



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**



**FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO**

**DESARROLLO DE LA NANOSÍLICE COMO AISLANTE  
TÉRMICO, APLICADA A LOS PROCESOS CONSTRUCTIVOS**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
MAESTRO EN DISEÑO

**PRESENTA:**

ARQ. JOSÉ MANUEL JORGE CID

**TUTOR ACADÉMICO:**

DR. EN C. S. JESÚS ENRIQUE DE HOYOS MARTÍNEZ

**TUTORES ADJUNTOS:**

DR. GONZALO MARTÍNEZ BARRERA

DR. RAÚL ALBERTO MORALES LUCKIE

M. EN ARQ. JORGE EDUARDO VALDÉS GARCÉS

MEUR. ARNULFO GABRIEL MORALES MONDRAGÓN

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, SEPTIEMBRE 2017

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
<b>1. FUNDAMENTACIÓN .....</b>	<b>14</b>
1.1. <i>Antecedentes.....</i>	15
1.1.1. <i>Efecto de las nanopartículas en la matriz polimérica.....</i>	16
1.1.2. <i>Uso de nanopartículas en materiales.....</i>	17
1.1.3. <i>Mecanismos de transferencia de calor.....</i>	18
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>21</b>
2.1.2. <i>Nanosílice.....</i>	24
2.1.3. <i>Resina poliéster.....</i>	26
2.1.4. <i>Confort térmico en la historia .....</i>	32
2.1.5. <i>Aislantes térmicos .....</i>	33
2.1.6. <i>Sistemas de construcción con aislamiento térmico y eficiencia energética.....</i>	34
2.1.7. <i>Norma Oficial Mexicana (NOM) 18 – ENE - 2011.....</i>	35
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>37</b>
3.1.1. <i>Metodología de investigación.....</i>	37
3.1.2. <i>Materiales .....</i>	38
3.1.3. <i>Ensayo sobre pastas de mortero .....</i>	39
3.1.4. <i>Ensayo sobre resinas .....</i>	40
3.1.5. <i>Equipos.....</i>	41
3.1.6. <i>Desarrollo experimental.....</i>	46
3.1.7. <i>Propiedades retardantes a la llama.....</i>	47
3.1.8. <i>Acondicionamiento de moldes para paletas de resina.....</i>	49
3.1.9. <i>Estabilidad térmica .....</i>	50
3.1.10. <i>Diseño de la mezcla de morteros.....</i>	52
3.1.11. <i>Acondicionamiento de moldes para especímenes de mortero .....</i>	52
3.1.12. <i>Preparación de probetas de resina .....</i>	54
3.1.13. <i>Diseño de la mezcla de resinas .....</i>	55
<b>4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>56</b>
4.1.1. <i>Pruebas de transferencia de calor .....</i>	57
4.1.2. <i>Pruebas de flamabilidad.....</i>	64
4.1.3. <i>Análisis termogravimétricos .....</i>	66
4.1.4. <i>Ensayos a compresión con especímenes de mortero .....</i>	73
4.1.5. <i>Ensayos con probetas a base de resinas .....</i>	78
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>84</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXOS. ....</b>	<b>93</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	Diagrama metodológico.....	12
Ilustración 2	Flujo de calor a través de una pared.....	18
Ilustración 3	Representación gráfica de la pérdida y ganancia de calor.....	34
Ilustración 4	Elaboración de mortero (nanosílice, arena, agua y cemento).....	39
Ilustración 5	Mezclado de resina con nanosílice.....	40
Ilustración 6	Analizador termogravimétrico marca TA.....	41
Ilustración 7	Multiensayo utilizada en las pruebas de compresión.....	42
Ilustración 8	Equipo utilizado para pruebas de flamabilidad (burning tester).....	43
Ilustración 9	Pesado de material en balanza OHAUS.....	43
Ilustración 10	Calentado de la mezcla (resina, nanosílice).....	44
Ilustración 11	Termómetro con luz LED utilizado para la medición de pérdida de temperatura. ..	45
Ilustración 12	Termopar para medición de temperatura (STEREN).....	46
Ilustración 13	Molde para colado de paletas 10 x 5 pulgadas por un centímetro de profundidad.	49
Ilustración 14	Paletas de concreto 10 x 5 pulgadas.....	50
Ilustración 15	Paletas de resina 10 x 5 pulgadas.....	50
Ilustración 16	Polvo producto del limado de las probetas de resina (testigo, 7nm, 12nm y 200nm). .....	51
Ilustración 17	Cilindro de metal para colado de especímenes.....	53
Ilustración 18	Especímenes de mortero.....	53
Ilustración 19	Molde metálico para colado de probetas de resina.....	54
Ilustración 20	Paleta expuestas a un soplete para medir la transferencia de calor (resina natural). .....	58
Ilustración 21	Paleta de resina expuestas a un soplete para medir la transferencia de calor (7 nm).....	59
Ilustración 22	Medición de la pérdida y ganancia de calor (resina natural).....	59
Ilustración 23	Paletas de resina sometidas a pruebas de flamabilidad (200 nm).....	65
Ilustración 24	Paletas de mortero sometidas a pruebas de flamabilidad (200 nm).....	66
Ilustración 25	Probeta de resina sometida a prueba de compresión (testigo).....	79
Ilustración 26	Probeta de resina sometida a prueba de compresión (7 nm).....	80
Ilustración 27	Probeta de resina sometida a prueba de compresión (12 nm).....	81
Ilustración 28	Probeta de resina sometida a prueba de compresión (200 nm).....	82
Ilustración 29	Mezcla de resina con nanosílice.....	93
Ilustración 30	Paleta de resina mezclada con nanosílice 12nm.....	93
Ilustración 31	Elementos para la elaboración de mortero (arena, cemento y nanosílice).....	94
Ilustración 32	Dispersión de nanosílice en mortero.....	94
Ilustración 33	Apreciación de un cambio de color con el agregado del butanox.....	95
Ilustración 34	Mezclado de resina con nanosílice.....	95
Ilustración 35	Presentación del material SIGMA – ALDRICH en su empaque.....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Composición de la resina.....	29
Tabla 2	Especificaciones de la resina.....	29
Tabla 3	Características típicas del curado.....	30
Tabla 4	Propiedades de la resina polimerizada.....	30
Tabla 5	Porcentaje para la prueba de polimerización.....	30
Tabla 6	Condiciones de la prueba.....	31
Tabla 7	Propiedades mecánicas del producto en la aplicación.....	31
Tabla 8	Métodos de prueba.....	36
Tabla 9	Descripción de los materiales ocupados.....	38
Tabla 10	Materiales empleados para la elaboración de morteros.....	52
Tabla 11	Materiales empleados para la elaboración de probetas de resina.....	55
Tabla 12	Pesos de material en cada muestra.....	56
Tabla 13	Obtención de pasta por la combinación de resina con NS.....	56
Tabla 14	Tiempos a los cuales el material cedió con la temperatura de la prueba TGA.....	72
Tabla 15	Tiempos a los cuales el material perdió masa con la temperatura de la prueba TGA.....	72
Tabla 16	Precios de nanosílice 7 nm.....	96

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1	Representación gráfica de pérdida y ganancia de calor (resina natural).....	60
Gráfica 2	Representación gráfica de pérdida y ganancia de calor (7 nm).....	61
Gráfica 3	Representación gráfica de pérdida y ganancia de calor (12 nm).....	62
Gráfica 4	Representación gráfica de pérdida y ganancia de calor (200 nm).....	63
Gráfica 5	Representación gráfica del comportamiento de materiales con y sin nanomateriales.....	64
Gráfica 6	Diagrama TGA resina testigo.....	67
Gráfica 7	Diagrama TGA con partículas de 7 nm.....	68
Gráfica 8	Diagrama TGA con partículas de 12 nm.....	69
Gráfica 9	Diagrama TGA con partículas de 200 nm.....	70
Gráfica 10	Comparación de resultados TGA de 4 distintos tamaños de muestra.....	71
Gráfica 11	Representación del trabajo a compresión de un espécimen testigo sin nanosílice.....	74
Gráfica 12	Representación del trabajo a compresión de un espécimen – 7nm.....	75
Gráfica 13	Representación del trabajo a compresión de un espécimen – 12nm.....	76
Gráfica 14	Representación del trabajo a compresión de un espécimen – 200nm.....	77
Gráfica 15	Comparativa del trabajo a compresión entre morteros con y sin nanosílice.....	78
Gráfica 16	Trabajo a compresión de una probeta de resina – testigo.....	79
Gráfica 17	Trabajo a compresión de una probeta de resina – 7nm.....	80
Gráfica 18	Trabajo a compresión de una probeta de resina – 12nm.....	81
Gráfica 19	Trabajo a compresión de una probeta de resina – 200nm.....	82
Gráfica 20	Comparativa de probetas de resina las cuales poseen 3 diferentes tamaños de partículas.....	83

## NOMENCLATURAS Y ABREVIACIONES

<i>MG</i>	Megagramo
<i>SiO<sub>2</sub></i>	Óxido de silicio
<i>NM</i>	Nanómetros
<i>TGA</i>	Análisis termogravimétrico
<i>NOM</i>	Norma Oficiales Mexicanas
<i>CO<sub>2</sub></i>	Bióxido de carbono
<i>NAMAs</i>	<i>Nationally Appropriate Mitigation Actions</i>
<i>ASHRAE</i>	<i>American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers</i>
<i>C-S-H</i>	Silicato de Calcio Hidratado
<i>NS</i>	Nanosílice
<i>OH</i>	Hidroxilo
<i>SP</i>	Hibridación
<i>TA</i>	Análisis térmico
<i>kN</i>	Kilonewton
<i>μm</i>	Micrómetro
<i>MEK</i>	Metil-etil-cetona
<i>PSI</i>	Libras por pulgada cuadrada
<i>LIDMA</i>	Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados.

## Introducción

El motivo de esta investigación está centrada en la preocupación de los gastos desmedidos en los que incurre la población por el consumo de energía generado por los aparatos eléctricos, entre ellos se encuentran principalmente el aire acondicionado y ventiladores, los cuales afectan de un modo considerable la economía de las familias en el Estado de México.

El consumo energético de las edificaciones oscila entre un 30-60% ubicándolo como uno de los gastos más demandantes; principalmente observado en lugares con climas que presentan cambios drásticos de temperatura. Una solución viable al control de esta demanda es el uso de aislantes térmicos que brinden un ahorro significativo (Veith, 2008).

Lo cual da paso al desarrollo de las nano-partículas de sílice, las cuales presentan propiedades físicas y químicas deseables para el desarrollo de materiales aislantes, así como baja conductividad térmica que será manipulable con base al tamaño y composición de cada partícula.

*En el contexto nano, las relevancias económicas más significativas van de acuerdo a los llamados “Nuevos Materiales”. Estos nuevos materiales no sólo son nuevos en términos de sus dimensiones; es posible su combinación acumulativa. El rango de aplicaciones de control, adhesión y dominio, aspectos tribológicos<sup>1</sup> como la ultra reducida fricción, absorción de luz, conducción transparente de superficies, difusores de luz y así sucesivamente hasta la insolación de materiales para las construcciones, las cuales ofrecen niveles similares de aislamiento como la insolación convencional, en una décima de espesor de estos materiales (Veith, 2008).*

---

<sup>1</sup> La **tribología** es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación que tienen lugar durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento (Martínez, 2002).

Con base a lo anterior se ha tomado la decisión de indagar en el tema de nanosílice como aislante térmico con base a la NOM-18 de edificaciones, aplicada a los materiales constructivos; tema que tendrá la participación de otras áreas del saber, como es el caso del Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA) de la Facultad de Química de la UAEM, ya que es un camino de innovación y desarrollo de tecnologías.

En relación con las aplicaciones específicas de la nanotecnología en la construcción, cabe señalar que centra su actividad en la exploración de nuevos materiales y procesos por la aplicación para continuar el desarrollo de productos para que las construcciones sean de mejor calidad, cumplan los tres conceptos fundamentales: durabilidad, resistencia y sustentabilidad. Además de ser más respetuosas con el medio ambiente (Erokhim et al., 2008).

### **Planteamiento del problema**

Se presenta una preocupación por parte de las emisiones de CO<sup>2</sup> generadas por los materiales de construcción (NAMAs)<sup>2</sup>. Con el objetivo de la protección y cuidado del medio ambiente se proponen apoyos para el desarrollo de un proyecto piloto que con el estudio de los nanomateriales reduzcan de manera considerable el CO<sup>2</sup> en el ambiente. Por lo cual surge la siguiente pregunta ¿Será posible la combinación de los materiales de la construcción y los nanomateriales para generar un aislante térmico?

Las emisiones de CO<sup>2</sup> están siendo controladas en países como Estados Unidos y parte de la Unión Europea. Al emplear paredes, techos y fachadas con la integración de módulos de energía multifuncional, obteniendo como resultados la reducción anual de consumo de energía y 104 toneladas de CO<sup>2</sup>, esto equivaldría a disminuir

---

<sup>2</sup> NAMAs: *Nationally Appropriate Mitigation Actions* (Acciones Nacionalmente Apropriadas de Mitigación).

10 veces el CO<sup>2</sup> de las edificaciones causado por el uso constante del aire acondicionado (ACCIONA, 2013).

