



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

*TESIS POR ARTÍCULO ESPECIALIZADO*

**“Desempeño térmico de concreto hidráulico  
adicionado con fibras naturales”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA  
**FÍS. ESTER GALICIA ALDAMA**

**COMITÉ TUTORIAL**  
DRA. LORENA ROMERO SALAZAR  
DR. MIGUEL MAYORGA ROJAS  
DR. JUAN CARLOS ARTEAGA ARCOS



*Universidad Autónoma del Estado de México*  
**UAEM**



PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**DRA. PETRA SÁNCHEZ NAVA**  
**COORDINADORA DE INVESTIGACIÓN**  
**Y ESTUDIOS AVANZADOS**

**PRESENTE**

Nos permitimos informarle que hemos revisado la tesis por artículo especializado titulado: **"Desempeño térmico de concreto hidráulico adicionado con fibras naturales"**, que presenta la **Fís. Ester Galicia Aldama**, para obtener el grado de Maestría en Ciencias. Dicho trabajo cuenta con nuestro **Voto Aprobatorio**.

**ATENTAMENTE**

**DRA. LORENA ROMERO SALAZAR**

**DR. JUAN CARLOS ARTEAGA ARCOS**

**DR. MIGUEL MAYORGA ROJAS**

**DR. DAVID JOAQUÍN DELGADO HERNÁNDEZ**

**DR. DANIEL OSORIO GONZÁLEZ**

**DR. JORGE MULIA RODRÍGUEZ**

**DR. PEDRO GUILLERMO REYES ROMERO**

Acta 111 Acuerdo 340/MC  
c.c.p. Archivo  
PSN/nmg



## CONTENIDO

<b>I. RESUMEN</b>	.....	4
<b>II. PROTOCOLO APROBADO Y REGISTRADO</b>	.....	5
<b>III. REFERENCIAS DE PROTOCOLO</b>	.....	16
<b>IV. CARTA DEL ARTÍCULO ENVIADO Y ARTÍCULO</b>	.....	19
<b>V. REFERENCIAS DEL ARTÍCULO ESPECIALIZADO</b>	.....	44
<b>VI. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES</b>	.....	49
<b>VII. LITERATURA CITADA</b>	.....	51
<b>VIII. ANEXO</b>	.....	57

## **I. RESUMEN**

La presente tesis contiene un artículo de divulgación con los resultados obtenidos del comportamiento reológico de la pasta de cemento adicionada con fibras de coco donde se fijo el porcentaje de adición y la relación de aspecto. Se muestra que la adición de la fibra de coco mejora la trabajabilidad de la pasta de cemento. La viscosidad dinámica es una propiedad que se afecta positivamente, ya que la posición y la geometría de las fibras de coco, permite que está fluya con mayor facilidad en comparación con la muestra testigo (sin fibra de coco). Además, se presentan primero resultados del desempeño térmico por transferencia de calor utilizando un arreglo de multicapa de paneles fabricados apartir de los resultados de la reología.

## **ABSTRACT**

This thesis contains an article of disclosure with the results obtained from the rheological behavior of the cement paste added with coconut fibers where the percentage of addition and the aspect ratio were fixed. It is shown that the addition of coconut fiber improves the workability of the cement paste. The dynamic viscosity is a property that is positively affected, since the position and geometry of the coconut fibers allows it to flow more easily compared to the control sample (without coconut fiber). In addition, thermal performance results are first reported by heat transfer using a multilayer array of panels manufactured from the results of the rheology.

## II. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

### COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS AVANZADOS

Formato de Registro de Anteproyecto de Tesis de Investigación para los Estudios de Maestría y Doctorado en Ciencias (Biología, Física y Matemáticas).

**Nombre del Programa Académico:** Maestría en Ciencias (Física)

**Tema de Tesis de Grado:** Desempeño térmico de concreto hidráulico adicionado con fibras naturales

**Nombre del Alumno:** Ester Galicia Aldama

**No. De Cuenta:** 0611193

**Fecha de Ingreso:** Agosto, 2016

**Duración del Plan de Estudios:** Cuatro Periodos Lectivos

**Nombre del Tutor Académico y Grado Universitario:**

Dr. Miguel Mayorga Rojas

**Nombre del Tutor Académico y Grado Universitario:**

Dra. Lorena Romero Salazar

**Nombre de Tutores Adjuntos (en su caso) y Grado Universitario:**

Dr. Juan Carlos Arteaga Arcos

**Nombre de la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento asociada al tema de investigación:** Procesos Irreversibles y Sistemas Complejos



**UAEM** | Universidad Autónoma  
del Estado de México

## **CONSTANCIA**

### **Registro de Protocolo de Tesis**

**Toluca, México, a 2 de diciembre de 2016**

**Número de Registro. MSFISI-0516**

**Nombre del Programa Académico: Maestría en Ciencias (Física)**

**Tema de Tesis de Grado: Desempeño térmico de concreto hidráulico adicionado con fibras naturales.**

**Nombre del Alumno: Galicia Aldama Ester**

**No. de cuenta: 0611193**

### **Comité de Tutores**

**Tutor Académico: Dra. Lorena Romero Salazar**

**Tutores Adjuntos: Dr. Miguel Mayorga Rojas  
Dr. Juan Carlos Arteaga Arcos**



  
DRA. CARMEN ÁLVAREZ LOBATO  
DIRECTORA DE ESTUDIOS AVANZADOS

SEA



## 1. Resumen

El objetivo de este trabajo de investigación es modelar el proceso de hidratación del concreto con cemento Portland mexicano reforzado con fibras naturales, dicho modelo buscará acoplar las ecuaciones de la reacción química, de la difusión de calor con la geometría de la matriz (concreto + fibra). El modelo requiere la caracterización del sistema desde un punto de vista reológico, termodinámico y mecánico. Las fibras naturales (FN) se utilizarán como un elemento de refuerzo y para ello se eligen productos agro-naturales tales como el maíz y nopal, caña de azúcar y la cáscara de coco (estopa), comprometiendo las propiedades térmicas del concreto + fibra, además de la sustentabilidad y la economía regional y nacional.

## 2. Introducción

En la antigüedad, las fibras se usaron para reforzar materiales, por ejemplo, la paja se usaba como refuerzo en los adobes de arcilla para controlar la tensión por el secado y reducir el agrietamiento; posteriormente, el asbesto comenzó a ser utilizado en muchos países, sin embargo, se detectaron daños a la salud al fabricar productos de asbesto-cemento, debido a esto, se buscó sustituir el asbesto por fibras de otros materiales. Existen en la industria varios tipos de fibras que se comercializan mundialmente, los tipos básicos son las de acero, vidrio y las derivadas de hidrocarburos (plásticas). Otro grupo de fibras, son las FN de origen vegetal. Su principal ventaja es la amplia disponibilidad en grandes cantidades en países en desarrollo y representan una fuente renovable continua además del bajo costo de producción en comparación con los otros tipos de fibras, estas fibras son llamadas típicamente FN no procesadas. La adición de fibras, en general, mejora una o más propiedades tales como la resistencia a la tracción, flexión, impacto o fatiga y una mejor resistencia-peso, estas propiedades son determinadas principalmente por la naturaleza de las fibras, la morfología del sistema, la interacción de la interfase fibra-matriz y la tecnología de fabricación [1,2].

El estudio de cementos reforzados con FN es un área de estudio desde hace aproximadamente 40 años [2], se han caracterizado mecánicamente ya que su uso se centra en la construcción de la obra civil, principalmente en la construcción de viviendas, es por ello que pocos trabajos de investigación consideran importante el proceso de la hidratación del cemento Portland, sin embargo el uso de este tipo de materiales se pretende ampliar a otras áreas como la industria en general y en la innovación de aparatos de uso común que involucren procesos termodinámicos, por lo tanto el proceso de hidratación del concreto mejorado con FN (concreto + FN), debe ser estudiado ya que algunas FN poseen características que desfavorecen su uso tales como la alta absorción de agua y elongación cuando entran en contacto con el agua además del proceso de putrefacción que pudieran tener debido al agua y al paso del tiempo, sin embargo otras propiedades como resistencia, dureza y flexión las hacen material óptimo para ser usado como refuerzo

en cemento; por medio de la caracterización sabremos cuales son las adecuadas para ser usadas en un composito de cemento con FN. Por composito de cemento entendemos que se trata de un cemento hidráulico compuesto de cemento Portland y uno o más materiales inorgánicos u orgánicos que intervienen en las reacciones de hidratación y por lo tanto hacen una contribución sustancial a los productos de hidratación [3,4].

En este trabajo de investigación se caracterizarán las FN que se utilizarán como refuerzo en la mezcla de concreto (cemento + agregados + agua), se harán estudios de reología a la pasta de cemento (cemento + agua) y se caracterizará la matriz de concreto mejorado con FN para estudiar propiedades mecánicas como la resistencia, la elasticidad o plasticidad; posteriormente se harán estudios de calorimetría mediante un calorímetro adiabático, (los detalles técnicos se enuncian en el apartado de marco metodológico). Por último, se acoplarán las ecuaciones de la reacción química, de la difusión de calor con la geometría de la matriz (concreto + fibra), para identificar los perfiles de reacción-difusión del proceso de hidratación como procesos termodinámicos fuera de equilibrio.

Este protocolo de tesis de maestría está asociado al proyecto ***Caracterización termodinámica de un metamaterial con propiedades termoaislantes***; el cual tiene como propósito fabricar a partir del concreto mejorado con FN el prototipo de un panel termoaislante para fabricar un desecador donde el panel fabricado tenga la función de una pared termoaislante, teniendo en cuenta las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-018-ENER-2011[5].

### **3. Antecedentes**

Actualmente, la palabra cemento indica cualquier tipo de adhesivo; su uso está más generalizado en la construcción y obras de ingeniería civil, por ejemplo, en aplicaciones diversas genéricas de tipo estructural, cimentaciones, obras portuarias y marítimas, obras hidráulicas, carreteras, puertos, aeropuertos, alcantarillados y cementos para morteros de albañilería. Además de estas aplicaciones, los cementos encuentran una aplicación particular en las etapas básicas de la gestión de desechos radioactivos, notablemente en la disposición definitiva que es la etapa final de la gestión de desechos radioactivos, cabe mencionar que anteriormente la postulante realizó su proyecto de tesis de la Licenciatura en Física en dicho tema bajo el título de “Influencia de la composición mineralógica del cemento en la difusión de especies químicas.” La investigación se basó de manera general en la historia del cemento, definición del cemento Portland, su clasificación de acuerdo con la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004, composición química, procesos de fabricación, así como la industria del cemento en México y su uso para fines específicos en la industria nuclear. Se tiene evidencia de estudios experimentales y cuantitativos en la caracterización mineralógica del cemento seco, hidratado en diferentes edades de curado por medio de tres técnicas de observación: Difracción



de Rayos-X (DRX), Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopia Mössbauer [6]. Por medio de estos tres métodos de caracterización se logró mayor comprensión del comportamiento de la pasta de cemento Portland durante el proceso de hidratación de las fases a diferentes edades, las fases de silicato de calcio hidratado (CSH), son las fases mayoritarias además de ser las responsables de las resistencias mecánicas de los materiales fabricados con cemento Portland. De acuerdo con la experiencia obtenida, los materiales cementicios intervienen en las diferentes etapas de la gestión de desechos radioactivos, sin embargo, su principal uso está en la obra civil, y actualmente se pretende darles un uso industrial, por lo que, a los materiales compuestos a base de matrices de cerámicos, plásticos y concreto se incorporan fibras para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas. El uso de las FN como refuerzo en el concreto representa una alternativa de desarrollo y sustentabilidad [7]. La condición de refuerzo se debe a la resistencia de las fibras, caracterizada por su dureza y la relación de forma de estas, la compatibilidad con la matriz que supone una transmisión de esfuerzos adecuada y la cantidad de fibra en el compuesto final. En este trabajo de investigación se analizará el concreto al cual se le agregarán aditivos pertenecientes al grupo de fibras naturales vegetales, considerando sus propiedades mecánicas y químicas, ventajas y desventajas en cuanto a costos de producción, traslación (en caso de ser necesario) y preparación. En la actualidad es común escuchar de concretos sustentables y de materiales compuestos avanzados esto es que además del uso de las FN como un aditivo se reduzcan la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido al ser confinadas como desechos, por lo tanto, el composito de cemento debe de estar comprometido con la sustentabilidad al garantizar que su fabricación, producción y uso esté sujeto a la **Norma Oficial Mexicana NOM-018-ENER-2011**[5,8]. El desarrollo de materiales biodegradables en el área de la construcción representa una opción eficaz para gestionar adecuadamente dichos residuos debido a la gran disponibilidad de residuos agrícolas. Estos constituyen una fuente abundante de fibras de bajo costo, siendo a veces la única fuente aprovechable de fibras en determinadas zonas geográficas, principalmente en países en vías de desarrollo, que la gran variedad de características, dimensiones fibrosas y composición química de estas fibras les confieren un gran potencial como materias primas [9,10]. La presente investigación propone el desarrollo teórico, experimental, caracterización y simulado de una matriz de concreto mejorado con FN considerando propiedades mecánicas y térmicas, así como las propiedades reológicas en pasta de cemento.

#### 4. Definición del Problema o Tema de Investigación

Se han llevado a cabo en varios países la caracterización mecánica de las FN y de compuestos formados por fibras y cemento [7]. Las fibras de origen vegetal pueden ser provenientes de [1]:

- Tallos: yute, lino, bambú, caña de azúcar, hierba de China o ramie, sunn, kenaf;
- Hojas: sisal, henequén, yucca, pasto de elefante, plátano, piasava.
- Cáscara: coco.
- Madera: celulosa.

Este proyecto se limita en las FN de México, en particular basados en productos regionales, lo cual, de acuerdo con el INEGI, algunas FN son maíz, trigo, arroz, sorgo, caña de azúcar, cebada, plátano, cáscara de coco, entre otras. En el 2010 la producción de maíz en el Estado de México representaba un 6.64% de la producción total del país, seguido de la cebada con poco más del 3% y en pequeñas cantidades el trigo, el plátano, el arroz y por último el sorgo, se debe destacar la producción escasa de la caña de azúcar, sin embargo en estados cercanos como Morelos y Michoacán, la producción de caña de azúcar representa aproximadamente un 3% y 2%, respectivamente, de la producción total del país [11]. En el año agrícola 2008 Guerrero concentró el 72% de la producción nacional de copra, seguido por Colima con el 16%. Michoacán fue el quinto productor con el 1% [12]. En el año 2007 el Estado de México se produjeron 21 086 toneladas nopal [13]. Por lo cual, la caña de azúcar, la estopa de coco y el nopal serán las FN con la que se trabajará en este trabajo de investigación.

