

## **B 25. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN MATERIAL FIBROCEMENTO UTILIZANDO FIBRAS DE RASTROJOS DE TRIGO**

Marcelo N. González<sup>a</sup>, Julio C. Astudillo<sup>b</sup>, Alejandro Bozo G.<sup>c</sup>, Ricardo Silva S.<sup>d</sup>

### **RESUMEN**

Los tableros de fibrocemento se fabrican en un proceso continuo a partir de la mezcla homogénea e íntima de cemento, agua, arena y fibras de celulosa. Se ocupan en obras de edificación, para elementos constructivos expuestos a la intemperie y también en interiores húmedos. Tradicionalmente la celulosa ocupada en la fabricación de estos productos de fibrocemento, provienen de la madera y es extraída mediante un proceso químico. Una alternativa a las fibras de madera son otras fibras vegetales, y dentro de estas, las fibras provenientes de los rastrojos (paja) de trigo son una atractiva alternativa. El presente estudio tiene por finalidad analizar la utilización de rastrojos de trigo en la confección de un nuevo material fibrocemento destinado para un uso similar al que tienen actualmente los tableros de fibrocemento tradicionales. Para esto se obtuvo fibras de celulosa de la estructura del trigo mediante métodos similares a los ocupados en la industria maderera. Específicamente el objetivo del presente estudio es estudiar las propiedades mecánicas y físicas de este nuevo material fibrocemento, desarrollando un trabajo experimental. Para la obtención de fibras celulósicas (pulpa), a partir de los rastrojos de trigo, se realizó un proceso químico de pulpaje tipo Kraft. Para la fabricación de las probetas de fibrocemento se ocupó cemento clase Portland Puzolánico grado corriente, fibras celulósicas obtenidas de los rastrojos y agua. La mezcla de fibras de trigo, cemento y agua se introdujo a un molde de acero inoxidable que permite la fabricación de una probeta de 7.2 cm. de largo y 3 cm. de ancho. Ocupando una prensa hidráulica de 50 toneladas de capacidad marca *Mega modelo KCK50A*, el molde es sometido a una carga que permite compactar la pasta. Para cada probeta se obtuvo la densidad, la resistencia a la flexión, y la absorción de agua. Para el pulpaje Kraft se obtuvo un rendimiento promedio de 37.24%, que es la cantidad de fibras celulósicas que se obtuvieron de los rastrojos de trigo. La resistencia a la flexión de las probetas aumenta a medida que aumenta la presión aplicada en el prensado. Se puede apreciar que las probetas que estaban constituidas de sólo cemento presentaron una diferencia significativa en la resistencia a la flexión, en comparación con las probetas que presentaron diferentes porcentajes de fibras. La resistencia a la flexión más alta se obtuvo con probetas de sólo cemento. Los valores más altos de resistencia para el compuesto se encuentran en las razones Fibra/Cemento bajas. La resistencia a la flexión del compuesto fibrocemento presenta valores máximos 10% de razón Fibras/Cemento para probetas fabricadas con razón Agua/Cemento igual a 100%; y 4% de razón Fibras/Cemento para probetas fabricadas con Agua/cemento igual a 30%. Las fibras celulósicas extraídas de los rastrojos de trigo tienen una longitud menor a la longitud de fibra crítica necesaria para reforzar en forma significativa una matriz de cemento. También estas fibras no colapsan totalmente durante el proceso de prensado, dejando espacios sin cemento en el lumen de cada una. La densidad de las probetas disminuye en forma lineal, y la absorción de agua aumenta en forma lineal, a medida que aumenta

---

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería de la Madera, Universidad de Chile. [mngonzalezr@gmail.com](mailto:mngonzalezr@gmail.com)

<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile. [juastudi@ing.uchile.cl](mailto:juastudi@ing.uchile.cl)

<sup>c</sup> Departamento de Ingeniería de la Madera, Universidad de Chile. [abozo@uchile.cl](mailto:abozo@uchile.cl)

<sup>d</sup> Departamento de Ingeniería de la Madera, Universidad de Chile. [rsilva@uchile.cl](mailto:rsilva@uchile.cl)

la proporción de fibras dentro del compuesto. La densidad del compuesto explica en forma satisfactoria las variaciones presentadas en la absorción de agua. La razón Agua/Cemento no presenta una influencia significativa sobre la resistencia a la flexión del fibrocemento. También no influye en las variaciones de la densidad del compuesto.

Palabras Claves: Fibrocemento, rastrojos de trigo, tableros, pulpaje kraft, flexión estática

## **1. INTRODUCCIÓN**

Las planchas planas de fibrocemento se fabrican en un proceso continuo a partir de la mezcla homogénea e íntima de cemento, agua, arena y fibras de Celulosa. Las planchas de fibrocemento se ocupan en obras de edificación, para elementos constructivos expuestos a la intemperie y también en interiores húmedos. En los últimos años este material ha ganado nuevos espacios, sin dejar de lado su utilización tradicional en viviendas económicas, cada vez aparece con más fuerza en la construcción de casas, departamentos de mayor valor, infraestructura vial, en edificios, centros comerciales, industrias, servicios y, en general, en lugares de alto tráfico [13].

La celulosa ocupada en la fabricación de estos productos de fibrocemento, provienen de la madera mediante un proceso químico. La madera en su composición química presenta un 50% de celulosa, constituyéndose también de hemicelulosas y lignina. También es sabido que toda estructura vegetal está compuesta por los elementos ya mencionados, pero variando en sus proporciones.

En Chile, un cultivo vegetal importante es el trigo. De las cosechas de este cereal, se obtienen grandes volúmenes de rastrojos o paja, alcanzando anualmente una cifra cercana a los dos millones de toneladas. Debido a las condiciones de clima y suelo en las zonas de cultivo de trigo en Chile, la descomposición de estos rastrojos es muy lenta provocando gran molestia en el manejo de estos después de la cosecha. En un gran porcentaje esta gran cantidad de biomasa es quemada, a pesar de que se le está dando usos como para forraje y camas para animales, y como sustrato en la industria de champiñones, pero el volumen utilizado para estas actividades es bajo. Para los agricultores y gente relacionada con los cultivos de trigo, es de mucho interés poder encontrar un uso para la paja, un uso donde pueda utilizarse en grandes volúmenes para eliminar el problema que existe sobre el manejo de estos residuos [1].

El presente estudio tiene por finalidad analizar la utilización de rastrojos de trigo en la confección de un nuevo material fibrocemento destinado para un uso similar al que tienen actualmente las planchas planas de fibrocemento tradicionales. Para esto se obtendrán fibras de celulosa de la estructura del trigo mediante métodos similares a los ocupados en la industria maderera.

Específicamente el objetivo del presente estudio es estudiar las propiedades mecánicas y físicas de este nuevo material fibrocemento, desarrollando un trabajo experimental. Además de detallar los costos económicos asociados a la fabricación de este material.

## **2. TEORÍA, MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

### **2.1 Teoría sobre materiales compuestos**

### 2.1.1 Materiales compuestos reforzados con fibras

Un material compuesto es un material multifase, es decir, donde existen fases, químicamente distintas, separadas por una superficie. Se espera de un material compuesto obtener propiedades que no se pueden obtener con los constituyentes en forma individual. Dentro de un material compuesto existe una fase continua o *matriz* que rodea a la *fase dispersa o de refuerzo* [8]. Ejemplos de materiales compuestos son la madera (fibras de celulosa en una matriz de lignina), los PRF (Polímeros reforzados con fibras), el hormigón, etc.

Existen materiales donde la fase dispersa está constituida por fibras. En este tipo de materiales la matriz transmite a las fibras la fuerza a la cual es sometido el material. Y también la presencia de fibras ayuda a retardar la propagación de fisuras y grietas, proporcionando una alta resistencia mecánica.

Existe una longitud de fibra crítica ( $l_c$ ) necesaria para aumentar la resistencia y rigidez del compuesto. Los perfiles de esfuerzo deformación dependen de si la longitud de fibra es menor o mayor que la longitud crítica. Si la longitud de fibra es menor que  $l_c$  el reforzamiento es insignificante, ocurriendo que la matriz se deforma alrededor de la fibra casi no existiendo transferencia de esfuerzo. En cambio si la longitud de fibra es mayor que  $l_c$  el reforzamiento es más efectivo [5].

Los principales factores de este tipo de compuesto son las propiedades físicas de la matriz y de las fibras que se ocupan como refuerzo, y la fuerza de adherencia entre ambas fases. También las propiedades de los materiales compuestos dependen altamente de las técnicas de ensayo utilizadas para las mediciones de estas propiedades. Otros factores que inciden en las propiedades del material son el volumen de fibras contenidas en la matriz, la orientación de las fibras, el largo de fibras [7].