Las ventajas de manipular los materiales de construcción a través de nanotecnología favorecen a la creación de nuevos acabados, es posible realizar estudios de su comportamiento con el objetivo de encontrar aplicaciones que puedan ayudar a la arquitectura a modificar el espacio y por ende tratar de obtener nuevas soluciones que mejoren la calidad de vida. Investigaciones relacionadas a estos materiales señalan que los espacios de la casa habitación están siendo optimizados a través de estrategias que contempla el uso de nanosuperficies con consideración estética, económica y ecológica (Leydecker, 2008).

Las nanosuperficies aislantes han sido desarrolladas con sílice y polímeros que permiten la lenta conductividad térmica, obteniendo propiedades mecánicas superiores (Kingspan, 2013).

En el caso de los materiales constructivos, surge la pregunta que orienta a la investigación ¿Por qué es importante el diseño de aislantes térmicos en las edificaciones? ¿Se podrá generar un aislamiento térmico con los nanomateriales con base a la NOM-18 y con ello dar un confort térmico a las edificaciones?

### **Pregunta de Investigación**

¿Cómo el empleo de nanomateriales en las edificaciones contribuye al desarrollo de aislantes térmicos que sean eficientes para este cometido?

### **Objetivo general**

Analizar y evaluar el comportamiento de la nanosílice en materiales constructivos que permitan comprobar su desempeño en superficies aislantes, para recubrimientos que cumplan con la Norma Oficial Mexicana (NOM-18), y con ello



diversificar los materiales y procesos de diseño de los sistemas constructivos en edificaciones habitables.

### **Objetivos específicos**

- Analizar la nanosílice en el campo de la nanotecnología.
- Análisis de la aplicación de la nanosílice en los materiales constructivos para comprobar su desempeño térmico.
- Examinar los resultados obtenidos de la experimentación con nanosílice en el proceso edificativo para la producción de aislante térmico, con base en la NOM-18 en los materiales a los cuales es aplicada la nanosílice.
- Designar recomendaciones con factibilidad de éxito para los materiales constructivos, a fin de que las propuestas y mejoras contribuyan al desarrollo tecnológico de las edificaciones.

### **Justificación**

Teniendo en cuenta la importancia del cuidado del medio ambiente, se pretende dar paso a la implementación de nuevos materiales, para promover los estudios de las envolventes, en caso específico: “la aplicación de nanomateriales a las casas habitación del Estado de México”, con el objetivo de evaluar a través de una detallada experimentación la resistencia que poseen los muros al cambio de temperatura.

Al generar una sensación de temperatura agradable dentro de la casa, el resultado estará basado en una sensación de bienestar físico y psicológico para los usuarios: elementos vinculados con la imagen que representa a los individuos que desarrollan sus vidas en estos espacios, siendo así más atractivos a través de una arquitectura sustentable.

## **Hipótesis**

Si se desarrolla un adecuado aislante térmico a partir de la nanosílice en combinación con los materiales de la construcción, será posible generar una regulación de temperatura de acuerdo a la NOM-18 de edificaciones y espacios habitables, para tal efecto se someterá a pruebas en diversas proporciones de nanosílice cemento-resina para comparar la conductibilidad térmica entre ellos.

## **Clasificación de la investigación**

Es descriptiva, porque tiene que ver con la descripción o narración de un determinado objeto de estudio y su comportamiento, la información generada será empleada para explicar las características más importantes de los fenómenos observados.

Es una investigación de campo, ya que la información con la que se trabajará, será obtenida de casas habitación para su posterior análisis y estudio en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), de la Facultad de Química de la UAEM.

Es transversal porque las observaciones y mediciones de dichos fenómenos se desarrollan en diferentes períodos, durante el transcurso de dos años consecutivos (Hernández, Fernández, y Baptista, 1991).

## **Normatividad**

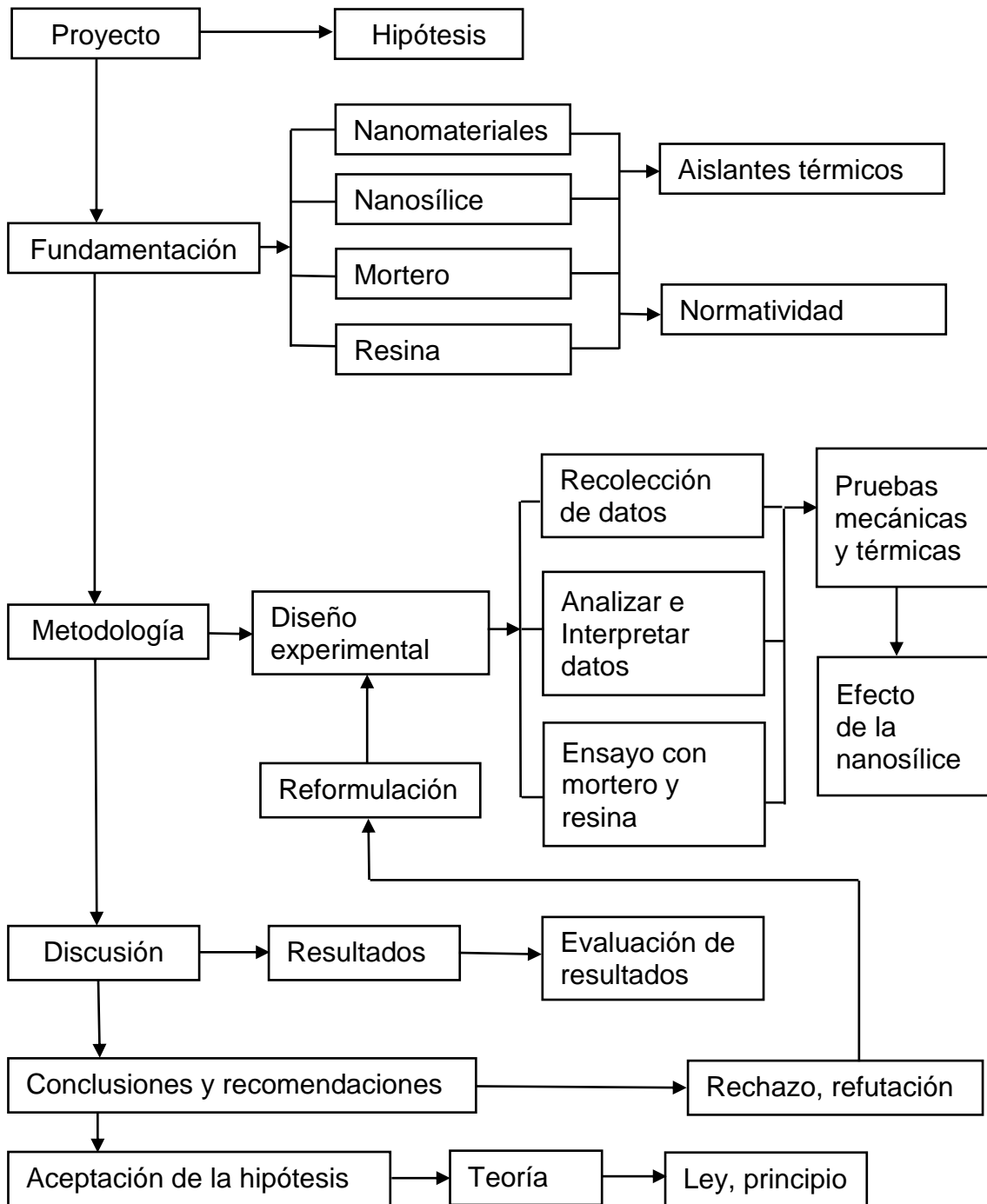
Para efectos de esta investigación es necesario apegarse a ciertas normas o lineamientos por el hecho de su fundamento, por lo que se citan algunas de las especificaciones a emplear:

- Normas Oficiales Mexicanas (NOM-18).
- Nationally Appropriate Mitigation Actions (NAMAs).

## **Diseño de la investigación**

El presente trabajo terminal de grado es una investigación experimental de diseño transversal, pues la obtención de los datos se llevará a cabo en el transcurso de dos años, será necesaria la implementación de instrumentos que permitan la recolección de datos, entre ellos están el empleo de mediciones con termo laser, para saber las temperaturas de los materiales constructivos y equipo de laboratorio para la manipulación de la nanosílice.

**Ilustración 1** Diagrama metodológico.



Fuente: elaboración propia.

## **Técnicas de investigación**

Etapa 1 Selección de información teórica – conceptual de los diversos conceptos ocupados para definir y explicar a los nanomateriales.

Etapa 2 - Efectuar experimentación con materiales de paredes, exponiéndolos a la intemperie, con el objetivo de analizar su comportamiento en climas cálidos y fríos, en el Estado de México. A partir de la aplicación de nanomateriales en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), de la Facultad de Química de la UAEM.

Etapa 3 - Generar propuestas que estén orientadas a resolver los problemas de cambio de temperatura que presentan las casas habitación, para que los habitantes obtengan un clima estable, basado en la NOM-18<sup>3</sup> referidas a los aislantes térmicos de las edificaciones.

Etapa 4 - Análisis de resultados, a través de los cuales se ordenará, clasificará y presentarán los resultados de la investigación en gráficas elaboradas y sintetizadas, interpretando la experimentación a realizar.

---

<sup>3</sup> Normas Oficiales Mexicanas (aplicables a la construcción)

## 1. Fundamentación

A continuación se presentan los fundamentos teóricos que soportan la hipótesis y los objetivos planteados en el presente trabajo terminal de grado. La fundamentación se divide en marco teórico y metodología; en el marco teórico se presentan los conceptos básicos necesarios para a comprensión de la metodología, principalmente con el papel de la nanotecnología en las aplicaciones con la resina, para posteriormente hacer un recuento de las características básicas de la nanosílice, se muestran los principios del problema de la dispersión de las nanopartículas en un medio líquido para por último hacer un resumen de las propiedades mecánicas de las matrices forjadas a base de resina que se ven influenciadas por la adición de la nanosílice.

En la metodología se hace un recuento de los trabajos relevantes que se han realizado en adición de nanosílice a matrices de resina; la nanosílice parte desde tres puntos de vista básicos, los porcentajes de adición que se han estudiado y sus resultados asociados, los procedimientos de dispersión y la influencia de las nanopartículas sobre las propiedades físicas y químicas por parte de la matriz de la resina (Ferreira, 2010).

La nanotecnología se ha convertido en los últimos años en uno de los principales y más importantes campos de investigación. Tiene como principal objetivo el obtener materiales a una escala nanométrica y, debido a esto, las propiedades fisicoquímicas de los objetos pueden ser moduladas sistemáticamente por la variación del tamaño facilitando el diseño de nuevos materiales y promoviendo el menor consumo de recursos naturales.

En lo que el sector de la construcción se refiere, las aplicaciones de la nanotecnología son para permitir el desarrollo de nuevos materiales, mejorando los procesos de fabricación y aportando nuevas técnicas constructivas.

A finales del siglo pasado, las propiedades requeridas en los materiales para su producción en gran escala, eran fundamentalmente la resistencia mecánica y la dureza. Ahora, con el desarrollo de la ciencia de los materiales, es posible diseñar nuevos materiales que respondan mejor a nuestras necesidades.

Para demostrar estos procesos, es necesario trabajar en dos aspectos importantes: en primer lugar, como caracterizar de manera apropiada las nanopartículas y en segundo lugar, el cómo aprovechar cada una de sus propiedades. Para comprender el funcionamiento de estos nuevos materiales es necesaria la combinación de diversas disciplinas como la física, la química aplicada a los materiales y la ingeniería (Patel, 2004).

### **1.1. Antecedentes**

En las propiedades de la materia existen múltiples escalas (nano, micro y macro), y las propiedades de la escala se derivan de las propiedades de la siguiente más pequeña. Las propiedades y procesos en la nanoescala definen las propiedades en la micro escala y esta a su vez las de la macro escala, por lo tanto, los procesos que ocurren en la nanoescala afectan últimamente las propiedades del material completa con cierto nivel de proporcionalidad.

La nanotecnología en el mundo de los materiales constructivos incluye todas las técnicas de manipulación de la estructura de las matrices, en una escala nanométrica, obteniendo una nueva generación de matrices con propiedades mecánicas superiores, mayor durabilidad y potencialmente una nueva gama de propiedades como lo son la baja resistencia eléctrica, alta durabilidad y sobre todo la mejora de las propiedades térmicas.

### 1.1.1. Efecto de las nanopartículas en la matriz polimérica.

Algunos de los efectos más significativos que se pueden obtener al introducir nanopartículas en la matriz polimérica son entre otros la modificación de la morfología del polímero y mejoras en propiedades térmicas, mecánicas, barrera o resistencia a la llama (Kim, 2007).

La elevada área y energía superficial de las nanopartículas las hace especialmente adecuadas para actuar como agentes nucleantes durante el proceso de cristalización de la matriz polimérica. En algunos sistemas polímero/partícula es posible detectar incrementos en el grado de cristalinidad del polímero base, lo que por ejemplo se puede traducir en un incremento de las propiedades térmicas y mecánicas (Senff, 2007).

La mejora en las propiedades térmicas, barrera y de resistencia a la llama al ser adheridas con nanopartículas están íntimamente relacionadas entre sí. Las nanopartículas actúan como barrera contra el calor, lo que mejora la estabilidad térmica del sistema aumentando la temperatura de degradación del polímero base. Por otro lado, la capa de ceniza generada mediante la carbonización de la nanopartícula sirve como un aislante favoreciendo el comportamiento retardante a la llama (Li, 2004).