El uso de FN en concretos y morteros han tenido un amplio estudio desde los años 70's, se han estudiado para determinar sus propiedades ingenieriles y su posible uso en la construcción en al menos 40 diferentes países; por ejemplo se han realizado estudios de cemento reforzado con fibras de lino [9], fibras de bagazo de caña de azúcar [7,14], fibra de estopa de coco [9,14,15,16,17,18], fibras de palma de aceite [18] y derivados de la cascarilla de arroz [19]. Se han realizado investigaciones con cenizas de coco, cenizas de bagazo de caña de azúcar y cenizas de cascarilla de arroz como materiales de refuerzo [19, 20, 21, 22, 23], así desechos industriales de caña de azúcar [24] y nopal [25]. En la República Mexicana grupos de investigadores de estados como Nuevo León y Veracruz han realizados estudios sobre compositos de cemento con FN como agave lechuguilla [1], bagazo de caña [3] y lechuguilla [2]. La línea de investigación es muy amplia, por lo tanto el alcance de los trabajos antes mencionados es únicamente respecto a las propiedades mecánicas de los productos ya hidratados, de ahí que la propuesta de investigación aquí planteada sea llevada a un estudio reológico y calorimétrico, además de mecánico para acoplar las ecuaciones de la reacción

química, de la difusión de calor con la geometría de la matriz (concreto + fibra), para identificar los perfiles de reacción-difusión del proceso de hidratación como procesos termodinámico fuera de equilibrio.

## 5. Objetivo(s)

### ➤ *Objetivo general:*

- ❖ Modelar termodinámicamente la cinética de reacción del proceso de nucleación y crecimiento del cemento Portland en presencia de distintas fibras naturales.

### ➤ *Objetivos específicos:*

- ❖ Preparar las fibras para incorporarlas en las mezclas de cemento y mortero.
- ❖ Determinar parámetros de cinética de reacción para ser ajustado con modelo de Avrami.
- ❖ Determinar propiedades reológicas de la pasta de cemento (cemento + agua) para hacer un fluido conforme a las normas de especificación.
- ❖ Determinar propiedades mecánicas del mortero: resistencia a la compresión, resistencia a la flexión o módulo de ruptura (MOR) y la resistencia de tensión indirecta.
- ❖ Modelar el proceso de hidratación como un proceso de reacción-difusión

## 6. Marco Teórico

La reología es la ciencia de la deformación y el flujo de la materia, y el énfasis en el flujo significa que tiene que ver con las relaciones entre el estrés, la tensión, la frecuencia de la tensión, y el tiempo. El concreto en su estado fresco se puede considerar un fluido y, por tanto, los principios básicos de reología se pueden aplicar a este material.

El esfuerzo o tensión se define como la fuerza perpendicular por unidad de área aplicada a un objeto, de tal forma que éste se comprima (esfuerzo compresivo) o se estire (esfuerzo de estiramiento).

$$\text{Módulo Elástico} = E = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación}} = \frac{F/A}{\Delta l/l} \text{ ----- (1)}$$

El esfuerzo de corte es similar al esfuerzo, excepto que la fuerza es aplicada de tal forma que el material es retorcido, entonces el módulo de esfuerzo se define como [26]:

$$\text{Módulo Esfuerzo} = S = \frac{\text{esfuerzo de corte}}{\text{deformación}} = \frac{F/A}{\Delta l/h} \text{ ----- (2)}$$

Un fluido se llama tixotrópico cuando, bajo la acción de una tasa de corte constante (velocidad de cizallamiento), alguna de sus propiedades decrece isotérmicamente,

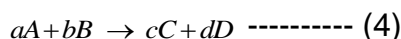
con marcada dependencia del tiempo (duración de la acción cortante), y con capacidad de recuperar su valor inicial una vez que cesa dicha acción. La ley de la viscosidad de Newton establece que, en movimientos fluidos laminares existe una relación lineal entre las relaciones tangenciales y los gradientes de velocidad, siendo la constante de proporcionalidad una propiedad física del fluido llamada viscosidad dinámica o absoluta ( $\eta$ ). Sin embargo, existen algunas sustancias industrialmente importantes que no se comportan siguiendo la ley de Newton de la viscosidad, ya que su viscosidad a una temperatura y presión dadas es función del gradiente de velocidad o velocidad de deformación (velocidad de cizallamiento). A los fluidos cuya relación entre tensión-velocidad de deformación no es proporcional, se los ha denominado fluidos no newtonianos. La mecánica de los fluidos se ocupa del estudio de los fluidos newtonianos exclusivamente; mientras que los fluidos no newtonianos son parte de la ciencia más ampliada denominada **reología**. El fluido no-newtoniano son todos aquellos fluidos que no exhiben una relación directa entre el esfuerzo y la velocidad de corte, por ejemplo, la mayoría de los fluidos de cemento. El cemento en estado fresco es considerado como un fluido de Bingham y algunos tipos de pasta exhiben el comportamiento de un fluido Herschel- Bulkley, los modelos matemáticos se encuentran explicados en [27]. La relación entre la reología de la pasta de cemento y la reología del concreto no está completamente establecida. Sin embargo, se supone que una correlación entre la reología de la pasta de cemento y la reología del concreto puede ser posible. La razón principal de que tal correlación nunca ha tenido éxito es que la reología de la pasta de cemento se mide siempre en condiciones que no son experimentados por la reología de pasta de cemento en el concreto [28].

En el estudio de una reacción química, hay dos aspectos fundamentales para tener en cuenta, uno estático y otro dinámico. Del primero se ocupa la Termodinámica y del segundo la Cinética. Así, la **Termodinámica** sólo se interesa por los estados inicial y final del sistema, se ocupa de sistemas en equilibrio. Estudia la dirección y la extensión con que se produce la reacción, e informa sobre si una reacción es o no posible. La **Cinética Química** se ocupa de la *velocidad* con que sucede una reacción y de las variables que la afectan (concentración, temperatura, presión, etc.). Por lo tanto, la Cinética informa del tiempo necesario para que se alcance el equilibrio. A partir de este estudio se puede conocer el camino por el que transcurre la reacción, el *mecanismo de la reacción* [29].

Cuando un sistema cambia de un estado a otro puede perder o ganar energía bajo forma de calor y trabajo. A volumen constante no se ejecuta trabajo externo, y el calor absorbido (o desprendido) es igual solamente al incremento (o disminución) de la energía interna  $E$ . Para una reacción a volumen constante; el calor absorbido es igual al incremento de energía interna, y las capacidades caloríficas implicadas son las correspondientes a volumen constante, de aquí [30,31]:

$$\left(\frac{\partial(\Delta E)}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial E_B}{\partial T}\right)_V - \left(\frac{\partial E_A}{\partial T}\right)_V = \Delta C_V \text{ ----- (3)}$$

Donde  $\Delta E$  es igual al calor de reacción a volumen constante y  $\Delta C_V$  es el incremento de la capacidad calorífica a volumen constante. Para cualquier reacción química, se define la **entalpía normal de reacción** (o con más propiedad, variación de entalpía normal de reacción)  $\Delta H_T^0$  como la variación de la entalpía al transformarse los números estequiométricos de los moles de los reactivos puros, separados y cada uno de ellos en sus estados normales a temperatura  $T$ . Con frecuencia,  $\Delta H_T^0$  se denomina *calor de reacción* a veces  $\Delta H_T^0$  se representa por  $\Delta_r H_T^0$  donde el subíndice  $r$  significa <<reacción>>. En la reacción



La variación de la entalpía normal  $\Delta H_T^0$  viene dada por:

$$\Delta H_T^0 \equiv cH_{m,T}^0(C) + dH_{m,T}^0(D) - aH_{m,T}^0(A) - bH_{m,T}^0(B) \text{ ----- (5)}$$

Donde  $H_{m,T}^0(C)$  es la entalpía molar de la sustancia  $C$  en su estado normal a la temperatura  $T$ . Para la reacción general, tenemos

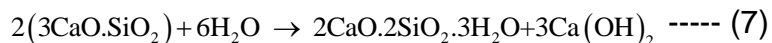
$$\Delta H_T^0 \equiv \sum_i \nu_i H_{m,T,i}^0 \text{ ----- (6)}$$

Donde los  $\nu_i$  son los coeficientes estequiométricos (positivo para los productos y negativo para los reactivos) y  $H_{m,T,i}^0$  es la entalpía molar de la sustancia  $A_i$  en su estado normal a la temperatura  $T$  [32].

La hidratación del cemento Portland se refiere a los cambios que le ocurren al cemento o a alguna de sus fases de constitución al mezclarse con agua; se llama pasta de cemento cuando la mezcla de cemento y agua comienza a endurecerse (solidificación). Físicamente, la hidratación ocurre cuando el cemento entra en contacto con el agua. [33].

Las reacciones químicas que se generan en la hidratación son muy complejas; la hidratación de cada componente del cemento se da de la siguiente forma:

- Silicato tricálcico o Alita  $C_3S$ : es una de las fases más importantes dentro del proceso de hidratación del cemento Portland, su reacción con el agua es mucho más simple que la reacción del cemento Portland con el agua, por este motivo es usado normalmente como un modelo para describir la hidratación de dicho cemento. Químicamente hablando es el más inestable de los componentes en el cemento, que al reaccionar con agua se convierten en silicato de calcio hidratado, conocido como tobermorita gel y en hidróxido de calcio (portlandita), según la reacción:



Existen fases llamadas "secundarias" en el proceso de hidratación: Silicato dicálcico o Belita y Aluminato tricálcico o Celita, entre otras [6].

La ecuación (7) es exotérmica, y el método más preciso de la medición de la cinética es supervisar la tasa de producción de calor con la calorimetría isotérmica. El inicio del proceso de nucleación y crecimiento coincide con el momento de la mezcla inicial, lo que indica que el período de lenta reacción inicial conocido como el "período de inducción" no es un proceso químico por separado como a menudo se ha planteado la hipótesis. La cinética de hidratación de silicato tricálcico ( $C_3S$ ), el principal constituyente de cemento portland, se analizan con un modelo matemático "nucleación límite" en la que la nucleación del producto de hidratación se produce sólo en límites internos que corresponden a las superficies de las partículas  $C_3S$ . Este modelo se aproxima más estrechamente el proceso de hidratación  $C_3S$  que lo hace la nucleación y crecimiento modelo de Avrami ampliamente utilizado. Considerando una transformación de fase isotérmica que se produce dentro de un volumen fijo por un proceso de nucleación y crecimiento para que la nucleación es espacialmente aleatoria y la tasa de crecimiento lineal en cualquier dirección es constante. Según lo propuesto por Avrami, estos casos límite se pueden combinar en una única ecuación general:

$$X = 1 - \exp\left[-(k_{avr}t)^n\right] \text{ ----- (8)}$$

Para una aplicación directa para obtener datos de la hidratación del  $C_3S$ , tal como la obtenida a partir de calorimetría isotérmica, es necesario el uso de una versión modificada:

$$R = Ank_{avr}^n (t - t_0)^{n-1} \exp\left(-[k_{avr}(t - t_0)]^n\right) \text{ ----- (9)}$$

Cuando se aplica el modelo de Avrami a una reacción química (tales como la hidratación  $C_3S$ ) en vez de una transformación de fase, se supone implícitamente que la velocidad de difusión de los reactivos a la superficie de crecimiento no se controla la velocidad [34]. Existe un antecedente reciente, del grupo de investigación, donde se muestra una comparación de la gráfica obtenida mediante el uso de la ecuación de Avrami contra la ecuación que se encuentra por default en el programa *Comsol Multiphysics*® (ecuación de Arrhenius) [35].

## 7. Marco Metodológico

En el desarrollo experimental de este trabajo se abordarán tres escalas de análisis, el primero a tiempos cortos con la pasta de la mezcla concreto + fibra; una segunda durante la reacción exotérmica de la hidratación; y la última a tiempos largos cuando ya la mezcla ha sido hidratada y endurecida. Se aplicará la metodología enunciada en la norma para caracterización de pastas de cemento y se generalizará para la

pasta de compositos: NMX-C-085-1982 Industria de la construcción - Método de mezclado mecánico de pastas y morteros de cementantes hidráulicos.

Las restricciones en el tamaño de partícula deben ser consideradas para poder utilizar el Reómetro Haake Mars III para medir la reología de la pasta de cemento, la Influencia del tipo de mezclador y procedimiento de mezcla. En todo sistema complejo, es importante caracterizar su comportamiento reológico. La Reología es la ciencia de la deformación y el flujo de la materia; el flujo significa que tiene que ver con la relación entre el estrés, la tensión, la frecuencia de la tensión y el tiempo. Para el estudio de la reología es relevante controlar las condiciones del esfuerzo aplicado en el proceso de mezclado. El procedimiento para preparar la mezcla con la que se fabricará la muestra de pasta de cemento fue desarrollado por el Instituto de Transporte de Texas basado en el procedimiento desarrollado por la Asociación de Cemento Portland (PCA) y más tarde por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), la aplicación de esta metodología se describe más a detalle en [27]. La medición de las propiedades reológicas de las pastas de cemento se obtiene información crucial sobre (i) la evolución de la hidratación de los sistemas cementantes, (ii) los cambios microestructurales y la interacción de las partículas en la pasta de cemento, (iii) el rendimiento relativo de diferentes aditivos químicos (por ejemplo, aditivo reductor de agua) -la dosis óptima y las consecuencias de dosis excesivas, y (iv) la compatibilidad de diversos cemento, químicos y adiciones minerales combinaciones [34].

La parte correspondiente al proceso experimental de esta investigación se realizará en dos partes:

- Experimental: se realizará una caracterización de la matriz de cemento con composito de FN (cemento + fibra natural). La caracterización se hará para conocer la
  - Resistividad: Atomic Force Microscopy (AFM), en el Laboratorio de Nanotermodinámica de la Facultad de Ciencias de la UAEM
  - Plasticidad o elasticidad: Prensa de Compresión Controls de 150 ton de capacidad modelo Pilot4, en el Laboratorio de Nanotermodinámica de la Facultad de Ciencias de la UAEM y Atomic Force Microscopy (AFM), en el Laboratorio de Nanotermodinámica de la Facultad de Ciencias de la UAEM
  - Calorimetría: Thermal Analysis (TAM III), en el Laboratorio de Nanotermodinámica de la Facultad de Ciencias de la UAEM.
- Modelo Termodinámico: Se buscará acoplar las ecuaciones de la reacción química, de la difusión de calor con la geometría de la matriz (cemento-fibra). La solución de las ecuaciones se realizará en la plataforma Comsol Multiphysics® en el Laboratorio de Nanotermodinámica de la Facultad de

Ciencias de la UAEM para identificar los perfiles de reacción-difusión del proceso de hidratación como procesos termodinámicos fuera de equilibrio. Tanto la caracterización como el modelo termodinámico de la matriz de cemento con composito de FN serán de gran utilidad para comprender el proceso de hidratación.

