



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE  
MÉXICO



Facultad de Ciencias

Diseño y análisis de un metamaterial con propiedades térmicas  
modulables para incorporarlo en un sistema constructivo

TESIS POR ARTÍCULO ESPECIALIZADO

**“Designing a thermally efficient cement-based meta-  
construction element”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS

**PRESENTA**

MELISSA MARÍA MONROY HERNÁNDEZ

**COMITÉ TUTORAL**

DRA. LORENA ROMERO SALAZAR

DR. JUAN CARLOS ARTEAGA ARCOS

DR. MIGUEL MAYORGA ROJA

# VOTOS APROBATORIOS



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



PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS (FÍSICA)

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

**PRESENTE**

Nos permitimos informarle que hemos revisado la tesis por artículos especializados titulado: "**Diseño y análisis de un metamaterial con propiedades térmicas modulables para incorporarlo en un sistema constructivo**", que presenta la **Ing. Melissa María Monroy Hernández**. Dicho trabajo cuenta con nuestro Voto Aprobatorio.

**ATENTAMENTE**

**DRA. LORENA ROMERO SALAZAR**

**DR. JUAN CARLOS ARTEAGA ARCOS**

Juan C. 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 103 Acuerdo 319/MC  
c.c.p. Archivo  
PSN/bfvc

**CONSTANCIA DE  
REGISTRO DE  
PROTOCOLO DE TESIS**



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

## **CONSTANCIA**

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

**Toluca, México, a 24 de Octubre de 2016**

**Número de Registro:** MSFISI-0216

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

**Tema de Tesis de Grado:** Diseño y análisis de un metamaterial con propiedades térmicas modulables para incorporarlo en un sistema constructivo.

**Nombre del Alumno:** Monroy Hernández Melissa María

**No. de cuenta:** 0515616

### **Comité de Tutores**

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

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



**DIRECCION DE  
ESTUDIOS AVANZADOS**

**DRA. CARMEN ÁLVAREZ LOBATO  
DIRECTORA DE ESTUDIOS AVANZADOS**

**SEA**



## **PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN**

### **COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS AVANZADOS.**

**Formato de Registro de Anteproyecto de Tesis de Investigación Para los Estudios de Maestría o Doctorado en Ciencias (Biología, Física, Matemáticas).**

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

**Tema de Tesis de Grado: “Diseño y análisis de un metamaterial con propiedades térmicas modulables para incorporarlo en un sistema constructivo”**

**Nombre del Alumno: Melissa María Monroy Hernández**

**No. de cuenta: 0515616**

**Fecha de ingreso:**

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

**Nombre del Tutor Académico y Grado Universitario: Dra. Lorena Romero Salazar**

**Nombre del Tutor Académico y Grado Universitario: Dr. Juan Carlos Arteaga Arcos**

**Nombres de Tutores Adjuntos (en su caso) y Grado Universitario: Dr. Miguel Mayorga Rojas**

**Nombre de la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento asociada al tema de tesis: Procesos Irreversibles y sistemas Complejos.**

## **Introducción o Antecedentes**

La huella de carbono se refiere a la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por algún individuo, proceso o industria en particular. Uno de los factores principales para el incremento de la huella de carbono es el consumo energético. “*Los edificios comerciales y residenciales consumen casi el 40% de la energía primaria en los Estados Unidos o Europa, y casi el 30% en China*” [1], en México en 2009 representó el 16.9% del consumo energético colocando al sector de la vivienda en el tercer lugar de consumo de energía nacional [2]; y su papel en la formulación de estrategias de desarrollo sustentable es importante; ya que además de la energía utilizada en la operación de la edificación, se debe incluir la energía utilizada para el proceso de extracción de materiales (minería), la manufactura y el transporte de los materiales de construcción, así como la energía consumida durante el proceso de construcción [3]. Para lograr que una edificación sea completamente sustentable, el análisis debe comenzar desde los materiales que componen a este sistema así como la técnica que se utiliza para construirla.

En respuesta a este problema se han desarrollado sistemas que integran tecnología novedosa y técnicas de implementación que mitigan el impacto de lo antes mencionado. Las técnicas que más se utilizan actualmente son: PV (photovoltaic) y BIPV (Building Integrated Photovoltaic), turbinas eólicas, calentadores solares, bombas térmicas (bombas de calor), las cuales tienen una afectación específica dentro del sistema, pero lo que lo envuelve queda expuesto al ambiente. Así, el objetivo principal del análisis de la envolvente del sistema es limitar la cantidad de calor ganado en épocas calurosas y el perdido en tiempos fríos a través del mismo sistema; esto se refiere al aislamiento térmico, el diseño de masas térmicas, las ventanas y los ya conocidos techos verdes [3].

Por esta razón, en el presente se propone aplicar la Termodinámica Irreversible para el diseño de un elemento prefabricado el cual consiste en un sistema compuesto por un metamaterial de bajo costo utilizando un desecho industrial que permitirá conducir eficientemente el calor para lograr un sistema aislado térmicamente.

## **Definición del Problema o Tema de Investigación**

Se analiza teórica y experimentalmente el transporte de calor de una placa de cemento con inclusiones de negro de carbono, considerando las propiedades intrínsecas de un metamaterial. Dentro de este análisis se incluye el diseño del arreglo geométrico del metamaterial, el diseño del *composite* (cemento-carbón negro) y las propiedades de la interfaz; con el fin de lograr dirigir el calor a zonas estratégicas para evitar el uso excesivo de aire acondicionado dentro de una edificación.

## **Objetivos**

Objetivo general

Modelar un metamaterial susceptible de incorporarse en un elemento prefabricado de edificación, con la finalidad de incrementar la eficiencia del transporte de calor hacia el interior y al mismo tiempo controlar el aislamiento térmico del espacio así edificado.

Objetivos Particulares

Estudiar la teoría con respecto a adiciones al cemento, con la finalidad de identificar qué efectos tienen sobre la eficiencia del transporte de calor, para así incluir la mejor opción en el sistema propuesto.

Analizar teórica y experimentalmente las propiedades generales del negro de carbón y en particular su aplicación como aditivo del cemento.

Comprender las características físico-mecánicas de un *composite* y de cada uno de sus constituyentes, con la finalidad de analizar y diseñar eficientemente el *composite* que formará parte del metamaterial.

Plantear un modelo termodinámico del *composite* adaptado a configuraciones geométricas elementales de un metamaterial, y simular a través de éste, el transporte de calor a varias escalas.

Realizar el cálculo de la eficiencia térmica del sistema para un mínimo de tres geometrías.

## Marco teórico

Un metamaterial es un material diseñado y fabricado el cual no se encuentra de manera natural. Cui [4] lo define como un *composite* macroscópico de estructura periódica o no periódica, cuyas características especiales se deben tanto a su arreglo celular o geométrico así como a su composición química. Recientemente se desarrolló un metamaterial capaz de generar una zona de aislamiento térmico en torno a un objeto el cual se cubre con dicho metamaterial [5], con estas investigaciones se puede comprobar que los metamateriales pueden controlar la dirección del flujo de calor, esto es, que presentan comportamientos térmicos característicos. El tener la capacidad de controlar flujos de energía térmica en un material es un tema de gran interés ya que permite diseñar de manera más eficiente un sistema e impacta en la sustentabilidad del mismo. Por lo tanto realizar un análisis termodinámico proporciona información para predecir teóricamente, diseñar y construir materiales con aplicaciones específicas [6] como es el caso de la construcción de edificaciones sustentables, que pueden ser para vivienda la cual es una necesidad inherente a cualquier sociedad.

Este metamaterial será modelado pensando en la problemática del alto consumo energético para el desarrollo e implementación de sistemas constructivos. En la construcción moderna se utilizan elementos prefabricados que son diseñados para ser producidos en serie, esto disminuye el costo y los residuos. Con un metamaterial es posible diseñar y controlar propiedades termodinámicas y mecánicas de un sistema utilizando el mismo como un elemento prefabricado.

## **COMPOSITE**

Un *composite* es un material que está constituido por dos o más fases o elementos para incrementar las propiedades del material base o incluso para crear un material nuevo. Para considerarse como un *composite*, los elementos deben estar presentes en proporciones adecuadas para que las propiedades del mismo sean notablemente diferentes a las de solo alguno de los elementos. Generalmente el constituyente que se encuentra presente en mayor cantidad dentro del *composite*, es llamado la matriz y es del cual se desea incrementar las propiedades. Los otros elementos son conocidos como la fase de refuerzo. Las características geométricas del elemento de refuerzo son importantes para determinar la efectividad y/o las propiedades del *composite*, ya que al estar unido a la matriz, las fuerzas a las que se someta el material, las soportarán ambos constituyentes; sin embargo, el elemento de refuerzo, que normalmente es más rígido y fuerte que la matriz, es el que soporta mayor esfuerzo. Al diseñar un *composite* es ideal que sea homogéneo en un volumen importante ya que si no lo es, es más probable que se presenten grietas o fracturas [7].

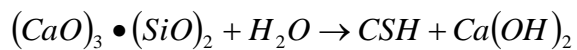
Los componentes del *composite* propuesto son:

## CEMENTO



El cemento Portland se produce por medio de la pulverización del clinker y la adición de Sulfato de Calcio. El clinker del cemento Portland está compuesto por  $(CaO)_3 \cdot (SiO)_2$  (Silicato Tricálcico/alita),  $(CaO)_2 \cdot (SiO)_2$  (Silicato Dicálcico/belita), óxido de Aluminio ( $Al_2O_3$ ), óxido de Hierro ( $FeO$ ); los cuales al ser hidratados, presentan cambios químicos y físico-mecánicos particularmente relacionados con el endurecimiento y fraguado, y se comienzan a mezclar dentro de una nanoestructura amorfa, producto de la hidratación llamada Silicato de Calcio Hidratado (CSH por sus siglas en inglés), el cual es determinante para las propiedades físico-mecánicas del cemento. La pasta que se forma durante el proceso de hidratación es un material multifase [8] lo cual implica que es sujeto de estudio del modelado multiescala [9].

Los aditivos reaccionan con el Hidróxido de Calcio ( $Ca(OH)_2$ ), lo cual es determinante para el desarrollo de sus propiedades puzolánicas, con esto se puede decir que se forma un producto con cualidades similares a las del CSH, lo cual se traduce en el incremento de las propiedades físico-mecánicas del cemento, esto es:



Se han estudiado diversos elementos aditivos para modificar de alguna forma las propiedades de los cementos en el mundo. Los aditivos usados son por ejemplo la escoria de alto horno, la cual se agrega para proteger contra la corrosión, es utilizada en la construcción de estructuras de presas [10]; la ceniza volante por sus propiedades puzolánicas es utilizada como sustituto de una parte del cemento Portland para incrementar la resistencia, durabilidad y trabajabilidad del concreto, además que, con la adición de microsilica (silica fume) se consiguen concretos con alta resistencia a la compresión, abrasión y erosión, además el deterioro y la permeabilidad se reducen [11]; con el uso de nanopartículas de óxido de zinc, se ha desarrollado un concreto con capacidades de "autolimpieza" ya que las nanopartículas de óxido de zinc trabajan como fotodegradantes de contaminantes y microorganismos [12]; también se ha estudiado la adición de polímeros como estireno, acetato de vinil entre otros con el fin de aumentar la resistencia.

Además, varios autores reportan el análisis del desempeño de desechos agroindustriales como son la ceniza de cáscara de arroz, la cual por su alto contenido de silica, se considera que tiene buenas propiedades puzolánicas, las cenizas de la palma de aceite ha mostrado alta resistencia a la compresión y alta reacción puzolánica, [13]; incluso de la ceniza de cáscara de arroz se ha logrado obtener grafeno, por medios químicos, [14]. Todos estos productos han demostrado ser altamente eficaces en el incremento y desarrollo de propiedades en el cemento, mortero y concreto. Con respecto a los agregados orgánicos el costo de adquisición del producto es bajo ya que son desechos de la agricultura, sin embargo el proceso de fabricación es lento además de que para obtener las cenizas es necesario someter el material a altas temperaturas, y aún no es comercial.

