  $\hat{Y} = XB$ . The reasoning of the least squares technique considers the deviation of records  $Y_i$  and their average value, thus determining the values  $\beta_s$ , which minimize the addition of squares in such deviations (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.

**Hypotheses associated with the Regression Model:** The hypotheses are posed on the parameters of model  $H_0: \beta_i = 0$  and the statistical t-student test is employed. When trying to prove hypotesis  $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ , the variance analysis technique shall be employed.

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 ( $> 0.05$ ).

The model was initially applied with all considered variables, ( $X_1$ : Undulation ability or malleability,  $X_2$ : Drain ability,  $X_3$ : Flow ability), with a low importance level ( $< 0.05$ ), that is to say that all applied variables in the regression equation are eliminated, if their importance level is higher than ( $> 0.05$ ).

**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),  $Y^T Y - B^T X^T Y$ .

**Variance Analysis:** The variance analysis (Anova) is a technique that summarizes the model and it consists in dividing the total variance of records in their variance sources, in accordance with the proposed model (Gelman, A. 2005, Montgomery D. C. 2004). The total variance of Anova is contained in the addition of total squares (SCT), which is composed by the addition of total regression squares (SCR),  $B^T X^T Y - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}$ , and the addition of error squares (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).

**Multiple Determination Coefficients:** The multiple determination coefficients correspond to a strength measurement of a linear association between random variables (Equation 4). This is a value oscillating between 0 and 1. Values close to one indicate that predictive variables explain the higher variance amount.

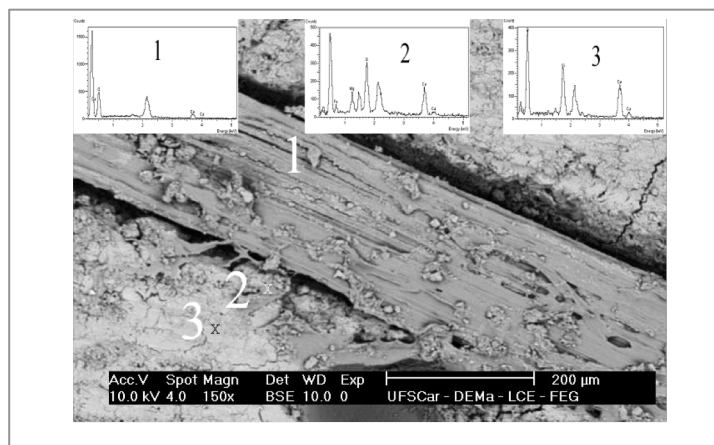
**Selection of the Best Set of Variables:** all variables the researcher considers might be associated with the response variable are initially considered. However, it is necessary to use a method to determine the values to be included, as they affect the average response. For such selection, the individual hypothesis tests for each parameter are analyzed; and the non-significant ones are excluded (values  $p > 0.05$ ), as  $R^2$  considerably decreases when they are eliminated from this model (Montgomery D. C., 2004; Gelman, A. 2005).

All calculations involved in the multiple regression model were obtained by the statistical software *Minitab 16* (Minitab® statistical software (version 16)).

### 3. Results

#### 3.1. Behavior of fiber in the matrix

Longitudinal visualization of the fiber immersed in the cementitious matrix is shown on Figure 4, which enables the determination of main characteristics of transition zones in the compound, such as: matrix partial bonding and micro-cracking. The developed treatment on the fiber, calcium hydroxide immersion, increased the contact area between the fiber and the cementitious matrix perimeter. EDS analysis (Figure 4a, b, c) detected chemical elements normally present in the cement hydration products, with ratios of calcium-silica between 1.2 and 2.0 (Roma Jr. et al., 2008; De Andrade S. et al., 2009).