### III. REFERENCIAS

- [1] Juárez Alvarado, César Antonio. Concretos base cemento Portland con fibras naturales (Agave Lechuguilla), como materiales para construcción en México; Tesis de Doctorado en Ingeniería con Especialidad en Materiales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Junio, 2002.
- [2] Juárez Alvarado César A., Rodríguez López Patricia, Rivera Villarreal Raymundo, Rechy de Von Roth Ma. de los Ángeles; "Uso de fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto"; Ingenierías, Vol. VII, No. 22; Enero-marzo 2004; pp. 7-19.
- [3] Reyes Bañuelos, Uriel Isaac; Concreto reforzado con fibra de bagazo de caña; Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil; Universidad Veracruzana; Xalapa Enríquez, Veracruz, 2008.
- [4] Taylor H. F. W., Cement Chemistry; Ed. Thomas Telford. 2nd edition; 1997
- [5] NORMA Oficial Mexicana NOM-018-ENER-2011. (2012) Aislantes térmicos para edificaciones. Características y métodos de prueba. México. 2012.
- [6] Galicia A, E. (2013). Influencia de la composición mineralógica del cemento en la difusión de especies químicas. Tesis de Licenciatura en Física. Universidad Autónoma del Estado de México.
- [7] Osorio S., J. A., Varon A., F., Herrera M., J. A. (2007). Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. Dyna, Año 74, No. 153, pp. 69-79. Medellín, noviembre de 2007. ISSN 0012-7353
- [8] Juárez C., Valdez P., Durán A. (2004). Fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en materiales de construcción. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 19 N°2, agosto del 2004 [www.ing.puc.cl/ric.](http://www.ing.puc.cl/ric/), pp. 83-92
- [9] Sabanés H., M. A. (2013). Uso de no tejidos de fibras vegetales en matrices de cemento para materiales de construcción. Máster en Sustentabilidad. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [10][http://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria20/feria049\\_01\\_elaboracion\\_de\\_material\\_para\\_la\\_construccion\\_de\\_pa.pdf](http://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria20/feria049_01_elaboracion_de_material_para_la_construccion_de_pa.pdf)
- [11] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2011). Agricultura y ganadería: Ganadería. El sector alimentario en México 2011. (pp. 35-76). ISBN: 0188-8374.
- [12] Fondo de Fomento Agropecuario del Estado de Michoacán. Comité Técnico Estatal de Evaluación Proyecto: Diagnostico Sectorial. El Sistema Producto



Cocotero en Michoacán Bases y Estrategias para Mejorar su Competitividad. SAGARPA.

[http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/michoacan/Lists/Evaluaciones%20Externas1/Attachments/39/compt\\_coco.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/michoacan/Lists/Evaluaciones%20Externas1/Attachments/39/compt_coco.pdf)

[13] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2007) Atlas Agropecuario de México: Censo Agropecuario 2007.

[http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/agropecuario/2007/atlas\\_agrop/Mex/AtlasagrMex1.pdf](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/agropecuario/2007/atlas_agrop/Mex/AtlasagrMex1.pdf)

[14] Paricaguán M., B. M. (2015). Contribución al estudio del comportamiento mecánico y fisicoquímico del concreto reforzado con fibras naturales de coco y bagazo de caña de azúcar para su uso en construcción. Tesis de Doctorado en Ingeniería Química. Universidad de Carabobo.

[15] Quintero G., S. L.; González S., L. O. (2006). Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Ingeniería y Desarrollo. Núm. 20; pp. 134-150. Universidad del Norte Barranquilla, Colombia.

[16] Ali, M.; Liu, A.; Sou, H.; Chouw, N., (2012). Mechanical and dynamics properties of coconut fibre reinforced concrete. Construction and building Materials (no.30). pp. 814-825

[17] Ali, M.; Li, X.; Chouw, N. (2013). Experimental investigations on bond strength between coconut fibre and concrete. Materials and Design (no. 44). pp. 596-605.

[18] Lertwattanaruk, P.; Suntijitto, A. (2015). Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. Construction and Building Material (no. 94). pp. 664-669.

[19] Rhee, I.; Kim, Y. A.; Shin, G.; Kim, J. H.; Muramatsu H. (2015). Compressive strength sensitivity of cement mortar using rice husk-derived grapheme with a high specific surface area. Construction and Building Materials (no. 96). pp. 189-197.

[20] Kumar, A.; Gupta, D. (2015). Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash-soil mixtures. Geotextiles and Geomembranas. pp. 1-9.

[21] R. Fairbairn, E. M.; B. Americano, B.; C. Cordeiro, G.; P. Paula, T.; Toledo F., R. D.; M. Silvano, M. (2010). Cement replacement by sugar bagasse ash: CO2 emissions reduction and potential for carbon credits. Journal of Environmental Management (no. 91). pp. 1864-1871.

[22] Jiménez-Quero, V. G.; León-Martínez, F. M.; Montes-García, P.; Ganoa-Tiburcio, C.; Chacón-Nava, J. G. (2013). Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars. Constructions and Building Materials (no. 40). pp. 691-701.

[23] Frias, M.; Villar, E.; Savastano H. (2011). Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. Cement and Concrete Composites (no. 33). pp. 490-496.

- [24] Setyowati, E. (2014). Eco-Building material of styrofoam waste and sugar industry fly-ash based on nano-technology. *Procedia Environmental Sciences* (no. 20). pp. 245-253.
- [25] Evans, S. L.; Kahn-Jetter, Z.; Frenz, C.; Pancrudo, J.; Lagrazon, K. (2001). Compressive/tensile stresses and lignified cells as resistance components in joints between cladodes of *Opuntia laevis* (Cactaceae): responses to applied stresses. *Environmental and Experimental Botany* (no. 46). pp. 47-53
- [26] Levi, E. (1991). *Elementos de Mecánica del Medio Continuo*. (pp. 25-32). México. Editorial LIMUSA. ISBN: 968-18-0609-3
- [27] Pedraza B., B. I. (2015). La reología en el proceso de microfluidéz en pastas de mortero de cementos Portland mexicano. Tesis de Licenciatura en Física. Universidad Autónoma del Estado de México
- [28] F. Ferraris, C. (1999). Measurement of the rheological properties of cement paste: a new approach. *Role and Admixtures in High Performance Concrete*, RILEM International Symposium. pp.333-342.
- [29][https://www.uam.es/docencia/revero00/docs/velocidad\\_de\\_reaccion2.pdf](https://www.uam.es/docencia/revero00/docs/velocidad_de_reaccion2.pdf)
- [30] Glasstone, S. (1979). *Primero y Segundo Principio de la Termodinámica*. (2da Ed.). *Tratado de Química Física*. (pp. 172-175; 184-186; 192; 195-197). Estados Unidos. Editorial Aguilar. ISBN: 84-03-20058-7
- [31] García-Colín S., L. (1900). *Potenciales Termodinámicos. Relaciones de Maxwell. Método Grafico*. (4ta Ed.). *Introducción a la Termodinámica Clásica*. (pp. 136.137). México. Editorial Trillas. ISBN: 968-24-3881-0
- [32] Levine, Ira N. (2004). *Funciones Termodinámicas Normales de Reacción*. (5ta Ed.). *Fisicoquímica. Vol. I*. España. Editorial McGRAW-HILL. ISBN: 84-481-3786-8.
- [33] Villa F., E. (2015). *Relación de microestructura mecánica contra posición química de morteros de cementos Portland mexicanos*. Tesis de Licenciatura en Física. Universidad Autónoma del Estado de México.
- [34] Thomas, J. J. (2007). A new approach to modeling the nucleation and growth kinetics of tricalcium silicate hydration. *The American Ceramic Society*. vol 90 (no.10). pp. 3282-3288.
- [35] K. Mukhopadhyay A.; Jang S. (2009). Using cement paste rheology to predict concrete mix design problems: technical report. <http://tti.tamu.edu/documents/0-5820.pdf>

## IV. ARTÍCULO ESPECIALIZADO

A manuscript number has been assigned: CONBUILDMAT-D-18-05607

Construction & Building Materials <eesserver@eesmail.elsevier.com>

vie 31/08/2018 05:09 a.m.

Parajcarteaga\_mx@yahoo.com.mx <jcarteaga\_mx@yahoo.com.mx>; jcarteaga@hotmail.com <jcarteaga@hotmail.com>;

Ccester.galicia.aldama@gmail.com <ester.galicia.aldama@gmail.com>; migmayorga@gmail.com <migmayorga@gmail.com>; Lorena Romero Salazar <lors@uaemex.mx>;

\*\*\* Automated email sent by the system \*\*\*

Ms. Ref. No.: CONBUILDMAT-D-18-05607

Title: Rheological behaviour of cement paste added with natural fibres

Construction & Building Materials

Dear Dr. Arteaga-Arcos,

Your submission, referenced above, has been assigned the manuscript number CONBUILDMAT-D-18-05607 and has been assigned to an Editor who will handle peer review.

Please note that in most cases at least two reviews may be required before a decision on a manuscript is made. You will be notified by e-mail each time a reviewer agrees to review your manuscript.

To track the progress of your manuscript, please log in to <https://ees.elsevier.com/conbuildmat/> and click on the "Submissions Being Processed" folder.

Your username is: jcarteaga\_mx@yahoo.com.mx

If you need to retrieve password details, please go to: [http://ees.elsevier.com/CONBUILDMAT/automail\\_query.asp](http://ees.elsevier.com/CONBUILDMAT/automail_query.asp)

Thank you for submitting your manuscript to Construction & Building Materials.

Kind regards,

Construction & Building Materials

=====

For further assistance, please visit our customer support site at <http://help.elsevier.com/app/answers/list/p/7923>. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions and learn more about EES via interactive tutorials. You will also find our 24/7 support contact details should you need any further assistance from one of our customer support representatives.

## **Rheological behaviour of cement paste added with natural fibres**

Ester Galicia-Aldama <sup>a,b,c,d</sup>, Miguel Mayorga-Rojas <sup>a,d,\*</sup>, Juan Carlos Arteaga-Arcos <sup>a,c,\*</sup> and Lorena Romero-Salazar <sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), Campus Universitario “El Cerrillo, Piedras Blancas”, Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 15.5, CP 50200, Estado de México, México

<sup>b</sup> Laboratorio de Nanotermodinámica y Sistemas Complejos, Facultad de Ciencias, UAEMex.

<sup>c</sup> Laboratorio de Micromecánica, Facultad de Ciencias, UAEMex.

<sup>d</sup> Laboratorio de Reología, Nanofluidos y Microfluidez, Facultad de Ciencias, UAEMex.

\* Corresponding author. Tel.:+52 722 226 23 00 x 16205 E-mail address: lors@uaemex.mx (L. Romero-Salazar), jcarteaga\_mx@yahoo.com.mx (J.C. Arteaga) & migmayorga@gmail.com (M. Mayorga)

### **Highlights**

- The aspect ratio modulates the rheological behavior of the cement paste
- The compressive strength is increased when adding coconut fibers to the mortar
- Natural by-products can be added to the mortar not affecting its performance

### **Abstract**

In this research we propose a method to include coconut fibres as by-products from agroindustry, as a sustainable application to reinforce cement paste and mortars, considering workability as a relevant indicator to obtain the best geometrical and percentage configurations. In agreement other publications, we show that mechanical properties such as compressive strength are not compromised with the addition of the fibres.

### **Keywords**

Natural fibres, rheological behaviour, cement paste, compressive strength

### **1. Introduction**

We carried out a literary review to obtain a database of research works involving the addition of natural fibres such as coconut, corn, sugar cane bagasse, among others. The important aspects to consider were the form of the addition to the cement matrix, the pre-treatment and processes to which the fibres were submitted, the modifications in favour or against the cement matrices' mechanical and physical properties. For more detail see Table 1.

Table 1. State-of-the-art regarding the addition of natural fibres to cement composites

Raw Material	Shape	Pre-treatment	Treatment as an addition/substitution	Results of the addition/substitution
Rice	Ash (RHA) [1], [2] [3], [4] husk (RHs) [5] Graphene from rice husk ash [6],	Burned 600-850° C [1], [2], [3] burned at 950° C [4] Rice Husk was burned 500-700° C, then activated with KOH at 850°C for 2 h [6]	Included as a 20% cement mass substitution in form of ultrafine ashes with median particle size of 4.3 µm in concrete mixtures; binary (sugar cane bagasse ash or rice husk ash plus cement) and ternary (sugar cane bagasse ash plus rice husk ash plus cement) blended-cement formulations; Normal and High Strength concretes were studied [1] 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% and 12% RHA as cement mass substitution of pervious concrete, three ratios water to cement (w/c) of 0.27, 0.33 and 0.4 were evaluated [2] RHA with pond ash, cement and plain polypropylene fibres for clayey soil stabilization; 5 to	The amount of superplasticizer increased in binary mixtures containing RHA when compared with the reference concretes. An opposite effect was observed in mixture containing SCBA. Binary concretes formulated with both kind of ashes presented improved properties at the fresh state. There is a decrease in the values of yield stress with the addition of RHA, a phenomenon that can be attributed to the effect of the superplasticizer. In the case of the SCBA, the presence of finely quartz particles contributes to this behaviour. In the hardened state, regarding the