El concreto es el material mayormente consumido en la industria de la construcción, la industria cementera se vuelve altamente competitiva con respecto a la innovación tecnológica y desarrollo de nuevos productos; aunado al éxito de esta industria las consecuencias medio ambientales son graves; el proceso de fabricación del cemento, desde la extracción de las materias primas, genera emisiones de  $CO_2$  muy significativas.

La Cámara Nacional del Cemento (CANACEM) (<http://canacem.org.mx/produccion-y-consumo/>) reporta que la producción y consumo de cemento a nivel nacional en el año 2014 fue de 36.6 millones de ton y 35.2 millones de ton respectivamente esto demuestra el gran impacto social, ambiental y económico que tiene la industria cementera en México. Por esta razón es imprescindible realizar acciones para mitigar la huella de carbono asociada a las edificaciones. Una manera de hacerlo es incrementando la eficiencia energética de las edificaciones construidas con productos de cemento una vez que son habitadas.

Para definir este proyecto se ha hecho una revisión hemero y bibliográfica, identificado que hay estudios sobre el desempeño mecánico de los agregados de origen agroindustrial e industrial; además, se encontraron análisis

del desempeño de agregados derivados del carbón, como son grafito, grafeno, fibra de carbón, nanotubos de carbón, carbón negro, como aditivos o sustitutos en el cemento, por ejemplo con respecto al Óxido de Grafeno, en [15] se estudian las propiedades mecánicas del cemento; en [16] se analizan las propiedades reológicas; en [17] las propiedades de transporte. También se han estudiado ciertas propiedades al añadir carbón negro, por ejemplo, en [18] se determinan propiedades eléctricas del concreto; igualmente en [19] determinan propiedades eléctricas bajo otros parámetros. En [20] realizan una comparación entre la adición de fibra de carbono y carbón negro para analizar propiedades de resistencia y conductividad.

El grafeno, los nanotubos y la fibra de carbón si bien han demostrado tener extraordinarias propiedades e incrementar positivamente las de los productos cementantes, el costo de obtención y/o adquisición de éstos es muy elevado; sin embargo, el carbón negro se encuentra con facilidad en la industria ya que es un desecho de la combustión de productos de petróleo, además su costo de adquisición/obtención es mucho menor que el del grafeno.

## **CARBÓN NEGRO**

El carbón negro se obtiene a partir de la combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa, se considera como carbón negro a los residuos vegetales parcialmente carbonizados hasta el hollín obtenidos durante esta combustión [21].

## **MARCO METODOLÓGICO**

La matriz del composite propuesto se puede encontrar en tres fases: como polvo, como pasta y como pasta solidificada y su comportamiento debe ser analizado en cada una de estas fases; tanto en solitario como al ser mezclado con la sustitución.

Caracterización de las partículas individuales [25]

Composición: con Fluorescencia de rayos X (FRX)

Tamaño y forma: con Scanning Electron Microscope (SEM)/ Dispersión Láser (PSD)

Área Superficial: siguiendo la norma ASTM C 2014-07 en el Laboratorio de Nanotermodinámica de la Facultad de Ciencias de la UAEM

Caracterización del *composite* como fluido complejo [25]

Composición: con Fluorescencia de rayos X (FRX) Viscosidad aparente

Densidad volumétrica

Calorimetría: con Thermal Analysis (TAM III)

Caracterización del *composite* sólido [25]

Composición: con Fluorescencia de rayos X (FRX), en el Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche

Estructura Molecular: con Raman/Infrarrojo en la Escuela Superior de Física y Matemáticas del IPN

Equivalent size: con Nanocalorimetría (TAM III), en el Laboratorio de Nanotermodinámica de la Facultad de Ciencias de la UAEM

Química superficial: con SEM+EDX, en el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del IPN

Calorimetría: con Thermal Analysis (TAM III), en el Laboratorio de Nanotermodinámica de la Facultad de Ciencias de la UAEM

Densidad Técnica básica: en Laboratorio de Nanotermodinámica de la Facultad de Ciencias de la UAEM

Calor de Hidratación: con Thermal Analysis (TAM III) / Norma ASTM C186-05, en el Laboratorio de Nanotermodinámica de la Facultad de Ciencias de la UAEM

Resistencia a la compresión y Módulo de elasticidad a escala Macro: con Prensa de Compresión Controls de 150 ton de capacidad modelo Pilot4, en el Laboratorio de Nanotermodinámica de la Facultad de Ciencias de la UAEM

Módulo de elasticidad Micro: con Atomic Force Microscopy (AFM), en el Laboratorio de Nanotermodinámica de la Facultad de Ciencias de la UAEM

Propiedades Térmicas (Conductividad térmica, transferencia de calor, almacenamiento de calor): Propiedades térmicas con placas, en el Laboratorio de Nanotermodinámica de la Facultad de Ciencias de la UAEM

Transferencia de calor: con Termodinámica mesoscópica y solución apoyada en COMSOL MultiPhysics, en el Laboratorio de Nanotermodinámica de la Facultad de Ciencias de la UAEM

Como se muestra en los incisos anteriores (1-3) se utilizarán normas que son reconocidas internacionalmente las cuales tienen el fin de homologar procesos, sistemas, materiales y servicios; se utilizarán, en particular, las normas de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) las cuales se desarrollan tomando en cuenta el criterio de distintas disciplinas y de los consumidores finales para garantizar que los resultados están basados en un sustento científico y tecnológico, y que serán utilizadas para mejorar y/o garantizar la calidad de lo antes mencionado.

El trabajo experimental es esencial ya que los resultados obtenidos se utilizarán para alimentar el modelo termodinámico, para contar con una solución que describa el transporte de energía en el mismo. Se resolverán las ecuaciones de transporte acopladas en la plataforma COMSOL Multiphysics para tres opciones de colocación del composite dentro del sistema. Para esto se utilizará la termodinámica mesoscópica y parámetros específicos para el análisis térmico de una edificación, así como valores experimentales de conductividad térmica efectiva (cemento-carbón negro). Nos auxiliamos de la “*Guide to Thermal Properties of Concrete and Masonry Systems*” del *American Concrete Institute* (ACI) [26] para definir propiedades que determinan la viabilidad del sistema constructivo.

**Masa térmica o inercia térmica** describe la absorción y almacenamiento del calor en un edificio o en las paredes de una edificación; este efecto acelera o disminuye la transferencia de calor a través de las paredes de la edificación, lo cual se traduce en que una parte del calor se almacena en las paredes del edificio y otra se transfiere al interior del mismo. Como la eficiencia del sistema depende de la capacidad que tiene de almacenar el calor y de la velocidad del flujo de calor, se debe tomar en cuenta la conductividad, la absorción, emisividad, y calor específico de los materiales que componen al sistema.

**Conductividad térmica:** capacidad un elemento de transferir energía de sus moléculas a otras adyacentes.

**El Coeficiente Térmico** ( $k_c$ ) lo definen como una “*medida de la razón a la que el calor pasa perpendicularmente por un volumen unitario de un material homogéneo para una diferencia de temperatura de un grado.*” Para el concreto este coeficiente depende del tipo de agregados que se utilicen ya que cada uno de estos tiene diferentes propiedades térmicas por ejemplo el silicato tiene una conductividad térmica de  $5.8 W / m \cdot K$  en bruto, mientras que al ser incluido en productos cementantes en una cantidad <50% toma valores que van de  $1.442 W / m \cdot K$  a  $2.8263 W / m \cdot K$ ; y para >50% toma valores desde  $1.5862 W / m \cdot K$  a  $3.1724 W / m \cdot K$ . Además, en esta guía, se reportan valores de la conductividad térmica, para fines prácticos, de la pasta de cemento (cemento hidratado sin agregados), que van desde  $0.10094 W / m \cdot K$  con una densidad de  $240.45 kg / m^3$  hasta  $0.7786 W / m \cdot K$  con densidad de  $1923.6 kg / m^3$ ; para el mortero se reportan valores desde  $0.4037 W / m \cdot K$  con densidad de  $961.8 kg / m^3$  hasta  $1.9467 W / m \cdot K$  con densidad de  $2244.2 kg / m^3$ . En esta guía los autores presentan una metodología para el cálculo de la conductividad térmica en sistemas de dos fases, lo llaman el “*modelo cúbico*”, el cual se buscará comparar con el planteamiento mesoscópico y el experimental.

Existen diversos factores que afectan la eficiencia energética de la masa térmica del sistema, algunos de estos son: la difusividad térmica (que tan rápido un material cambia de temperatura), capacidad calorífica (cantidad

de calor necesario para incrementar la temperatura de cierta masa en un grado), aislamiento (en términos de la ubicación del sistema aislante con respecto a la masa de un elemento específico del sistema, por ejemplo el uso de paneles de tipo sándwich (multicapa) colocando el material aislante en el centro del mismo), la temperatura a la que se somete el sistema y la ubicación geográfica del mismo.

La metodología teórica a utilizar es la del conjunto de ecuaciones de transporte de densidad de masa, momento y energía del sistema bajo el esquema de la termodinámica irreversible. Para ello consideraremos los siguientes análisis:

*Composite* como capa externa. Aquí el flujo de calor se transporta por conducción hacia el interior del panel y la fuente de energía es la radiación solar, el *composite* se modela como un sistema no homogéneo bidimensional.

*Composite* como capa interna. Aquí el flujo de calor se transporta por conducción hacia el interior del panel y la fuente de energía es la condición interna de la edificación, el *composite* se modela como un sistema no homogéneo bidimensional.

*Composite* en sección interna de un panel. Aquí se combinarán secciones donde fluye calor (conducción y convección) por efecto del aire en el interior del panel y las multicapas de *composite* con un arreglo geométrico fijo.

Al sumar las diferentes contribuciones se fijará como restricción el mantener la temperatura de confort al interior de la edificación considerando las dimensiones a escala de una edificación real, esto último para reducir el tiempo de cómputo en la solución numérica. Con los perfiles de temperatura se construirá la eficiencia exergética del prefabricado para diferentes momentos del día y fechas en el año; esto último para determinar las condiciones óptimas de uso del metamaterial según las condiciones de radiación solar en Toluca dejando la opción de modificar los valores de radiación de otras localizaciones geográficas.

Las ecuaciones de balance de densidad de masa, momento y energía para un elemento de volumen del aire en el interior del panel son las siguientes:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left\{ -\rho \mathbf{I} + \mu [(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I})^T - \frac{2}{3} \mu (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{I}] \right\} + \mathbf{F} ; \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

$$d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (d_z \kappa \nabla T) + d_z Q + Q_H + Q_{conv} + Q_{rad}$$

Por otra parte en la fase sólida la relevante es sólo la ecuación de balance de energía

$$d_z \rho_s C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho_s C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (d_z \kappa \nabla T) + d_z \vec{J}_q + Q_{rad}$$

la difusión de calor en el *composite* será el definido por la Ley de Fourier, considerando la conductividad térmica como parámetro efectivo ( $k = k(r)$  : Conductividad térmica del *composite* que será obtenido experimentalmente)

$$\vec{J}_q = k T^2 \frac{\partial T}{\partial r}, \text{ donde } \vec{J}_q \text{ es la contribución del flujo de calor por conducción en el } \textit{composite}.$$

Cabe destacar que el análisis tanto teórico como práctico será complementado con la aplicación de las materias optativas, haciendo énfasis en el estudio de la termodinámica mesoscópica aplicada a propiedades de transporte de calor en un sistema no homogéneo [27] generalizando al caso del *composite*. Así como el estudio de las demás técnicas experimentales que complementen la caracterización del mismo.

Con lo anteriormente mencionado se integrará un modelo teórico y experimental que permita evaluar los perfiles de temperatura en el sistema, y así calcular la eficiencia térmica del metamaterial en el elemento prefabricado.