Las nanopartículas, fungen en un polímero como barrera de paso a los gases que intentan atravesarlo, (*laberinto de volátiles*). En el caso de las propiedades térmicas y de resistencia a la llama, las nanopartículas trabajan en dos direcciones, por un lado impidiendo que el oxígeno penetre en el interior del material (y de ese modo reduciendo el poder de combustión) por otro lado, estas limitan la salida de productos volátiles generados durante la descomposición del polímero (Li, 2004).

La mejora del comportamiento mecánico de los polímeros ha sido quizá una de las principales razones por la que la adición de nanocargas ha centrado tanto interés.



Las mejoras que se pueden lograr añadiendo pequeños porcentajes son muy elevadas, sin embargo, están condicionadas a lograr un grado de dispersión adecuado de las partículas y lo que es más importante una buena compatibilización polímero-partícula (Li, 2004).

### **1.1.2. Uso de nanopartículas en materiales**

En la actualidad existen grandes contribuciones hacia las mejoras de estos materiales, empleando nano-partículas de sílice (estado coloidal), las que son empleadas para morteros y concretos, con la finalidad de retardar el deterioro de las estructuras (Chang et al., 2008).

Las propiedades de los morteros de cemento portland con nano-SiO<sub>2</sub>. Evaluó los efectos de la adición de las nano-partículas sobre el comportamiento de pastas y morteros. Las nano-partículas de sílice amorfa fueron incorporadas a un porcentaje de 3 y 10% en peso respecto al cemento. Observó que las resistencias a la compresión de diferentes morteros incrementaron con el aumento de la cantidad de nano- SiO<sub>2</sub>, debido a la aceleración del proceso de hidratación que genera en el cemento (Tyson et al., 2011).

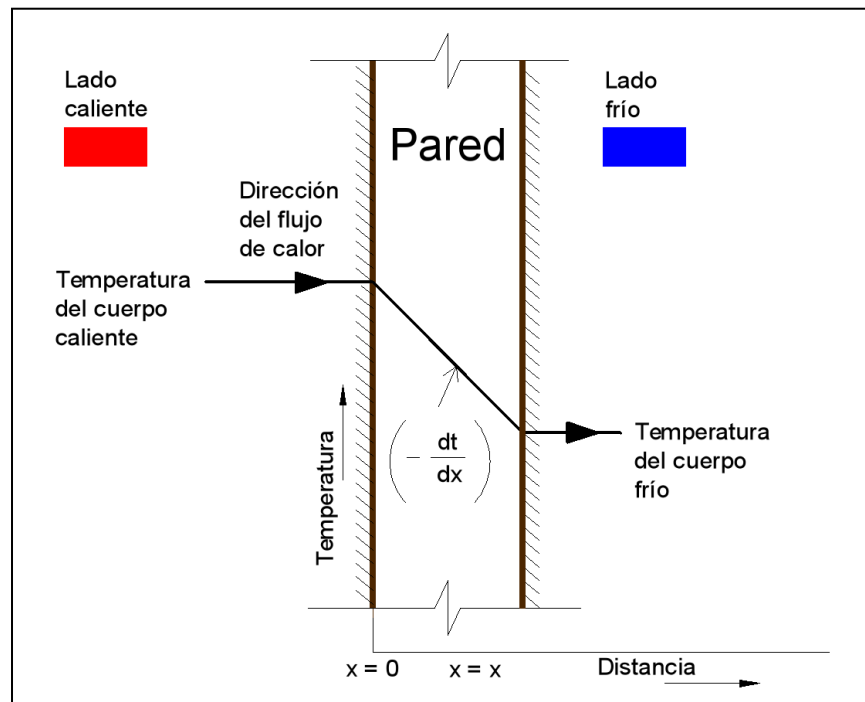
Sin embargo, estas investigaciones no son suficientes para mitigar los problemas ya existentes, debido a que estos métodos son proporcionados desde el diseño y elaboración de la mezcla. Esto impide que sean empleados en estructuras ya existentes. Por lo tanto, en la actualidad se realizan diversos estudios relacionados con la aplicación de los nanomateriales.

### 1.1.3. Mecanismos de transferencia de calor.

De acuerdo con Kern (1965) hay tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aún cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres. Estas son, *conducción*, *convección* y *radiación*.

La conducción es la transferencia de calor a través de un material fijo tal como la pared estacionaria mostrada en la siguiente ilustración.

**Ilustración 2** Flujo de calor a través de una pared.



Fuente: obtenida de Kern, (1999).

En ella se muestra la dirección del flujo de calor será a ángulos rectos a la pared, si las superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico. Supóngase que una fuente de calor existe a la izquierda de la pared y que existe un receptor de calor en la superficie derecha. Es conocido y después se confirmará por una derivación, que el flujo de calor por hora es proporcional al

cambio de temperatura a través de la pared y al área de la pared  $A$ . Si  $t$  es la temperatura en cualquier punto de la pared y  $x$  es el grueso de la pared en dirección del flujo de calor, la cantidad de flujo de calor  $dQ$  es dada por.

**Ecuación 1** Ecuación para el cálculo de transferencia de calor.

$$dQ = kA \left( -\frac{dt}{dx} \right) \text{ Btu/hr}$$

Fuente: obtenida de Kern, (1999).

La transferencia de calor por convección se debe al movimiento del fluido. El fluido frío adyacente a superficies calientes recibe calor que luego transfiere al resto del fluido frío mezclándose con él. La convección libre o natural ocurre cuando el movimiento del fluido no se complementa por agitación mecánica. Pero cuando el fluido se agita mecánicamente, el calor se transfiere por convección forzada. La agitación mecánica puede aplicarse por medio de un agitador, aún cuando en muchas aplicaciones de proceso se induce circulando los fluidos calientes y fríos a velocidades considerables en lados opuestos. Las convecciones libre y, forzada ocurren a diferentes velocidades, la última es la más rápida y por lo tanto, la más común. Los factores que promueven altas transferencias para la convección forzada, no necesariamente tienen el mismo efecto en la convección libre (Kern, 1999).

Un ejemplo claro, es cuando el calor es primero absorbido de la fuente por partículas de fluido inmediatamente adyacentes a ella y entonces transferido al interior del fluido mezclándose con él.

Para el caso de la transferencia de calor por medio de la radiación, esta puede atribuirse a los cambios en las energías de átomos y moléculas sin referencia a sus electrones individuales. Si dos o más núcleos de la molécula están vibrando uno con respecto al otro, un cambio en la amplitud o amplitudes de la vibración causará un cambio en el contenido de energía. La energía de la molécula puede cambiarse

por una alteración de su energía cinética de translación o rotación y esto también resultará en emisión de energía radiante.

En otras palabras esta no requiere de la intervención de un medio, y el calor puede ser transmitido por radiación a través del vacío absoluto, un ejemplo sería el caso de un cuerpo caliente luminoso (Kern, 1999).

## 2. Marco teórico

El logro de la sustentabilidad en la construcción de edificios acondicionados requiere inherentemente la consideración del efecto de la masa térmica. La masa térmica de los materiales de construcción agregados permite que la estructura absorba, almacene y rechace cantidades significativas de calor que afectan a menudo el balance energético neto y el consumo para la estructura. Las estructuras que se han construido de hormigón y mampostería durante décadas han demostrado estas ventajas debido a su masa térmica inherente.

La absorción y retención de energía durante períodos de tiempo reducen el consumo de energía transfiriendo calor en un ciclo natural a través de un componente de construcción de masa térmica. Los ciclos de calefacción y enfriamiento son balanceados, ya que la masa reduce el tiempo de respuesta y reduce las fluctuaciones de temperatura de manera efectiva, la masa térmica permite el transporte de calor de la energía térmica.

El desplazar la demanda de energía a períodos de tiempo fuera de las horas de mayor demanda, generalmente se ve reflejada en costos más bajos. Esto es claro desde que las plantas eléctricas se diseñan para proporcionar energía en las cargas máximas; el consumo de carga máxima se reduce, optimizando el uso de energía y la sustentabilidad desde esta perspectiva (Leydecker, 2008).

La nanociencia y la nanotecnología de los materiales constructivos, en algunos casos denominado nano-modificación, son términos de uso común que describen dos grandes corrientes de la aplicación de ellas.

Por un lado, la nanociencia se encarga de la medición y caracterización de la estructura de los materiales basados en cemento, en la nano y micro escala, para entender de una mejor forma, como dichas estructuras afectan las propiedades y el

desempeño del material en la macro escala, esto a través del uso de técnicas avanzadas de caracterización y modelamiento molecular (Sánchez, 2010).

El concepto de una tecnología a nano-escala comenzó con el famoso artículo de 1959 “hay bastante espacio en la parte inferior” por el ganador del premio Nobel en física teoría Richard Feynman (Feynman, 1959). En la cual él dijo que no estaba preocupado de considerar la cuestión de si “En un gran futuro – nosotros podamos organizar los átomos de la manera que nos plazca”. La palabra nanotecnología fue asignada por el científico japonés Taniguchi Nori en 1974. Una visión futurística de la hipótesis de Feynman, es una transformación tecnológica social que comenzó a ser dada por Eric Drexler en 1986 con su libro “Creación de la maquina: La siguiente era de la nanotecnología (Drexler, 1986). En 1990 el restauró su visión: con una idea central, usando mecanismos a nanoescala que pudieran ser ensamblados como moléculas para la producción de sustancias útiles a los seres humanos, que fue técnicamente elaborado en 1995, en su trabajo titulado nanosistemas (Drexler, 1992). Mientras tanto los instrumentos y las técnicas de la nanotecnología han traído una visión más cercana.

Se espera que la nanotecnología tenga un impacto significativo en todo sector económico a través del uso de materiales nanoestructurados en medicina, la producción en energía limpia y la reducción del consumo energético, la creación de sensores nanoscópicos, nuevos materiales para óptica y fotónica, ultra pequeños imanes, el desarrollo de nuevas técnicas para la fabricación de estructuras a gran escala, el remplazo de la tecnología basada en silicón por la electrónica y computación, y la mejora de los productos de consumo. Unas de las nuevas aplicaciones serán resaltadas dentro de la materia (Wiley, 2014).

La nanotecnología agrupa las técnicas de manipulación de las estructuras en la escala de los nanómetros, para desarrollar una nueva generación de materiales compuestos, con desempeños mecánicos con durabilidad superior y con un potencial para un nuevo rango de propiedades como baja reactividad eléctrica, auto

control de grietas, entre otras. La nanotecnología modifica las matrices mediante la incorporación de objetos nanométricos, para controlar el comportamiento del material y añadir nuevas propiedades, o mediante la incorporación de moléculas en las partículas.

El continuo aumento de la capacidad de computación, ha permitido predecir la microestructura y las propiedades de las fases hidratadas de los polímeros mediante la integración física y química. El modelamiento a escala atómica mediante la dinámica molecular y técnicas de minimización de energía ofrecen un nuevo potencial en las ciencias, sobre los procesos que ocurren en la nanoescala, los cuales son de gran importancia para entender las propiedades del material en la macro escala y para el desarrollo de estrategias que mejoren su desempeño (Shelley, 2006).

Sin embargo, aunque el modelamiento a escala atómica provee habilidades para manipular, por medio de la simulación, átomos y moléculas, es necesario asegurar que dichas mejoras logradas en la escala nanométrica puedan ser trasladadas a la escala macrométrica. Existe una necesidad significativa de investigación en el desarrollo con respecto a las relaciones que existen entre los polímeros y la nano, micro y macro escala (Sánchez, 2010).

Existen tres líneas de investigación dentro de las cuales se pueden enmarcar los avances de la nanotecnología aplicada a los polímeros, la adición de materiales nanométricos y nanoestructurados, la hibridación de hidratos con moléculas orgánicas y la adición de nanorefuerzos. Dentro del campo de la adición de materiales nanométricos y nanoestructurados, se encuentra el trabajo realizado con nanopartículas tales como el nanohierro, la nanoalumina, la nanosílice, el nano-óxido de titanio y la nanoarcilla (Sánchez, 2010).

### **2.1.1. Los nanomateriales**

La nanotecnología se entiende como el estudio, diseño, creación y aplicación de materiales a nano escala, a través del control de la materia, reordenando los átomos y la estructura molecular.

La nanotecnología ofrece un alto potencial para promover innovaciones radicales y de alto valor en la fabricación, las propiedades y el uso de los materiales de construcción. La nanotecnología facilitará materiales ligeros, resistentes, con menor impacto ambiental e incluso autoadaptables al medio ambiente.

Es imprescindible que los materiales de construcción y los sistemas constructivos derivados cumplan varias características, como son: propiedades térmicas y mecánicas.

Como ha sido demostrado, las cantidades relativamente pequeñas de materiales en nanoescala son suficiente para mejorar la actuación del producto final. A pesar de esto, el éxito comercial de los nanomateriales depende de la habilidad para producir estos materiales en grandes cantidades y con un costo razonable (Zean, 2007).

### **2.1.2. Nanosílice**

Esta partícula posee propiedades puzolánicas que en reacción con los componentes hidratados del cemento, mejoran las propiedades de este. Sin embargo, la nano sílice es capaz de reaccionar con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para la formación de los C-S-H (silicato de calcio hidratado) con mejora de las propiedades resistentes. Por su tamaño y propiedades puede agruparse en los poros pequeños de la matriz cementante cerrando los mismos, por lo tanto, disminuye la permeabilidad y mejora las propiedades de durabilidad de los cementos, al limitar la penetración de agentes agresivos.