			<p>20% substitution of RHA by dry soil weight. [3]          Added 5%, 10%, 15% and 20%, and the aspect ratio (l/w) is 2.48 [5]</p>	<p>compressive strength and Young's modulus of the SCBA-based against the reference concretes; no significant differences were observed for both classes of strength. For the RHA, it was observed increases of about 33% and 15% in relation to the references for normal and High Strength concretes respectively. Regarding the ternary concretes, for the normal concrete, it was observed that the compressive strength of ash concrete is about 20% higher than the strength of reference one, for the case of the High Strength concrete no significance differences were observed [1]. The addition of rice husk and natural fibres significantly increased the compressive,</p>
--	--	--	--	--

				tensile and flexural strength in cement composites [2], [3], [4], [5]
Sugar Cane Bagasse	<p>Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA/SCW A) [1], [7], [8], [9], [10], [11] Ash, fibres from sugar cane Straw [12]. fibres from bagasse [13]</p>	<p>Burned 700-900°C [1], [9].  i) The laboratory bagasse ash (LBA) obtained in an electric furnace burned 400-800° C for 60 min. ii) Filter bagasse ash (FBA) obtained from combustion fumes (300°C) and iii) Bottom bagasse ash (BBA) at approximately 800° C [7].  burned 800-1000°C [11], [12]  i) Bagasse fibres alkali treated with Ca(OH)<sub>2</sub> 5% by mass</p>	<p>Included as a 20% cement mass substitution in form of ultrafine ashes with median particle size of 2.7 µm in concrete mixtures [1]  Cement mortars adding SCBA with different particle size distribution as cement mass substitution (35%) and constant W/C ratio [9]  0% to 3% SCBF addition by mass of the mixture composition (Portland Cement, sand, limestone, bentonite, cellulose pulp, silica fume 5, an aqueous copolymer) to fabricate reinforced cement composites constant W/C= 0.9 [13]</p>	<p>Binary concretes formulated with SCBA presented improved properties at the fresh state, there is a decrease in the values of yield stress; the presence of finely quartz particles contributes to this behaviour. No significant differences were observed in the Compressive Strength and Young's modulus of the SCBA-based against the reference concretes. [1]  The addition of SCBA and Fly Ash (FA) in the cement pastes and mortars, contributed to the reduction of the yield strength (a Hershel- Buckley rheological model was utilised), of the mixtures in fresh state due to the</p>

		(BAGB) and ii) Bagasse fibres heat- treated at 200° C (BAGP) [13]		effect of the superplasticizer [8] A direct relationship exists between the compressive strength of mortar containing SCBA and the fineness of the ash and inversely proportional to the SCBA's particle size; the finest SCBA provided the highest packing density of mortar, which generated a higher compressive strength and pozzolanic activity. [9] The addition of SCBF contributes to decrease the thermal conductivity of the cement composite when compared with normal cement paste and cement mortars. [13]
Corn	Corn cob ash (CCA) [14]	a fine waste derived from the combustion of maize and corn	CCA was added by inter grinding it with the Portland cement clinker at 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 15%, 20%, and 25% replacement during the cement	The addition of CCA as a pozzolanic material showed a higher setting time than the control concrete. The compressive strength of CCA



			manufacturing process. Studies of permeability and acid attack in blended cement, properties in mortar and workability & compressive strength of concrete were conducted	concrete was lower than the plain concrete at the early age. However, it improved significantly at the later age. The optimum portion of CCA was 8%.
Palm Oil	Palm oil fuel ash (POFA) [14] Olive residue biomass fly ash (ORBFA) [15]	burned 800-1000°C [14] Bottom ash is the portion of the non-combustible residue of biomass combustion in a furnace and fly ash is the portion of the ash that escapes through the chimney and is then retained to prevent it from being released into the atmosphere . [15]	ORBFA was used as cement filler in Self Compacting Concrete (SCC) mixture, the amount of filler was calculated by various dosage criteria commonly used in SCC design. [15]	The main oxide of POFA is silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> ), which is moderately rich in silica compared to that of OPC. It is much finer than OPC; high fineness POFA has a faster pozzolanic reaction than coarse POFA. It can improve the compressive strength of concrete due to its high fineness which is denser and more homogeneous. The pozzolanic reaction of POFA is small at an early age and increases in significance at a later age. It also shows that the pozzolanic reaction of POFA increases with arising particle fineness, cement

				replacement rate and age of concrete. It is also used as to improve the sulphate resistance of concrete. [14]
Coconut	Fibre [16], [17], [18] [19] [20] [21] [22] Hydraulically compressed fibres [23] Coconut Shell Fibres [24]	bio-composites of cassava starch reinforced with 5–30 wt.% of fibres from green coconuts using glycerol as plasticize [16] fibres were washed with water until pH = 7, then boiled for 2 h in water, and finally oven dried at 100° C for 24 h [17] Fibres were washed and soaked with tap water for 30 min (3x). Oven dried at 30° C for 10–12 h, named	Coconut fibre was added to High Strength concrete (HSC) to evaluate its contribution in terms of the strength and durability parameters when the fibre-reinforced concrete was exposed to a seawater environment and tropical climate. Type I Portland cement and condensed silica fume were used as the binder. Four different contents of fibres, i.e., 0.6%, 1.2%, 1.8%, and 2.4%, into the concrete were studied. The percentage of fibre content was calculated based on the binder volume [19] Coconut shell concrete beams	According to the Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) results, the addition of Green coconut fibres presents improved mechanical-thermal behaviour of the thermoplastic starch; it showed a higher thermal transition temperature probably due to the increase of rigidity of the starch-based composites when there is a good interaction with the matrix. [21] Up to 10% weight ratio to the binder was recommended as the proper mix proportion for manufacturing natural fibre cement flat sheets, to optimise their heat insulation, includes coconut coir fibre or

		<p>“soaked fibres”. ii) Fibres were dipped in 0.25% Sodium Alginate (<math>\text{NaC}_6\text{H}_7\text{O}_6</math>) solution for 30 min, then soaked in 1% Calcium Chloride (<math>\text{CaCl}_2</math>) solution for 90 min, finally dried at 70° C for 60 min, named “CaAl fibres” [23]</p> <p>Fibres were dried at 80° C for 24 h, then ground in a mill and sieved; they were treated with alkaline solution 1% (w/v), vacuum filtered and washed with distilled water. Finally, fibres were oven dried</p>	<p>(utilised as a lightweight concrete), subjected to torsion and compared with conventional concrete beams, Mix ratio 1:1.47:0.65:0.42 (Cement: sand: Coconut Shell: w/c) [24]</p> <p>Alkali treated coconut fibres were added to polyester resin matrix composites as reinforcement (10 wt.% of the final mass of the mixture), the fatigue behaviour of the composite was reported [20]</p> <p>Coconut fibre utilised as central layer filler (0.1 m thick), as thermal insulator in 1.0x1.0 m sandwich array ferrocement panel. Coconut fibre weights of 5.76 kg, 3.15 kg and 2.6 kg were tested to determine panel’s thermal conductivity. [21]</p>	<p>oil palm fibre. These composite cement sheets showed an increase in apparent porosity and a decrease in bulk density. The increased amount of fibres added to the mix proportions resulted in a lower compressive and flexural strength of fibre cement products. Finally, the presence of these natural fibres also reduced the product’s thermal conductivity, which provide effective heat insulation. [17]</p> <p>Coconut fibre filled ferrocement panels were used as insulating material for house living with lower thermal conductivity than typical building materials, as for example lightweight concrete brick, hollow concrete block and red clay bricks panel walls. As fibre loading content of coconut filled ferrocement</p>
--	--	---	--	--

		<p>at 100° C for 24 h. [20]  fibres were treated with Ca(OH)<sub>2</sub> (10g/l) for 48 h [22]</p>	<p>panels is raised, thermal conductivity is reduced down [21]  In aggressive environments (seawater exposure, tropical climate), incorporating a small amount of coconut fibre enhances the compressive strength of concrete by approximately 12%. (the best at 0.6%). Fibrous specimens register higher flexural strength than control, however, the maximum improvement is not as high as in the compressive strength. Finally, the permeability of specimen increases with the fibre content. [19]  It was observed that the torsional behaviour of CSC beams is comparable to that of conventional concrete. Compared to conventional</p>
--	--	--	--

				<p>concrete specimens, coconut shell concrete specimens are more ductile [24]</p> <p>Mechanical properties such as compressive strength, flexural strength and modulus of elasticity are increased with the addition of coconut fibres. [18], [20], [22]</p>
--	--	--	--	--

### **Sustainability and the use of by-products in the construction Industry**

Over the years, the industry has evolved, not only satisfying their needs but also meeting customer requirements. This has been done bearing in mind not only local and global conditions, but also geographical and environmental adaptations, as well as the use of new technologies. The construction industry has evolved since the first civilizations using rustic building materials such as piled stones, solid clay and straw bricks. Later, with the use of volcanic sand and lime, a mixture similar to mortar was obtained. In addition, later, with the use of sands with a high content of silica, gypsum appeared and, together with limestone, it became the manufacture of Portland cement in the 1920's. This material is used in the development of civil engineering, through its generic applications such as structures, foundations and water infrastructure for: roads, ports, airports, sewers, among others. It is also used for masonry mortars, in the management of radioactive waste [25], and as a filling material in forms and prefabricated products (panels, walls, ceilings, reeds). Its characteristics as: versatility, resistance, durability, handling, resistance to fire and cost make cement a material that cannot be easily replaced. Therefore, the modifications in its chemical composition, through the addition or substitution of pozzolanic ashes and additives; or the reinforcement of the cement matrix with residual materials from other industries, has enormous implications for the final product [26], [27], [28], [29].

In the production of Portland cement, calcination of limestone (80% of Portland cement raw material) emits 5% to 8% of CO<sub>2</sub> from the total produced by humankind. Given the inability and dependence on the use of cement in construction, its

consumption reaches  $1.6 \times 10^{11}$  metric tons per year, compared with the use of sand, wood and steel representing  $3.0 \times 10^9$ ,  $2.0 \times 10^9$  &  $1.5 \times 10^8$  metric tons per year, respectively. However, by 2030, production of Portland cement is expected to be  $5 \times 10^{12}$  metric tons and by 2050, especially in developing countries, such production will double and could reach  $18 \times 10^{12}$  metric tons. Leading to CO<sub>2</sub> emissions that will reach 17% of the total produced by the mankind, regardless of whether the material is used or not [30], [29], [31], [28], [32].

The development of sustainable industries has gained great attention throughout the world. Sustainability is a development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs. In the struggle to maintain a friendly relationship between the environment, the production and use of cement, urgent changes are required. The guide for sustainability in this industry has environmental approaches, particularly in the need to reduce the production and emission of CO<sub>2</sub>, in addition to the reduction of cement consumption, which leads to the reduction of its production. The conservation and protection of the environment has become an important global problem, which is why most of the industrialized countries have agreed to formulate regulations related to this problem [30], [33], [34].

Suhendro [34] proposed other strategies to produce concrete with clean technologies, by replacing a defined percentage of cement with ash residues and by products. In the first case addition of mineral additives to cement such as fly ash, blast furnace slag and limestone fill is a widespread and documented practice that has been carried out for several years. In the second case, the by-products from other industries and agriculture are an abundant source, they are considered as low cost and because of their physical and chemical characteristics, they can be used in construction processes reducing their environmental, economic and social impact.

Other reports show approaches that use solid waste, renewable resources, recycling or the reuse of construction materials to reinforce the cement matrix [30]. Other contributions to the decrease in the use of cement can be modulated through policies or regulations specific to countries, institutions, industries or a combination of the former [32], [34]. In the field of recycling, natural fibres come from waste generated by the food industries (mainly sugar, rice, coconut, among others), agriculture and rural and urban waste. When they result from chemical, thermal or mechanical industrial procedures, they are called by-products, with availability throughout the world.

Already in olden days, natural fibres were used as reinforcement material in construction but not in a systematic technique; for instance, straw was used in clay bricks to control stress by drying and reducing cracking. The main purpose of the addition of natural fibres is the improvement of mechanical properties such as tensile strength, bending, impact or fatigue and better resistance to weight. These properties depend mainly by the nature of the natural fibre, the morphology of the

system, the interaction of the fibre-matrix interface and the manufacturing technology assuming its use in the construction or prefabricated materials. The addition of these materials in cement and concrete matrixes has been studied extensively since the 70's, but their interest was mainly on the engineering and mechanical properties. These investigations have been carried out by adding to cement or concrete pulps or matrices, linen fibre ropes, sugarcane bagasse, coconut fibre, palm oil fibre and rice husk derivatives; It has also been carried out with coconut fibre ash, sugarcane bagasse and rice and cactus husks.

It was until this decade that other authors report the effect of including natural fibres to modulate rheological behaviour, resistance at early ages of the concrete, as well as sensitivity to contraction and cracking [33].

Regarding thermal performance, Alavez-Ramirez *et al* [21], reported the thermal conductivity of concrete panels and coconut fibre. The arrangement that was used is a multilayer where the fibre was placed right in the middle of the two prefabricated panels, the results showed, with this arrangement, the thermal conductivity decreases. Lertwattanakruk & Suntijitto [17], optimized their heat insulation, includes coconut fibre or oil palm fibre.

### **The use of agricultural by-products for cementitious applications**

Due to the increase of the industrial and housing development, the requested amount of cement and natural resources needed for its manufacturing is growing day after day the whole world around.

According to Aprianti *et al*. [14], the use of different by-products as Supplementary Cementitious Materials (SCM) helps to increase the sustainability of the cement industry. The decision of using them, depends on multiple aspects such as geographic, social, economic and politics conditions as well as others; for example, their availability, the need for homogenization or pre-processing, transportations costs. We can find different origin and characteristics of the by-products, in our research, we focused on the agricultural ones due to their availability and their variety.

In Table 1, we summarised a recent state-of-the-art regarding the utilisation of agricultural by-products as SCM; in such a table we analysed the effect of rice, sugar cane bagasse, corn, palm oil and coconut by-products in cement paste, mortars and concrete.

### **Previous coconut applications**

Table 2 summarises different physical and mechanical properties of the coconut fibre in accordance with Salcedo *et al* [22] and Pereira *et al* [35].

Table 2. Some physical and mechanical properties of the Coconut fibre.

Property						
Diameter mm	Average Diameter $\mu\text{m}$	Natural Length cm	Maximum Extensional Strain %	Shear Modulus dina/cm <sup>2</sup>	Density g/cm <sup>3</sup>	Water Absorption %
0.1-1.5	15	15-30	29	1.829	1.38 - 1.42	93.8

Mulinari *et al.* [20] conducted an alkaline treatment on the fibres previously to be added to the cementitious matrix. The natural and treated fibres were characterized by *Scanning Electron Microscopy* (SEM) to observe morphology. Cellulose characteristic peaks were identified by X-Ray Diffraction (XRD) analysis; it was demonstrated that the crystallinity index of the fibres was increased after the alkaline treatment. Additionally, Thermal Gravimetric Analysis (TGA) revealed higher thermal stability on the alkalinized fibres.

Pereira *et al.* [35] carried out SEM analysis of the transversal section of the coconut fibres. They found various unitary cells that compound the fibre; and an external layer that protects the unitary cells of the green coconut fibre, improving the shield against the attack alkali caused by the matrix cement.