#### Referencias de protocolo

- [1] S. Deng, R. Wang and Y. Dai, "How to evaluate performance of net zero energy," *Energy*, no. 71, pp. 1-16, 2014.
- [2] M. Gobierno Federal, "Indicadores de eficiencia energética en el sector residencial," Gobierno Federal, Distrito Federal, 2011.
- [3] D. H. Li, L. Yang and J. C. Lam, "Zero energy buildings and sustainable development," *Energy*, no. 54, pp. 1-10, 2013.
- [4] J. T. Cui, R. Liu and D. R. Smith, "Introduction to Metamaterials," in *Metamaterials Theory, Design and Applications*, New York, Springer Sciences Bussiness, 2010, pp. 1-20.
- [5] R. Schittny, M. Kadic, S. Guenneau and M. Wegner, "Experiments on Transformation Thermodynamics: Molding the Flow of Heat," *Physical Review Letters (195901)*, pp. 1-5, 2013.
- [6] B. Bokstein and M. S. D. Mendeleev, *Thermodynamics & Kinetics in material science, a short course*, New York: Oxford University Press, 2005.
- [7] F. Matthews y R. R.D, *Composite Materials: Engineering and Science*, Abington Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [8] Y. Sáez de Ibarra, J. Gaitero, E. Erkizia and J. Campillo, "Atomic Force Microscopy and nanoindentation of cement paste with nanotube dispersions.," *PHYSICA.STAT.SOL* , pp. 1076-1081, 2006.
- [9] T. Karakasidis and C. Charitidis, "Multiscale modeling in nanomaterials science," *MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING C*, pp. 1082-1089, 2007.
- [10] M. Moranville-Regourde, "Cements Made From Blastfurnace Slag," in *Lea´s Chemistry of Cement and Concrete*, Oxford, Elsevier, Butterworth Heinemann, 2010, pp. 636-678.
- [11] P. Fidjestol and R. Lewis, "Microsilica as an Addition," in *Lea´s Chemistry of Cement and Concrete*, Oxford, Elsevier, Butterworth Heinemann, 2010, pp. 679-712.
- [12] T. Nochaiya, Y. Sekine, S. Choopun and A. Chaipanich, "Microstructure, characterizations, functionality and compressive strength of cement-based materials using zinc oxide nanoparticles as an additive," *Journal of Alloys and Compounds*, no. 630, pp. 1-10, 2015.
- [13] E. Aprianti, P. Shafigh, S. Bahri and J. Nodeh, "Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes- A review," *Construction and Building Materials*, no. 74, pp. 176-187, 2015.
- [14] I. Rhee, A. Yoong, G.-O. Shin, J.-H. Kim and H. Muramatsu, "Compressive strength sensitivity of cement mortar using rice husk-derived graphene with a high specific surface area," *Construction and Building Materials*, no. 96, pp. 189-197, 2015.

- [15] H. Elzbieta, E. Mijowska, R. J. Kalenczuk and M. Aleksandrak, "Nanocomposite of cement/graphene oxide-Impact on hydration kinetics and Young's modulus," *Construction and Building Materials*, no. 78, pp. 234-242, 2015.
- [16] Y. Shang, D. Zhang, Y. Chao, Y. Liu and Y. Liu, "Effect of graphene oxide on the rheological properties of cement pastes," *Construction and Building Materials*, no. 96, pp. 20-28, 2015.
- [17] A. Mohammed, J. Sanjayan, W. Duan and A. Nazari, "Incorporating graphene oxide in cement composites: A study of transport properties," *Construction and Building Materials*, no. 84, pp. 341-347, 2015.
- [18] A. Monteiro, P. Cachim and P. Costa, "Electrical properties of cement-based composites containing carbon black particles," *Materials today: Proceedings*, no. 2, pp. 193-199, 2015.
- [19] H. Li, H. Xiao and J. Ou, "Electrical property of cement-based composites filled with carbon black under long-term wet and loading condition," *Composites Science and Technology*, no. 68, pp. 2114-2119, 2008.
- [20] Y. Ding, C. Zhipei, Z. Han, Y. Zhang and F. Pacheco-Torgal, "Nano-carbon black and carbon fiber as conductive materials for the diagnosing of the damage of concrete beam," *Construction and Building Materials*, no. 43, pp. 233-241, 2013.
- [21] G. Shresna, T. S. J and S. C. W., "Black Carbon's Properties and Role in the Environment: A Comprehensive Review," 2010.
- [22] S. Hernández-López, E. Viguera-Santiago, M. Mayorga-Rojas and D. Reyes-Contreras, "Thickness effect on electric resistivity on polystyrene and carbon black- based composites," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 167, no. 1, 2009.
- [23] A. Monteiro, P. Cachim and P. Costa, "Electrical properties of cement-based composites containing carbon black particles," *Materials Today: Proceedings 2*, pp. 193-199, 2015.
- [24] Y. Wu, J.-Y. Wang and P. Monteriro, "Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings," *Construction and Building Materials* 87, pp. 100-112, 2015.
- [25] M. Werner, A. Crossley and C. Johnston, "Characterization of Nanostructured Materials," in *Handbook of Surface and Interface Analysis Methods for Problem-Solving*, Boca Raton, Florida, Taylor & Francis Group, LLC, 2009, pp. 319-350.
- [26] K. Cavanaugh, "ACI 122R-02 Guide to Thermal Properties of Concrete and Masonry Systems," American Concrete Institute, 2002.
- [27] D. Reguera, J. Vilar and J. Rubi, "The Mesoscopic dynamics of thermodynamic systems," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 109, no. 46, p. 21502-21515, 2005.
- [28] E. M. e. a. Fairbairn, "Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO<sub>2</sub> emissions reduction and potential for carbon credits," *Journal of Environmental Management*, pp. 1864-1871, 2009.
- [29] F. Capolino, *Theory and Phenomena of Metamaterials*, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2009.

- [30] W. Chan and C. Wu, "Durability of concrete with high cement replacement," *Cement and Concrete Research*, pp. 865-879, 2000.
- [31] P. M. Sherwood, "Composites," in *Handbook of Surface and Interface Analysis Methods for Problem-Solving*, Boca Raton, Florida, Taylor & Francis Group LLC, 2009, pp. 421-456.
- [32] J. F. Watts, "Adhesion Science and Technology," in *Handbook of Surface and Interface Analysis Methods for Problem-Solving*, Boca Raton, Florida, Taylor & Francis Group LLC, 2009, pp. 565-601.
- [33] B. Banerjee, *An introduction to Metamaterials and Waves in Composites*, Boca Raton, FL.: Taylor and Francis Group, LLC, 2011.
- [34] T. J. Cui, D. R. Smith and R. Lui, *Metamaterials; Theory, Design, and Applications*, New York: Springer Sciences Business Media, 2010.
- [35] S. Guenneau, C. Amra and D. Veynante, "Transformation thermodynamics: cloaking and concentrating heat flux," *Optics Express*, vol. 20, no. 7, pp. 8207-8218, 2012.
- [36] S. Guenneau, C. Amra and D. Veynante, "Transformation thermodynamics: cloaking and concentrating heat flux," *Optics Express*, vol. 20, no. 7, pp. 8207-8218, 2012.

# CARTA DE RECEPCIÓN DE ARTÍCULO



Manuscript Number: CONBUILDMAT-D-16-01433

Title: Designing a thermally efficient cement-based meta-construction element

Article Type: Research Paper

Keywords: Cement  
Building element  
Composite  
By-product  
Thermal efficiency

Corresponding Author: Dr. Juan carlos Arteaga-Arcos, Ph.D.

Corresponding Author's Institution: UAEMEX

First Author: Melissa Maria Monroy-Hernandez, M.Sc.

Order of Authors: Melissa Maria Monroy-Hernandez, M.Sc.; Harnani Tiago Yee-Madeira, Dr. rer.nat.; Gonzalo Alonso Ramos-López, Dr. rer.nat.; Miguel Mayorga Rojas, PhD.; Juan carlos Arteaga-Arcos, Ph.D.; Lorena Romero-Salazar, PhD.

Abstract: This investigation was performed to evaluate the incorporation of by-products to cement mortar to modify its thermal properties without reducing its mechanical strength. Experimental results from the characterisation of the cement-based composites are presented, these analyses were performed to consider its integration as a precast element for construction industry. The experimental characterisation includes several techniques such as Particle Size Distribution (PSD), Rheology, Thermal behaviour and Mechanical strength. We manufactured a sandwich panel with interchangeable layers; two layers made of cement mortar added with a natural by-product (microparticles or fibres) and one of normal cement mortar. We analysed several arrays and two concentrations of by-products to find the most thermally efficient system.

Suggested Reviewers: Kimberly Kurties PhD  
Georgia Institute of Technology  
kimberly.kurtis@ga.gatech.edu  
Due to her technical background on cement-composites and applications.

Jose Ivan Escalante-Garcia PhD  
CINVESTAV-SALTILLO  
ivan.escalante@cinvestav.edu.mx  
Due to his technical background on cement-composites and applications.

Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel  
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
gerardo.fajardosn@uanl.edu.mx  
Due to his technical background on cement-composites and applications.

Mohammed Imbabi PhD

# Designing a thermally efficient cement-based meta-construction element

Melissa María Monroy-Hernández <sup>a,b,c,d</sup>, Hernani Tiago Yee-Madeira <sup>e</sup>, Gonzalo Alonso Ramos-López <sup>f</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.

<sup>e</sup> Laboratorio de Espectroscopia Mössbauer y Técnicas Complementarias, ESFM-Instituto Politécnico Nacional, CDMX, Mexico.

<sup>f</sup> Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Querétaro (CICATA-Queretaro- Instituto Politécnico Nacional), Queretaro, Mexico.

\* Corresponding author. Tel.: +52 722 296 55 54 x 124

E-mail address: lors@uaemex.mx (L. Romero-Salazar), jcarteaga\_mx@yahoo.com.mx (J.C. Arteaga) & migmayorga@gmail.com (M. Mayorga)

## Highlights

- Cement-based composites that enhances or inhibits the heat flux were designed.
- The inclusion of natural by-products modifies the thermal properties of cement mortar.
- By-products microparticles improve the normal cement's Particle Size Distribution.
- Workability of cement mortar with microparticles is acceptable for practical purposes.
- Mechanical strength of Cement-based composite with natural by-products is not reduced.

## Abstract

This investigation was performed to evaluate the incorporation of by-products to cement mortar to modify its thermal properties without reducing its mechanical strength. Experimental results from the characterisation of the cement-based composites are presented, these analyses were performed to consider its integration as a precast element for construction industry. The experimental characterisation includes several techniques such as Particle Size Distribution (PDS), Rheology, Thermal behaviour and Mechanical strength. We manufactured a sandwich panel with interchangeable layers; two layers made of cement mortar added with a natural by-product (microparticles or fibres) and one of normal cement mortar. We analysed several arrays and two concentrations of by-products to find the most thermally efficient system.

Key Words: Cement, building element, composite, by-product, thermal efficiency

## 1. INTRODUCTION

One of the main factors for the increase in carbon footprint is the energy consumption, the International Energy Agency in the Technology Roadmap Energy-efficient Buildings: Heating and Cooling Equipment establishes that “both space heating and cooling as well as hot water are estimated to account for roughly half of global energy consumption in buildings” [1]; additionally in [2] says that space heating accounts for 9% of global final energy use;. Official statistics reports in Mexico [3], showed that the country's energy consumption from residential usage represented 14.26% of the total energy consumption in 2016; leading to high CO<sub>2</sub> emissions. Most residential buildings are made with concrete; an increase in population demands more housing, this translates in an increased of construction materials production and usage, from which cement stands out for being the most consumed. From

2000 to 2010 in Mexico, there was an increase of 30% in dwelling construction, of which between 70 and 90% were built with at least one element made of concrete [4]. On the other hand, it has been reported that during 2016 in Mexico the national production of cement was 40.6 million ton and the consumption 40.1 million ton [5], these numbers show the impact of the cement industry in Mexico. This problematic demand integral solutions, hence, it is important to study new materials and technologies to generate intelligent sustainable spaces, and the development of sustainable strategies in order to meet with the 2017 Roadmap for Building Energy Codes and Standards for Mexico [6] which establishes the path so that the energy consumption in Mexico is desired to decrease in 53.4% in the residential building sector by 2050. This would be possible if we analyse the Global Building Envelope (GBE) which is defined as the physical performance of the building envelope with respect to how much energy is needed to heat and cool a building [7]. For the building envelope analysis, the material of which it is built is one of the main factors for their thermal performance, thus, the development of a material which combines in a single material suitable insulating and mechanical properties would contribute to reduce both economic and environmental costs of energy over the lifetime of a building.