### 2.1.2 Fibrocemento

Es un material compuesto por dos fases, una matriz de cemento y fibras que actúan como refuerzo. Las fibras pueden distribuirse en forma aleatoria dentro de la matriz y también se pueden incorporar más de un tipo de fibra dentro del compuesto. Las fibras tienen una longitud de 1 a 40 mm [4].

Como es sabido las pastas de cemento tienen una baja resistencia a la tracción, si los comparamos con el buen comportamiento que tienen a esfuerzos de compresión, por lo que durante años diversas investigaciones han apuntado a vencer esta debilidad reforzando matrices de cemento con acero y distintos tipos de fibras. Se han utilizado diversos tipos de fibras, tanto de origen inorgánico como lo son las fibras de aluminio, asbestos, vidrio, carbón, nylon, polipropileno y acero; como de origen orgánico extraídas de diferentes vegetales como cáscara de arroz, sisal, madera, maíz, etc.

## 2.2 Materiales utilizados

### 2.2.1 Cemento Portland

El cemento Portland es fabricado a base de caliza ( $CaO$ ), Sílice ( $SiO_2$ ), alúmina ( $Al_2O_3$ ) y óxido de hierro ( $Fe_2O_3$ ). Estas materias primas se muelen y se

combinan en forma apropiada para producir diferentes tipos de cemento Portland. Esta mezcla se coloca en un horno rotatorio a temperaturas entre 1400 y 1650 °C. Durante este proceso la mezcla se convierte químicamente en clinker de cemento, el cual es posteriormente enfriado y pulverizado. Finalmente se le adiciona una pequeña cantidad de yeso para controlar el tiempo de fraguado del hormigón [14].

Por su composición, el cemento puede considerarse como un material cerámico. Los materiales cerámicos son materiales inorgánicos no metálicos obtenidos por fusión. En general son materiales típicamente duros, frágiles, con baja tenacidad y ductibilidad [14].

El falló mecánico (fractura frágil) de este tipo de material, es debido a la presencia de defectos macroscópicos como la porosidad y fisuras superficiales; y defectos microscópicos como dislocaciones, vacíos, átomos intersticiales y sus interacciones [7].

La porosidad influencia en forma significativa la resistencia mecánica, debido a que se producen concentraciones de tensiones entorno a ellos. Se debe considerar la distribución individual de cada poro, debido a que la concentración de tensiones depende principalmente de si existe o no interconexión entre ellos. También se debe dar gran importancia a la condición superficial del material, como daños producidos por la técnica de fabricación o por golpes, debido a que estos disminuyen la resistencia mecánica [7].

El cemento ocupado durante la realización de este estudio fue el cemento de marca comercial *Polpaico especial*, clase Portland Puzolanico, grado corriente.

### **2.2.2 Fibras celulósicas extraídas de la paja de trigo**

El producto fibroso que resulta de la separación de las fibras del tejido vegetal, se denomina pasta o pulpa. El tipo de pulpaje utilizado para obtener la pulpa es de suma importancia ya que influye en el grado de deterioro de las fibras, cantidad de lignina residual, cantidad de químicos finales, etc. Todos estos factores van a estar influyendo directamente en el comportamiento de cualquier producto que la utilice como materia prima [3].

En la fabricación de tableros a base de fibras de madera existen tipos de pulpaje que toman gran importancia, como lo son el Pulpaje Mecánico, Pulpaje Químico y Pulpaje Kraft. De estos tres, el pulpaje Kraft tiene gran importancia en la actualidad debido a la excelente calidad de pasta que origina.

El pulpaje Kraft es un proceso que busca eliminar la fracción lignina presente en la estructura vegetal por medio de una cocción en una solución alcalina. Mediante una cocción Kraft, se obtienen fibras flexibles y colapsables en función de su diámetro y espesor de pared celular, también son de largo real y hay una escasa presencia de finos [10]. La extracción de la lignina presente en el tejido vegetal se realiza a través de reactivos químicos (licores de cocción) tales como el Sulfuro de Sodio ( $Na_2S$ ) e Hidróxido de Sodio o Soda ( $NaOH$ ), todo esto bajo ciertas condiciones de temperatura y presión controladas. Se produce también una extracción y disolución de gran parte de

las hemicelulosas además de la degradación parcial de la celulosa, sin lograr la extracción total de la lignina lo que genera un remanente residual

En el trigo el porcentaje de celulosa es de aproximadamente un 40%, valor ligeramente inferior y más variable que en las especies madereras, donde la celulosa está presente en un 45 a 50 %. La Hemicelulosa es de menor pureza que la celulosa, mientras que la lignina es el material cementante que mantiene unidas a las fibras. La mayor diferencia entre la madera y los rastrojos de trigo es el alto contenido de sílice que estos últimos contienen, trayendo consecuencias positivas y negativas, las positivas es que aumentan la resistencia al fuego y al ataque de insectos, mientras que las negativas corresponden al daño en los procesos de generación de energía y pulpaje [6]. También la química de los rastrojos de trigo es más alcalina (Ph entre 7 y 9) que la de la madera, la cual es mas ácida [9].

A un nivel microscópico, las fibras individuales de los rastrojos de trigo tienen una longitud de fibra que varía entre 0.85 y 1,3 mm, y un diámetro de 15  $\mu\text{m}$  [6].

## 2.3 Metodología experimental

### 2.3.1 Obtención de Fibras.

Para la obtención de fibras celulósicas (pulpa), a partir de los rastrojos de trigo, se realizó un proceso químico de pulpaje tipo Kraft:

Las cocciones se realizaron en un digestor *Betriebsdruck modelo Baujahr*, con capacidad de 20 litros, donde se pudieron realizar cargas para cada pulpaje de 1000 gramos de rastrojos en estado seco. Las condiciones del proceso de cocción fueron las siguientes:

- Alkali Activo (AA) : 22%
- Sulfidez (S) : 20%
- Relación Licor/rastrojo : 14/1
- Temperatura máxima : 165 °C
- Tiempo de elevación : 105 min.
- Tiempo a Temperatura máxima : 45 min.

Para lograr una mayor difusión del Licor dentro de los rastrojos durante la cocción, se agregaron 7 litros de agua a los 1000 g de rastros secos 24 horas antes de realizar el proceso Kraft.

Terminada la cocción, se procedió al evacuado y lavado de la pulpa obtenida. Luego las fibras, disueltas en agua en una relación 10:1 aproximadamente, se introducen en un digregador, consistente en un rotor con aspas que separan los haces de fibras. De esta manera se pudo obtener fibras individuales.

Después de la digregación de la pulpa, se procedió al drenado de esta, para bajar el contenido de humedad, y finalmente se llevó a una estufa a 103 °C durante 24 horas para obtener fibras secas. Todo el proceso de obtención de fibras se realizó en el *laboratorio de Celulosa y Papel del Departamento de Ingeniería de la Madera*.

### 2.3.2 Fabricación de probetas

Para la fabricación de la probetas de fibrocemento se ocupó cemento *Polpaico especial*, clase Portland Puzolanico, grado corriente, las fibras celulósicas obtenidas de los rastrojos y agua

Se ocupó una balanza de precisión 0.001 g, marca *Sartorius modelo 2355* para pesar las cantidades necesarias de fibras y cemento para cada probeta. Para medir la cantidad de agua se ocupó una pipeta de precisión 0.1 ml.

En un vaso precipitado limpio se mezclaron el agua y las fibras hasta que estas últimas quedaron completamente hidratadas. Luego se agregó el cemento a la mezcla, y se mezcló hasta obtener una pasta homogénea.

La pasta se introduce a un molde de acero inoxidable que permite la fabricación de una probeta de 7.2 cm de largo y 3 cm de ancho. Ocupando una prensa hidráulica de 50 toneladas de capacidad marca *Mega modelo KCK50A*, el molde es sometido a una carga que permite compactar la pasta. Al llegar a la carga especificada, se mantiene la presión durante un minuto, y luego se extrae la probeta del molde

Las probetas recién fabricadas, se dejaron en una cámara de fraguado durante 7 días a 21 °C (+2) y una humedad relativa de 95% (+5). Estas condiciones de alta humedad se mantuvieron para obtener una buena hidratación y por consiguiente un buen fraguado del cemento [7].

Al finalizar el período de hidratación se sacaron las probetas de la cámara de fraguado para llevarlas a una estufa durante 24 horas a 100 °C para frenar el fraguado del cemento [4].