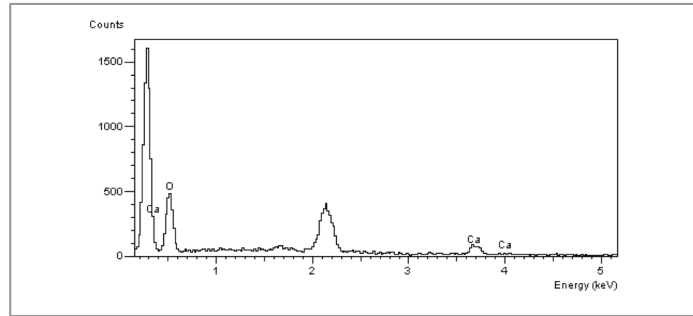


**Figura 4.** Microfotografía de ESEM de 193 días, a 200  $\mu\text{m}$  (punzonada en 1 centro de la fibra), (punzonada en 2 fuera de la fibra) y (punzonada en 3 fuera de la fibra)

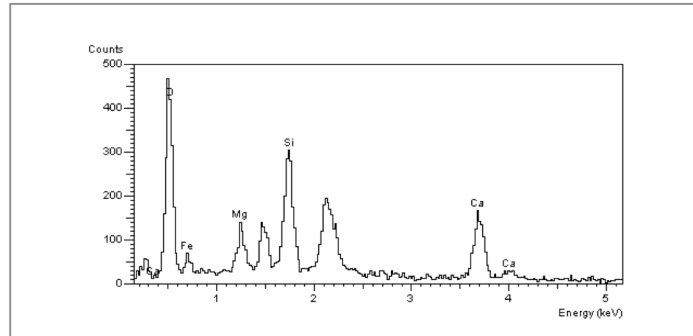
**Figure 4.** ESEM Microphotography at 193 days, 200  $\mu\text{m}$  (punched the fiber center in 1), (punched outside the fiber in 2) and (punched outside the fiber in 3)



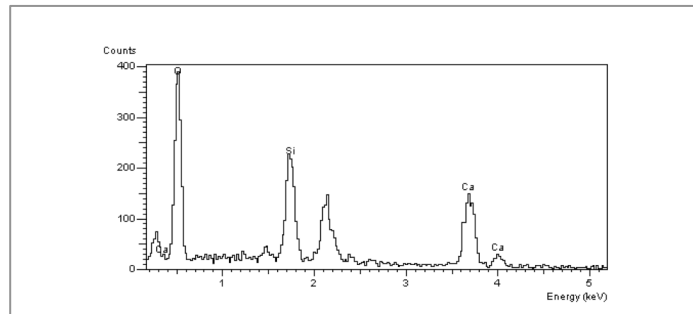




**Figura 4. a.** EDS Punzonada en 1 centro de la fibra  
*Figure 4. a.* EDS Punched the fiber center in 1



**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.

### 3.2. Relationship between rheology and bending resistance modulus

Relationship between rheology and bending resistance modulus was determined by using the multiple regression model. Specifically for the behavior analysis of fiber-reinforced mortar, the bending resistance modulus in hardened state was used ( $y$ ), as predictive variable. As interest variables, probably explaining the behavior, we considered Undulation ability ( $X_1$ ), Drain ability ( $X_2$ ) and Flow ability ( $X_3$ ) in fresh state.



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.

Based on the statistical analysis using the linear model, the importance regression coefficient values are obtained for each aforementioned variable, as well as the importance levels (P) (Table 5) obtained to check the individual importance hypotheses of forecast variables (Xs) over linear regression. Similarly, it is observed that at importance levels lower than 0.011, the bending resistance modulus is explained by the variables: undulation ability, flow ability and drain ability. On the other hand the goodness of fit is excellent ( $R^2 = 98.3\%$ ), proving the experimental sample fits perfectly to the proposed model. Undulation ability as well as flow ability and drain ability have a negative effect on bending resistance modulus (coefficients -1.27, -0.65 and -0.66, respectively). However, the interactions undulation ability-flow ability and flowability-drainability have positive effects on the bending resistance modulus, while the bending resistance modulus rises with each increment in the involved interactions.

**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	Coefficientes/ 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.

Flow ability is posed by the Equation 5, where the bending resistance modulus is expressed in MPa, undulation ability is dimensionless, drain ability is expressed in percentage and flow ability in centimeters. Consequently, if such variables are available for the mortar in fresh state, then it is possible to determine the bending resistance modulus in hardened state.

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

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.

Where:  $X_1$ : Undulation ability or moldeability,  $X_2$ : Drain ability,  $X_3$ : Flow ability and Y: is the failure of bending resistance modulus.