A cement based composite is referred to be a cement matrix with additions of micro or nanoparticles which enhances certain inherent features such as mechanical strength, durability, flexure strength, workability, amongst others. There exist several cement-based composites, for instance, the most common are blast furnace slag cement, fly ash cement and silica fume cement; and recently the use of carbon nanotubes [8, 9] and graphene [10, 11, 12, 13] to enhance mechanical and electrical properties; there have also been studies on using the so called Phase Change Materials to modify thermal properties [14, 15, 16, 17]; on the other hand, there are composites with natural additions, such as rice husk ash [18], sugar cane (straw and bagasse) [19, 20, 21, 22] [23] [24], coconut (fibre) [25] [26] [27] [28] [29] to modify thermal and mechanical properties.

Consequently, we propose a solution to help in the reduction of energy consumption caused by the processes of heating and cooling houses built with concrete. This solution is the design of a building element manufactured with a cement based composite with the addition of natural by-products with which is possible to module the thermal mass of the building -i.e. modify thermal conductivity- and to control the heat flow into the house, without reducing its mechanical strength.

## 2. METHODOLOGY

### 2.1 Theoretical methodology

From the Irreversible Thermodynamics, energy balance equation [30], we developed the evolution equation for the temperature field through a porous material with an external heat source.

$$\left[ \theta_c \rho_c C_{pc} + \theta_e \rho_e C_{pe} \right] \frac{\partial T_c}{\partial t} + \rho_c C_{pc} \bar{v}_e \cdot \nabla T_e = \nabla \cdot (\theta_c \kappa_c + \theta_e \kappa_e) \nabla T_c + (\rho Q_c) \quad (1)$$

Where:

$\theta$ : volume fraction;  $\rho$ : Density;  $C_p$ : Heat Capacity;  $\bar{v}$ : Fluid velocity field;

$\nabla T$ : Temperature Gradient;  $\kappa$ : Thermal conductivity;  $\rho Q$ : External heat source;

$\partial T_c / \partial t$ : Temperature change through time; subindexes  $c$  and  $e$  stand for the composite and external fluid's contributions.

The former equation (1) represents the case of a heating process. When the heat source is removed, the temperature field will show a cooling process towards a stationary state. A measure of this cooling process is given by entropy production.

Using this model, it was possible to identify the thermodynamic variables to be determined through experimental analyses; porosity, density and volume fraction are related to Particle Size Distribution (PSD); viscosity, density and mechanical properties are associated with rheology (Re); temperature gradients, heat capacity and thermal conductivity are linked to Thermal behaviour (Tb).

Following, we briefly describe the theoretical basis of the experimental techniques used.

### 2.1.1 Particle Size Distribution

For this analysis we applied the Rosin-Rammler-Sperling-Bennet, equation (2) [31] which represents the mass fraction of particles with diameter less than  $d$ . Using this model, and the data obtained from a commercial laser particle size apparatus (CILAS®) it is possible to determine two important parameters  $d'$  which is the particle size for which the residue is 36.79% and  $n$ , the distribution index [32] which is a measure of the spread of the particle sizes. The latter, is directly related with the packing density, "the more  $n$ , the less packing density is" [32]. The distribution index has a direct effect on the porosity, water intake and mechanical properties; it has been proven that the closer its value is to 1, the better packing density of the material; this translates in less porosity, and better compressive strength [32].

$$R(d) = 100 \cdot \exp \left[ - \left( \frac{d}{d'} \right)^n \right] \quad (1)$$

Where:

$R(d)$ : % residue by weight;  $d'$  : Particle characteristic diameter (particle size that the residue is 36.79%);  $n$ : Distribution index

### 2.1.2 Rheology

Cement paste has been proven to behave as a Bingham fluid [33], these have a characteristic yield stress which gives the rheological properties. We use the Bingham equation (3) to measure the yield stress and plastic viscosity of the cement paste samples.

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (2)$$

Where:

$\tau$ : shear stress;  $\tau_0$ : yield stress;  $\eta$ : plastic viscosity;  $\dot{\gamma}$ : shear strain rate

### 2.1.1 Thermal behaviour

According to the Irreversible Thermodynamics, the generation of entropy is defined as the irreversible variation of entropy [34, 35]. As the Linear Irreversible Thermodynamics postulates, the generation of entropy can be written as the product of forces and fluxes, for this system the heat flux is coupled to a force that is proportional to the temperature gradient, the proportionality is given by Onsager's coefficient. For comparing the cooling process for different geometries, the proportionality is suffice as follows

$$\sigma \approx \frac{1}{T^2} (\nabla T)^2 \quad (4)$$

### 2.1.2 Compressive strength

For this analysis as stated previously, we use what is established in ASTM-C-109 Standard test [36] for the determination of the compressive strength (6) of a cube made of cement mortar.

$$F = \left( \frac{P}{A} \right) \quad (5)$$

Where:

$F$  : compressive strength;  $P$  : maximum load;  $A$  : surface area

## 2.2. Experimental methodology

### 2.2.1 Materials

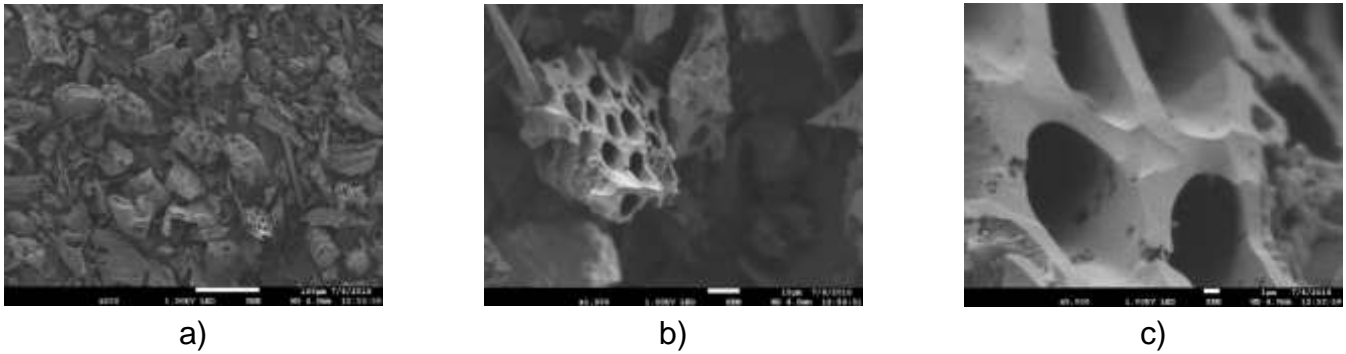
Ordinary Portland Cement Sulphate Resistant (Type II according to ASTM-C-150 [37]), its chemical composition is presented in Table 1; high range water-reducing (superplasticizer) Type F in accordance with ASTM-C-494 Standard [38], sand (ASTM-C-778) [39], water and the additions, *i.e.* natural by-products (coconut fibres and micro particles) were used.

**Table 1** Chemical composition of the cement used to prepare the samples

Loss on ignition	3.00%
Residue	7.10%
SiO <sub>2</sub>	19.90%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.70%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.48%
CaO	63.10%
MgO	1.70%
SO <sub>3</sub>	2.62%
K <sub>2</sub> O	0.30%
Na <sub>2</sub> O	0.23%
C <sub>3</sub> S	67.20%
C <sub>2</sub> S	6.30%
C <sub>3</sub> A	2.20%
C <sub>4</sub> AF	13.60%
CaSO <sub>4</sub> •2H <sub>2</sub> O	10.70%
Na <sub>2</sub> O (total alkalis)	0.42%

Microparticles were obtained from the residues of combustion of biomass and then passed through a #200 sieve. SEM analysis was performed to these particles (Fig.1) to study their morphology and physical properties.

The coconut fibres were obtained from the coconut shell, they were treated as said in [27] , once dried, they were cut into 5 cm length (Fig. 2).



**Fig. 1** SEM images of by-product microparticles used to prepare Composite 1 at different scales a) 100 μm; b) 10 μm; c) 1 μm



**Fig. 2** Clean dry coconut fibres that were used to prepare Composite 2

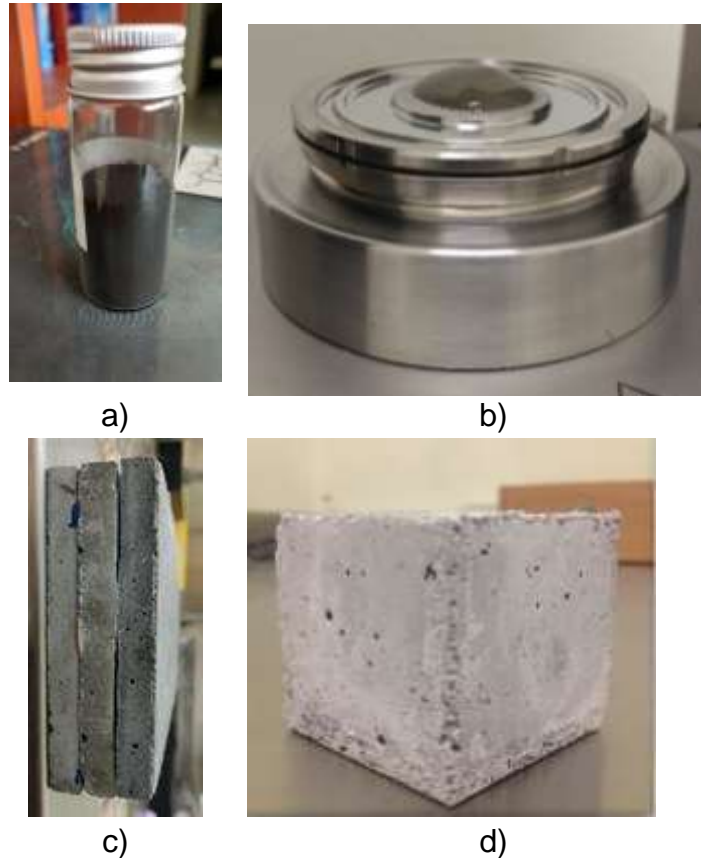
### 2.2.2. Sample preparation

We defined the material composition, which involves three cement mortars. A cement-based composite is referred to be a cement matrix with additions of particles which serve to modify certain cement inherent features such as mechanical strength, durability, workability, amongst others. We developed two different cement composites, both with normal cement mortar base ( $w/c=0.5$  constant):

- Composite 1: normal cement mortar + by-product microparticles (1% and 5%) substitution (which means a percentage of cement is replaced with another material). Due to the hygroscopic properties of the particles, we used a high range superplasticizer (Type F according to ASTM-C494 [38]) for the correct particle dispersion.
- Composite 2: cement mortar + by-product fibres (5 cm length coconut fibres) addition, maintaining the cement-fibre ratio constant as 5% of cement weight.

Consistent with each experimental procedure requirements, various types of samples were manufactured (see Table 2 and Fig. 3)

<b>Experimental analysis</b>	<b>Sample type</b>
PSD	a) Powder mixture
Rheology	b) Cement paste
Thermal behaviour	c) 16x8x1 cm plates
Compressive strength	e) 125 cm <sup>3</sup> cubes



**Fig. 3** Types of samples: a) powder mixture, b) cement paste, c) plates d) cubes

## 2.2.3 Experimental procedures

### 2.2.3.1 Particle Size Distribution

The equipment used was a CILAS 1064 ®, the cement, microparticles and 1% and 5% mixtures were dispersed in ethanol for testing; the experimental data was used as input for an algorithm developed in [40] which uses the Rossin-Ramler-Sperling-Benett equation (2) to determine  $n$  and  $d'$ , and to plot the Particle Size Distributions.