### 2.3.3 Ensayos

Para cada probeta se obtuvo la densidad, la resistencia a la flexión, y la absorción de agua, esto debido a que son las propiedades de mayor interés para un producto fibrocemento según la NCh 186/1 [11].

Las probetas, después de estar 24 horas en la estufa a 100 °C, se midieron sus dimensiones: largo, ancho y espesor en dos puntos, utilizando un pie de metro. Luego se midió el peso seco utilizando la balanza *Sartorius modelo 2355*. La densidad se obtuvo mediante la expresión:

$$D = \frac{p}{V}$$

Donde:  $D$  es la densidad real de la probeta,  $p$  es el peso seco de la probeta y  $V$  es el volumen de la probeta calculado con promedio de las dos mediciones de espesor.

Luego de realizar las mediciones en cada probeta, se dejaron durante 24 horas aclimatándose en el *laboratorio del propiedades mecánicas del Departamento de Ingeniería de la Madera*, a una temperatura de 20 °C (+2) y 50% (+2) de humedad relativa, para realizar el ensayo de flexión estática ocupando una máquina universal de

ensayos marca *Amsler*. La resistencia a la flexión se obtuvo mediante la siguiente relación:

$$R_f = \frac{M \cdot C}{I}$$

En que:  $M = P \cdot l/4$  ;  $C = e/2$  ;  $I = b \cdot e^3/12$

Donde:  $P$  es la carga aplicada por la prensa en kilogramos-fuerza,  $l = 5\text{ cm}$  es la luz de ensayo,  $e$  es el espesor de la probeta y  $b = 3\text{ cm}$  es el ancho de la probeta

Finalmente se realizó el ensayo de Absorción de agua. De las probetas fracturadas en el ensayo de resistencia a la flexión, se obtuvieron probetas más pequeñas las que se dejaron durante 24 horas en la estufa a  $100\text{ }^\circ\text{C}$  para dejarlas en estado anhidro. Luego fueron pesados en la balanza *Sartorius modelo 2355* y sumergidas en agua a  $21\text{ }^\circ\text{C}$  ( $\pm 2$ ) de temperatura durante 24 horas. Al término de este período de tiempo se sacó el agua superficial de cada probeta con un papel absorbente y se pesaron nuevamente en la balanza.

La Absorción de agua de las probetas se obtuvo con la relación:

$$A = \frac{(P_a - P_s)}{P_s}$$

Donde:  $A$  es el porcentaje de agua que absorbió la probeta con respecto a su peso en estado seco,  $P_a$  es el peso en gramos de la probeta saturada de agua, y  $P_s$  es el peso en gramos de la probeta en estado seco

### 2.3.4 Diseño y análisis de la investigación

Debido a que el material en estudio, compuesto fibrocemento, es de uso estructural. Es de interés medir en las probetas, durante el desarrollo de esta investigación la resistencia a la flexión. Esta propiedad mecánica será la variable respuesta en estudio

Para la variable respuesta: resistencia a la flexión, se decidió analizar el efecto de dos potencialmente factores que pueden influenciar en el compuesto:

- Razón Fibras/Cemento (F/C): Cantidad de fibras dentro del compuesto fibrocemento, expresada como la razón, en peso, de la cantidad de fibras con respecto a la cantidad de cemento
- Razón Agua/Cemento (A/C): Cantidad de agua utilizada en la pasta durante la fabricación del compuesto fibrocemento expresada como razón, en peso, de la cantidad de agua con respecto a la cantidad de cemento.

Para determinar si existió una influencia estadísticamente discernible de los factores sobre las variables respuestas se llevó a cabo un análisis de experimentos unifactoriales en un diseño completamente aleatorio, ocupando el modelo de efectos fijos [2].

Cuando el análisis de varianza (ANDEVA) derivado del tratamiento estadístico ya mencionado, prueba que existió una influencia del tratamiento sobre la variable respuesta, se realizó una separación de medias mediante el test de Duncan [12].

También se ajustaron modelos de regresión lineal simple (MRLS), utilizando como variables dependientes las razones F/C y A/C, para explicar las variables respuesta:

- Densidad
- Absorción de agua.

Se analizó si los datos obtenidos se ajustan bien a los datos mediante un ANDEVA, y se observó el porcentaje de la variabilidad total explicada por el MRLS ( $R^2$ ). Todos los resultados del análisis estadístico de los datos se expusieron con un nivel de confianza del 95%

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Rendimientos del pulpaje Kraft sobre paja de trigo

Para este estudio específico se realizaron ocho cocciones bajo las mismas condiciones de carga y proceso, descritos en la metodología. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 1: Rendimientos de pulpaje Kraft aplicado a rastrojos de trigo

Pulpaje	Rendimiento [%]
1	35,47
2	33,45
3	35,60
4	37,80
5	45,37
6	36,70
7	36,80
8	36,70
<b>Promedio</b>	<b>37,24</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>3,5</b>

Se obtuvo un rendimiento promedio de 37.24%, que es la cantidad de fibras celulósicas que se obtuvieron de los rastrojos de trigo. Este valor estuvo dentro de lo esperado según la información citada sobre la composición química del trigo. La pulpa obtenida fue de color café debido a la presencia de lignina residual al terminar el proceso de cocción (Ver Anexo), sin embargo esta cantidad de lignina fue eliminada mediante el lavado efectuado a esta.

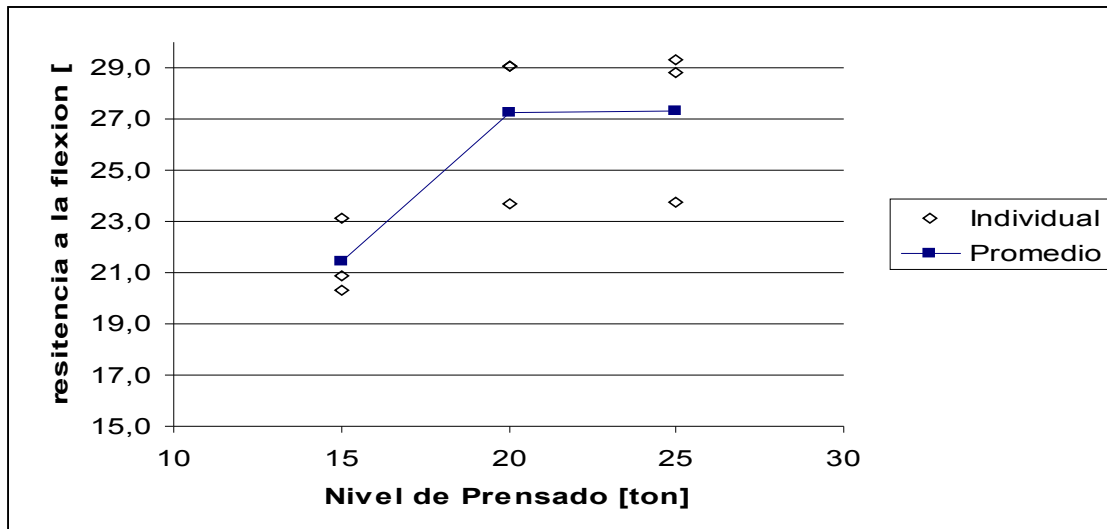
#### 3.2 Nivel de prensado

Inicialmente fue de interés averiguar el efecto de la cantidad de fibras (F/C) y la razón Agua/Cemento (A/C) en el material fibrocemento. Sin embargo en forma previa se realizó una experiencia para establecer la carga más adecuada a utilizar en la fabricación de probetas fibrocemento durante la investigación. Se seleccionaron tres niveles de prensado: 15 Ton (714.3 kg/cm<sup>2</sup>), 20 ton (952.4 kg/cm<sup>2</sup>) y 25 ton (1190.5 kg/cm<sup>2</sup>) y se confeccionaron 3 probetas para cada nivel de prensado, se eligió una



razón fibras/cemento (F/C) fija de 0.6 [3], razón A/C de 1, y la variable respuesta fue la resistencia a la flexión. Los resultados fueron los siguientes:

Figura 1: Resistencia a la flexión v/s Nivel de prensado para probetas fibrocemento con razón F/C= 0.6 y A/C = 1



De la figura 1 podemos observar que, en general, la resistencia a la flexión de las probetas aumenta a medida que aumenta la carga aplicada en el prensado. Entre los niveles de 20 Ton y 25 Ton la tendencia continua pero de manera muy tenue. En consecuencia con lo anterior se optó por ocupar 25 Ton de carga en el prensado de las probetas a fabricar en el desarrollo de este estudio.