La nanosílice (NS) es ampliamente reconocida como una adición activa a los polímeros, la cual mejora su trabajabilidad en estado fresco y su resistencia mecánica en estado endurecido entre otras propiedades (Sánchez, 2010). También se ha encontrado que acelera el proceso de hidratación, aumenta las resistencias mecánicas a edades tempranas (Qing, 2007) y aumenta la resistencia a la penetración de agua, mejorando consecuentemente la durabilidad de los polímeros (Senff, 2007).

Los aumentos en resistencias mecánicas son principalmente a compresión; la resistencia a flexo-tracción se ve mejorada, pero esta no es significativa con respecto a la compresión (Pinnavia, 2000). Los resultados obtenidos dependen de la ruta de producción y las condiciones de síntesis de la nanosílice, del tamaño de la partícula y de su grado de dispersión dentro de la matriz (Sánchez, 2010).

Los trabajos donde se ha estudiado los efectos de la NS en solución o en polvo, se pueden agrupar en dos categorías, una primera categoría con adiciones menores de 5%, llegando incluso a valores menores de 1% y un segundo con adiciones entre 5 y 15%.

En el caso de la NS se puede afirmar que no hay consenso en el cual es el porcentaje ideal de adición (Pinnavia, 2000). Hay autores que plantean, que son mejores los porcentajes bajos de adición, quienes proponen un 0.6% como el porcentaje óptimo de adición de nanosílice, para alcanzar la máxima resistencia a la compresión. Otros autores encontraron el mejor resultado de resistencia a la flexión y a la compresión con el 1% de adición de NS (Li, 2004).

Por otro lado, los autores que proponen porcentajes altos de sustitución, hacen ajustes a la formulación para evitar un exceso de auto-deseccación y microgrietas que disminuyan la resistencia de la mezcla (Pinnavia, 2000). Dadas las características físicas de la NS, parecería más aconsejable utilizar porcentaje no superiores al 5% porque el aumento en el porcentaje de esta adición se incrementa

la demanda de agua, se dificulta la homogeneización de la mezcla (dispersión de nanopartículas), se genera mayor calor de hidratación y los costos de producción también se incrementan (Pinnavia, 2000).

La nanosílice es una de las nanopartículas incorporadas al cemento más estudiadas, ya que la sílice amorfa micrométrica (humo de sílice), ha sido usada como adición activa en los materiales cementantes durante los últimos 20 años, lográndose mejorías significativas en cuanto al desarrollo de resistencia mecánica y durabilidad de las mezclas. Las partículas de nanosílice presentan menor tamaño, mayor pureza y una estructura cristalina similar al humo de sílice, por lo tanto se espera obtener mejores resultados con su uso (Tobón, 2011).

### **2.1.3. Resina poliéster**

#### **Generalidades**

Las resinas de poliéster son líquidas a temperatura ambiente y pueden ser llevadas a estado sólido, en el caso de las resinas pre-aceleradas, por la adición de un catalizador; y para resinas no pre-aceleradas un acelerador y un catalizador.

Las resinas se presentan en forma de plásticos termo-estables que son los que se emplean en los materiales compuestos.

Los plásticos termoestables son aquellos que necesitan un agente externo (catalizador) para cambiar su estructura en otra diferente; una vez producida, esta no puede volver a su estado anterior, a diferencia de los plásticos termoplásticos.

Los materiales compuestos son aquellos que originalmente eran dos o más, y por medio de diferentes procesos se convierten en uno, siendo sus

propiedades finales diferentes de los materiales originales. Ejemplo claro de esto es el laminado de fibra de vidrio con resina de poliéster (Díaz, 2008).

### **Endurecimiento de las resinas**

De acuerdo con Gil (2008) el proceso de transformación de estado líquido a sólido se llama curado, polimerización o endurecimiento y viene acompañado de una reacción exotérmica (que desprende calor). Este cambio de estado no se presenta inmediatamente se adicionan los promotores de curado (acelerador y catalizador), es una reacción que ocurre a medida que transcurre el tiempo y se genera de forma gradual, pasando de estado líquido a estado gelatinoso (conocido como estado o tiempo de gel) y finalmente ha estado sólido.

En las resinas de poliéster el acelerante o acelerador se llama octoato de cobalto y el catalizador se llama mek (metil-etil-cetona) peróxido.

Los principales factores que intervienen en el proceso de curado son:

- El tipo y referencia de resina empleada.
- La temperatura ambiente, la mayoría de las resinas no curan a temperaturas inferiores a 16°C.
- La naturaleza y cantidad de catalizador y acelerador. A mayor cantidad de ambos, menor tiempo de gelificación.
- La naturaleza y cantidad de las cargas. Si estas son elevadas retrasan el curado.
- La humedad relativa. Es necesario mantener una humedad relativa entre 40 y el 54%.

Además de lo antes mencionado hay que tener en cuenta lo siguiente:

Todas las resinas de poliéster disponen de una hoja de seguridad, además de una formulación específica o ficha técnica en la que se menciona, entre otros, la cantidad de catalizador y de ser necesario la cantidad de cobalto, si permite o no la utilización de estireno y en qué porcentajes.

En el caso de las resinas pre-aceleradas, es posible encontrar (dependiendo del lote de fabricación o de la empresa que la produce) que la cantidad de cobalto no sea siempre la misma, lo cual hace difícil la tarea de prever un tiempo de gel y de curado según la cantidad de catalizador que haya que adicionar y se convierte en decisión del experto en resinas por medio de chequeo visual, para decidir el porcentaje de catalizador y/o acelerador tomando como base las recomendaciones del fabricante, además de todos los factores aquí mencionados.

Otro factor a tener en cuenta, es que las resinas tienen un tiempo de vida, y desde su fabricación, pasando por el proceso de distribución hasta llegar al consumidor final puede haber pasado un tiempo considerable que afecta la calidad y viscosidad de la resina, además el lugar y la temperatura de almacenamiento pueden influir en forma negativa.

Una vez se ha destapado un recipiente que contiene resina y comienza a utilizarse, debe gastarse en el menor tiempo posible, de lo contrario es posible que dicha resina pierda propiedades de manejo y características en el producto final.

El molde es otro elemento importante a considerar, éste puede interferir en la buena realización de un vaciado de resina de muchas formas, ya sea por humedad de éste, temperatura diferente a la recomendada, puntos de amarre, volumen y hasta la forma de la pieza a ser vaciada, ya que la reacción exotérmica de la resina cambia y puede generar fracturas en ésta (Gil, 2008).

## Descripción

Resina poliéster instaurada ortoftálica, tixotrópica, sin parafina de reactividad media, su viscosidad y los aditivos hacen que esta resina sea considerada de baja emisión de estireno.

Está diseñada para trabajar en el sistema de aspersión. Tiene excelentes propiedades mecánicas y gran estabilidad dimensional (GQ, 2007).

## Composición

**Tabla 1** Composición de la resina.

Poliéster instaurado (%)	62 – 64
Monómero de estireno (%)	36 – 38

Fuente: grupo químico industrial de Toluca S.A. de C.V.

## Aplicaciones

Por sus características para:

- Fabricación de barcos, lanchas y equipo marinos.

## Especificaciones del producto

**Tabla 2** Especificaciones de la resina.

Color visual	Rosado
Viscosidad brookfield (cps) (25°C)	400 – 500
Sólidos (%)	62 – 64
Estabilidad (120°C ± 2)	90' Mínimo
Peso específico (25°C)	1.11 – 1.13
Índice tixotrópico	1.5 – 2.5

Fuente: grupo químico industrial de Toluca S.A. de C.V.

**Nota:** estabilidad sin catalizador o acelerador y en la oscuridad.

## Resina polimerizada

### Características típicas de curado

**Tabla 3** Características típicas del curado.

Tiempo de gelado (min)	10'00"–15'00"
Exotérmica máx. tiempo (min)	20'00"–30'00"
Temperatura exotérmica máx. (°C)	150 – 180

Fuente: grupo químico industrial de Toluca S.A. de C.V.

### Propiedades de la resina polimerizada

**Tabla 4** Propiedades de la resina polimerizada.

Apariencia	Sólido rosado
Peso específico	1.10 – 1.13
Volumen de contracción (%)	5 – 6
Dureza barcol	40 – 45
Absorción de agua (mg/kg)	0.04 – 0.05
Temperatura de distorsión (°C)	70 – 80

Fuente: grupo químico industrial de Toluca S.A. de C.V.

### Porcentaje para la prueba de polimerización

Las características de curado y las propiedades de la resina se obtuvieron realizando la polimerización de acuerdo a:

**Tabla 5** Porcentaje para la prueba de polimerización.

MEGA TIX 3012-F2 (g)	100
Catalizador P MEC al 50% (ml)	1.0

Fuente: grupo químico industrial de Toluca S.A. de C.V.

## Condiciones de la prueba

**Tabla 6** Condiciones de la prueba.

Temperatura	25 °C
Presión	Ambiente

Fuente: grupo químico industrial de Toluca S.A. de C.V.

Para acelerar el tiempo de gelado de la resina se recomienda aumentar o disminuir el acelerador o el catalizador de acuerdo a los requerimientos del proceso (tiempos de trabajo). Otro factor que acelera el proceso de polimerización es la temperatura de trabajo, a mayor temperatura se obtiene una polimerización más rápida.

Es indispensable realizar pruebas preliminares para cada proceso con el fin de determinar el sistema acelerador-catalizador adecuado para satisfacer las necesidades de trabajo. Una vez efectuada la polimerización se obtiene un producto duro e infusible (GQ, 2007).

## Propiedades del producto en la aplicación

Propiedades mecánicas típicas en laminados (98) (MR 3000/60-PA).

**Tabla 7** Propiedades mecánicas del producto en la aplicación.

Resistencia a la tensión	kg/cm <sup>2</sup>	1470.39
	PSI	20909
Resistencia a la flexión	kg/cm <sup>2</sup>	3262.52
	PSI	46393
Resistencia a la compresión	kg/cm <sup>2</sup>	1621.66
	PSI	23060

Fuente: grupo químico industrial de Toluca S.A. de C.V.

#### **2.1.4. Confort térmico en la historia**

El confort térmico es la sensación que expresa la satisfacción de los usuarios de los edificios con el ambiente térmico. Por lo tanto es subjetivo y depende de diversos factores.

El cuerpo humano “quema” alimento y genera calor residual, similar a cualquier máquina. Para mantener su interior a una temperatura de 37°C, tiene que disipar el calor y lo hace por medio de conducción, convección, radiación y evaporación. En la medida como se acerca la temperatura ambiental a la temperatura corporal, el cuerpo ya no puede transmitir calor por falta de un gradiente térmico, y la evaporación queda como única forma de enfriamiento.

Una de las funciones principales de los edificios es proveer ambientes interiores que son térmicamente confortables. Entender las necesidades del ser humano y las condiciones básicas que definen el confort es indispensable para el diseño de edificios que satisfacen los usuarios con un mínimo de equipamiento mecánico (ACCIONA, 2013).

#### **Factores**

La producción de calor del cuerpo depende principalmente del nivel de actividad de la persona. Para la disipación de calor, estos factores son críticos:

- Factores ambientales.
- Temperatura del aire.
- Humedad relativa del aire.
- Movimientos de aire.
- Temperatura media radiante.
- Factores personales.
- Vestimenta de la persona.



La sensación térmica además depende fuertemente de las expectativas de la persona. Así que influyen el clima exterior, la estación del año y la hora del día, el asoleamiento, la iluminación y la calidad del aire interior, entre otros.

Las recomendaciones y normas pueden diferir bastante en los valores concretos para los factores ambientales (ACCIONA, 2013).

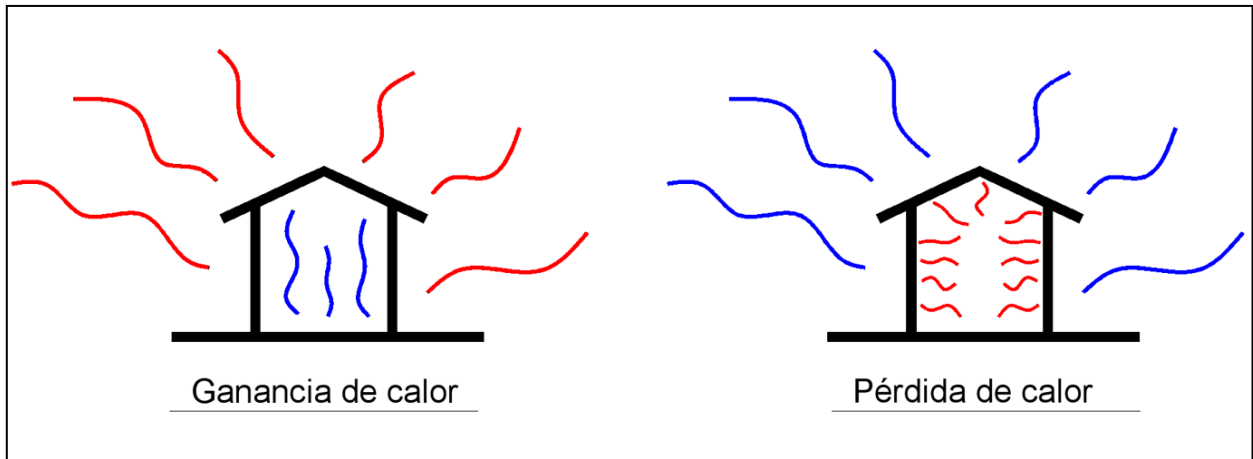
Este es el caso de la Norma Oficial Mexicana que tiene por objeto establecer los métodos de prueba para evaluar la conductividad o resistencia térmica, densidad aparente, permeabilidad al vapor de agua, la absorción de humedad y absorción de agua, que se indiquen en los materiales homogéneos que se comercialicen en el país con propiedades de aislantes térmicos.