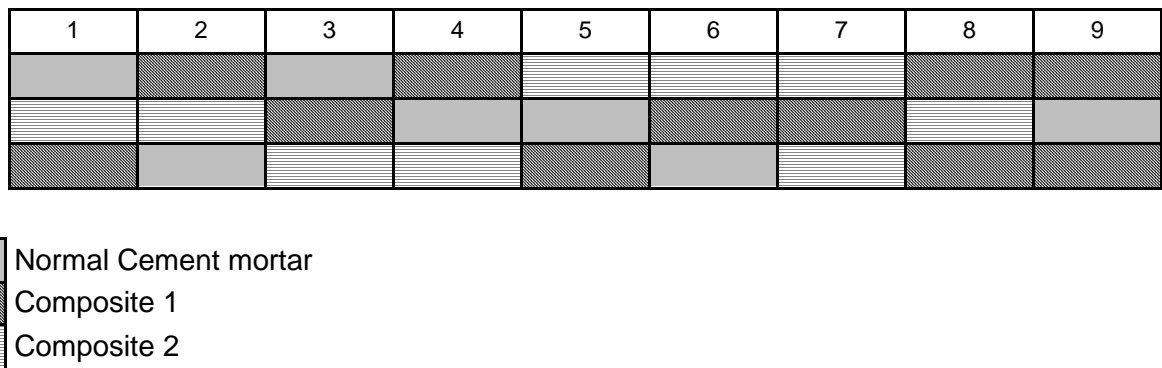
**Fig. 4** Rheometer MARS III ®. Rheometer used for the viscosity and shear stress analysis of the pastes at different concentrations of microparticles.

### 2.2.3.2 Rheology

The test was made with a MARS III ® rheometer (see Fig.4). Serrated plates of 35mm on diameter were used. The experimental parameters were kept constant, including 1mm separation distance between the plates, a 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 [41]. Five tests for every sample were performed.

### 2.2.3.3 Thermal behaviour

Based on the experimental set presented in [14] a system consisting of a box with five polystyrene walls (adiabatic system) and one (the top one) a three-plate element was assembled; the plates were interchangeable to form different arrays as seen in Fig. 5. Above this box, an infrared heat source was placed; and for measuring the outside and inside temperatures, two digital thermometers were used (see Fig. 6).



**Fig. 5** Representation of the nine arrays analysed to prove if the configuration of the plates affects the thermal behaviour of the system.

With the information obtained, heating/cooling processes and temperature difference graphs were plotted as a function of time.

According to this arrangement, the temperature field can be analysed along the z axis, since along the x and y axes the adiabatic walls which guarantee that the heating/cooling process follows through the



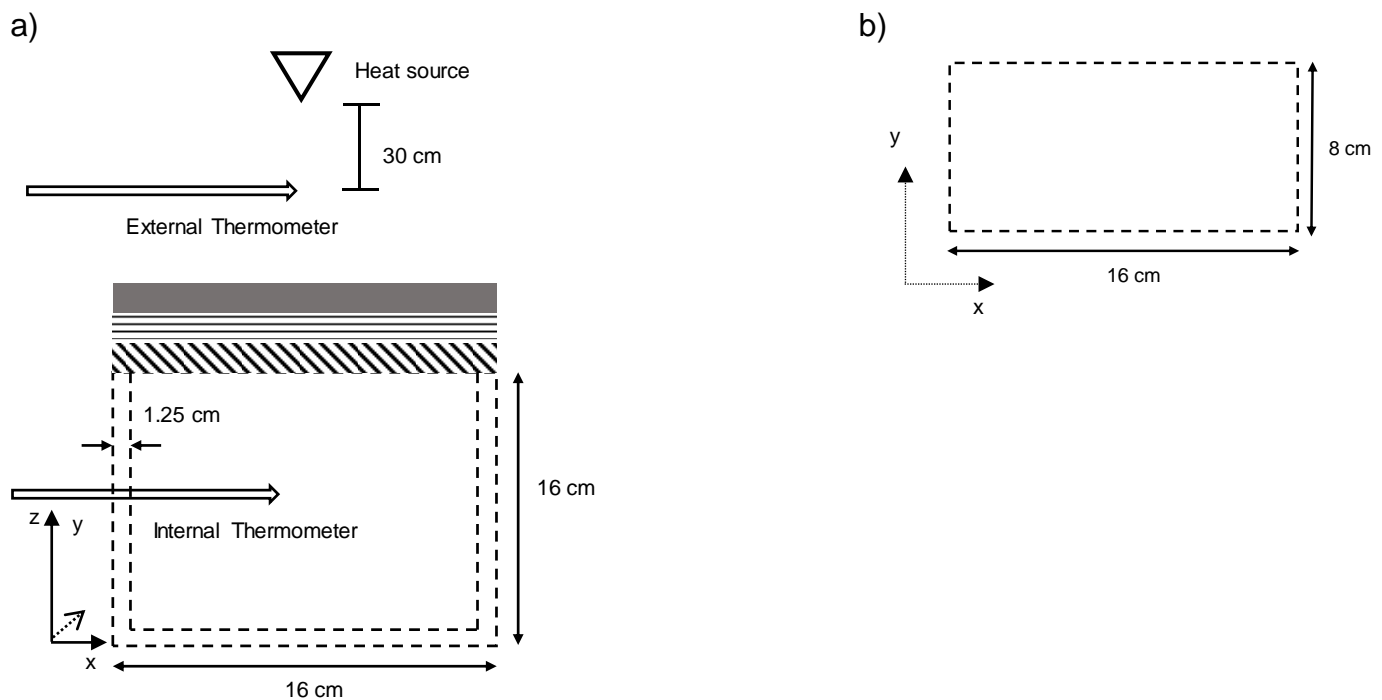
upper top. And in the linear regime we can approximate the temperature gradient along the z-axis using the first terms of a Taylor expansion as follows,

$$(\Delta T)_z \cong \frac{T_f - T_0}{\Delta z} \quad (6)$$

Where  $\Delta z = l$ ;  $T_0$  corresponds to the initial temperature during the cooling process and  $T_f$  will be the decaying temperature after a given time. Therefore, the generation of entropy along this z axis is reduced to the following expression:

$$\sigma \approx \frac{1}{T^2} (\nabla T)^2 = \frac{1}{T^2} \frac{(T_f - T_0)^2}{l^2} \quad (7)$$

In order to identify the best configuration for isolation or for absorption, a comparison between the entropy production for different arrays was made. A lower value for  $\sigma$  represents a slow cooling rate that can be interpreted as an isolated array, on the contrary a higher generation of entropy will correspond to a configuration that dissipates heat more efficiently.



**Fig. 6** Diagram of the experimental set for the thermal behaviour analysis. a) Side view of the chamber with the geometric arrangement on top; b) Bottom view of the adiabatically isolated compartment.

### 2.3.3.4 Compressive strength

We performed the compressive strength analysis according to ASTM-C-109 Standard test method [36] only for the 28 days old cubes. The test was made for three cubes of each concentration of microparticles and for the fibre composite.



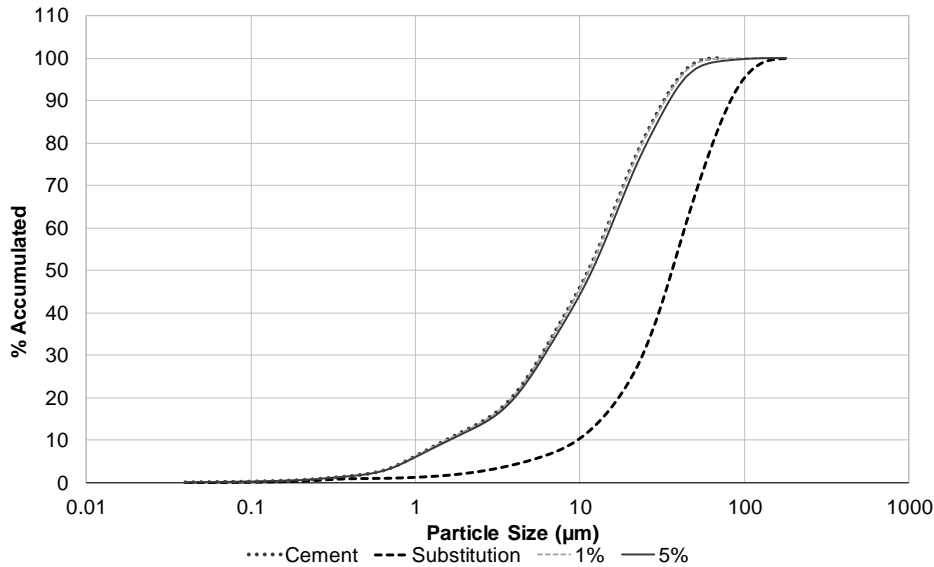
Fig. 7 Equipment used for the compressive strength test

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 Particle Size Distribution

Figure 8 shows the behaviour of the cement, microparticles and mixtures Particle Size Distribution. As it seen, the distribution of the microparticles is very different from the other samples; and the fact that the behaviour of the mixtures (1% and 5%) is not significantly far from the cement shows that the microparticle substitution should not affect the mechanical performance of the mixtures.

In Table 3, the resulting parameters of the Rosin-Ramler-Sperling-Bennet equation fitting for each sample are presented. The substitution of microparticles increases the particle characteristic diameter  $d'$  of the mixtures; on the other side, the distribution index  $n$  is also affected; for cement  $n=1.42$  and according to [32] a value closer to 1 is being pursued, which in this analysis would be sample with 5% of microparticles substitution.



**Fig. 8** Cumulative Particle Size Distribution of the cement, microparticles and mixtures (cement+ microparticles 1% and 5%) used in this analysis.

**Table 3** Results of the Particle Size Distribution analysis with Rossin-Ramler-Sperlling-Benett equation (particle characteristic diameter  $d'$  the distribution index  $n$ ) for the cement, microparticles and mixtures (cement+ microparticles 1% and 5%)

CEMENT		SUBSTITUTION		1%		5%	
$d'$ ( $\mu\text{m}$ )	11.796	$d'$ ( $\mu\text{m}$ )	54.805	$d'$ ( $\mu\text{m}$ )	14.533	$d'$ ( $\mu\text{m}$ )	16.175
$n$	1.417	$n$	1.129	$n$	1.265	$n$	1.220

### 3.2 Rheology

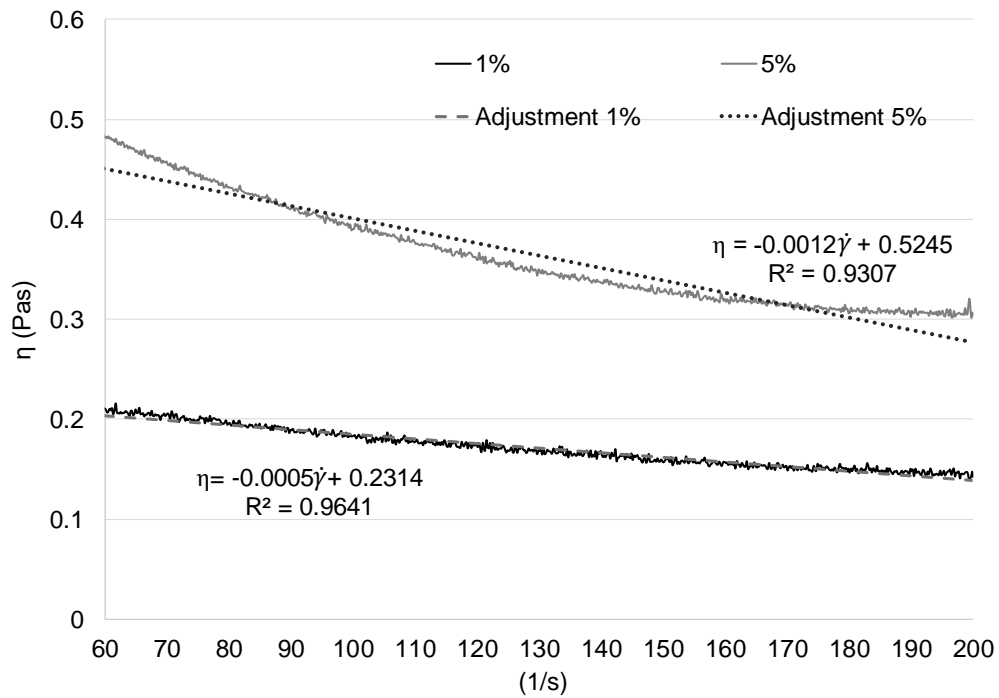
From the rheology analysis we obtained the plastic viscosity  $\eta$  and the yield stress  $\tau_o$  of each sample; these results are presented in Table 4 for the five tests performed. Both parameters grow as the amount of microparticles concentration increases. Another noticeable behavior is the time dependence of the material's plastic viscosity, which increases from test to test. The behaviour of the cement pastes here analysed is in accordance with technical literature [33]. These results also show that the increase of the substitution percentage makes the paste less workable than the witness (0%) sample.