### 3.3 Efecto del factor razón Fibras/Cemento (F/C) en el compuesto fibrocemento.

Este análisis consistió en tomar el factor F/C para determinar su influencia sobre la resistencia a la flexión principalmente, sin embargo también se analizó la variación de la densidad y de la absorción de agua. Para esto se determinaron 10 niveles de F/C de interés con tres repeticiones en cada unidad experimental. Los niveles de F/C fueron de 10% hasta 100% (0.1 hasta 1) con intervalos de 10% (0.1) y la razón A/C se mantuvo constante e igual a 100%. Las condiciones de fabricación fueron homogéneas durante toda la experiencia.

#### 3.3.1 Resistencia a la Flexión

Tabla 2: Resistencia a la flexión de probetas con distinta razón F/C y razón A/C constante igual a 1

Razón F/C	Resistencia a la flexión [kg/cm <sup>2</sup> ]	
	Promedio	Desviación Estándar
0,1	87,2	17,1
0,2	54,4	11,6
0,3	59,0	13,4
0,4	54,6	6,8
0,5	47,5	2,7
0,6	41,3	3,7
0,7	42,3	6,5
0,8	57,5	2,0
0,9	51,9	6,9
1	40,2	3,6

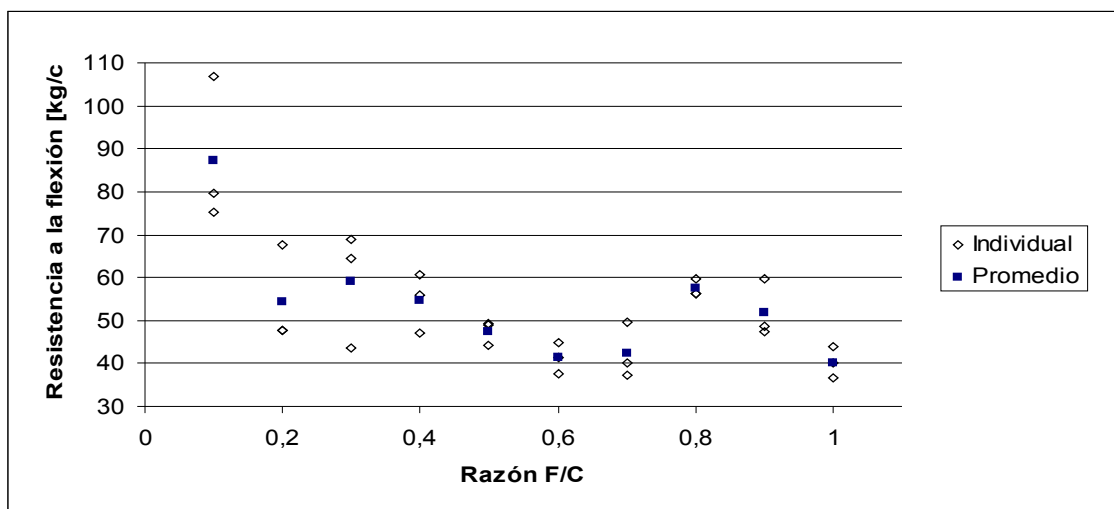
Tabla 3: ANDEVA para el Diseño experimental completamente al azar de efectos fijos, para la influencia de la razón F/C sobre la resistencia a la flexión de probetas fibrocemento con A/C igual a 1

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	Razón F	Valor crítico para F
Tratamiento	9	5023,75	558,2	7,151	2,39
Error	20	1561,20	78,1		
Total	29	6584,96			

El ANDEVA arrojó como resultado, con una probabilidad de error no superior al 5%, que existe una influencia estadísticamente discernible en la resistencia a la flexión del compuesto debido a la variación de la cantidad de fibras (F/C).

De la prueba de separación de medias se obtuvo que la resistencia media de las probetas con F/C igual a 10% presentaron una diferencia estadísticamente significativa con respecto a los nueve niveles restantes. Así mismo los valores medios de resistencia a la flexión del compuesto con F/C igual a 20% hasta 100%, no presentan diferencias estadísticas entre sí. La dispersión de los datos se puede apreciar en la figura 2:

Figura 2: Resistencia a la flexión v/s Razón F/C de probetas fibrocemento con razón A/C igual a 1



En base a los resultados observados, se decidió realizar una nueva experiencia de la influencia de la cantidad de fibras sobre la resistencia a la flexión del compuesto fibrocemento. Debido a que las probetas con F/C igual a 10% mostraron una mayor resistencia mecánica respecto de las demás probetas, diferencia estadísticamente significativa, se trabajó con dosificaciones de fibras cercanas a este valor.

Para mejorar la precisión de las conclusiones, se aumentó a cuatro el número de repeticiones por unidad experimental, y los intervalos de dosificación de F/C se redujeron a 4% (0.04) comenzando desde probetas de sólo cemento (F/C = 0) hasta probetas con F/C igual a 40%.

Una de las razones por la que se decidió repetir este análisis con una mayor precisión, fue debido a que se observó durante la confección de las probetas un exceso de la cantidad de agua utilizada ( $A/C = 1$ ), esto se reflejó en la obtención de pastas demasiado acuosas para las dosificaciones con menos fibras y que presentaron problemas de arrastre de partículas durante el proceso de prensado. Debido a esto se decidió además, confeccionar la nueva serie de probetas con razón A/C igual a 30% (0.3). Los resultados se exponen a continuación:

Tabla 4: Resistencia a la flexión de probetas con distinta razón F/C y razón A/C constante igual a 0.3

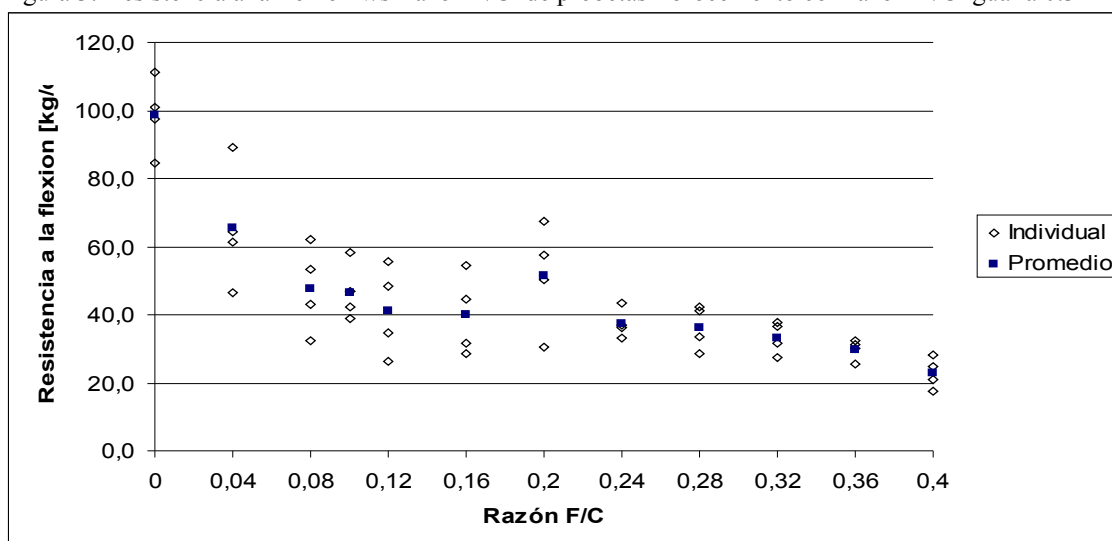
Razón F/C	Esfuerzo en flexión [kg/cm <sup>2</sup> ]	
	Promedio	Desviación estándar
0	98,6	11,1
0.04	65,4	17,7
0.08	47,7	12,9
0.10	46,5	8,5
0.12	41,3	13,1
0.16	39,9	12,0
0.20	51,4	15,7
0.24	37,4	4,3
0.28	36,3	6,4
0.32	33,3	4,8
0.36	29,8	3,0
0.40	22,8	4,6

Tabla 5: ANDEVA para el Diseño experimental completamente al azar de efectos fijos, para la influencia de la razón F/C sobre la resistencia a la flexión de probetas fibrocemento con A/C igual a 0.3

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	Razón F	Valor crítico para F
Tratamiento	11	17462,6	1587,5	14,076	2,07
Error	36	4060,1	112,8		
Total	47	21522,7			

Podemos concluir, de los resultados del ANDEVA, que existe una influencia estadísticamente significativa de la cantidad de fibras en las probetas sobre la resistencia a la flexión que presentaron. Del análisis de Duncan se observó que existe una diferencia significativa de la resistencia promedio de las probetas de sólo cemento con respecto a los demás niveles de dosificaciones F/C. Así mismo la resistencia promedio observada para las probetas con F/C igual a 4% presenta diferencias significativas con la resistencia promedio de las demás dosificaciones F/C. Finalmente para las dosificaciones de fibras comprendidas entre 8% y 40% no existe evidencia suficiente para dudar que los valores promedios de resistencia a las flexión son estadísticamente iguales. Los resultados se pueden ver en la figura 3:

Figura 3: Resistencia a la flexión v/s Razón F/C de probetas fibrocemento con razón A/C igual a 0.3



Se puede apreciar que las probetas que estaban constituidas de sólo cemento presentaron una diferencia significativa en la resistencia a la flexión, en comparación con las probetas que presentaron diferentes porcentajes de fibras. También la mejor resistencia a la flexión de las probetas fibrocemento se presentaron con 4% de F/C.