We measured the rheologic behaviour of Ordinary Portland Cement (OPC) mortars. According to the technical literature, the cement paste is a plastic fluid. The Bingham model can describe its behaviour, where the parameters that characterise this model are the yield stress and the apparent viscosity [36]. Our baseline was the mortar with no addition of CFs, then we studied the effect of two different variables; a) CFs amount and b) the aspect ratio (length/diameter, AR) of the wires, the different tested samples are summarised in Table 4. We kept constant the water to cement ratio (w/c) for all the samples. In this paper we report the changes of the yield stress and the apparent viscosity for each combination and provide an explanation of the findings.

According to [37] the measurement of the rheological properties of cement pastes provides crucial information of the evolution of the cementing hydrating systems immediate of different chemical additives (optimal dosage and consequences of excessive doses), and the compatibility of various cement-fibre combinations. Rheological measurements of cement paste with addends have a great potential, they can identify precursors of possible incompatibilities before their incorporation into the concrete. This has been revisited by Mukhopadhyay and collaborators [37] and they recognized that such complex fluid behaviour has insight not only on



microstructural changes but also about the interactions between added particles, chemical additives and cement paste components.

### **Our contribution**

Based in previous works summarised in Table 1 and due to our geographical location, we determined the viability of the addition of coconut fibres during the elaboration of cement mortars. The by-product of the coconut shell is a material easily obtained in the State of Mexico. From the bibliographic review we generalised a process of obtaining them; cleaning and drying the coconut fibres, which would be added as reinforcement material. The importance of cleaning fibres is to eliminate microorganisms that could be harmful in their performance as reinforcement material affecting the mechanical properties of cement matrices in a lifetime after the maximum period of hardness development (28 days); to corroborate that the cleaning process met the prospects, samples of the coconut fibres were submitted to analysis under Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersion Spectrometry (ESD), before and after said treatment.

The coconut fibres were added to the cement pastes as will be described in section 2, this process was also adapted from the review of the literature.

In this research work, we report the apparent viscosity slopes obtained by the Bingham linear model, which is used in the study of the rheology of cement pastes [36]. In addition, we show the results of the mechanical properties of cement mortars. In all cases, the cement paste and the cement mortars added with our coconut fibres showed a better performance than the baseline sample with no addition of coconut fibres.

This research is part of a larger project mainly focused on the addition of agricultural by-products from coconut shell (exocarp), in the form of natural fibres; our main goal is to modify the thermal performance of Portland Cement Composites due to the presence of the Coconut Fibres (CF). To evaluate the feasibility of using these by-products, some physical properties of the cement paste in fresh stage must be evaluated to comprise its flowability; therefore, in this paper we will report the variation of the rheological behaviour of the paste due to the presence of the CFs.

We obtained the CFs with wire shape from the exocarp's mesocarp layer; the selected coconut species was *cocos nucifera* due to its large availability in Mexico (in 2016, near 220k tons of *cocos nucifera* were produced in the country) [38]. Furthermore, the CF is from natural origin and it has been demonstrated to provide adequate mechanical properties and good compatibility of the fibre with cementitious materials for being using as a reinforcement addition [17], [21], [18], [20], [22], [19], [24].

In Table 1 we have summarised previous works, nevertheless they reported mainly modifications of the mechanical behaviour. Hence, our contribution is the description of the cement paste added with coconut fibre, considering aspects such as the

percentage and dimensions of the fibre. It is worth to be mentioned that our whole research project deals with the feasibility of using the paste in the production of prefabricated panels with thermal insulation functions without compromising the mechanical properties and through a sustainable process. In this piece of research, we reported the rheological behaviour and compressive strength of cement composites added with these natural fibres to verify that physical and mechanical properties in both, fresh and hardened states were not comprised due to the presence of fibres.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Materials

#### 2.1.1. Cement

We used a commercially available Mexican Ordinary Portland Cement [39], [40], Table 3 shows its chemical composition.

Table 3. Main oxides composition of Ordinary Portland Cement

Oxides	%	Oxides	%
SiO <sub>2</sub>	19.9	Total Alkali	0.42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.7	C <sub>3</sub> S	67.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.48	C <sub>2</sub> S	6.3
CaO	63.10	C <sub>3</sub> A	2.2
MgO	1.7	C <sub>4</sub> AF	13.6
SO <sub>3</sub>	2.62	Loss on ignition	3.0
K <sub>2</sub> O	0.30	Include Residue	0.71
Na <sub>2</sub> O	0.23		

#### 2.1.2. Sand

We used standard grade sand for mortar manufacturing in accordance with ASTM-C-778 [41].

## 2.2. Experimental Procedures

### 2.2.1. Coconut fibres preparation

We obtained the fibres from the coconut shell, as solid residues from commercial premises; they were Alkali treated (CaO), for cleaning purposes as reported by Quintero *et al.* [22], afterwards they were dried at 65 °C ± 5 °C for 8 hours in an electric device. The fibres were stored in airtight containers to prevent them from ambient humidity. Subsequently, the fibres were cut in lengths of 1, 10 and 20 mm. The average diameter of the coconut fibres was measured from a set of 200 fibres, by image processing (ImageJ software) using a stereoscopic microscope (Stereo Microscope SM Z630). The average diameter was 1.4 mm; which agrees with the

value reported in [22]. From the length ( $l$ ) and the radius ( $r$ ) of the fibres we can define their aspect ratio (AR), as  $AR=l/r$ .

### **2.2.2. Fibre morphology and chemical composition**

The coconut fibres were characterized under SEM and EDS to observe their morphology and determine the chemical composition of the samples, with and without treatment.

### **2.2.3. Preparation of cement paste and cement mortar**

The cement mortar for the mechanical testing (cubes), was prepared in accordance with ASTM-C305 [42]; we incorporated the fibres to the mortar in an additional step, at medium speed during a one-minute period. The cement to sand proportion was 1:2.75 in accordance with ASTM-C109 [43]. The water to cement ratio was kept constant at  $w/c=0.5$ .

We conducted the mechanical mixing of cement paste following recommendations provided somewhere else [37]. We performed the procedure for mixing cement mortars then we substituted the sand by the coconut fibres to obtain the paste for the rheological testing. We considered three cement weight percentages for fibres addition (1 wt %, 2.5 wt % & 5 wt %).

### **2.2.4. Rheology Test**

Concrete at short time scales can be considered as a complex fluid; therefore, the basic principles of rheology can be applied to this material. The aim is to obtain the modification of rheological behaviour of the cement paste when fibres are added using the same mixing method at different fibre size and concentration. For the viscous inquiry, a parallel plate rheometer is used (Haake Mars III®) and the fixed parameters were: the separation between plates, the temperature and the shear rate ramp. We used a plate to plate separation of 1 mm, temperature of 20°C, 15 minutes between each test and 1000 data points for each acceleration and deceleration plots, for which the data was adjusted with the Bingham model. Five tests for every sample were performed.

The data set analysis was conducted with the RheoWin® software provided together with the experimental device.

We used 35mm parallel serrated plates, maintaining a constant temperature of 20°C for the 5 minutes of rotation in the experimental setup [37]. We conducted five repetitions for each measurement. In addition, the aspect ratio of the fibres and the percentage of addition were considered as experimental variables.

The experimental curves were fitted by the Bingham Model [37], [44], [45], [36], using the RheoWin Data Manager® software.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Aspect ratio

From both values, the aspect ratio we shown in Table 2 as follows.

Table 4. Aspect ratio for determined coconut fibre lengths.

Diameter (mm) $\pm 0.05$	Length (mm) $\pm 0.25$	Aspect Ratio (l/d) $\pm 0.002$
1.4	1	0.714
	2	1.428
	3	2.142
	5	3.571
	10	7.412
	20	14.285

#### 3.2. Chemical composition of fibres and morphology

The coconut fibres have a cylinder shape-like geometry, their surface presents roughness and protuberances, these latter characteristics can help anchoring the fibres in the cement matrix.

The coconut fibres were characterized under SEM, to observe the fibres morphology and validate the idea that they act as a reinforcing material when added into the cement paste; the analysis was complemented with EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) to study the chemical characterization of a sample without treatment. The results of SEM show in Fig. 1 (a) the coconut fibre morphology without treatment, its physics appearance shows roughness. Fig. 1 (b) shows the coconut fibre with treatment, where the small white spots are homogenous cavities throughout the coconut fibre, this morphology contributes as a positive effect in the mixing and solidification of the samples, since they would form *physical bridges* of links between the paste or cement mortar, resulting in a better agglomeration between the materials, thus fulfilling the purpose of being a reinforcing material in the cement matrix, this effect will be seen in the results obtained from the mechanical properties. The images obtained are like the images found by Mulinari *et al.* [20].

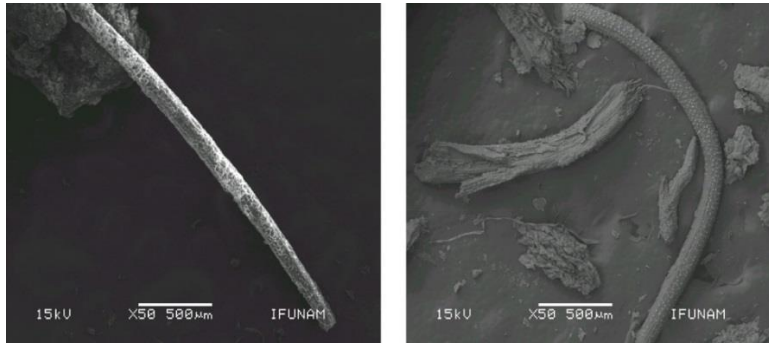


Fig. 1. Morphology of coconut fibre: (a) without treatment (b) with treatment

The EDS analysis, coconut fibre morphology without treatment, organic matter was found on the fibre surface: 64% of carbon, C, 33% of oxygen, O, and 1% potassium, K, and in minor amount sulphur, S, silicon, Si, and magnesium, Mg. Coconut fibre after treatment, under EDS analysis shows organic matter like carbon and oxygen both in less amount. An important highlight is that in the coconut fibres with treatment we did not find evidence of sulphur. The internal chemical composition of the coconut fibres was not changed, the cleaning process only eliminated the organic material not required on the surface of the fibre.

### 3.3. Mechanical Tests

Adding coconut fibres as a reinforcing material in a cement matrix, indicates that their mechanical properties are modified, as shown in Table 1. For this reason, testing for resistance to compression is important. Next, the results obtained from this mechanical test are presented. In general, the samples were made from the results of the rheology, of the characteristics with better performance in its workability and viscosity.

#### 3.3.1. Compressive strength test

We manufacture the samples using the standards ASTM C 305 [42] and C109/C109M [43]. The obtained results are showed in Figure 2:

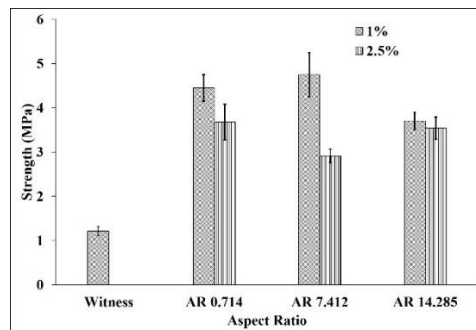


Figure 2. Compressive strength for different aspect ratios and two concentrations, compared to the witness.

### 3.4. Rheological behaviour

The process of hydration of the cement is given in various stages; it starts when water is added until it reaches solidification. The rheological analysis is performed during the first 30 minutes of hydration; when coconut fibres are added to the mixture their presence modifies the rheological response.

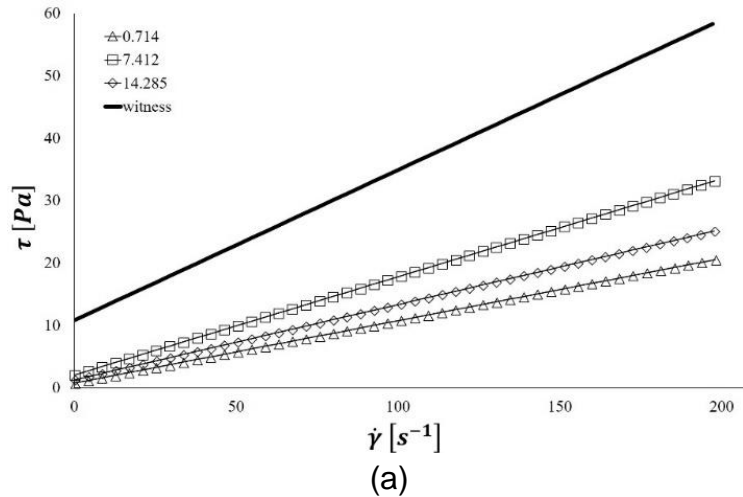
The experimental procedure gives a data set of yield stress vs shear rate; these are fitted by the Bingham rheological model. The resulting lines, shown in Figure 4, were obtained from the deceleration curve data set of the whole rheology experiment. They correspond to the lineal equation

$$\tau = \tau_o + \eta\dot{\gamma}. \quad (1)$$

Where:

$\tau$ : shear stress;  $\tau_o$ : yield stress;  $\eta$ : plastic viscosity and  $\dot{\gamma}$ : shear strain rate [44].

The results showed in Figure 4, are the curves corresponding to the cement paste and the cement paste added with coconut fibre. The graphs were obtained from the statistical analysis (moving averages) of the data generated by the rheology of twenty-one combinations, for seven AR's and three percentages of addition. These analyses identify nine cases that agree with specifications in the standards (ref); hence these are our main results, shown with respect to the control sample. Each Fig. 1a-1c keeps the percentage addition constant and shows the behaviour when varying the AR.