A su vez responde a la necesidad de incrementar el ahorro de energía y la preservación de los recursos energéticos a través de la utilización de mejores materiales, así como a la de proteger al consumidor, orientándole en la selección de los materiales que le ofrezcan la mejor alternativa para su necesidad de aislar térmicamente su edificación (CCNNPURRE, 2011).

#### **2.1.5. Aislantes térmicos**

A la hora de seleccionar el material térmico, la propiedad principal a tener en cuenta, es la conductividad, pero no hay que olvidar: la densidad, la estabilidad química, la rigidez estructural, la degradación y lógicamente el costo, que son fundamentales para que el material pueda culminar la función para la que se instaló. Muchos materiales pierden entre el 20% y el 5% de su calidad aislante durante el primer año de uso.

### Ilustración 3 Representación gráfica de la pérdida y ganancia de calor.



Fuente: elaboración propia.

En los materiales que absorben humedad, aumenta considerablemente su conductividad y pierden, o cuando menos disminuye, su funcionalidad. Los aislantes sueltos pueden apelmazarse. Todo ello hace, que al seleccionar un aislante halla que fijarse atentamente en sus propiedades (Kern, 1999).

#### 2.1.6. Sistemas de construcción con aislamiento térmico y eficiencia energética

Estudios han comprobado que alrededor del 40% de la energía que se produce en nuestros países se consume en edificios, y de este total, más del 60% se destina a climatizar el interior de las viviendas para alcanzar el nivel óptimo de confort. Además, una parte destacada de la energía necesaria para la climatización se obtiene de la combustión de combustibles fósiles, lo que produce emisiones de CO<sup>2</sup> a la atmósfera.

Por ello, para reducir la demanda de energía es necesario actuar sobre la envolvente (fachadas, puertas, ventanas, recubrimientos) para mejorar el aislamiento de la misma, así como reducir las pérdidas energéticas por infiltraciones

y puentes térmicos. A esta reducción de demanda energética se puede sumar otras buenas prácticas como aprovechar las ganancias solares pasivas.

La eficiencia energética en la edificación requiere que la parte mayor de ahorro se obtenga de la propia construcción: tipología de los cerramientos, los materiales utilizados y la orientación del edificio. En el caso de la rehabilitación de edificios, es importante evaluar el estado de los aislantes térmicos existentes para implementar soluciones que permitan mejorar la transmitancia térmica<sup>4</sup> del edificio (Maratum, 2017).

### 2.1.7. Norma Oficial Mexicana (NOM) 18 – ENE - 2011

Aislantes térmicos para edificaciones, características y métodos de prueba.

#### Objetivo

Esta Norma Oficial Mexicana establece las características y métodos de prueba que deben cumplir los productos, componentes y elementos termoaislantes, para techos, plafones y muros de las edificaciones.

#### Campo de aplicación

Aplica a los productos, componentes y elementos que sean de fabricación nacional o de importación con propiedades de aislante térmico para techos, plafones y muros de las edificaciones, producidos y comercializados con ese fin, sin perjuicio de otros fines. Se excluyen los aislantes térmicos para cimentaciones.

---

<sup>4</sup> **Transmitancia térmica** (U, pero denominada también como Valor-U en algunos lugares) es la medida del calor que fluye por unidad de tiempo y superficie, transferido a través de un sistema constructivo, formado por una o más capas de material, de caras plano paralelas, cuando hay un gradiente térmico de 1°C (1 K) de temperatura entre los dos ambientes que éste separa (Huerta, 2012).

Especificaciones:

- Densidad aparente: el fabricante debe indicar la densidad aparente del material, producto, componente y elemento termoaislante. Esto se verifica de acuerdo al método de prueba correspondiente con el tipo de material, producto, componente y elemento.
- Conductividad térmica: el fabricante debe indicar la conductividad térmica del material, producto, componente y elemento termoaislante, medida a una temperatura media de 297 K (24°C).

Para los materiales termoaislantes en espesores fijos determinados, se debe indicar el valor de la resistencia térmica, indicados en la siguiente tabla.

**Tabla 8** Métodos de prueba.

<b>Propiedad</b>	<b>Métodos de prueba</b>
Densidad aparente	NMX-C-125-ONNCCE-2010 NMX-C-126-ONNCCE-2010 NMX-C-213-ONNCCE-2010 NMX-C-258-ONNCCE-2010
Conductividad térmica	NMX-C-181-ONNCCE-2010 NMX-C-189-ONNCCE-2010

Fuente: diario oficial de la federación (2015) norma oficial mexicana. Recuperado de [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5411121&fecha=09/10/2015](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5411121&fecha=09/10/2015).

### **3. Metodología**

En este capítulo se presenta la metodología general de investigación en la cual el desarrollo experimental se divide en cuatro etapas asociadas con actividades que describen el diseño experimental. Para cada una de estas actividades principales se presenta en detalle el montaje experimental, la preparación de la muestra y el diseño de la matriz experimental, en los casos que aplica. Finalmente se presenta un resumen de las especificaciones técnicas de los equipos usados.

#### **3.1.1. Metodología de investigación**

El desarrollo experimental se dividió en cuatro etapas consecutivas, a partir de los resultados obtenidos en cada etapa se alimentó la siguiente, buscando afinar los parámetros experimentales para reducir el número de experimentos.

En la primera etapa, se realizó la caracterización de las materias primas, con la finalidad de identificar las propiedades de los materiales usados y verificar su calidad. Se escogió una nanosílice disponible comercialmente para aplicaciones de construcción, debido a que estos son menos costosos que otros casos y sus propiedades mecánicas en las pastas de cemento y resina son similares. En la segunda etapa se estudió la dispersión de la nanosílice en resina, ya que el método elegido para introducir las nanopartículas a la matriz de la resina será a través de métodos manuales. Para la tercera etapa se llevarán a cabo los moldes donde serán vaciadas las mezclas y en la última etapa, las probetas obtenidas serán sometidas a pruebas mecánicas y térmicas.

Se encontraron los parámetros más adecuados para maximizar el grado de dispersión de la nanosílice con ayuda de superplastificante (SP), se evaluaron los daños inducidos por el proceso de dispersión en la estructura de la nanosílice y se simuló un ambiente rico en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , característico del cemento hidratado, para identificar su influencia sobre la estabilidad de las dispersiones.

### 3.1.2. Materiales

La siguiente tabla presenta un resumen de los materiales utilizados en el desarrollo del trabajo experimental, su proveedor y sus características básicas reportadas en las fichas técnicas.

**Tabla 9** Descripción de los materiales ocupados.

<b>Nombre</b>	<b>Marca</b>	<b>Características por ficha técnica</b>
Nanosílice	ALDRICH	7 nm
Nanosílice	ALDRICH	12 nm
Nanosílice	ALDRICH	200 – 300 nm
Cemento CPC 30R	CEMEX	Resistencia a compresión a 28 días
Resina	Grupo Químico Industrial	Poliéster, tixotrópica
Butanox	Comercial	

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.3. Ensayo sobre pastas de mortero

Se presentó una situación similar a las pastas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , donde existe un porcentaje máximo de nanopartículas sólidas que se pueden adicionar a la pasta sin superar la relación agua/material cementante deseada. Teniendo en cuenta la concentración de sólidos de la dispersión (0.25%) y la concentración de sólidos de la NS (49.5%), el porcentaje máximo de adición de NS sólidos calculado para relaciones agua/material cementante 0.4%.

**Ilustración 4** Elaboración de mortero (nanosílice, arena, agua y cemento).



Fuente: trabajo de laboratorio.

### 3.1.4. Ensayo sobre resinas

Para identificar la influencia nanosílice se prepararon pastas adicionadas con resina a diferentes tamaños de partículas (7nm, 12nm, 200nm). El combinado de las resinas con la nanosílice, siempre fue trabajado en vasos de precipitados para posteriormente ser estudiado su proceso de gelificación o ser vaciado en los moldes, el mezclando de los compuestos se realizaron de forma manual con una espátula, el resultado final fue almacenado en un ambiente templado.

**Ilustración 5** Mezclado de resina con nanosílice.



Fuente: trabajo de laboratorio.



### 3.1.5. Equipos

#### 3.1.5.1. Termogravimetría (TGA)

Se trabajó en un analizador termogravimétrico marca TA *instruments* referencia SDT Q600, en un rango de temperaturas entre 28 °C a 600 °C, con un método de rampa el cual fue aumentando su temperatura a 20.00 °C/min, en una atmósfera de hidrógeno. Los ensayos se realizaron en LIDMA, de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México.

**Ilustración 6** Analizador termogravimétrico marca TA.



Fuente: laboratorio LIDMA-UAEM.

### 3.1.5.2. Multiensayo

Se trabajó con una prensa marca Controls Multiensayo, electromecánico universal para pruebas, con un intervalo de medición: 200 y 300 kN. En las de compresión máxima de 9.12 toneladas. Para compresión se corrieron 12 probetas de concreto y 12 de resina, cada uno con diferente tamaño de partícula respectivamente, de acuerdo con las normas EN-196-1. Este equipo pertenece a LIDMA de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México.

**Ilustración 7** Multiensayo utilizada en las pruebas de compresión.



Fuente: laboratorio LIDMA-UAEM.

### 3.1.5.3. *Burning tester* (pruebas de flamabilidad)

Se trabajó en un equipo nombrado *Horizontal-vertical burning tester*, con una flama que atacó las paletas durante 15 segundos, el combustible de la flama fue gas natural. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de una empresa privada.

**Ilustración 8** Equipo utilizado para pruebas de flamabilidad (burning tester).

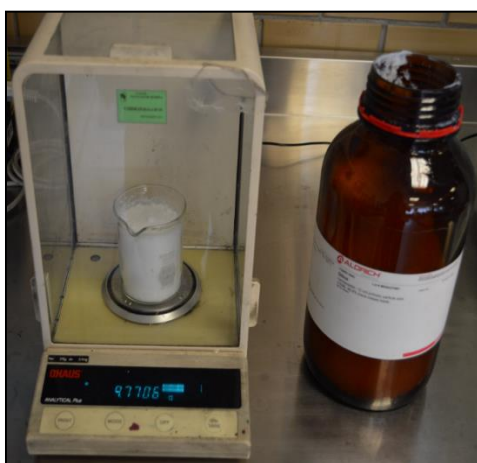


Fuente: guangzhou hongce equipment CO., LTD.

**3.1.5.4. Balanza analítica**

Se trabajó en un Ohaus Analytical Plus balance Ohaus AP250D, la cual tiene una capacidad máxima de medida de 250 gramos y una resolución de 0.1 mg. Los pesados se realizaron en LIDMA, de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México.

**Ilustración 9** Pesado de material en balanza OHAUS.

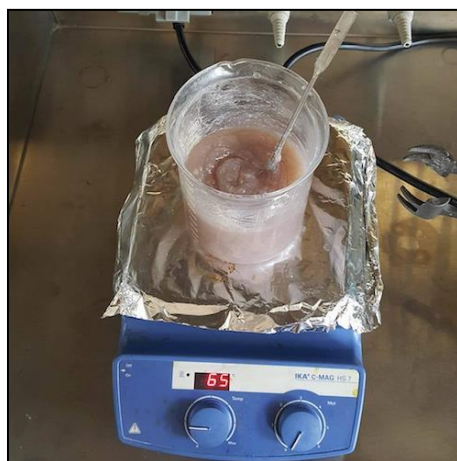


Fuente: laboratorio LIDMA-UAEM.

### 3.1.5.5. Calentador y agitador

Agitador magnético con placa calefactora de vitrocerámica que se caracteriza por una resistencia química muy alta. Potente motor para cantidades de agitación de hasta 10 l (H<sub>2</sub>O), Circuito de seguridad fijo de 550 °C, Indicador de alta temperatura - aviso en el caso de que la superficie esté caliente para proteger frente a quemaduras. El calentamiento del material se realizó en LIDMA, de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México.

**Ilustración 10** Calentado de la mezcla (resina, nanosílice).



Fuente: laboratorio LIDMA-UAEM.

### 3.1.5.6. *Sper Scientific 800100 IR Thermometer Pen, LED Light*

El rango de temperatura que puede ser captado por esta pluma va de los -27°C a los 428°C, resolución 0.5 grados Fahrenheit. La medición de la temperatura del material se realizó en LIDMA, de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México.

**Ilustración 11** Termómetro con luz LED utilizado para la medición de pérdida de temperatura.



Fuente: laboratorio LIDMA-UAEM.

#### **3.1.5.7. Multímetro profesional con detector de voltaje (Termopar)**

Mediciones precisas de voltaje, corriente, capacitancia, temperatura, frecuencia, continuidad y beta de transistores. La medición de la temperatura del material se realizó en LIDMA, de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México.