La menor resistencia a la flexión de las probetas de fibrocemento se puede atribuir a dos razones:

- Las fibras celulósicas obtenidas a partir de los rastrojos de trigo presentan un largo menor a la longitud de fibra crítica necesaria para reforzar una matriz de cemento en forma significativa [5]
- Los lúmenes de las fibras celulósicas no colapsaron durante el proceso de prensado, provocando una mayor porosidad del compuesto fibrocemento, lo que se tradujo en un deterioro de sus propiedades mecánicas [7].

Según los resultados expuestos en relación a la resistencia mecánica del compuesto, las fibras no refuerzan a la matriz de cemento. Sin embargo esto último no se puede afirmar completamente ya que se debería realizar un experimento más detallado entre las proporciones de fibra 0 y 10%, con intervalos más pequeños y con un mayor número de repeticiones (probetas) por unidad experimental para reducir los errores. Lo que si podemos afirmar de los resultados obtenidos es que las fibras de celulosa obtenidas de los rastrojos de trigo no son un refuerzo significativo para una pasta de cemento.

Finalmente se pudo observar durante los ensayos de flexión que a medida que aumentó la razón F/C las probetas admitían una mayor deformación antes de fracturarse (pseudoductibilidad), a pesar que el esfuerzo de ruptura era menor.

### 3.3.2 Densidad

La densidad (Y) de las probetas fibrocemento al variar la dosificación de fibras (X) con razón A/C constante e igual a 100%, presentó los siguientes resultados:

Tabla 6: Densidad de probetas con distinta razón F/C y razón A/C constante igual a 1

Razón F/C	Densidad real [g/cm <sup>3</sup> ]	
	Promedio	Desviación Estándar
0,1	1,44	0,01
0,2	1,30	0,02
0,3	1,30	0,08
0,4	1,29	0,01
0,5	1,24	0,07
0,6	1,14	0,03
0,7	1,14	0,03
0,8	1,15	0,02
0,9	1,05	0,02
1	1,10	0,02

El ajuste de los datos al MRLS arrojó los siguientes resultados:

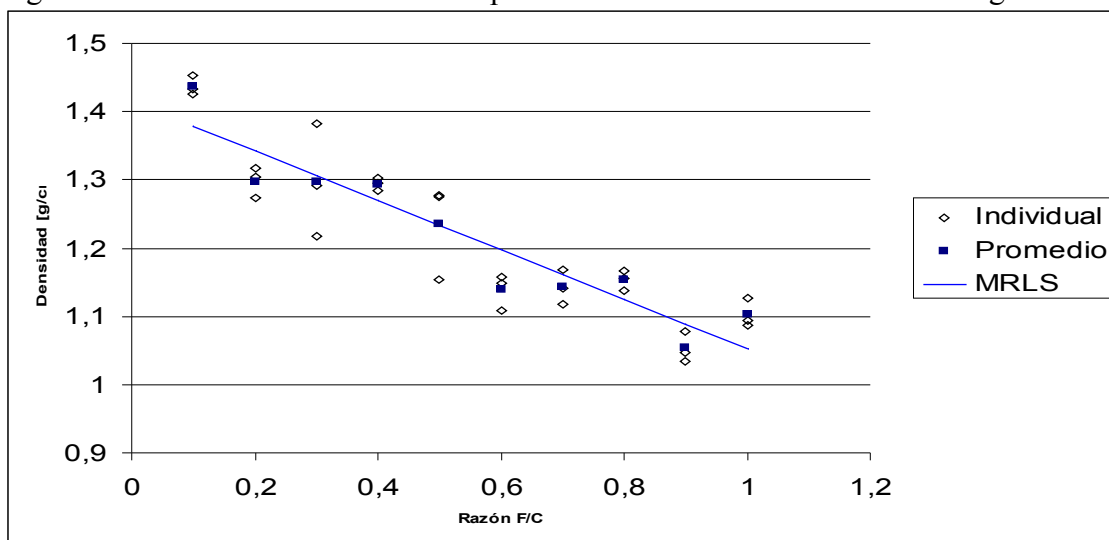
$$Y = 1.41 - 0.36 \cdot x$$

Tabla 7: ANDEVA del análisis de regresión, para la resistencia a la flexión de probetas fibrocemento con A/C igual a 1 en función de la razón F/C

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Razón F	Valor crítico de F
Regresión	1	0,109	0,1088	60,46	5,35E-05
Residuos	8	0,014	0,0018		
Total	9	0,123			

El MRLS presenta un buen ajuste del modelo a los datos, del ANDEVA se puede ver que la razón F/C presenta una influencia lineal sobre la densidad de los compuestos fibrocemento con A/C igual a 1. El modelo explica el 88.31% de la variabilidad total de los datos.

Figura 4: Densidad v/s Razón F/C de probetas fibrocemento con razón A/C igual a 1



Para los datos obtenidos con la serie de probetas fabricadas con F/C entre 0% y 40%, y razón A/C igual a 0.3, el análisis de regresión arrojó lo siguiente:

$$Y = 1.48 - 0.994 \cdot X$$

Tabla 8: Densidad de probetas con distinta razón F/C y razón A/C constante igual a 0,3

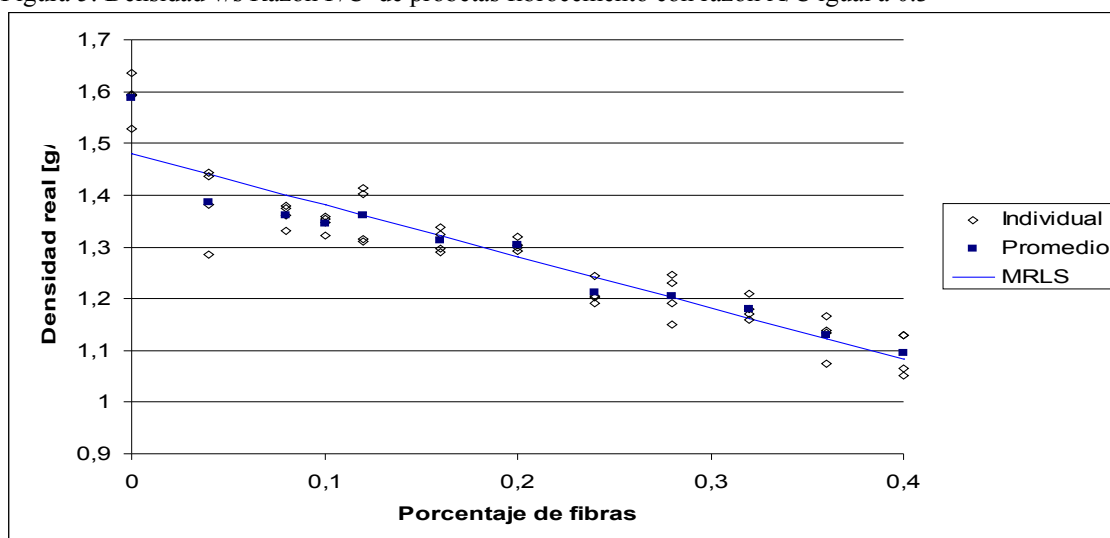
Razón F/C	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	
	Promedio	Desviación estándar
0	1,6	0,04
0,04	1,4	0,07
0,08	1,4	0,02
0,10	1,3	0,02
0,12	1,4	0,05
0,16	1,3	0,02
0,20	1,3	0,01
0,24	1,2	0,02
0,28	1,2	0,04
0,32	1,2	0,02
0,36	1,1	0,04
0,40	1,1	0,04

Tabla 9: ANDEVA del análisis de regresión, para la resistencia a la flexión de probetas fibrocemento con A/C igual a 0.3 en función de la razón F/C

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	Razón F	Valor crítico de F
Regresión	1	0,7323	0,7323	259,331	1,5695E-20
Residuos	46	0,1299	0,0028		
Total	47	0,8622			

Nuevamente del MRLS podemos concluir que la densidad de las probetas fibrocemento es explicada de buena forma por la razón A/C. El  $R^2$  es igual a 84.93%