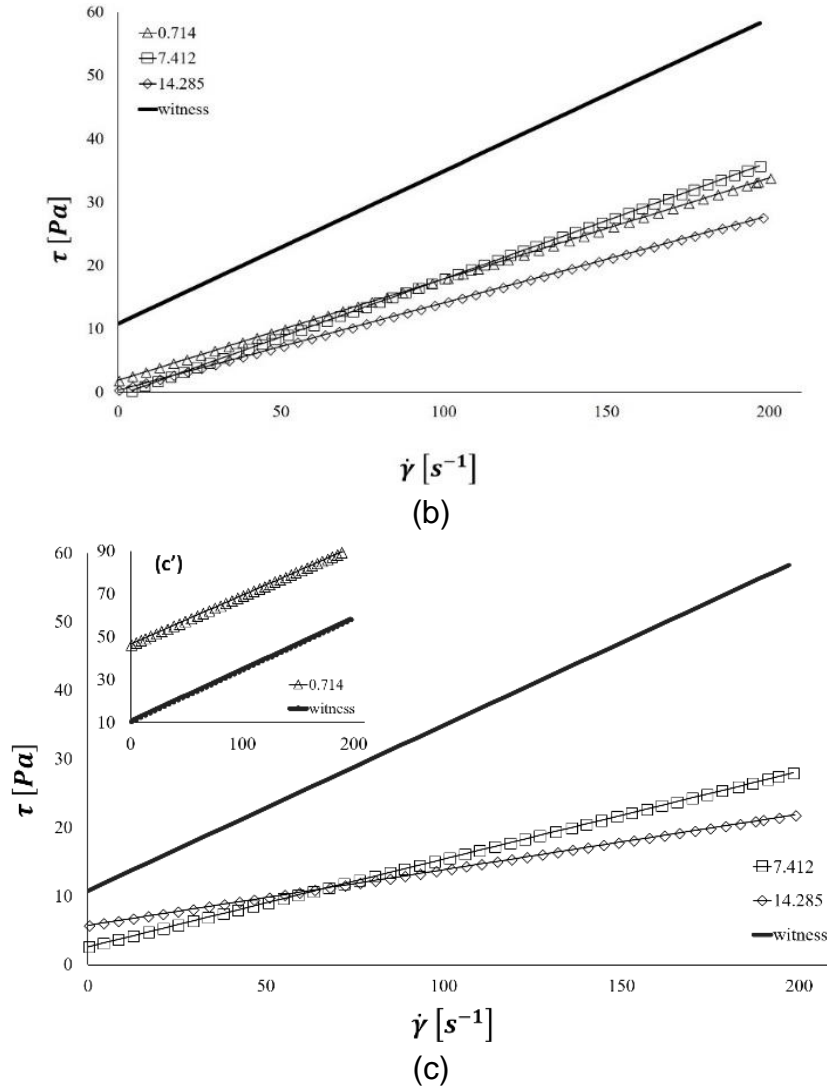


Figure 4(a-c). Rheological behaviour, adjustment by Bingham model for cement paste added with a 1%, 2.5% and 5% of coconut fibre, respectively.

The curves in Figure 4a, correspond to the case when 1% of coconut fibre is added to the cement paste. Notice should be made on the fact that for the aspect ratios 0.714, 7.412 and 14.285 the apparent viscosity is smaller than the witness sample. All apparent viscosity values are displayed in Table 5. This suggests that the coconut fibres have an ordering effect and induce a better performance in terms of the workability and fluency of the cement paste. The cut-off at  $\dot{\gamma} = 0$  represents the initial shear stress needed to start the flow, and from the same figure we can see that this value decreases when the AR increases. The relation obtained between the shear deformation speed ( $\dot{\gamma}$ ) and the shear stress ( $\tau$ ), indicates that the paste added with 1% of coconut fibre requires a minimum effort to initiate its flow, this in comparison to that of the control sample (solid line), whose initial effort of movement

is greater than 9 Pa, indicating that the cement paste added with coconut fibre has lower strength than cement paste without coconut fibre.

The plastic viscosity of the control sample, 0.216, is higher compared to any AR for a 1% of coconut fibre addition; nevertheless, there is nonlinear effect between the smallest and the highest value for AR, comparing with the intermediate one. It seems that smallest fibres coincide with the plate to plate separation and the induce increasement of the yield stress.

In Fig. 4b, for cement paste added with 2.5% of coconut fibre, the yield stress  $\tau_o$  increases when the AR increases from 7.412 to 14.285 and again the smallest value for AR shows a noticeable increase of  $\tau_o = 1.402$ .

The values of  $\tau_o$  for the AR 7.142 and 14.285 corresponding to 2.5% of addition are lower than those of 1%, this does not occur with the AR 0.714, where the  $\tau_o$  is greater for 2.5% compared to its corresponding with 1% addition.

Moreover, the lines of the three samples have points that cross over. The first intersection occurs between the line of AR 7.412 (open squares) and 14.285 (open diamonds), where the shear rate is between 0 less than  $50 \text{ s}^{-1}$ . Another crossing happens between the lines of AR 0.714 (open triangles) and 14.285 (open diamonds), where the shear rate is between 50 and  $150 \text{ s}^{-1}$ . The cause of these intersections is due to the length of the fibres since they are correlated and the percentage of addition, as well as the geometric arrangement of the coconut fibres during the rheology process.

It can be noted that the plastic viscosity for these arrangements is smaller than that of the control sample; this behaviour suggests that the coconut fibres improve the workability and the fluence of the cement paste.

Figure 4c corresponds to the cement paste with the addition of 5% of coconut fibre, for AR 7.412 (open square), AR 14.258 (open diamond), and the witness (solid line). The inset (c') shows the rheological behaviour for AR 0.714 that corresponds to a higher viscosity than the witness, it seems to be a coarse grain effect similar to the presence of sand [36], [46], [45], [37].

Yield stress values  $\tau_o$  increase from 2.041 Pa to 5.817 Pa for AR 7.412 to AR 14.285 but they are below the witness value 9.164 Pa; but at this higher concentration for a fibre size like plate to plate separation the yield stress is increased remarkably with respect to witness value. Which is an indication that it needs more effort to flow, so that its workability is negatively affected, this effect could be related to the way in which coconut fibres are accommodated (geometry within the experiment) when the shearing starts, and how they rearrange during the rheological experiment.

Once again it is observed that the initial effort so that the cement pastes added with coconut fibres begin to flow, is lower in comparison with that of the control sample. On the other hand, the plastic viscosities are lower than that of the control sample, for larger fibres. However, for the case of smaller fibres the plastic viscosity exceeds the witness's value.



Another intersection appears between the lines of AR 0.714 (open triangles) and 14.285 (open diamonds), where the shear rate ( $\dot{\gamma}$ ) is between 50 and 150 s<sup>-1</sup>, as in the previous arrangement, since the length of both fibres is correlated.

Table 5 shows the values of the initial shear stress and the plastic viscosity of the cement pastes with and without coconut fibre for the nine suitable combinations.

Table 5. Main values of the rheology of cement pastes added with coconut fibre

Additio n [%]	Aspect Ratio [mm]	$\tau_0$ [Pa]	$\eta$ [s <sup>-1</sup> ]	R
-	-	9.164	0.21 6	0.97 3
1	0.714	0.734	0.09 9	0.96 4
	7.412	2.097	0.15 6	0.99 1
	14.285	1.496	0.11 6	0.99 0
2.5	0.714	1.402	0.14 3	0.95 2
	7.412	0.112	0.17 7	0.98 9
	14.285	0.205	0.13 9	0.94 7
5	0.714	33.81 0	0.24 7	0.89 0
	7.412	2.041	0.13 0	0.92 2
	14.285	5.817	0.07 7	0.97 6

The regression curve allowed a complete analysis on the behaviour of cement paste and cement paste added with coconut fibres. The results obtained indicate that the addition of these fibres generates a positive impact in terms of the initial force of movement for 9 combinations represented in their respective graphs, since less initial force is used in comparison with the control sample, although there is an exception (AR 0.714) for the highest percentage, whose value is approximately 4 times the value of tau zero corresponding to that of the control sample.

The values of the slopes of the plastic viscosity, 5 of the 9 combinations have a lower value than that of the control sample; here it is important to mention that although

the curve belonging to AR 0.714 has a value greater than  $\tau_0$  than the control sample, its slope is a unit smaller than the same. On the other hand, there is a slope with value close to the control sample, and the other 3, its slope is slightly superior to the control sample. From where we confirm that the coconut fibres have an important effect on the viscosity of the samples.

All the results are closely related to the aspect ratio of the fibres, in the percentage of addition, in the mixing of the cement paste and the uniform incorporation of the fibres in all the cement paste, as well as in the way in which these are accommodated between the static and rotatory plate of the rheometer during this process.

This can be described in analogy with the behaviour of liquid crystals. The main characteristic of liquid crystals is that they form one or more intermediate phases when they melt, called mesophases, where the material has an ordered structure and nonetheless the mobility of a liquid. Liquid crystals are a supramolecular phenomenon that is based on the existence of weak interactions between molecules of the dipole-dipole type or dispersion forces. In this way, these interactions are strong enough to sustain the associations between molecules in a preferred orientation without losing their free movement. The complex behaviour of liquid crystals is typically associated with the presence of large and elongated molecules; this causes the molecules to prefer a parallel orientation among them. The viscosity of these compounds is lower in the direction parallel to the molecules because they need less energy to slide relative to each other along their axes than to move laterally [47]. The fibres can be interpreted as macromolecules in the cement paste and their orientation is induced by the plate to plate constraint as an external force, but when the size of the fibres is similar to the plate to plate separation the dissipative contributions increase as well as the viscosity. Hence the coconut fibres have a mechanical effect in this rheological behaviour.

Notice should be made that the coconut fibres do not have a chemical effect, only a mechanical one, because when added in the form of ropes (independent of size) they are chemically inert, so they do not react with the cement components.

With these results, and the description in a previous section, we could predict and extrapolate the behaviour of cement pastes to mortars and concretes added with coconut fibres.

#### **4. Conclusions**

A bibliographic review was carried as a framework to study and acknowledge the work of previous research teams. From this review we recognise that most report works of mechanical improvement of cement, mortar and concrete paste added with different natural fibres in different presentations (ropes, ashes, shells) and for specific crops growing in the country; nevertheless, there has not been emphasize in relating the rheological and mechanical behaviour to identify a favourable monodisperse condition for the incorporated fibre. The review is presented in Table

1, describing the pre-treatment of the fibres, the shape and percentages of addition; the type of samples, their treatment and their mechanical, thermal, and rheological tests, as well as their results.

Regarding the methodology used to obtain coconut fibre (ropes), we would recommend improving the strategy to clean and separated them efficiently. On the other hand, the cleaning process is adequate in terms of guaranteeing the elimination of non-desired organic matter and microorganisms that could affect the composition of the rope and subsequently, cause damage to the cement matrix where it will be added. This effect was corroborated with the comparison of the MEB images and the EDS analysis.

The results obtained from the compressive strength test show that the addition of coconut fibres effectively increases the mechanical performance of cement mortar added with coconut fibres.

The rheology of the cement paste determined that the viscosity of the cement paste is related to the aspect ratio of the coconut fibres added, as well as the percentage of addition. In each of the arrangements, the results for the initial cutting effort were kept below the results of the control sample, providing better handling of the cement paste, considering that  $\tau_o$  for the control sample is 9.164 Pa y and the lowest value for  $\tau_o$  es 0.112 Pa, decreasing the value of  $\tau_o$  approximately 98%. The slope of the dynamic viscosity also decreases when the coconut fibres are added, being the control 0.973 and the lowest value 0.890, decreasing by 5%, but in this case (specifically) the value of  $\tau_o$  is almost 4 times higher than that of the witness sample. This result was atypical compared to the others, it could be attributed to external causes, to the methodology of mixing the cement paste, as well as to the addition of the coconut fibres, to the aspect ratio and the percentage of addition, since these fibres are longer and their diameter is too small, we speak practically of long cylinders (in comparison with the size of the particle of the cement), and not of punctual particles as it would be in the case of AR 0.714.

With all the tests carried out, the main objective of this research work was to determine the thermal performance of hydraulic cement added with natural fibres (coconut fibre) without negatively modifying the rheological and mechanical properties of the material, all this considering the norms both national and international and contemplating that the mix arrangements in the incorporation of fibre is different from those reported in the literature, which are mentioned in Table 1.

The results presented here serve as pioneers in the rheology of cement pastes added with coarse aggregates (with respect to the grain size of the cement) and which can be extrapolated to the rheology of the mortar (cement + sand + water + coarse aggregates), and concrete (cement + sand + gravel + coarse aggregates), also to serve as a database for further research in our country and in any part of the world.

And for now, we can guarantee that the most workable paste is AR and presents the best mechanical features. Where AR presents a poor rheological behaviour and breaks for a compression lower than the witness. And the first one is highly recommended for a construction element.

### **Acknowledgements**

We appreciate the scholarship granted by CONACYT for postgraduate studies. To UAEMéx research projects with CLAVE 3752/2014 / CID and 3814/2014 / CIA for the use of scientific instruments and the hybrid solar and electric dehydrator. As well as the support of the Consolidated Academic Body of Statistical Physics and Dr. JCAA member of the Academic Body 167 Assessment of Risks and Structural Reliability for Systems and Other Engineering of the Faculty of Engineering UAEMéx.

## **V. REFERENCES**

- [1] G. C. Cordeiro, R. D. Toledo Filho, L. M. Tavares and E. M. R. Fairbain, "Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagase ashes," *Construction and Building Materials*, pp. 641-646, 2012.
- [2] S. Hesami, S. Ahmadi and M. Nematzadeh, "Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement," *Construction and Building Materials*, pp. 680-691, 2014.
- [3] A. Kumar and D. Gupta, "Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rive husk ash-soil mixtures," *Geotextiles and Geomenbranes*, pp. 1-9, 2015.
- [4] S. Kumagai and Y. Matsuo, "Composite produce from rice husk and chopped carbon fiber without using any binders," *Industrial Crops and Products*, pp. 640-647, 2013.
- [5] P. Jearanaisilawong, S. Eahkanong, B. Phungsara and A. Manonukul, "Determination of in-plane elastic properties of rice husk composite," *Materials and Desing*, pp. 55-63, 2015.
- [6] I. Rhee, Y. S. G.-O. Ahm Kim, J. Hoon Kim and H. Muramatsu, "Compressive strength sensitivity of cement mortar using rice husk-derived graphene with a high specific surface area," *Construction and Building*, pp. 189-197, 2015.