**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  $\sigma^2$ , 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.

**Validation of assumptions on the errors in the model:** The model proposed meets the error assumptions, that is to say, errors come from a regular distribution population with average 0 and variance  $\sigma^2$ . Besides, variance is constant and errors are independent, with importance values higher than 15%. Similarly, the required condition was also met: the greater amount of records, the greater amount of parameters to be estimated.



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).

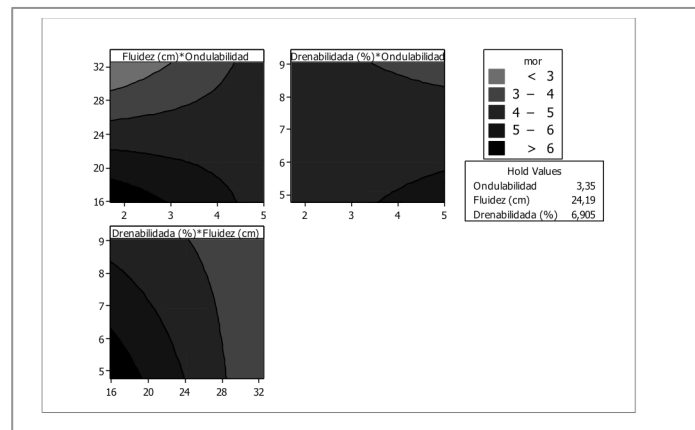
Table 6 shows the proposed regression variance analysis (Equation 5) where it is evident that it is significant (p-value of 0.000). Above indicates that, at least one coefficient is different from zero, thus indicating that regression is not only significant in the sample but also in the population. The random effects explanation is minimal (0.073) compared to the regression (4.269).

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

	Suma de cuadrados/ Squares Addition	F	p-valor/p-value
Regresión/Regression	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.

The optimization to obtain values, from undulation ability, flow ability and drain ability (Figure 5) maximizing the bending resistance modulus takes place when lower values are achieved for undulation ability values lower than 3 approximately as well as flow ability values lower 16 cm approximately and drain ability values lower than 4.7%, thus predicting bending resistances higher than 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.

**Verification of predictions delivered by this model:** In order to verify the forecast ability of this model, 3 mixtures were elaborated (Table 7), which showed that values predicted by the regression equation are quite similar to real values obtained in the laboratory. Above, because fitting in the modeling was very adequate, so values are quite close to the results shown on Figure 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
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 fibroreforzados 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).

## 4. Conclusões

The results obtained lead us to the following conclusions:

- The analysis results were used to establish a predictive model of the bending resistance modulus based on the fresh state of a fiber-cement mortar to be used for corrugated tiles production. This model allowed us to predict the mechanical resistance in hardened state, at 28 days, by using the parameters of undulation ability, flow ability and drain ability during the first minutes of mixing process. The raw materials employed by this model were Cement, Fique Fiber, Bentonite, Pulp, Silica fume and Acronal).
- The applied multiple linear regression model properly represents the existing relation between undulation ability, flow ability, drain ability and the bending resistance modulus ( $R^2 = 98.3\%$ ) of fiber reinforced mortars elaborated in this research, which are then employed in tiles production.
- Validation of multiple regression models intended to develop an advanced diagnosis of bending resistance modulus, by using properties such as: undulation ability, flow ability and drain ability. These models have an adequate approximation to real data.
- By means of Micro-photographic tests, it was observed that fibers are tightly embedded in the matrix, thus demonstrating the bonding strength between the fiber and the matrix (Pull out). The developed treatment (immersion in a hot calcium hydroxide suspension) increases the contact area between the fiber and the cementitious matrix perimeter, leading us to suppose there will be a proper bending resistance.

## 5. Acknowledgements

Authors wish to thank the Universidad del Valle (Colombia), the Colombian Institute for the Development of Science and Technology “Francisco José de Caldas” (COLCIENCIAS), Raw Materials Excellence Center (CENM) that supported this research and, the Group of Construction and Environment of the Faculty of Animal Husbandry and Food Engineering (FZEA) at the University Of Sao 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-Coutrin 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 ARPN *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Asian Research Publishing Network (ARPN). All rights reserved. www.arpnjournals.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