Figura 5: Densidad v/s Razón F/C de probetas fibrocemento con razón A/C igual a 0.3



### 3.3.3 Absorción de Agua

Los datos obtenidos de absorción de agua (Y) al hacer variar la proporción de fibras (X) fueron los siguientes:

Tabla 10: Absorción de Agua de probetas con distinta razón F/C y razón A/C constante igual a 1

Razón F/C	Absorción de Agua [%]	
	Promedio	Desv. Estándar
0,1	18	1
0,2	27	13
0,3	27	2
0,4	37	8
0,5	37	1
0,6	48	3
0,7	49	2
0,8	55	4
0,9	59	10
1	64	8

El ajuste de los datos al MRLS arrojó los siguientes resultados:

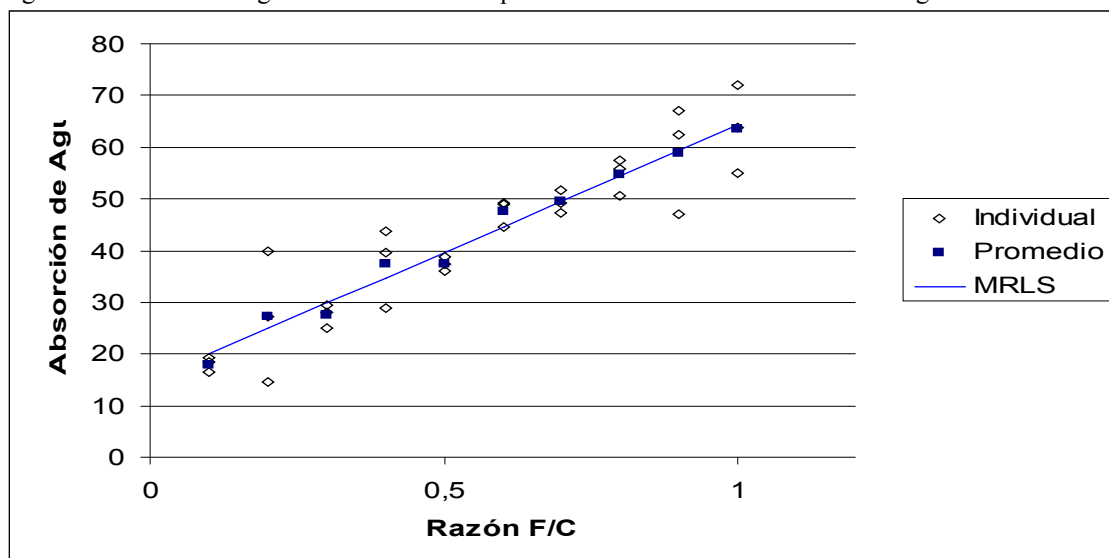
$$Y = 15.045 + 49.287 \cdot x$$

Tabla 11: ANDEVA del análisis de regresión, para la absorción de agua de probetas fibrocemento con A/C igual a 1 en función de la razón F/C

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Razón F	Valor crítico de F
Regresión	1	6012,3	6012,3	172,25	1,75E-13
Residuos	28	977,3	34,9		
Total	29	6989,7			

Del ANDEVA obtenemos que la absorción de agua de las probetas fibrocemento con A/C igual a 1, está influenciada en forma lineal por la razón F/C ( $R^2 = 86.02\%$ )

Figura 6 Absorción de agua v/s Razón F/C de probetas fibrocemento con razón A/C igual a 1



Para los datos de absorción de agua obtenidos en la segunda serie de probetas, se observó lo siguiente:

Tabla 12: Absorción de Agua de probetas con distinta razón F/C y razón A/C constante igual a 0.3

Razón F/C	Absorción de agua [%]	
	Media	Desv. Estándar
0	13	0
0,04	19	1
0,08	21	1
0,10	24	2
0,12	24	1
0,16	28	2
0,20	33	3
0,24	31	2
0,28	35	1
0,32	38	1
0,36	40	0
0,40	47	6

Del análisis de regresión se obtuvieron los siguientes resultados:

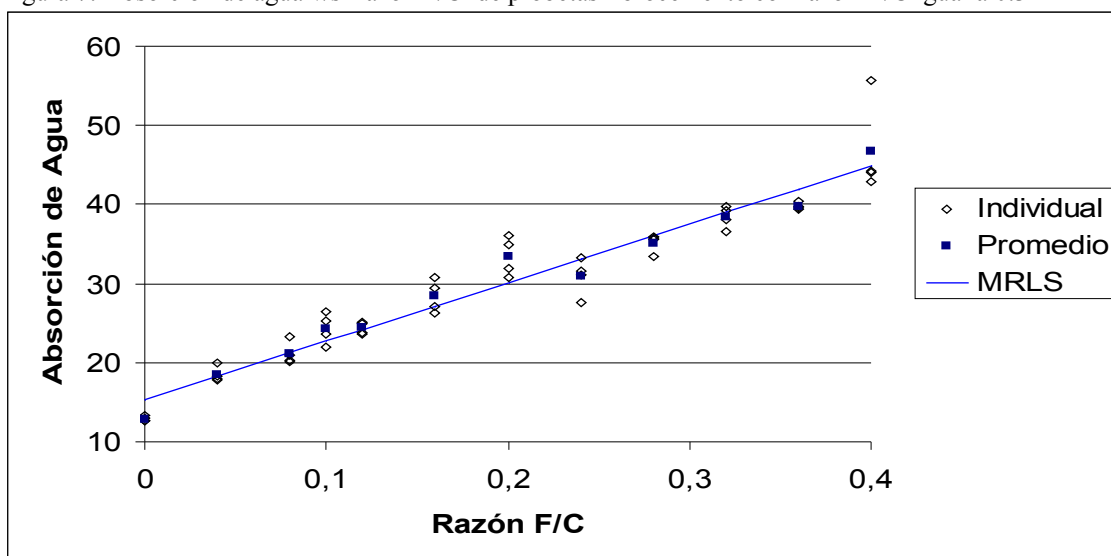
$$Y = 15.315 + 74.05 \cdot x$$

Tabla 13: ANDEVA del análisis de regresión, para la absorción de agua de probetas fibrocemento con A/C igual a 0.3 en función de la razón F/C

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	Razón F	Valor crítico de F
Regresión	1	4061,7463	4061,7463	565,002	1,7739E-27
Residuos	46	330,6900	7,1889		
Total	47	4392,4363			

El ANDEVA arroja que la absorción de agua de las probetas fibrocemento con A/C igual a 0.3, está influenciada en forma lineal por la razón F/C ( $R^2 = 92.47\%$ )

Figura 7: Absorción de agua v/s Razón F/C de probetas fibrocemento con razón A/C igual a 0.3



Por los ensayos realizados, podemos ver que a medida que se aumenta la proporción de fibras en las probetas fibrocemento, disminuye la densidad del material y aumenta el porcentaje de absorción de agua, o sea se obtiene un material más poroso. De este comportamiento físico de las probetas podemos inferir que las fibras celulósicas ocupadas no son totalmente colapsables, ya que a pesar de la alta presión aplicada durante la fabricación ( $1190.5 \text{ kg/cm}^2$ ), el lumen de las fibras no desaparece por completo, dejando estos espacios sin cemento. Esto explica el comportamiento físico del compuesto al hacer variar la razón F/C.