Figures 9 and 10 show pairs of plots containing the data obtained after the adjustment with Bingham model. An adjustment line to show the linearity of the data is displayed.

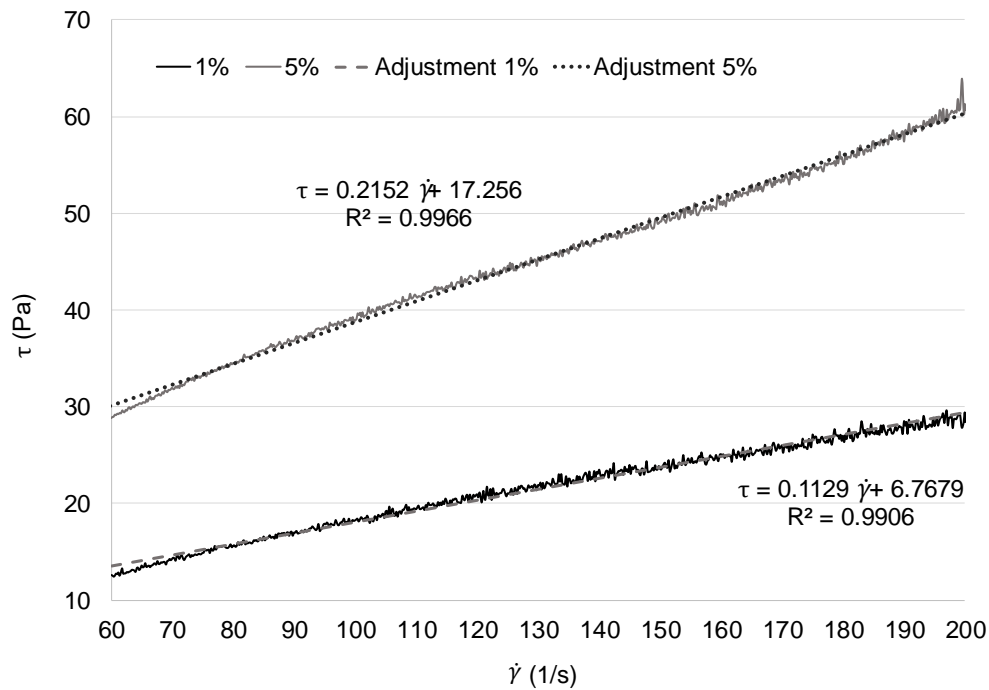
**Table 4** Shear stress and Plastic viscosity results of the five tests performed for the witness sample (0%), and for the 1% and 5% of microparticles substitution samples.

Substitution %	0%		1%		5%	
	$\eta$ [Pas]	$\tau_0$ [Pa]	$\eta$ [Pas]	$\tau_0$ [Pa]	$\eta$ [Pas]	$\tau_0$ [Pa]
Test 1	0.108	9.15	0.040	0.00	0.131	13.92

Test 2	0.109	10.72	0.068	0.72	0.211	22.48
Test 3	0.125	9.13	0.109	8.21	0.256	21.49
Test 4	0.118	13.60	0.187	12.55	0.297	21.26
Test 5	0.143	14.77	0.170	11.32	0.318	23.02



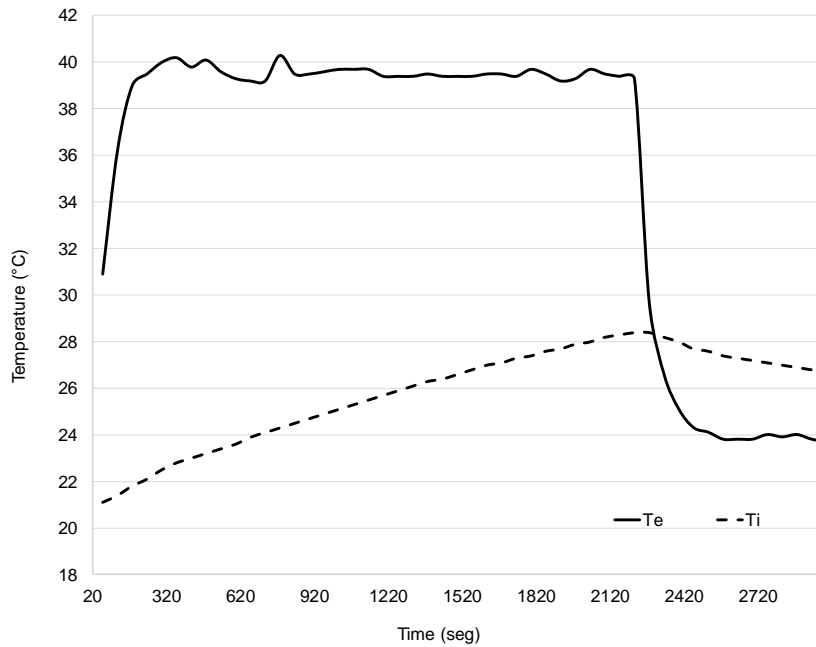
**Fig. 9** Average Plastic Viscosity of the two concentrations of microparticles by-product and linear tendency line



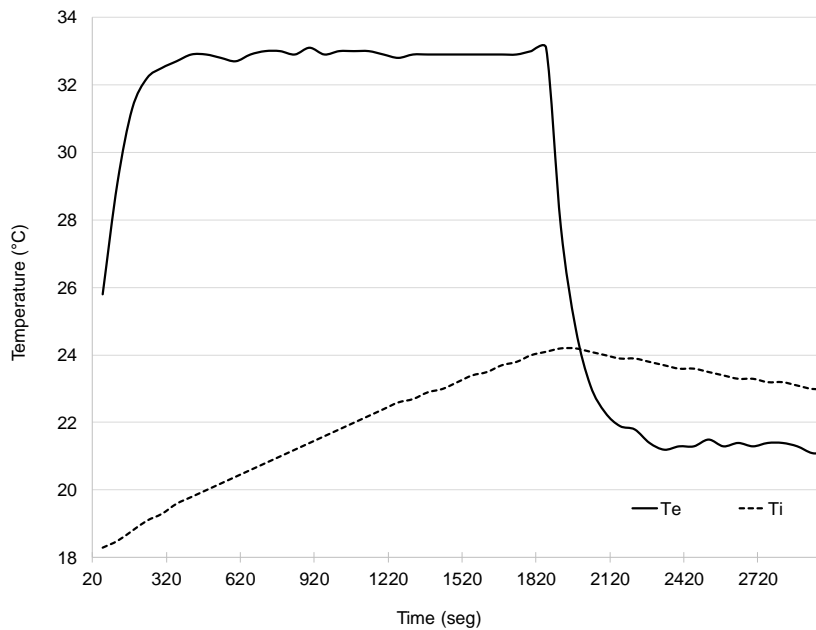
**Fig. 10** Average Shear Stress of the two concentrations of microparticles by-product and linear tendency line

#### 4. Thermal behaviour

Figures 11 and 12 show an example of the results from the complete thermal process *i.e.* heating and cooling processes for array 1 (top plate: normal cement mortar; middle plate: Composite 2; bottom plate: Composite 1), for each concentration of microparticles. Both plots demonstrate a temperature difference between the exterior (above the box) and inside the chamber. For the 1% concentration, the maximum temperature difference was recorded as 17.5 °C; and for the 5% sample as 13.2 °C. Another important aspect is the rate at which the external temperature suddenly drops when the heat source is off and how the internal temperature presents a less hasty change. This behaviour shows that the three-plate-adiabatic chamber modules the heat flow from the inside to the outside.



**Fig. 11** Complete thermal process evolution of array 1 for the 1% concentration of microparticles sample



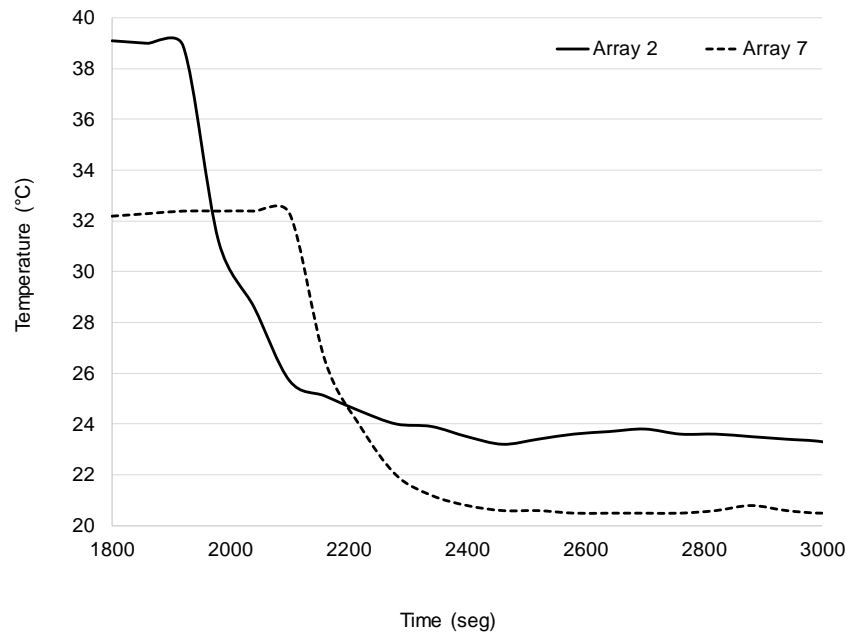
**Fig. 12** Complete thermal process evolution of array 1 for the 5% concentration of microparticles sample

For the entropy production, two temperatures were determined  $T_0$  and  $T_f$ ; where  $T_0$  is the temperature taken at the moment when the internal and external temperatures are equal, and  $T_f$  is taken considering a temperature gradient  $\Delta T=418^\circ\text{C}$ . Table 5 shows the results of the calculation of the generation of entropy using equation (7).