## Ilustración 12 Termopar para medición de temperatura (STEREN).



Fuente: laboratorio LIDMA-UAEM.

### 3.1.6. Desarrollo experimental

En este capítulo se describen los detalles del procedimiento experimental efectuado en las diferentes etapas de esta investigación, que se requirieron para cumplir los objetivos planteados anteriormente, con el fin de que todos los ensayos realizados durante este período, pudiesen ser reproducibles en futuros estudios.

Para ello, se realizaron una serie de análisis de caracterización fisicoquímica de cada uno de los materiales empleados como materia prima, antes de llevar a cabo las probetas con las partículas, se determinaron los porcentajes aceptados por lo polímeros para la obtención de las pastas.

### Dispersión de nanopartículas

Para lograr una mejora de las propiedades de una matriz mediante la adición de nanopartículas, uno de los principales aspectos que se debe tener en cuenta es la adecuada dispersión de la nanopartículas en la matriz. Dependiendo del tipo, la cantidad del pH en el medio que estén dispersas, las nanopartículas serán más o menos propensas a formar aglomeraciones. Para el caso de esta investigación

(matriz de cemento), las nanopartículas dispersas rellenan los poros entre las partículas de cemento, acelerando el proceso de hidratación.

La uniformidad de la dispersión se puede dividir en dos aspectos, el primero relacionado con la uniformidad espacial de las nanopartículas y el segundo, relacionado con su orientación cuando éstas tienen forma de filamentos y su orientación afecta las propiedades constitutivas del compósito (Sobolkina, 2012).

Cuando las partículas de la matriz son significativamente más grandes que el material que se está incluyendo (nanopartículas), se puede generar una aglomeración dependiente de la geometría de las partículas de la matriz, la cual puede causar una baja homogeneidad en la dispersión de las nanopartículas (Sobolkina, 2012).

### **3.1.7. Propiedades retardantes a la llama**

Dado que expresar una información en forma numérica facilita la comparación, el comportamiento de los materiales polímeros cuando son expuestos al fuego generalmente se expresa como el resultado de un test de inflamabilidad. Es de esperar que estas pruebas proporcionen alguna correlación con la exposición real del material al fuego.

Una advertencia publicada por la *American Society for testing and materials*, en sus métodos estándar para las pruebas de inflamabilidad y que es apropiada para todas las pruebas de inflamabilidad dice:

*“Este método estándar debería ser usado para medir y describir la respuesta de los materiales, productos o componentes al calor y la llama bajo condiciones controladas y no debería ser usado para describir o valorar el peligro al fuego o el riesgo de fuego de materiales, productos o componentes bajo condiciones reales de fuego. Sin embargo, los resultados de este test pueden ser usados como*

*elementos de evaluación del peligro al fuego o de evaluación del riesgo de fuego, tomando en cuenta todos los factores que son pertinentes para la evaluación de los peligros o riesgos de fuego de un particular uso final” (Randall, 2009).*

Las pruebas de inflamabilidad pueden ser clasificados en dos grupos generales: los que son principalmente las pruebas de investigación, y los que son principalmente las pruebas de aceptación. El primer grupo comprende todos los métodos que son estándar porque son reconocidos como métodos deseables para la evaluación de la respuesta característica al fuego de materiales sobre la base de solidez técnica y valor científico. El segundo grupo incluye aquellos métodos que son estándar principalmente porque son un requerimiento del mercado. Muchas de las pruebas de aceptación son, en algún momento u otro, usados como pruebas de investigación. En los mejores casos, las mejores pruebas de investigación llegan a ser eventualmente pruebas de aceptación.

La evaluación del retardante a la llama de los materiales sintetizados en este trabajo fue realizada en relación a lo estipulado en la NOM-018 (Norma Oficial Mexicana). En este test se emplearon paletas de resina y de concreto las cuales tuvieron una medida de 5” x 10” pulgadas y 1 cm de espesor las cuales fueron sostenidas verticalmente por la parte inferior.

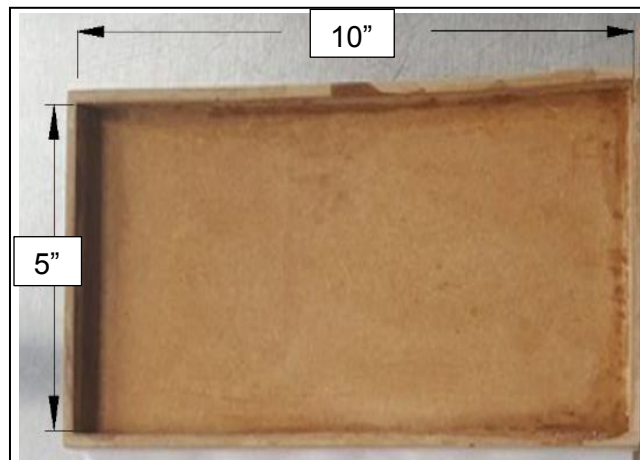
El flujo del gas natural en el tubo es de  $4\pm 1$  cm/s. La muestra es encendida en la parte superior con una llama, la cual es luego retirada al paso de 15 segundos, y se determina la atmósfera que permite sostener la llama de la muestra. El índice de oxígeno es la concentración mínima de oxígeno, que permite quemar 10” pulgadas en dirección vertical de las paletas o mantener el fuego durante 3 minutos. Se considera que un material tiene propiedades retardantes a la llama si este no permanece prendido después de ser atacado con una flama directa.



### 3.1.8. Acondicionamiento de moldes para paletas de resina

Se elaboraron paletas con moldes de madera de 5" de ancho, 10" de longitud y 1cm de espesor como se muestra en la siguiente ilustración. Fue necesaria la elaboración de los moldes, encerados, para facilitar el desmolde de las paletas.

**Ilustración 13** Molde para colado de paletas 10 x 5 pulgadas por un centímetro de profundidad.



Fuente: elaboración propia.

**Ilustración 14** Paletas de concreto 10 x 5 pulgadas.



Fuente: elaboración propia.

**Ilustración 15** Paletas de resina 10 x 5 pulgadas.



Fuente: elaboración propia.

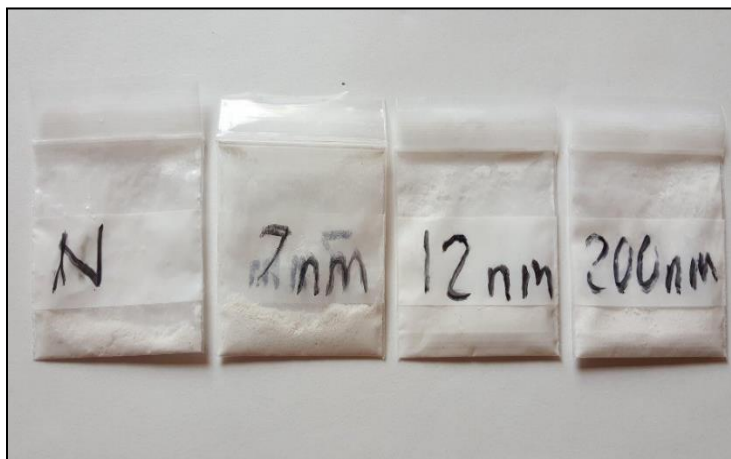
### 3.1.9. Estabilidad térmica

El análisis termogravimétrico (TGA) se basa en la medida de la variación de la masa del material cuando éste es sometido a un proceso de calentamiento. La estabilidad térmica del mortero y de la resina fueron evaluados mediante experimentos con un programa de calentamiento “*rampa*” de 20°C/min en el rango de temperaturas de 30°C a 600°C en una atmósfera de hidrógeno.

En todos los casos se eligió la temperatura de inicio de la pérdida de peso como la temperatura a la cual se ha perdido el 20% de peso y el residuo a 600°C se consideró como el resto carbonado con alta temperatura. La velocidad de pérdida de peso se determinó mediante la derivada de la curva termogravimétrica con respecto al tiempo (o en relación a la temperatura), también llamada DTG. El intervalo de temperaturas que contiene un máximo de velocidad de pérdida de peso asociado con al menos una etapa de degradación.

El peso perdido se debió a la degradación del material expuesto a una alta temperatura. En la siguiente ilustración se muestran los sobres con la molienda de resina simple y resina combinada con nanosílice, los cuales dieron paso a llevar a cabo las pruebas de TGA.

**Ilustración 16** Polvo producto del limado de las probetas de resina (testigo, 7nm, 12nm y 200nm).



Fuente: trabajo de laboratorio.

### 3.1.10. Diseño de la mezcla de morteros

Para este trabajo se propuso una relación constante entre el agua y el material a/mC = 0.65, que se utilizó para la elaboración de los especímenes de morteros, con la finalidad de cumplir parámetros de porosidad requerido, entre un 15 a 20% (concreto de baja calidad). Los morteros se elaboraron con una consistencia normal.

En la siguiente tabla se puede apreciar la fórmula que se utilizó para la elaboración de morteros con la simple combinación de cemento, agua y arena, para el caso de los especímenes testigo y con la dispersión de nanosílice al 1% en tres diferentes tamaños para obtener una comparativa de resultados.

**Tabla 10** Materiales empleados para la elaboración de morteros.

Material 1:3	Material 1%
Cemento	Nanosílice
Agua	
Arena	

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.11. Acondicionamiento de moldes para especímenes de mortero

Se elaboraron especímenes cilíndricos de 5 cm de diámetro y 10 cm de longitud, como se muestra en la siguiente ilustración, los cilindros se obtuvieron por parte de LIDMA, de la Facultad de Química de la UAEM. Para comenzar se engrasaron con aceite para facilitar el desmolde de los especímenes y posteriormente se coló la mezcla en tres tiempos a los cuales se les picó 25 veces con una espátula para la liberación de burbujas.

**Ilustración 17** Cilindro de metal para colado de especímenes.



Fuente: laboratorio LIDMA-UAEM.

Se pudo observar que los cilindros presentan una deshidratación al ser integrada la nanosílice, por lo que se recomienda elaborar esta prueba en un ambiente húmedo y cuidar que los especímenes se mantengan hidratados.

**Ilustración 18** Especímenes de mortero.

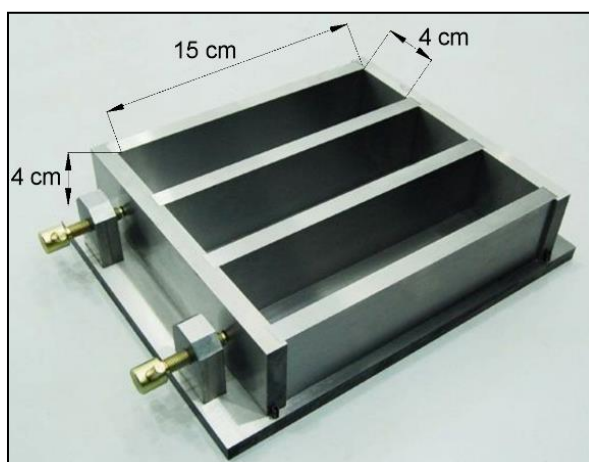


Fuente: trabajo de laboratorio.

### 3.1.12. Preparación de probetas de resina

Se elaboraron probetas de resina de 4 x 4 x 15 cm, como se muestra en la siguiente ilustración. El molde se obtuvo del Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA) de la Facultad de Química de la UAEM, posteriormente fueron encerados, para facilitar el desmolde de las probetas y completamente selladas todas las fisuras para evitar fugas.

**Ilustración 19** Molde metálico para colado de probetas de resina.



Fuente: laboratorio LIDMA-UAEM.

### 3.1.13. Diseño de la mezcla de resinas

Para este trabajo es necesaria una previa experimentación como lo muestra la siguiente tabla, para comprobar la cantidad necesaria de sílice a ser dispersa en la resina y así comprobar los tiempos de gelado, posteriormente agregar a la mezcla 1% de butanox (catalizador) para después ser agregado inmediatamente en los moldes, previo a su endurecimiento.

**Tabla 11** Materiales empleados para la elaboración de probetas de resina.

<b>Material</b>	<b>Porcentaje</b>
Resina	Cantidad
Nanosílice	4%
Butanox	1%

Fuente: elaboración propia.

#### 4. Discusión de resultados

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos a partir de las actividades planteadas en la metodología. En las siguientes tablas de interacciones se permite analizar el comportamiento de los tres tamaños de partículas probadas, propiedades de los materiales que comienzan a reaccionar cuando la matriz del compuesto ha aceptado la nanosílice.

**Tabla 12** Pesos de material en cada muestra.

Peso de vaso (g)	Peso de resina (g)	Tamaño de partícula	Peso total (g)
VP1 T=31.6010	10,5305	12 nm	42,5716
VP2 T=31.6010	10,1327	7 nm	47,5384
VP3 T=31.6010	10,3776	200 nm	43,6181

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 13** Obtención de pasta por la combinación de resina con NS.

Vaso	Peso de vaso con resina y NS	Porcentaje de NS	Producto
VP1	44	4,2	pasta
VP2	53	5,0	pasta
VP3	47	4,38	pasta

Fuente: elaboración propia.

Con estas tablas queda demostrado que es posible obtener una pasta, dispersando en la resina el 4% del volumen total a trabajar, esta fórmula queda asentada y da paso a la elaboración de las probetas para las pruebas mecánicas y térmicas.