### 3.3.4 Correlación entre Densidad y Absorción de agua

De las conclusiones obtenidas sobre la relación existente entre la densidad y la absorción de agua, fue de interés relacionar estas dos propiedades físicas mediante un ajuste de los datos a MRLS, dejando como variable independiente a la densidad de las probetas y como variable dependiente a la Absorción de agua:

Para la serie de probetas con A/C igual a 1, se tuvieron los siguientes resultados del MRLS:

$$Y = 182.42 - 115.44 \cdot x$$

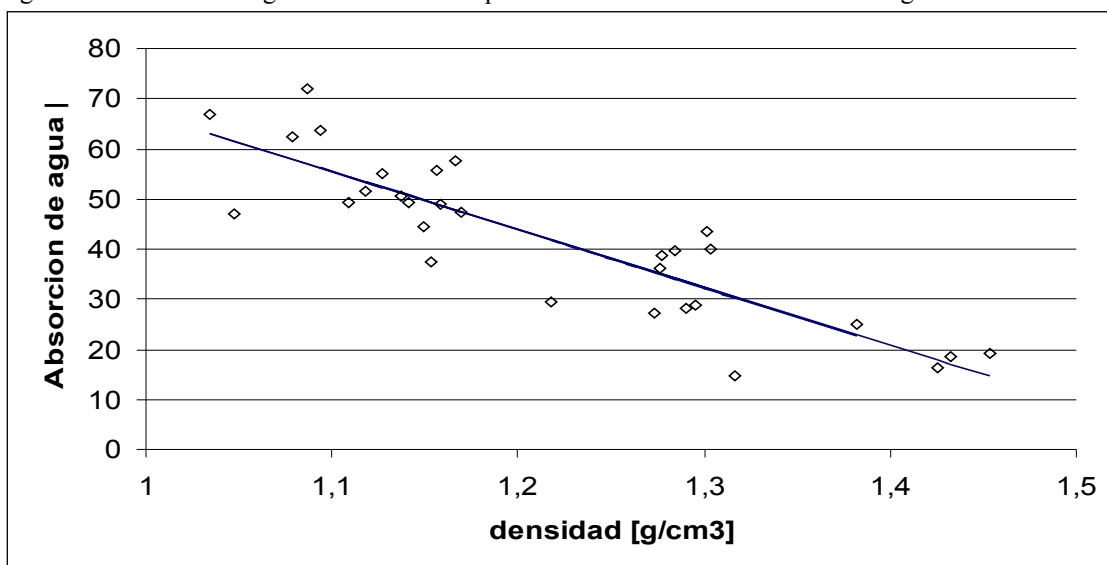


Tabla 14: ANDEVA del análisis de regresión, para la absorción de agua de probetas fibrocemento con A/C igual a 1 en función de la densidad

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Razón F	Valor crítico de F
Regresión	1	5329,82	5329,82	89,909	3,0727E-10
Residuos	28	1659,85	59,28		
Total	29	6989,67			

El ANDEVA derivado del análisis de regresión, arroja que la absorción de agua de las probetas fibrocemento con A/C igual a 1, está influenciada en forma lineal por la densidad del compuesto fibrocemento ( $R^2 = 76.25\%$ ).

Figura 8: Absorción de agua v/s Densidad de probetas fibrocemento con razón A/C igual a 1



Para la serie de probetas con A/C igual a 0.3, se tuvieron lo siguiente al ajustar el MRLS:

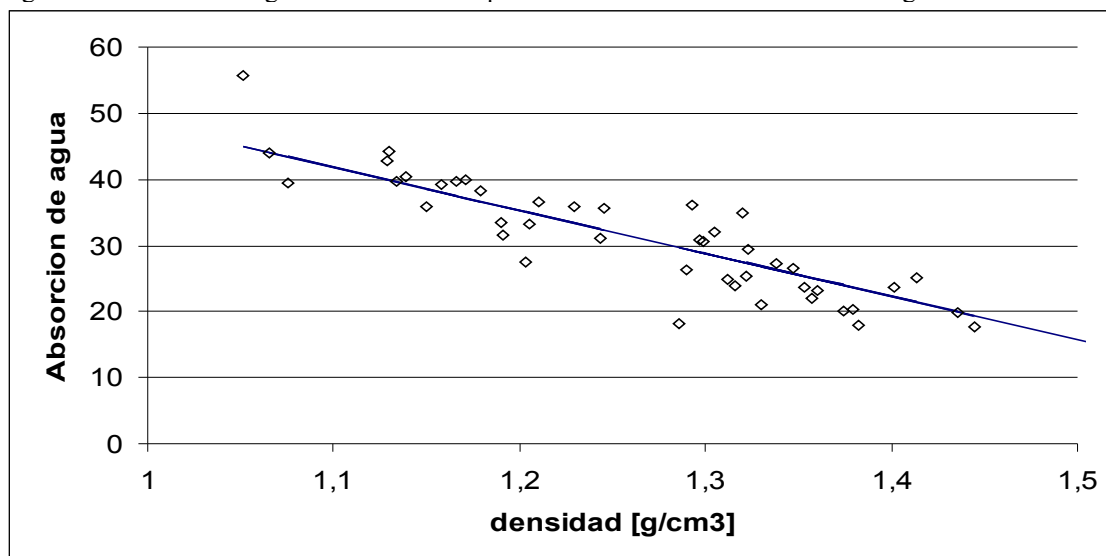
$$Y = 182.42 - 115.44 \cdot x$$

Tabla 15: ANDEVA del análisis de regresión, para la absorción de agua de probetas fibrocemento con A/C igual a 0.3 en función de la densidad

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Razón F	Valor crítico de F
Regresión	1	3627,58	3627,58	218,170	4,4459E-19
Residuos	46	764,86	16,63		
Total	47	4392,44			

En este caso el ANDEVA arroja las mismas conclusiones que sobre la relaciones entre densidad y absorción de agua de las probetas de fibrocemento con A/C igual a 100% ( $R^2 = 82.59\%$ ).

Figura 9: Absorción de agua v/s Densidad de probetas fibrocemento con razón A/C igual a 0.3



### 3.4 Efecto de la razón Agua/cemento (A/C) en el compuesto fibrocemento

Este análisis consistió en tomar el factor A/C para determinar su influencia sobre la variable respuesta Resistencia a la flexión. Para esto se determinaron 5 niveles de A/C de interés con cuatro repeticiones en cada unidad experimental. La razón F/C se mantuvo constante durante la experiencia, trabajando con dos niveles de este factor.

Los niveles de F/C se eligieron de los resultados obtenidos del análisis estadístico realizado con los datos obtenidos con las probetas fabricadas con razón A/C igual a 30%. Se ocupó un 4% de F/C debido a que presentó la mejor resistencia a la flexión de las probetas fibrocemento.

El criterio ocupado fue variar la cantidad de agua en función de la proporción de fibras de cada probeta, manteniendo como base una razón A/C de 0.3 y se aumento de la siguiente manera:

Tabla 16: Variación de la razón agua/Cemento en probetas fibrocemento con proporción de fibras 0.04

Relación fibras-agua	Razón Agua/Cemento
1:0	0,3
1:1	0,34
1:2	0,38
1:3	0,42
1:4	---*

\* Las probetas con esta dosificación presentaron una pasta con exceso de agua durante su fabricación, lo que impidió que fueran sacadas del molde en forma satisfactoria debido a la falta de resistencia mecánica.

Las condiciones de fabricación fueron homogéneas durante toda la experiencia. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

#### 3.4.1 Resistencia a la flexión

Tabla 17: Resistencia a la flexión de probetas fibrocemento con distinta razón Agua/Cemento y proporción de fibras constante igual a 0.04

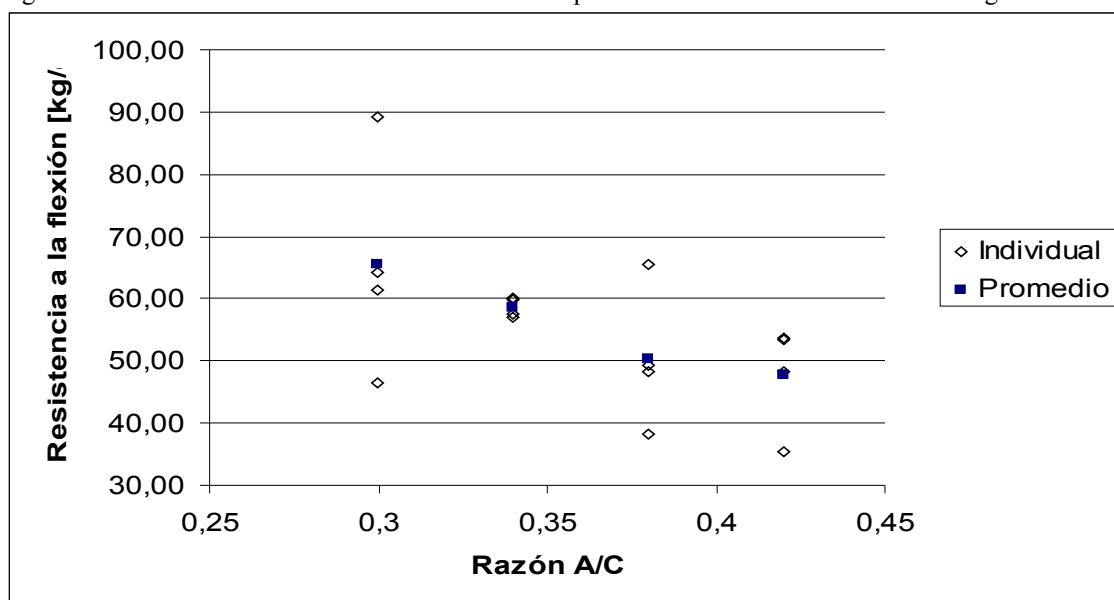
Razón A/C	Resistencia a la flexión [kg/cm <sup>2</sup> ]			
	0,3	0,34	0,38	0,42
	46,5	59,9	48,3	48,3
	64,3	56,9	38,2	53,5
	89,3	57,5	49,2	35,5
	61,5	60,2	65,5	53,7
<b>Promedio</b>	<b>65,4</b>	<b>58,6</b>	<b>50,3</b>	<b>47,8</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>17,7</b>	<b>1,7</b>	<b>11,3</b>	<b>8,6</b>