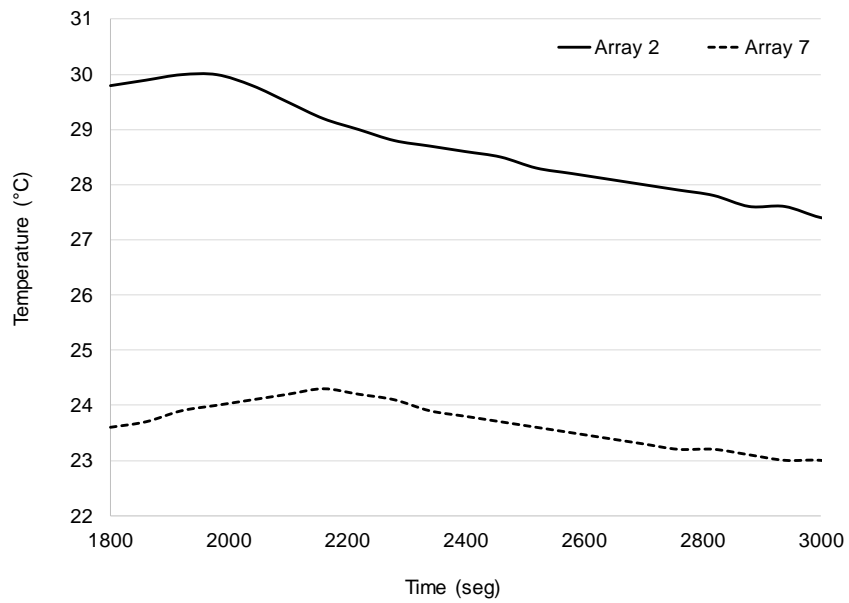
**Table 5** Generation of Entropy analysis using equation (7)

1%	Array 1	Array 2	Array 3	Array 4	Array 5	Array 6	Array 7	Array 8	Array 9
$T_0 [K]$	301.45	303.05	302.65	298.85	298.95	299.65	297.35	298.45	300.45
$T_f [K]$	297.15	296.55	296.65	293.85	293.65	293.85	293.65	293.65	294.05
$\sigma \cong [JK^{-1}kg^{-1}] \cdot 10^{-3}$	2.3	5.1	4.4	3.1	3.5	4.2	1.7	2.9	5.0
5%	Array 1	Array 2	Array 3	Array 4	Array 5	Array 6	Array 7	Array 8	Array 9
$T_0 [K]$	297.35	299.35	298.85	299.45	300.75	298.55	298.85	299.95	299.05
$T_f [K]$	294.35	295.05	294.95	294.35	294.45	294.35	294.15	294.15	294.55
$\sigma \cong [JK^{-1}kg^{-1}] \cdot 10^{-3}$	1.1	2.3	1.9	3.2	4.9	2.2	2.7	4.2	2.5

Figure 13 represents the external (a) and internal (b) temperatures during the cooling process of the arrays that obtained the maximum and minimum production of entropy for the 1% sample.



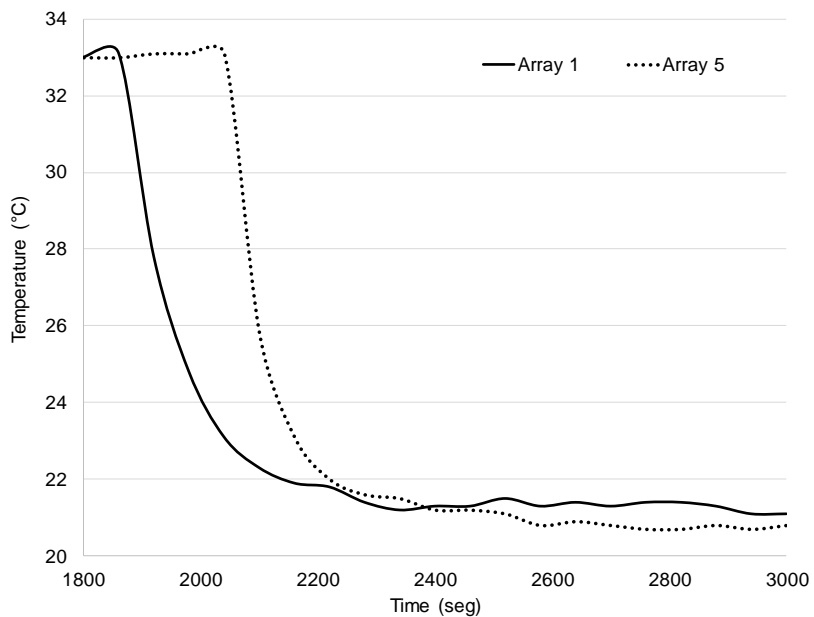
a)



b)

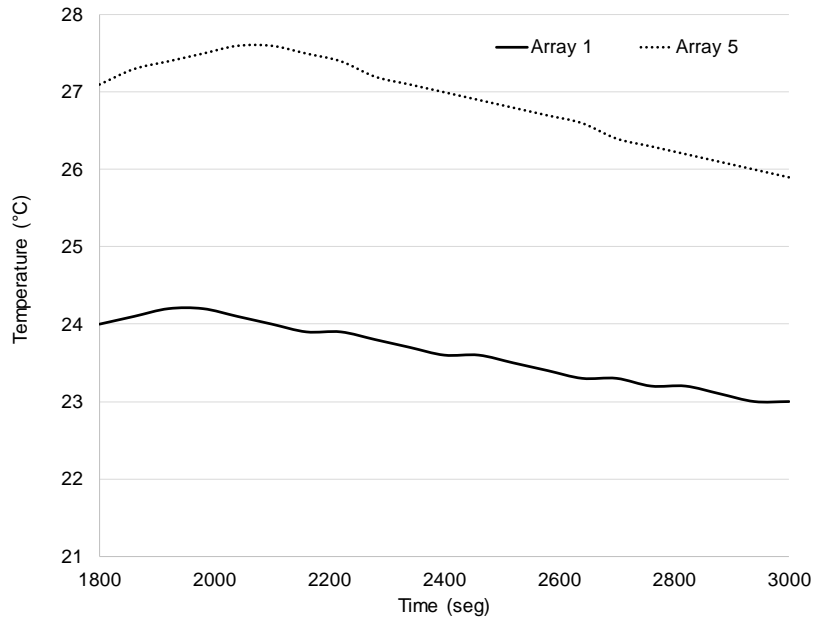
**Fig. 13** a) External Temperature Cooling process (1%) for arrays 2 and 7; b) Internal Temperature Cooling process (1%) for arrays 2 and 7.

Figure 14 represents the cooling process behaviour of the arrays that obtained the maximum and minimum production of entropy for the 5% sample.



a)



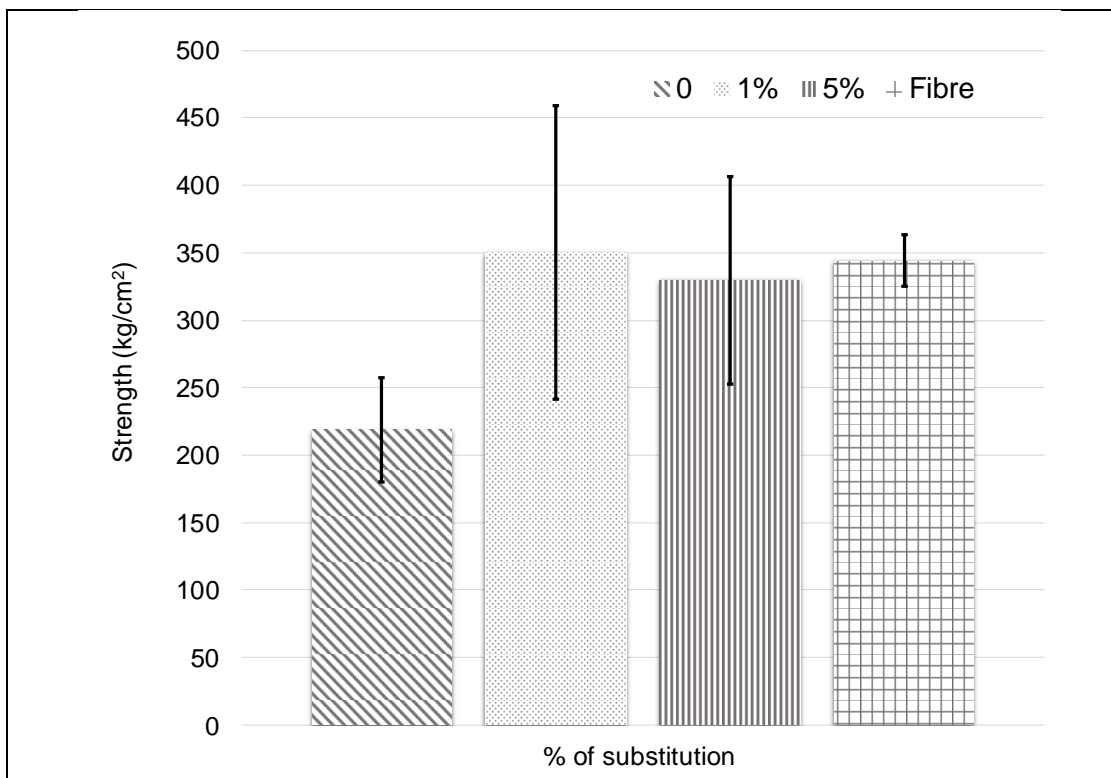


b)

**Fig. 14** a) External Temperature Cooling process (1%) for arrays 1 and 5; b) Internal Temperature Cooling process (1%) for arrays 1 and 5

### Compressive strength

From Fig. 15 it can be seen that the compressive strength increases with the addition of microparticles, this might be caused by a filler effect of microparticles in cement mortar, as stated in [42] with  $\text{SiO}_2$  microparticles, [43] with waste-glass microparticles, [44] using glass fume.



**Fig. 15** Compressive strength results performed according to the Standard ASTM-C-109 [36] for each microparticle concentration (1% and 5%) and for the fibre composite.

#### **4. Conclusions**

We have shown that it is possible to use a three plates system manufactured with cement-based composites using by-products obtained from biomass combustion and natural fibres, with different thermal features which in a prearranged disposition, enhances or inhibits the heat flux through the plates in order to design a heat exchanger or thermal insulator.

The results from the experimental procedure demonstrate that the inclusion of microparticles and fibres from by-products can be used to modify the thermal properties of normal cement mortar without diminishing its mechanical strength, on the contrary, the addition of microparticles, that may act as fillers tends to increase the mechanical strength of a normal cement mortar. On the other hand, the fibres absorb the energy applied during compression and enhances the capacity of the cement mortar under compressive stress.

These results are directly linked to the PSD, which for this analysis, it is demonstrated that the substitution of 1% and 5% of by-product microparticles improves the PSD when compared to a normal cement mortar, which means that the porosity, water intake and mechanical properties are positively modified.

Another important feature to consider for a cement mortar is the workability, which was measured with rheology tests and it is seen that the viscosity of the cement composite (Composite 1) is increased as the percentage of substitution increases, nonetheless, the use of a high range superplasticizer reduces this effect. The shear stress, is also increased as the substitution is increased, which means it is still manageable, but that requires more energy to start flowing.

As to the thermal behaviour, it is demonstrated that: 1) it is possible to use by-products to modify the thermal behaviour of a three-plate cement mortar element; 2) the three-plate-adiabatic chamber modules the heat flow from the inside to the outside allowing the plate to behave as an insulator or to heighten the heat flow through the chamber.

#### **5. Acknowledgements**

MMMh acknowledges the National Council for Science and Technology (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-CONACyT) for the graduate-degree scholarship given (ID433422). The authors acknowledge the Autonomous University of Mexico State and PRODEP for the financial support under projects 3814/2014/CIA, 3752/2014/CID and PRODEP Network 11067. We Also acknowledge to the Autonomous Metropolitan University Campus Xochimilco (Universidad Autónoma Metropolitana) for facilitating the use of their press machine.

#### **Referencias de artículo especializado**

- [1] IEA, «Technology Roadmap Energy-efficient Buildings: Heating and Cooling equipment,» International Energy Agency, 2011.