- [7] M. Frías, E. Villar and H. Savastano, "Brazilian sugar caen bagasse ashes from cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture," *Cement and Concrete Composites*, pp. 490-496, 2011.
- [8] V. G. Jiménez-Quero, F. M. León-Matínez, P. Montes-García, C. Ganoa-Tiburcio and J. G. Chacón-Nava, "Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars," *Construction and Building Materials*, pp. 691-701, 2013.
- [9] G. C. Cordeiro, R. D. Toledo Filho, L. M. Tavares and E. M. R. Fairbairn, "Pozzolanic activity and filler affect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars," *Cement and Concrete Composites*, pp. 410-418, 2008.
- [10] E. M. R. Fairbairn, B. B. Americano, G. C. Corderiro, T. P. Paula, R. D. Toledo Filho and M. M. Silvosio, "Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO2 emissions reduction and potential for carbon credits," *Journal of Environmental Management*, pp. 1864-1871, 2010.
- [11] E. V. Morales, E. Villar-Cociña, M. Frías, S. F. Santos and H. Savastano Jr., "Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation," *Cement and Concrete Composites*, pp. 22-28, 2009.
- [12] M. Frías, E. Villar-Cociña and E. Valencia-Morales, "Characterisation of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction: Clacining temperature and kinetic parameters," *Waste Management*, pp. 533-538, 2007.
- [13] C. Onésippe, N. Passe-Coutrin, F. Toro, S. Delvasto, K. Bilba and M.-A. Arsene, "Sugar cane bagasse fiber reinforced cement composite: Thermal considerations," *Composites: Part A*, pp. 549-556, 2010.
- [14] E. Aprianti, P. Shafigh, S. Bahri and J. Nodeh Farahani, "Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes- A review," *Construction and Building Materials*, pp. 176-187, 2015.
- [15] J. Cuenca, J. Rodríguez, M. Martínez-Morales, Z. Sánchez-Roldán and M. Zamorano, "Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete," *Construction and Building Materials*, pp. 702-709, 2013.
- [16] M. G. Lomelí-Ramírez, S. G. Kestur, R. Manríquez-González, S. Iwakiri, G. Bolzon de Muniz and T. Syndenstricker Flores-Sahagun, "Bio-compositeof cassava starch-green coconut fiber:Part II-Structure and properties," *Carbohydrate Polymers*, pp. 576-583, 2014.

- [17] P. Lertwattanakur and A. Suntijitto, "Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications," *Construction and Building Materials*, pp. 664-669, 2015.
- [18] Z. Tang, M. Ali and N. Chou, "Residual compressive and shear strengths of novel coconut-fibre-reinforced-concrete interlocking blocks," *Construction and Building Materials*, pp. 533-540, 2014.
- [19] M. Ramli, W. Kwan Hoe and N. Faisal Abas, "Strength and durability of coconut-fiber-reinforced concrete in aggressive environments," *Construction and Building Materials*, pp. 554-566, 2013.
- [20] D. Mulinari, C. Baptista, J. V. C. Souza and H. Voorwald, "Mechanical Properties of Coconut Fibers Reinforced Polyester Composites," *Procedia Engineering* , pp. 2074-2079, 2011.
- [21] R. Alavez-Ramirez, F. Chiñas-Castillo, V. J. Morales-Dominguez and M. Ortiz-Guzman, "Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels," *Construction and Building Materials*, pp. 425-431, 2012.
- [22] S. L. Quintero García and L. O. Gonzáles Salcedo, "Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto," *Ingeniería y Desarrollo*, pp. 134-150, 2006.
- [23] M. Ali, X. Li and N. Chou, "Experimental investigations on bond strength between coconut fibre and concrete," *Materials and Desing* , pp. 596-605, 2013.
- [24] K. Gunasekaran, R. Ramasubramani, R. Annadurai and S. Prakash Chandar, "Study on reinforced lightweight coconut shell concrete beam behavior under torsion," *Materials and Desing*, pp. 374-382, 2014.
- [25] E. Galicia Aldama, *Influencia de la composición mineralógica del cemento en la difusión de especies químicas*, Toluca, Estado de México, 2015.
- [26] W. H. F. Taylor, "Composite cements," in *Cement chemistry*, London, United Kingdom, Thomas Telford, 1997, pp. 261-263.
- [27] K. M. Breesem, F. Faris Gorashi and I. M. Abdel-Magid, "Behavior of Self-Compacting Concrete Using Different Sludge and Waste Materials– A General Overview," *International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences* , pp. 2320-4087, 2014.

- [28] M. S. Imbabi, C. Carrigan and S. McKenna, "Trends and developments in green cement and concrete technology," *International Journal of Sustainable Built Environment*, pp. 194-216, 2012.
- [29] R. J. Flatt, N. Roussel and C. R. Cheeseman, "Concrete: An eco material that needs to be improved," *Journal of the European Ceramic Society*, pp. 2787-2798, 2012.
- [30] P. Joseph and S. Tretsiakova-McNally, "Sustainable Non-Metallic Building Materials," *Sustainability*, pp. 400-427, 2010.
- [31] E. M. Gartner, "Potential improvements in cement sustainability," in *31st Cement and Concrete Science Conference*, London, United Kingdom, 2011.
- [32] F. Pelisser, A. Barcelos, D. Santos, M. Peterson and A. M. Bernardin, "Lightweight concrete production with low Portland cement consumption," *Journal of Cleaner Production*, pp. 68-74, 2012.
- [33] S. Bensalem, C. Amouri, H. Houari and M. Belachia, "Elaboration and characterization of self-compacting concrete based on local by-product," *International Journal of Engineering, Science Technology*, pp. 98-105, 2014.
- [34] B. Suhendro, "Toward green concrete for better sustainable environment," *Procedia Engineering*, pp. 305-320, 2014.
- [35] C. L. Pereira, H. Savastano Jr., J. Payá, S. F. Santos, M. V. Borrachero, J. Monzó and L. Soriano, "Use of highly reactive rice husk ash in the production of cement matrix reinforced with green coconut fiber," *Industrial Crops And Products*, pp. 88-96, 2013.
- [36] F. C. Ferraris, "Measurement of the rheological properties of cement past: a new approach," in *RILEM International Symposium*, Monterrey, México, 1999.
- [37] A. K. Mukhopadhyay and S. Jang, "Using Cement Paste Rheology to Predict Concrete Mix Design Problems: Technical Report," Technical Report Documentation Page, College Station, Texas, United States, 2009.
- [38] Á. Alcántara, "Así es como creció el jugoso negocio del coco en México," *El Financiero*, Ciudad de México, México, 2017.
- [39] CEN-EN-197-1, "Cement: Part 1. Composition, specifications and conformity criteria for common cement," CEN, Brussels, Belgium, 2000.
- [40] NMX-C-414, "Industria de la construcción-cementos hidráulicos-especificaciones y métodos de prueba," ONNCCE, S. C., Ciudad de México, México, 2004.

- [41] ASTM-C-778, "Standard Specification for Standard Sand," American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos, 2006.
- [42] ASTM-C305, "Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency," American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pensilvania, United States, 1999.
- [43] ASTM-C-109/C-109-M, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)," American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pensilvania, United States, 1999.
- [44] P. Coussot, "Introduction to the rheology complex fluid," in *Understanding the rheology of concrete*, Philadelphia, United States, Wooghead Publishing Limited, 2012, pp. 3-22.
- [45] C. Hu, F. De Larrard and O. E. Gjorv, "Rheological testing and modelling of fresh high performance," *Materials and Structure*, pp. 1-7, 1995.
- [46] N. Roussel, "Rheology of fresh concrete: from measurements to predictions of casting processes," *Materials and Structures* , pp. 1001-1012, 2007.
- [47] J. W. Goddby and G. W. Gray, *Handbook of liquid crystals*, Weinheim, Germany: VCH, 1999.



## VI. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES

Considerando el objetivo inicial del protocolo de tesis de Maestría: “*Modelar termodinámicamente la cinética de reacción del proceso de nucleación y crecimiento del cemento Portland en presencia de distintas fibras naturales*”; se logró cumplir con dicho objetivo, compluyendo de manera satisfactoria el trabajo de investigación.

Los resultados mostrados en el artículo especializado dan pie a continuar con la segunda parte de la investigación, la cual consiste en determinar el desempeño térmico paneles de mortero adicionado con fibras de coco mediante un arreglo multicapa; los paneles están fabricados con la metodología descrita en el artículo especializado, además con los porcentajes y relaciones de aspecto más viables determinados por el comportamiento reológico de la pasta de cemento.

Los datos de los experimentos de desempeño térmico para diferentes arreglos multicapa fueron analizados, dando como principales resultados los mostrados en la Fig. 5, donde el arreglo utilizado es AR1- Testigo-Testigo, Testigo-Testigo- AR1 y Testigo-Testigo-Testigo.

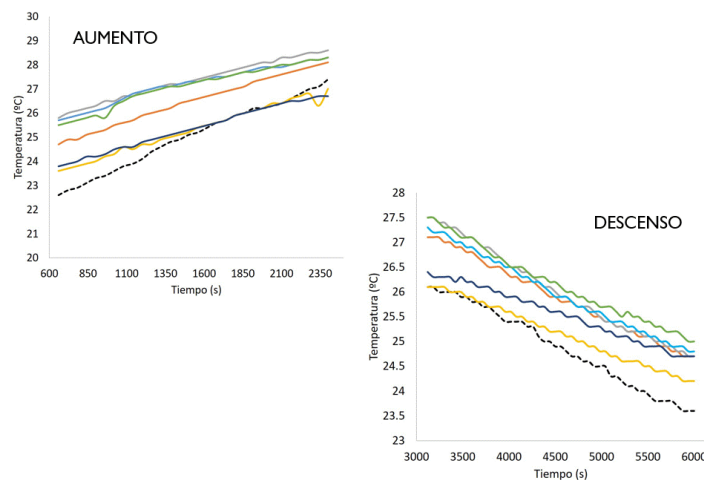


Fig. 5 Comportamiento térmico de diferentes arreglos multicapa de paneles de mortero adicionado con fibra de coco

Se observa que el desempeño térmico, en los diferentes arreglos tienen tendencia similar. El aumento (transferencia) y el descenso (cedencia) de temperatura al colocar el panel adicionado con fibra de coco es ligeramente superior a los valores del arreglo *testigo* (línea punteada). Esto indica que el AR y % de adición de la fibra de coco en el mortero son factores determinantes para un modificar su desempeño térmico. Por tratarse de un sistema que se incluirá como diseño industrial no se

pueden dar más detalles en este manuscrito. De esta manera se alcanza a cumplir el objetivo principal, concluyendo así satisfactoriamente la investigación.

Estos resultados también son contemplados para la escritura de un siguiente artículo donde se destacará la ecuación exotérmica de la evolución del proceso de nucleación de la hidratación del concreto y de esta manera generar un mayor conocimiento termodinámico de dicho proceso.

La originalidad del trabajo radica en estudios pioneros de reología en pastas de cemento adicionado con fibra de coco, y del desempeño térmico en arreglo multicapa modulados por la adición de fibras de coco en paneles de mortero, y a partir de esto modelizar el proceso de hidratación de la pasta de cemento y del concreto en presencia de fibras naturales, por lo que además de ser una investigación de grado, se abre un nuevo camino al desarrollo de más investigaciones y aplicaciones en la industria de la construcción aprovechando los recursos catalogados como desechos industriales o agroindustriales, fomentando la sustentabilidad del país.

Una perspectiva inmediata es la solicitud de la patente del proceso de adición de las fibras de coco, y de los paneles adicionados con fibra de coco. Dichos paneles servirán como intercambiadores de calor.

Las técnicas aprendidas durante la maestría son varias: el manejo del reómetro y del software de manejo de datos; interpretación de las micrografías del SEM, así como el análisis del EDS; utilización del microscopio biológico; y el conocimiento y aplicación de normas de concreto nacionales e internacionales.

## VII. LITERATURA CITADA

- [1] Juárez Alvarado, César Antonio. Concretos base cemento Portland con fibras naturales (Agave Lechuguilla), como materiales para construcción en México; Tesis de Doctorado en Ingeniería con Especialidad en Materiales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Junio, 2002.
- [2] Juárez Alvarado César A., Rodríguez López Patricia, Rivera Villarreal Raymundo, Rechy de Von Roth Ma. de los Ángeles; "Uso de fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto"; Ingenierías, Vol. VII, No. 22; Enero-marzo 2004; pp. 7-19.
- [3] Reyes Bañuelos, Uriel Isaac; Concreto reforzado con fibra de bagazo de caña; Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil; Universidad Veracruzana; Xalapa Enríquez, Veracruz, 2008.
- [4] Taylor H. F. W., Cement Chemistry; Ed. Thomas Telford. 2nd edition; 1997
- [5] NORMA Oficial Mexicana NOM-018-ENER-2011. (2012) Aislantes térmicos para edificaciones. Características y métodos de prueba. México. 2012.
- [6] Galicia A, E. (2013). Influencia de la composición mineralógica del cemento en la difusión de especies químicas. Tesis de Licenciatura en Física. Universidad Autónoma del Estado de México.
- [7] Osorio S., J. A., Varon A., F., Herrera M., J. A. (2007). Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. Dyna, Año 74, No. 153, pp. 69-79. Medellin, noviembre de 2007. ISSN 0012-7353
- [8] Juárez C., Valdez P., Durán A. (2004). Fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en materiales de construcción. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 19 N°2, agosto del 2004 [www.ing.puc.cl/ric.](http://www.ing.puc.cl/ric/), pp. 83-92
- [9] Sabanés H., M. A. (2013). Uso de no tejidos de fibras vegetales en matrices de cemento para materiales de construcción. Máster en Sustentabilidad. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [10][http://www.feriadelasciencias.unam.mx/antecedentes/feria20/feria049\\_01\\_elaboracion\\_de\\_material\\_para\\_la\\_construccion\\_de\\_pa.pdf](http://www.feriadelasciencias.unam.mx/antecedentes/feria20/feria049_01_elaboracion_de_material_para_la_construccion_de_pa.pdf)
- [11] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2011). Agricultura y ganadería: Ganadería. El sector alimentario en México 2011. (pp. 35-76). ISBN: 0188-8374.
- [12] Fondo de Fomento Agropecuario del Estado de Michoacán. Comité Técnico Estatal de Evaluación Proyecto: Diagnostico Sectorial. El Sistema Producto Cocotero en Michoacán Bases y Estrategias para Mejorar su Competitividad. SAGARPA.  
[http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/michoacan/Lists/Evaluaciones%20Externas1/Attachments/39/compt\\_coco.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/michoacan/Lists/Evaluaciones%20Externas1/Attachments/39/compt_coco.pdf)
- [13] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2007) Atlas Agropecuario de México: Censo Agropecuario 2007.