Tabla 18: ANDEVA para el Diseño experimental completamente al azar del efecto de la razón A/C sobre la resistencia a la flexión de probetas fibrocemento con proporción de fibras 0.04

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios	Razón F	Valor crítico para F
Tratamiento	3	778,4	259,5	2,002	3,49
Error	12	1555,3	129,6		
Total	15	2333,7			

El Análisis de varianza arrojó como resultado que, con una probabilidad de error no superior al 5%, no existe evidencia suficiente para dudar que el efecto de la razón Agua/Cemento sobre la resistencia a la flexión de las probetas fibrocemento es nulo, es decir, que las diferencias observadas en la resistencia debido a la variación de la proporción de agua en la fabricación no son estadísticamente significativas. La conclusión derivada del ANDEVA se debe sin duda a la gran variación presentada por la resistencia a la flexión dentro de cada unidad experimental. Esto se puede apreciar en la figura 10.

Figura 10: Resistencia a la flexión v/s Razón A/C de probetas fibrocemento con razón F/C igual a 0.04



#### 2.4.2 Densidad

Los valores observados para la densidad (Y) de las probetas de fibrocemento al hacer variar la razón A/C (X) fueron los siguientes:

Tabla 19: Densidad de probetas fibrocemento con distinta razón Agua/Cemento y proporción de fibras constante igual a 0.04

Razón A/C	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]			
	0,3	0,34	0,38	0,42
	1,286	1,392	1,387	1,400
	1,444	1,422	1,403	1,444
	1,436	1,410	1,362	1,433
	1,382	1,395	1,467	1,443
<b>Promedio</b>	<b>1,405</b>	<b>1,40</b>	<b>1,43</b>	<b>1,39</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>0,014</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	<b>0,07</b>

El análisis de regresión para estos datos obtuvo los siguientes resultados.

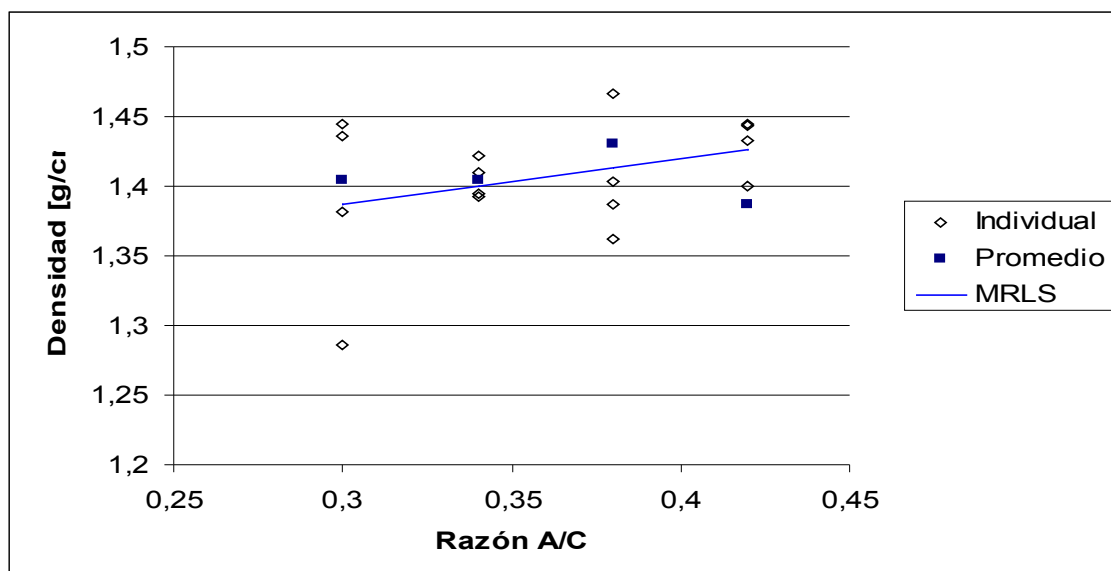
$$Y = 1.29 + 0.323 \cdot X$$

Tabla 20: ANDEVA del análisis de regresión, para la densidad de probetas fibrocemento con F/C igual a 0.2 en función de la razón A/C

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Razón F	Valor crítico para F
Regresión	1	0,0033	0,0033	1,939	4,6
Residuos	14	0,0241	0,0017		
Total	15	0,0275			

El ANDEVA entrega como resultado que la razón A/C no es un buen predictor de la densidad de las probetas fibrocemento ( $R^2 = 12.16\%$ ).

Figura 11: Densidad v/s Razón A/C de probetas fibrocemento con razón F/C igual a 0.04



#### 4. CONCLUSIONES

La resistencia a la flexión más alta se obtuvo con probetas de sólo cemento. Esto indica que los valores mas altos de resistencia para el compuesto se encuentran en las razones Fibras/Cemento bajas.

La resistencia a la flexión del compuesto fibrocemento presenta valores máximos 10% de razón Fibras/Cemento para probetas fabricadas con razón Agua/Cemento igual a 100%; y 4% de razón Fibras/Cemento para probetas fabricadas con Agua/cemento igual a 30%

Las fibras celulósicas extraídas de los rastrojos de trigo tienen una longitud menor a la longitud de fibra crítica necesaria para reforzar en forma significativa una matriz de cemento. También estas fibras no colapsan totalmente durante el proceso de prensado, dejando espacios sin cemento en el lumen de cada una.

La densidad de las probetas disminuye en forma lineal, y la absorción de agua aumenta en forma lineal, a medida que aumenta la proporción de fibras dentro del compuesto.

La densidad del compuesto explica en forma satisfactoria las variaciones presentadas en la absorción de agua.

La razón Agua/Cemento no presenta una influencia significativa sobre la resistencia a la flexión del fibrocemento. También no influye en las variaciones de la densidad del compuesto.

## 5. REFERENCIAS

[1] ASTUDILLO, J.; GONZÁLEZ, M. 2004. Análisis para los primeros tableros fibrocemento elaborados en Chile a base de rastrojos de trigo. Informe para el curso "Producción y Conocimiento". Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 37 p.

[2] CANAVOS, C. G. 1992. Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y métodos. Mc Graw-Hill, México. 651 p.

[3] CASTELLANOS, GERMAN. 2001. Estudio de variables de proceso en la fabricación de tableros de fibras recicladas de madera-cemento. Tesis Ingeniería forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 108 p.

[4] DÍAZ R. GERARDO. 1984. Estudio de factibilidad del compuesto alambre de cobre cemento como material de construcción. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Industrial. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 97 p.

[5] DONOSO, EDUARDO. 2006. Materiales compuestos reforzados con fibras. Apuntes de curso Materiales Compuestos. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

[6] FIBER FUTURES. 2007. Straw Utilization. [en línea] <<http://www.fiberfutures.org/straw/main.html>>. [consulta: 15 marzo 2007]

[7] GALLEGUILLOS A, ENRIQUE. 1981. Estudio experimental de un material compuesto cemento portland-fibra de cobre. Tesis para optar al título de Ingeniero

Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 142 p.

[8] GAY, DANIEL; HOA, SUONG V; TSAI, STEPHEN W. 2003. Composite Materials: Desing and applications. CRC press LLC.

[9] GOLDBOARD DEVELOPMENT CORPORATION. 2001. Overview of the Goldboard®. Products and Zero Technology Risk. [en línea] <<http://www.goldboard.com>>.[consulta: 28 octubre 2004]

[10] GONZÁLEZ, JAVIER. 2006. Pulpaje Kraft. Apuntes del curso Celulosa y Papel. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile.

[11] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN). 1987. Norma Chilena oficial; NCh 186/1 of86: Requisitos planchas planas de fibrocemento. Chile

[12] MONTGOMERY C. DOUGLAS. 1991. Diseño y Análisis de Experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica, México.

[13] REGISTRO TÉCNICO DE MATERIALES (RTM), 2005. Ficha Técnica: Planchas planas de fibrocemento. [En línea]. <<http://www.rtm.cl>>. [consulta: 20 junio 2005]

[14] SMITH F. WILLIAM; HASHEMI, J. 2004. Ciencia e Ingeniería de materiales, tercera edición. Mc Graw-Hill, España. 570 p.