- [2] IEA, «Energy Efficiency 2017,» International Energy Agency, 2017.
- [3] SENER, «SIE Sistema de Información Energética,» Secretaría de Energía, 2010. [En línea]. Available: <http://sie.energia.gob.mx/>. [Último acceso: 7 February 2018].
- [4] INEGI, «INEGI Estadísticas,» Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 7 February 2018. [En línea]. Available: [www.beta.inegi.org.mx/temas/vivienda/](http://www.beta.inegi.org.mx/temas/vivienda/). [Último acceso: 2017].
- [5] C. N. d. Cemento, «CANACEM,» Camara Nacional del Cemento CANACEM, [En línea]. Available: <http://canacem.org.mx/cemento-3/produccion-y-consumo/>. [Último acceso: 7 February 2018].
- [6] «Roadmap for Building Energy Codes and Standards for Mexico,» Mexican Energy Secretary, Mexico City, 2017.
- [7] International Energy Agency, «Tracking Clean Energy Progress 2017 Energy Technology Perspectives 2017 Excerpt Informing Energy Sector Transformations,» International Energy Agency, 2017.
- [8] M. Morsy, S. Alsayed y M. Aqel, «Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar,» *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 145-149, 2011.
- [9] Y. Ding, Z. Chen, Z. Han, Y. Zhang y F. Pacheco-Torgal, «Nano-carbon black and carbon fiber as conductive materials for diagnosing of the damage of concrete beam,» *Construction and Building Materials*, vol. 43, pp. 233-241, 2013.
- [10] R. Alves e Silva, P. de Castro Guetti, M. S. da Luz, F. Rouxinol y R. V. Gelamo, «Enhanced properties of cement mortars with multilayer graphene nanoparticles,» *Construction and Building Materials*, vol. 149, pp. 378-385, 2017.
- [11] M. Wang, H. Yao, R. Wang y S. Zheng, «Chemically functionalized graphene oxide as the additive for cement-matrix composite with enhanced fluidity and toughness,» *Construction and Building Materials*, vol. 150, pp. 150-156, 2017.
- [12] H. Yang, M. Monasterio, H. Cui y N. Han, «Experimental study of the effects of graphene oxide on microstructure and properties of cement paste composite,» *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 102, pp. 263-272, 2017.
- [13] C. Zhou, F. Li, J. Hu, M. Ren, J. Wei y Q. Yu, «Enhanced mechanical properties of cement paste by hybrid graphene oxide/carbon nanotubes,» *Construction and Building Materials*, vol. 134, pp. 336-345, 2017.
- [14] L. Min, W. Zhishen y T. Jinmiao, «Heat storage properties of the cement mortar incorporated with composite phase change material,» *Applied Energy*, vol. 103, pp. 393-399, 2013.
- [15] K. L. Scrivener, P. Juilland y P. J. Monteiro, «Advances in understanding hydration of Portland cement,» *Cement and Concrete Research*, vol. 78, pp. 38-56, 2015.
- [16] L. Tung-Chai y P. Chi-Sun, «Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview,» *Construction and Building Materials*, vol. 46, pp. 55-62, 2013.

- [17] D. Zhou, C. Zhao y Y. Tian, «Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications,» *Applied Energy*, vol. 92, pp. 593-605, 2012.
- [18] Y. Hamzeh, K. Pourhooshyar Ziabari, J. Torkaman, A. Ashori y M. Jafari, «Study on the effects of white rice husk ash and fibrous materials additions on some properties of fiber-cement composites,» *Journal of Environmental Management*, vol. 117, pp. 263-267, 2013.
- [19] M. Frías, E. Villar-Cociña y E. Valencia-Morales, «Characterisation of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction: Calcining temperature and kinetic parameters,» *Waste Management*, vol. 27, pp. 533-538, 2007.
- [20] E. M. Fairbairn y e. al., «Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO2 emisisions reduction and potential for carbon credits,» *Environmental Management* , vol. 91, pp. 1864-1871, 2010.
- [21] G. Cordeiro y et.al., «Effecto of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash,» *Cement and Building Materials*, vol. 23, pp. 3301-3303, 2009.
- [22] G. Cordeiro, R. Toledo Filho, L. Tavares y E. Fairbairn, «Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars,» *Cement and Concrete Composite*, vol. 30, pp. 410-418, 2008.
- [23] M. Frías, E. Villar y H. Savastano, «Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement surface manufacture,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, pp. 490-496, 2011.
- [24] K. Bilba, M.-A. Arsene y A. Ouensanga, «Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical component of bagasse on the setting of bagasse/cement composite,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, pp. 91-96, 2003.
- [25] M. D.R, C. Baptista, J. Souza y H. Voorwald, «Mechanical Properties of Coconut Fibers Reinforced Polyester Composites,» *Procedia Engineering* , vol. 10, pp. 2074-2079, 2011.
- [26] M. Ali y N. Chouw, «Experimental investigations on coconut-fibre rope tensile strength and pullout from coconut fibre reinforced concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 681-690, 2013.
- [27] M. Ali, A. Liu, H. Sou y N. Chouw, «Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 30, pp. 814-825, 2012.
- [28] M. Ali, «Seismic performance of coconut-fibre-reinforced-concrete-columns with different reinforcement configurations of coconut-fibre ropes,» *Construction and Building Materials* , vol. 70, pp. 226-230, 2014.
- [29] R. Alvarez-Ramirez, F. Chiñas-Castillo, V. Morales-Dominguez y M. Ortiz-Guzman, «Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels,» *Cosntruction and Building Materials*, vol. 37, pp. 425-431, 2012.
- [30] D. Jou, G. Lebon y J. Casas-Vásquez, *Extended Irreversible Thermodynamics*, Springer Netherlands, 2010.

- [31] J. C. Arteaga-Arcos, O. A. Chimal-Valencia, H. T. Yee-Madeira y S. Díaz de la Torre, «The usage of ultra-fina cement as an admixture to increase the copressive strength of Portland cement mortars,» *Construction and Building Materials*, vol. 42, pp. 152-160, 2013.
- [32] W. Aiqin, Z. Chengzhi y Z. Ningsheng, «The theoretical analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement,» *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 1721-1726, 1999.
- [33] N. Roussel, *Understanding the rheology of concrete*, Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [34] L. García-Colín y P. Goldstein Menache, *Procesos Irreversibles Teoría y Aplicaciones*, Mexico: El Colegio Nacional & UAM Iztapalapa, 2013.
- [35] D. Kondepudi y I. Prigogine, *Modern Thermodynamics From Heat Engines to Dissipative Structures*, London: John Wiley & Sons, 1998.
- [36] «Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars,» ASTM, 2008.
- [37] «ASTM-C-150 Standard Especification for Portland Cement».
- [38] «Standard Specifications for Chemical Admixtures for concrete,» ASTM, 2001.
- [39] «ASTM C 778 Standard Especification for Standard Sand».
- [40] I. Brenazi y F. Zelenak, *Matlab tool for plotting the PSD diagram*, 2010.
- [41] M. Anal K y J. Sehoon, «Using Cement paste rheology to predict concrete mix,» Texas Transportation Institute, Texas A&M University System, Texas, 2009.
- [42] J. Byung-Wan, K. Chang-Hyun, T. Ghi-ho y P. Jong-Bin, «Characteristics of cement mortar with nano-SIO<sub>2</sub> particles,» *Conatruction and Building Materials*, vol. 21, pp. 1351-1355, 2007.
- [43] Y. Shafari, I. Afhoon, Z. Firoozjaei y A. Momeni, «Utilization of waste glass micro-particles in producing self-consolidating concrete mixtures,» *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 10, nº 3, pp. 337-353, 2016.
- [44] D. Harbec, A. Zidol, A. Tagnit-Hamou y F. Gitzhofer, «Mechanical and durability properties of high performance glass fume concrete and mortars,» *Construction and building materials*, vol. 134, pp. 142-156, 2017.

## CONCLUSIONES DE MIS ESTUDIOS DE POSGRADO FEBRERO 2016-MARZO 2018

Como parte de las premisas principales en las que fue basado el desarrollo del proyecto, se planteó la consideración de que el Composite, esto es, mortero de cemento+by-product (micropartículas o fibras) causa menor impacto negativo al ambiente comparado con el uso de un mortero de cemento normal.

Esto se consideró así porque en el caso del uso de micropartículas, éstas se añadieron como porcentaje de sustitución del cemento, mitigando así parte del impacto generado por el uso y producción de cemento.

Por otro lado, la hipótesis enuncia que “es posible modular las propiedades térmicas de un elemento de construcción tricapa (conocido como “panel sándwich”) fabricado como su nombre lo dice con tres capas de diferentes composites de cemento, una capa de mortero de cemento normal, otra de mortero de cemento con fibras naturales y finalmente la tercera capa de mortero de cemento normal con cierto porcentaje de sustitución con micropartículas producto de la combustión de biomasa; esto sin que la resistencia mecánica a la compresión que caracteriza a los elementos fabricados con mortero de cemento normal, se vea disminuida”. La capacidad que tiene el elemento de modular la temperatura de acuerdo con la disposición de las placas o capas de distintos materiales podría indicar el ahorro de energía por uso de aire acondicionado o calefacción en el interior de una edificación.

Una vez que se demostró que es posible tener diferentes comportamientos térmicos dependiendo de la disposición del arreglo de las placas del elemento tricapa, fue necesario demostrar la pertinencia ambiental que se planteó desde un inicio como eje de este proyecto. Para este análisis, se determinó que el método que daría los resultados más acertados y en las unidades de interés (unidades energéticas), es el análisis de ciclo de vida del elemento colocado en una edificación. Esta metodología está basada en las normas ISO 14040 a la 14044 y con ella se puede obtener los valores de impactos al medio ambiente, principalmente la huella de carbono que deja a partir de la extracción de la materia prima, hasta su fin último que puede considerarse reciclar, reusar, demolición, entre otros. Para esta etapa de la investigación, se contactó con expertos en esta metodología en la Universidad Tecnológica de Delft en Países Bajos, y solicité hacer una estancia corta para realizar esta investigación.

Durante la estancia de investigación estudié la teoría del Análisis de Ciclo de Vida (ISO 14040-14043, bases de datos internacionales, Metodología Recipe ® para determinación de valores de impacto), herramientas probabilísticas (redes Bayesianas, *Expert Judgement* y Metodología Monte Carlo) para evaluar la incertidumbre de datos, se determinó que por la escasez de información, la herramienta más adecuada para un primer acercamiento sería el análisis de incertidumbre con *Expert Judgement* (Juicio Estructurado de Expertos), para lo cual se diseñó un cuestionario que fue aplicado a dos expertos en el área de cementos y Análisis de Ciclo de Vida.

Es importante mencionar que este cuestionario se encuentra en etapa de prueba ya que es necesario recabar más información respecto al impacto ambiental del material que se está analizando para generar las preguntas adecuadas a los expertos.

De esta investigación, se generó un documento que contiene toda la investigación teórica, así como el desarrollo y los resultados obtenidos al aplicar las técnicas de Análisis de Ciclo de Vida y *Expert Judgement*.

Por otro lado, se tiene el compromiso de ampliar este cuestionario con la información antes mencionada, así como aplicar el mismo a un foro más amplio y recabar la mayor cantidad de información posible para que el Análisis de Ciclo de Vida del material sea más apegado a la realidad. También se propuso una colaboración académica para la difusión de la Técnica de *Expert Judgement*.

Es importante mencionar que, aunque no se tienen los valores que indiquen la pertinencia ambiental del material, es necesario seguir recabando información por medio de análisis experimental para que pueda

utilizarse como datos en el análisis de incertidumbre que alimenta la metodología del análisis de ciclo de vida. La estancia complementó mi formación de posgrado y me permitió ampliar las metodologías multidisciplinarias adquiridas en la Maestría en Ciencias de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma del Estado de México.

## **AGRADECIMIENTOS**

- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-CONACyT por la beca de Posgrado (ID433422) y Beca Mixta
- Universidad Autónoma del Estado de México por la beca de escolaridad
- Universidad Autónoma del Estado de México por el financiamiento del Proyecto 3814/2014
- Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por el Proyecto de redes 11067
- TU Delft, al Dr. Oswaldo Morales por su hospitalidad y conocimientos
- Universidad Autónoma Metropolitana Campus Xochimilco por permitirnos usar la prensa para las pruebas mecánicas
- Laboratorio de Espectroscopía Mössbauer y Técnicas Complementarias, ESFM-IPN por las pruebas de Distribución de Tamaño de Partícula