[http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/agropecuario/2007/atlas\\_agrop/Mex/AtlasagrMex1.pdf](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/agropecuario/2007/atlas_agrop/Mex/AtlasagrMex1.pdf)

- [14] Paricaguán M., B. M. (2015). Contribución al estudio del comportamiento mecánico y fisicoquímico del concreto reforzado con fibras naturales de coco y bagazo de caña de azúcar para su uso en construcción. Tesis de Doctorado en Ingeniería Química. Universidad de Carabobo.
- [15] Quintero G., S. L.; González S., L. O. (2006). Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Ingeniería y Desarrollo. Núm. 20; pp. 134-150. Universidad del Norte Barranquilla, Colombia.
- [16] Ali, M.; Liu, A.; Sou, H.; Chouw, N., (2012). Mechanical and dynamics properties of coconut fibre reinforced concrete. Construction and building Materials (no.30). pp. 814-825
- [17] Ali, M.; Li, X.; Chouw, N. (2013). Experimental investigations on bond strength between coconut fibre and concrete. Materials and Design (no. 44). pp. 596-605.
- [18] Lertwattanaruk, P.; Suntijitto, A. (2015). Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. Construction and Building Material (no. 94). pp. 664-669.
- [19] Rhee, I.; Kim, Y. A.; Shin, G.; Kim, J. H.; Muramatsu H. (2015). Compressive strength sensitivity of cement mortar using rice husk-derived grapheme with a high specific surface area. Construction and Building Materials (no. 96). pp. 189-197.
- [20] Kumar, A.; Gupta, D. (2015). Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash-soil mixtures. Geotextiles and Geomembranas. pp. 1-9.
- [21] R. Fairbairn, E. M.; B. Americano, B.; C. Cordeiro, G.; P. Paula, T.; Toledo F., R. D.; M. Silvano, M. (2010). Cement replacement by sugar bagasse ash: CO2 emissions reduction and potential for carbon credits. Journal of Environmental Management (no. 91). pp. 1864-1871.
- [22] Jiménez-Quero, V. G.; León-Martínez, F. M.; Montes-García, P.; Ganoa-Tiburcio, C.; Chacón-Nava, J. G. (2013). Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars. Constructions and Building Materials (no. 40). pp. 691-701.
- [23] Frias, M.; Villar, E.; Savastano H. (2011). Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. Cement and Concrete Composites (no. 33). pp. 490-496.
- [24] Setyowati, E. (2014). Eco-Building material of styrofoam waste and sugar industry fly-ash based on nano-technology. Procedia Environmental Sciences (no. 20). pp. 245-253.
- [25] Evans, S. L.; Kahn-Jetter, Z.; Frenz, C.; Pancrudo, J.; Lagrazon, K. (2001). Compressive/tensile stresses and lignified cells as resistance components in joints between cladodes of *Opuntia laevis* (Cactaceae): responses to applied stresses. Environmental and Experimental Botany (no. 46). pp. 47-53

- [26] Levi, E. (1991). Elementos de Mecánica del Medio Continuo. (pp. 25-32). México. Editorial LIMUSA. ISBN: 968-18-0609-3
- [27] Pedraza B., B. I. (2015). La reología en el proceso de microfluidéz en pastas de mortero de cementos Portland mexicano. Tesis de Licenciatura en Física. Universidad Autónoma del Estado de México
- [28] F. Ferraris, C. (1999). Measurement of the rheological properties of cement paste: a new approach. Role and Admixtures in High Performance Concrete, RILEM International Symposium. pp.333-342.
- [29][https://www.uam.es/docencia/revero00/docs/velocidad\\_de\\_reaccion2.pdf](https://www.uam.es/docencia/revero00/docs/velocidad_de_reaccion2.pdf)
- [30] Glasstone, S. (1979). Primero y Segundo Principio de la Termodinámica. (2da Ed.). Tratado de Química Física. (pp. 172-175; 184-186; 192; 195-197). Estados Unidos. Editorial Aguilar. ISBN: 84-03-20058-7
- [31] García-Colín S., L. (1900). Potenciales Termodinámicos. Relaciones de Maxwell. Método Grafico. (4ta Ed.). Introducción a la Termodinámica Clásica. (pp. 136.137). México. Editorial Trillas. ISBN: 968-24-3881-0
- [32] Levine, Ira N. (2004). Funciones Termodinámicas Normales de Reacción. (5ta Ed.). Físicoquímica. Vol. I. España. Editorial McGRAW-HILL. ISBN: 84-481-3786-8.
- [33] Villa F., E. (2015). Relación de microestructura mecánica contra posición química de morteros de cementos Portland mexicanos. Tesis de Licenciatura en Física. Universidad Autónoma del Estado de México.
- [34] Thomas, J. J. (2007). A new approach to modeling the nucleation and growth kinetics of tricalcium silicate hydration. The American Ceramic Society. vol 90 (no.10). pp. 3282-3288.
- [35] K. Mukhopadhyay A.; Jang S. (2009). Using cement paste rheology to predict concrete mix design problems: technical report. <http://tti.tamu.edu/documents/0-5820.pdf>
- [36] Juárez Alvarado, César Antonio. Concretos base cemento Portland con fibras naturales (Agave Lechuguilla), como materiales para construcción en México; Tesis de Doctorado en Ingeniería con Especialidad en Materiales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Junio, 2002.
- [37] Juárez Alvarado César A., Rodríguez López Patricia, Rivera Villarreal Raymundo, Rechy de Von Roth Ma. de los Ángeles; "Uso de fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en concreto"; Ingenierías, Vol. VII, No. 22; Enero-marzo 2004; pp. 7-19.
- [38] Reyes Bañuelos, Uriel Isaac; Concreto reforzado con fibra de bagazo de caña; Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil; Universidad Veracruzana; Xalapa Enríquez, Veracruz, 2008.
- [39] Taylor H. F. W., Cement Chemistry; Ed. Thomas Telford. 2nd edition; 1997
- [40] NORMA Oficial Mexicana NOM-018-ENER-2011. (2012) Aislantes térmicos para edificaciones. Características y métodos de prueba. México. 2012.

- [41] Galicia A, E. (2013). Influencia de la composición mineralógica del cemento en la difusión de especies químicas. Tesis de Licenciatura en Física. Universidad Autónoma del Estado de México.
- [42] Osorio S., J. A., Varon A., F., Herrera M., J. A. (2007). Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. Dyna, Año 74, No. 153, pp. 69-79. Medellin, noviembre de 2007. ISSN 0012-7353
- [43] Juárez C., Valdez P., Durán A. (2004). Fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en materiales de construcción. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 19 N°2, agosto del 2004 [www.ing.puc.cl/ric.](http://www.ing.puc.cl/ric/), pp. 83-92
- [44] Sabanés H., M. A. (2013). Uso de no tejidos de fibras vegetales en matrices de cemento para materiales de construcción. Máster en Sustentabilidad. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [45][http://www.feriadelasciencias.unam.mx/antiores/feria20/feria049\\_01\\_elaboracion\\_de\\_material\\_para\\_la\\_construccion\\_de\\_pa.pdf](http://www.feriadelasciencias.unam.mx/antiores/feria20/feria049_01_elaboracion_de_material_para_la_construccion_de_pa.pdf)
- [46] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2011). Agricultura y ganadería: Ganadería. El sector alimentario en México 2011. (pp. 35-76). ISBN: 0188-8374.
- [47] Fondo de Fomento Agropecuario del Estado de Michoacán. Comité Técnico Estatal de Evaluación Proyecto: Diagnostico Sectorial. El Sistema Producto Cocotero en Michoacán Bases y Estrategias para Mejorar su Competitividad. SAGARPA.  
[http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/michoacan/Lists/Evaluaciones%20Externas1/Attachments/39/compt\\_coco.pdf](http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/michoacan/Lists/Evaluaciones%20Externas1/Attachments/39/compt_coco.pdf)
- [48] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2007) Atlas Agropecuario de México: Censo Agropecuario 2007.  
[http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/agropecuario/2007/atlas\\_agrop/Mex/AtlasagrMex1.pdf](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/agropecuario/2007/atlas_agrop/Mex/AtlasagrMex1.pdf)
- [49] Paricaguán M., B. M. (2015). Contribución al estudio del comportamiento mecánico y fisicoquímico del concreto reforzado con fibras naturales de coco y bagazo de caña de azúcar para su uso en construcción. Tesis de Doctorado en Ingeniería Química. Universidad de Carabobo.
- [50] Quintero G., S. L.; González S., L. O. (2006). Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Ingeniería y Desarrollo. Núm. 20; pp. 134-150. Universidad del Norte Barranquilla, Colombia.
- [51] Ali, M.; Liu, A.; Sou, H.; Chouw, N., (2012). Mechanical and dynamics properties of coconut fibre reinforced concrete. Construction and building Materials (no.30). pp. 814-825
- [52] Ali, M.; Li, X.; Chouw, N. (2013). Experimental investigations on bond strength between coconut fibre and concrete. Materials and Design (no. 44). pp. 596-605.
- [53] Lertwattanaruk, P.; Suntijitto, A. (2015). Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. Construction and Building Material (no. 94). pp. 664-669.

- [54] Rhee, I.; Kim, Y. A.; Shin, G.; Kim, J. H.; Muramatsu H. (2015). Compressive strength sensitivity of cement mortar using rice husk-derived grapheme with a high specific surface area. *Construction and Building Materials* (no. 96). pp. 189-197.
- [55] Kumar, A.; Gupta, D. (2015). Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash-soil mixtures. *Geotextiles and Geomembranas*. pp. 1-9.
- [56] R. Fairbairn, E. M.; B. Americano, B.; C. Cordeiro, G.; P. Paula, T.; Toledo F., R. D.; M. Silvano, M. (2010). Cement replacement by sugar bagasse ash: CO<sub>2</sub> emissions reduction and potential for carbon credits. *Journal of Environmental Management* (no. 91). pp. 1864-1871.
- [57] Jiménez-Quero, V. G.; León-Martínez, F. M.; Montes-García, P.; Ganoa-Tiburcio, C.; Chacón-Nava, J. G. (2013). Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars. *Constructions and Building Materials* (no. 40). pp. 691-701.
- [58] Frias, M.; Villar, E.; Savastano H. (2011). Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. *Cement and Concrete Composites* (no. 33). pp. 490-496.
- [59] Setyowati, E. (2014). Eco-Building material of styrofoam waste and sugar industry fly-ash based on nano-technology. *Procedia Environmental Sciences* (no. 20). pp. 245-253.
- [60] Evans, S. L.; Kahn-Jetter, Z.; Frenz, C.; Pancrudo, J.; Lagrazon, K. (2001). Compressive/tensile stresses and lignified cells as resistance components in joints between cladodes of *Opuntia laevis* (Cactaceae): responses to applied stresses. *Environmental and Experimental Botany* (no. 46). pp. 47-53
- [61] Levi, E. (1991). *Elementos de Mecánica del Medio Continuo*. (pp. 25-32). México. Editorial LIMUSA. ISBN: 968-18-0609-3
- [62] Pedraza B., B. I. (2015). La reología en el proceso de microfluidéz en pastas de mortero de cementos Portland mexicano. Tesis de Licenciatura en Física. Universidad Autónoma del Estado de México
- [63] F. Ferraris, C. (1999). Measurement of the rheological properties of cement paste: a new approach. *Role and Admixtures in High Performance Concrete*, RILEM International Symposium. pp.333-342.
- [64][https://www.uam.es/docencia/revero00/docs/velocidad\\_de\\_reaccion2.pdf](https://www.uam.es/docencia/revero00/docs/velocidad_de_reaccion2.pdf)
- [30] Glasstone, S. (1979). *Primero y Segundo Principio de la Termodinámica*. (2da Ed.). *Tratado de Química Física*. (pp. 172-175; 184-186; 192; 195-197). Estados Unidos. Editorial Aguilar. ISBN: 84-03-20058-7
- [65] García-Colín S., L. (1900). *Potenciales Termodinámicos. Relaciones de Maxwell. Método Grafico*. (4ta Ed.). *Introducción a la Termodinámica Clásica*. (pp. 136.137). México. Editorial Trillas. ISBN: 968-24-3881-0
- [66] Levine, Ira N. (2004). *Funciones Termodinámicas Normales de Reacción*. (5ta Ed.). *Fisicoquímica. Vol. I*. España. Editorial McGRAW-HILL. ISBN: 84-481-3786-8.

- [67] Villa F., E. (2015). Relación de microestructura mecánica contra posición química de morteros de cementos Portland mexicanos. Tesis de Licenciatura en Física. Universidad Autónoma del Estado de México.
- [68] Thomas, J. J. (2007). A new approach to modeling the nucleation and growth kinetics of tricalcium silicate hydration. The American Ceramic Society. vol 90 (no.10). pp. 3282-3288.
- [69] K. Mukhopadhyay A.; Jang S. (2009). Using cement paste rheology to predict concrete mix design problems: technical report. <http://tti.tamu.edu/documents/0-5820.pdf>
- [70] W. Goddby, J., & W. Gray, G. (1999). Handbook of liquid crystals. Weinheim, Germany: VCH.
- [71] Masoero, E., Del Gado, E., M. Pellenq, R. J., J. Ulm, F., & Yip, S. (2012). Nanostructure and Nano-mechanics of Cement: Polydisperse Colloidal Packing. Physical Review Letters, 1-4.
- [72] Bustos, V., & Mayorga, M. (2010). Non-equilibrium thermodynamics of magnetic colloids with tunable dipolar interactions. Non-Equilibrium Thermodynamics, 35-50.



## VIII. ANEXO

### Otros productos y actividades formativas durante el posgrado

A continuación se detalla brevemente actividades realizadas durante la Maestría:

Presente un cartel registrado como *“Natural fibers as a sustainable option for cement composites”* en el 6th Integrative Biology Workshop, Collaboration Network for the Research in Vertebrate Comparative Ecophysiology, llevado a cabo los días 28,29 & 30 de octubre, correspondiente al semestre 2016B.

Participe en el Diplomado On-Line denominado *“Diplomado en gestión estratégica de la innovación”* impartido por CIATT, que comprende los meses de noviembre (2016) a marzo (2017), esto durante el semestre 2016B y 2017A.

Asistí al *Foro: Voces de Mujeres Mexiquenses*, realizado con motivo del Día Internacional de la Mujer (8 de Marzo de 2017) a cargo del Estado de México.

Asistí a seminarios intersemestrales sobre a Propiedad Intelectual impartidos en la Facultad de Química: *“Sinergia de la Innovación Tecnológica”* y *“Redacción de Patentes”*, así como el curso *“Forjando Innovadores Protegidos”*, llevada a cabo en la Facultad de Ciencias en el mes de agosto, correspondientes al semestre 2017B

Asistí y participe con la presentación de un cartel en el Seminario de Formación de Habilidades Profesionales con Perspectiva de Género llevado a cabo en la ciudad de Puebla del 6 al 9 de septiembre de 2017, correspondiente al semestre 2017B

Participe como coautora en cartel presentado en el LX Congreso Nacional de Física, en Nuevo León, Monterrey, correspondiente al semestre 2017B.

Asistí al curso *“Instrumentos de la Propiedad Industrial”* impartido por el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, realizado en el mes de enero, correspondiente al semestre 2018B