#### 4.1.1. Pruebas de transferencia de calor

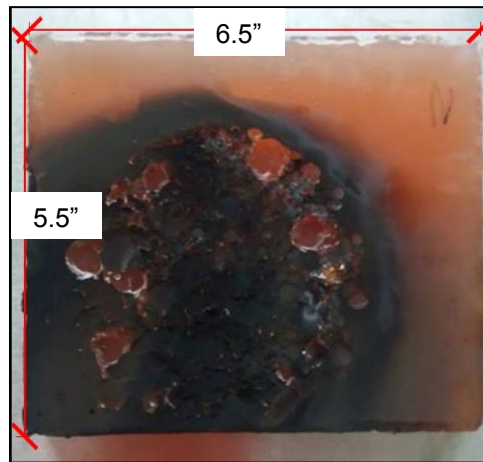
Un Intercambiador de calor es un sistema mecánico, construido para transferir calor entre dos fluidos a diferente temperatura que están separados por una pared que puede ser metálica.

Cuando la diferencia de temperatura es pequeña se desprecia la transferencia de calor por radiación y el intercambiador de calor se calcula aplicando las correlaciones de transferencia de calor por conducción y convección.

Un aspecto importante en la aplicación de los intercambiadores es la recuperación del calor de procesos o incluso a la recuperación de calor de fluidos residuales, que en sí mismo no tiene valor económico, pero estando a temperaturas superiores al ambiente, transportan calor, que al recuperarlo, tiene un valor energético (recuperación de energía) y económico. Además, permite o contribuye a la conservación del medio ambiente, ayuda a que el ahorro de energía se traduce en un ahorro de combustible, disminución de masa de contaminantes (dióxido de carbono y otros), emitidos a la atmósfera.

La ley básica de la conducción del calor (Kern, 1999), establece: “La tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y gradiente de temperatura en esa dirección”.

**Ilustración 20** Paleta expuestas a un soplete para medir la transferencia de calor (resina natural).

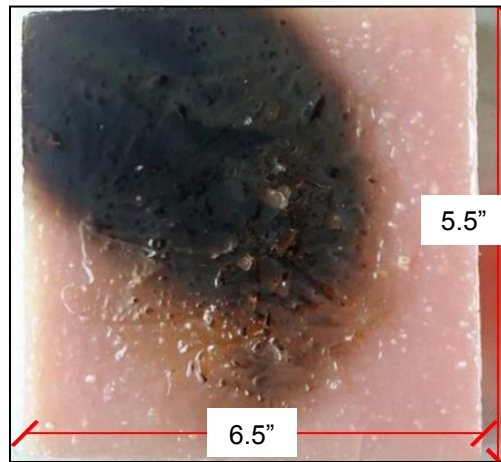


Fuente: elaboración propia en el laboratorio LIDMA-UAEM.

Con frecuencia resulta imposible predecir el coeficiente de transferencia de calor global de un intercambiador de calor al cabo de un cierto tiempo de funcionamiento, teniendo sólo en cuenta el análisis térmico; durante el funcionamiento con la mayoría de los líquidos y con algunos gases.

Con el objetivo de hacer una comparativa entre la ilustración 20 y 21 se puede apreciar el desgaste provocado por una llama que fue colocada directamente en ambas probetas. En el caso de la paleta sin NS la flama consumió bruscamente el material, pero para el caso de la paleta con NS, está no recibió gran daño durante el experimento.

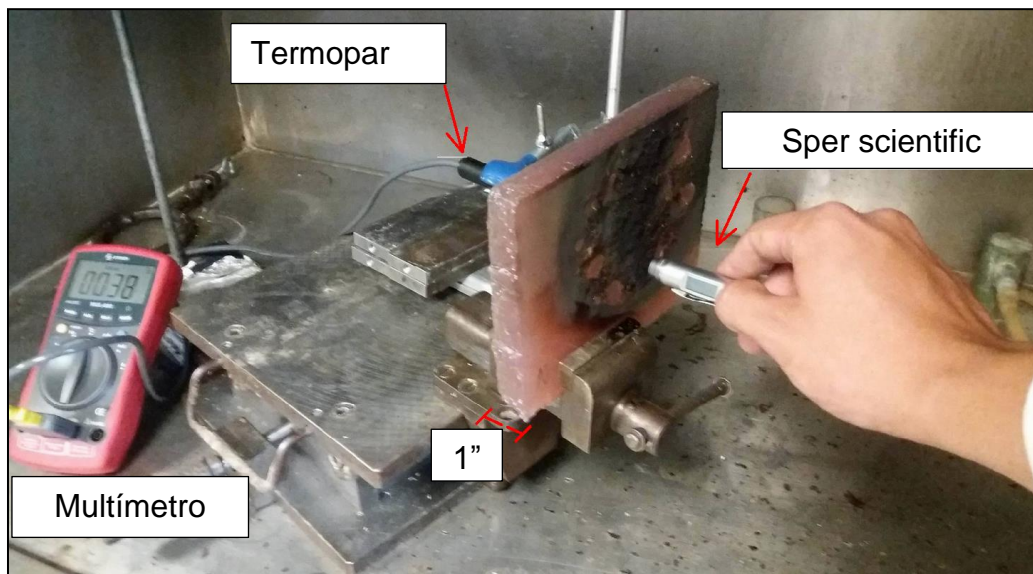
**Ilustración 21** Paleta de resina expuestas a un soplete para medir la transferencia de calor (7 nm).



Fuente: trabajo de laboratorio.

Con el paso del tiempo se van produciendo gradualmente películas de suciedad sobre la superficie en la que se realiza la transferencia térmica, que pueden ser de óxidos, incrustaciones calizas procedentes de la flama, provocando un aumento de la resistencia térmica de la probeta.

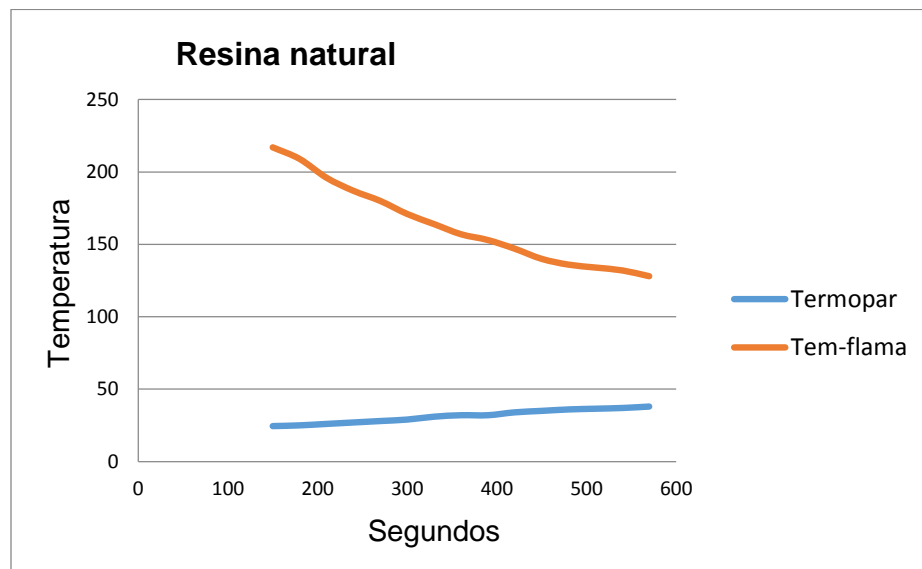
**Ilustración 22** Medición de la perdida y ganancia de calor (resina natural).



Fuente: trabajo de laboratorio.

En la ilustración anterior se puede observar como existe un desgaste mayor en la paleta que no le fue incorporada la nanosílice, la llama del soplete fue más agresiva para este tipo de probeta. A su vez se puede observar el proceso de medición de la transferencia de temperatura, por medio del uso de un termopar y un *sper scientific*, puestos inmediatamente después de haber sido retirada la flama.

**Gráfica 1** Representación gráfica de pérdida y ganancia de calor (resina natural).

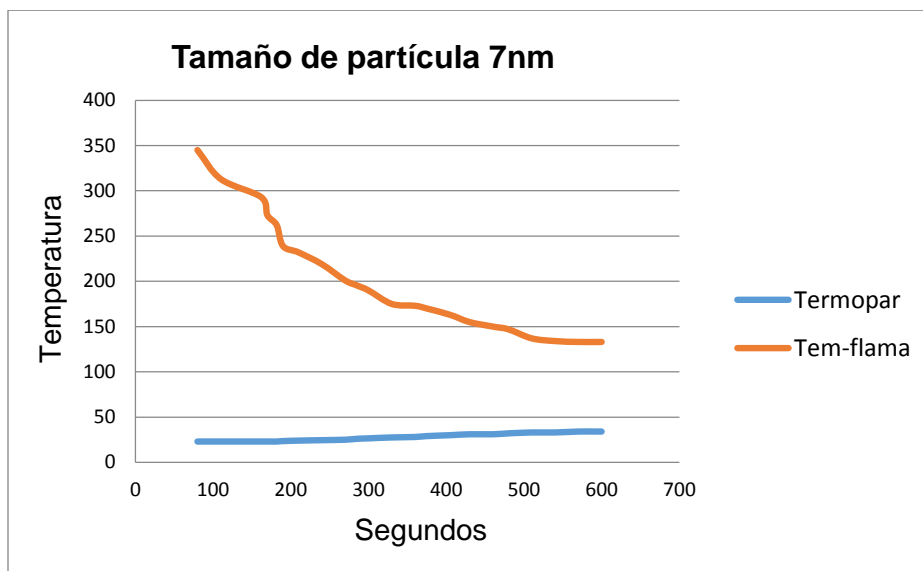


Fuente: elaboración propia.

En la gráfica anterior se presenta la ganancia y pérdida de temperatura, mostrando un flujo desigual, contracorriente. El calor fue viajando a través de una paleta de resina con espesor de una pulgada. También es posible observar que el máximo de temperatura es de 350°C alcanzados por la probeta, en el área donde le fue aplicada la flama, su pérdida de temperatura fue relativamente constante para terminar en 113°C, mientras que el lado donde se colocó el termopar la temperatura inicial fue de 23°C, llegando a obtener 34°C como temperatura final, el tiempo de medición fue de 10 minutos, fijando dos termómetros al mismo tiempo. Un aspecto importante es que la probeta comenzó registrar un calentamiento a los 2 minutos después de

haber sido retirada la flama, mientras que las otras probetas a las que les fue aplicada la nanosílice tardaron en reaccionar entre 3 y 4 minutos.

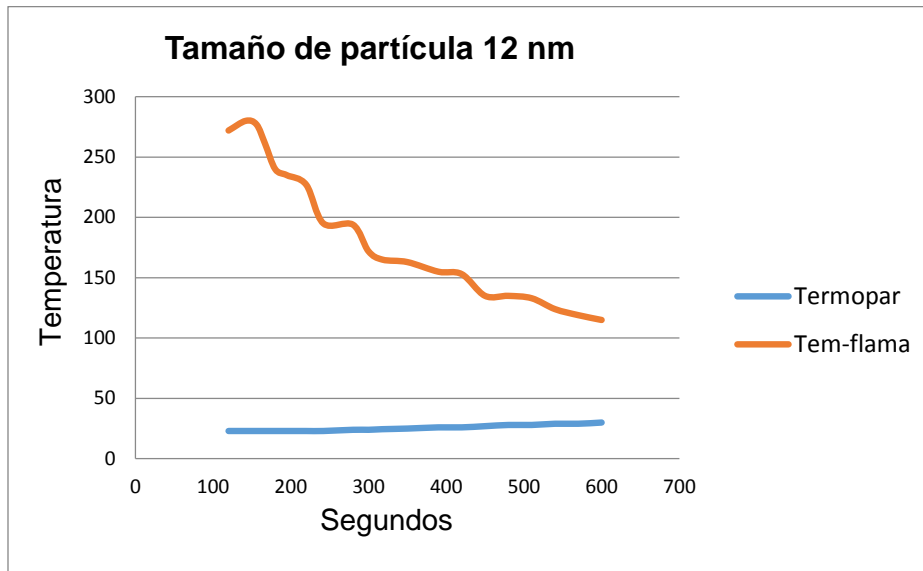
**Gráfica 2** Representación gráfica de pérdida y ganancia de calor (7 nm).



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la gráfica anterior se observa el máximo de temperatura es de 350°C alcanzados por la probeta, en el área donde le fue aplicada la flama, su pérdida de temperatura fue relativamente constante para terminar en 113°C, mientras que el lado donde se colocó el termopar la temperatura inicial fue de 23°C, llegando a obtener 34°C como temperatura final, el tiempo de medición fue de 10 minutos, fijando dos termómetros al mismo tiempo. Un aspecto importante es que la probeta comenzó registrar un calentamiento lento a los 3 minutos después de haber sido retirada la flama.

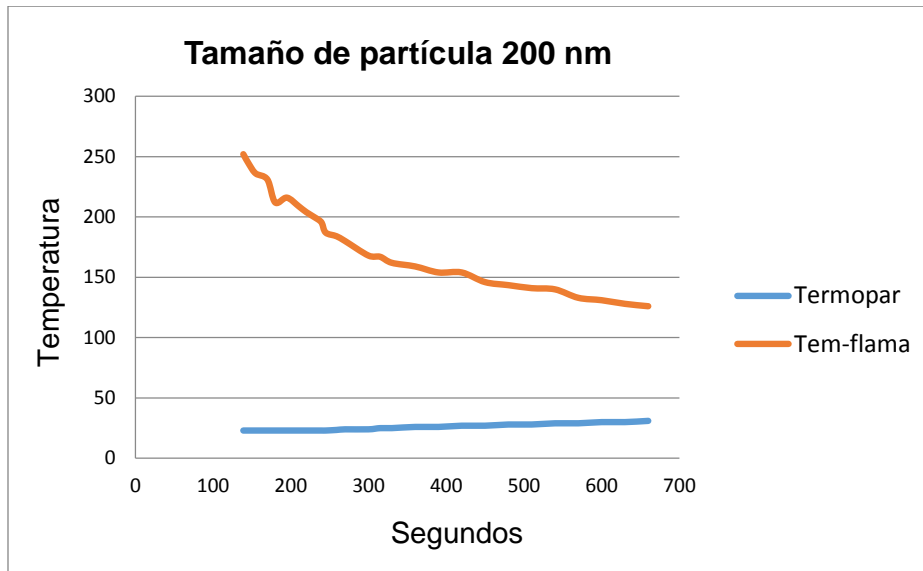
**Gráfica 3** Representación gráfica de pérdida y ganancia de calor (12 nm).



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la gráfica anterior se observa el máximo de temperatura es de 280°C alcanzados por la probeta, en el área donde le fue aplicada la flama, su pérdida de temperatura fue un poco variable por lo que terminó en 115°C, mientras que el lado donde se colocó el termopar la temperatura inicial fue de 23°C, llegando a obtener 30°C como temperatura final, el tiempo de medición fue de 10 minutos, fijando dos termómetros al mismo tiempo. Un aspecto importante es que la probeta comenzó registrar un calentamiento lento a los 4 minutos después de haber sido retirada la flama.

**Gráfica 4** Representación gráfica de pérdida y ganancia de calor (200 nm).



Fuente: elaboración propia.

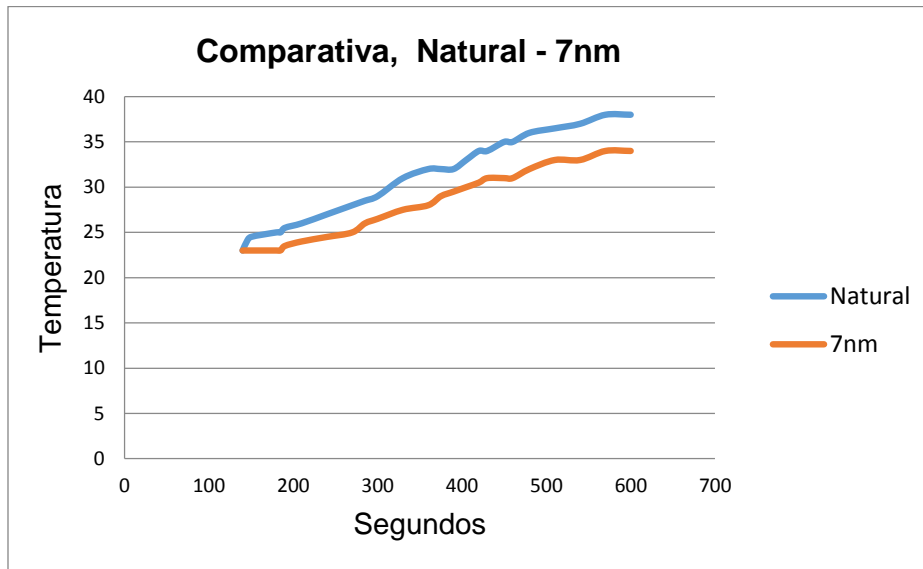
De acuerdo a la gráfica anterior se observa el máximo de temperatura es de 252°C alcanzados por la probeta, en el área donde le fue aplicada la flama, su pérdida de temperatura constante por lo que terminó en 126°C, mientras que el lado donde se colocó el termopar la temperatura inicial fue de 23°C, llegando a obtener 31°C como temperatura final, el tiempo de medición fue de 10 minutos, fijando dos termómetros al mismo tiempo. Un aspecto importante es que la probeta comenzó registrar un calentamiento lento a los 4 minutos después de haber sido retirada la flama.

La siguiente gráfica es una de las más importante de esta investigación, ya que en ella se demuestra y comprueba que la presencia de la nanosílice en una mezcla con resina juega un factor importante para la creación de un aislante térmico con un resultado positivo, además se puede observar como existe una diferencia de temperatura de entre 4 y 6 °C con forme la temperatura avanza.

Por lo que, si el transcurso de temperatura en las construcciones habitables es disminuido 6°C esto dará como resultado un 20% de diferencia con el uso de

nanopartículas, que a la larga será una gran diferencia en cuanto al consumo energético de las edificaciones.

**Gráfica 5** Representación gráfica del comportamiento de materiales con y sin nanomateriales.



Fuente: elaboración propia.

Por lo que se demuestra que el uso de nanosilíce en un tamaño menor a los 100 nm puede resultar como un cambio benéfico, termalmente hablando. Además de que entre más pequeñas sean las partículas con las que se trabaja mejor será el resultado térmico.

#### 4.1.2. Pruebas de flamabilidad

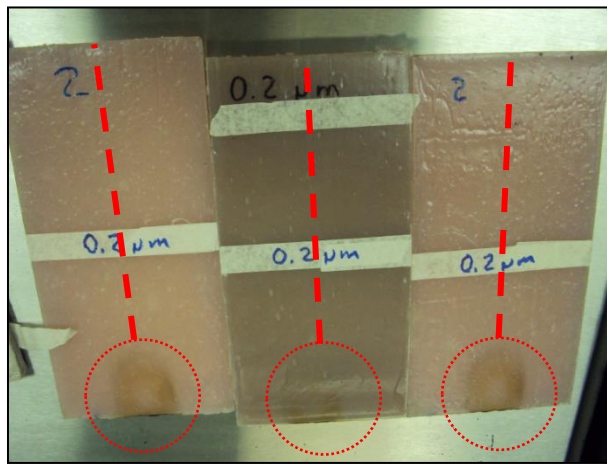
De manera general, se puede decir que las partículas NS contribuyeron de forma independiente a la inhibición del CO<sub>2</sub>, de entrada como un agente bloqueador de los poros, debido a la variación del tamaño de la partícula y al efecto que se genera en la interacción de la NS con respecto al medio (aglomeración).



La reducción de diámetro de poro entre los especímenes tratados con NS pudo atribuir a la doble capa de interacción entre ellas; es decir, la formación de C-S-H en la parte inferior y superior del poro. Se puede deducir con base en los análisis elementales realizados en las muestras.

En las dos ilustraciones siguientes se muestran paletas de resina y mortero que después de ser atacadas directamente con una flama durante 15 segundos, estas no permanecieron encendidas, ni mucho menos la flama fue propagada a lo largo de la línea punteada que se muestra en las ilustraciones, con lo que se comprueba que el material es completamente inflamable.

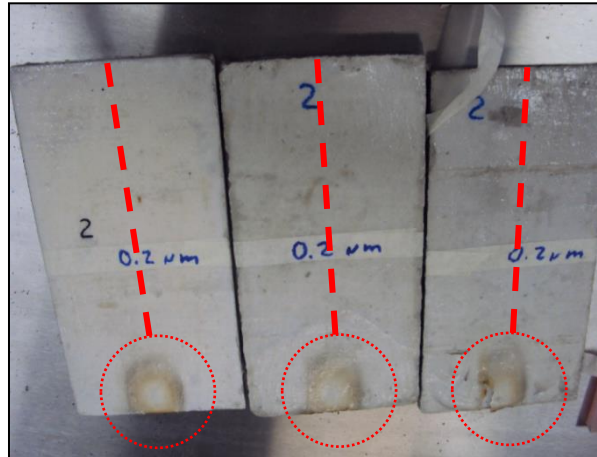
**Ilustración 23** Paletas de resina sometidas a pruebas de flamabilidad (200 nm).



Fuente: trabajo de laboratorio.

Por lo que sería posible considerar que ambos materiales pueden ser considerados como un elemento resistente al fuego. Una ventaja más del uso de la nanosílice al ser combinada con los materiales de la construcción.

**Ilustración 24** Paletas de mortero sometidas a pruebas de flamabilidad (200 nm).

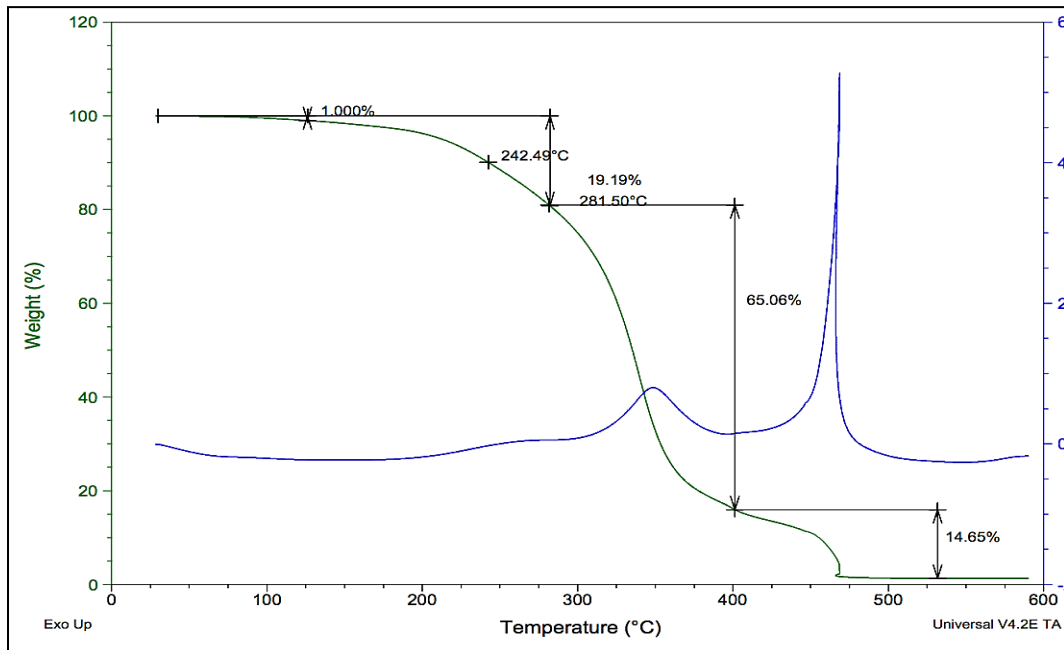


Fuente: trabajo de laboratorio.

#### 4.1.3. Análisis termogravimétricos

La definición generalmente aceptada de análisis térmicos abarca al grupo de técnicas en las que se mide una propiedad física de un sistema (sustancia o materiales) en función de la temperatura, mientras se le somete a un programa de temperatura controlado.

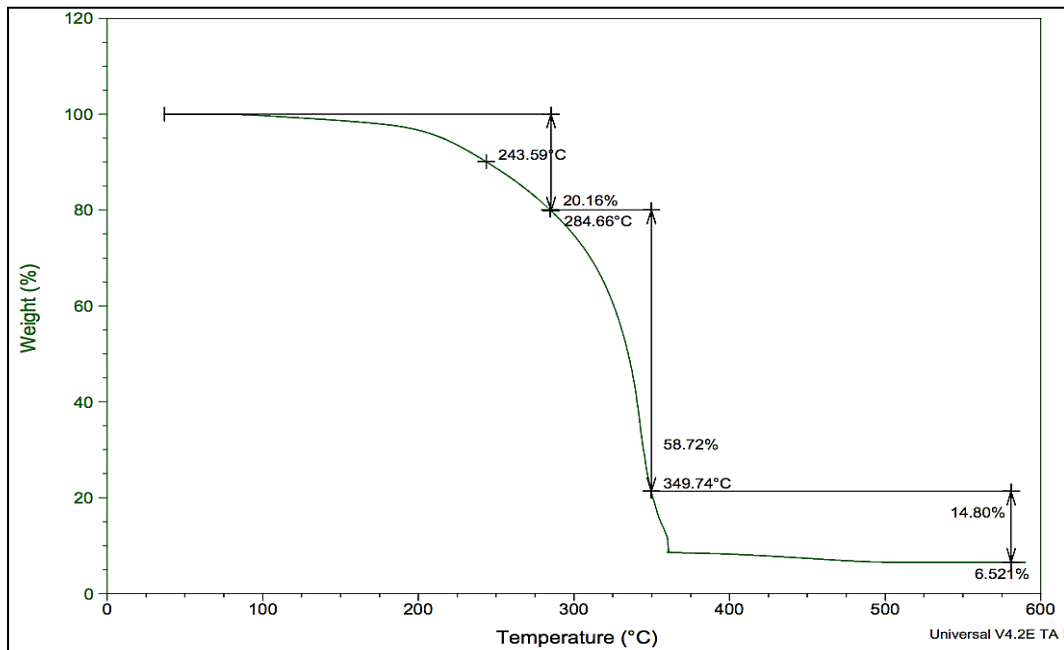
**Gráfica 6** Diagrama TGA resina testigo.



Fuente: diagrama extraído de un analizador termogravimétrico.

Es posible distinguir más de una docena de métodos térmicos que difieren en las propiedades, medidas y en los programas de temperatura. Estos métodos encuentran una amplia aplicación, tanto en el control de la calidad, como en investigación de productos farmacéuticos, arcillas, minerales, metales, aleaciones, polímeros y plásticos.

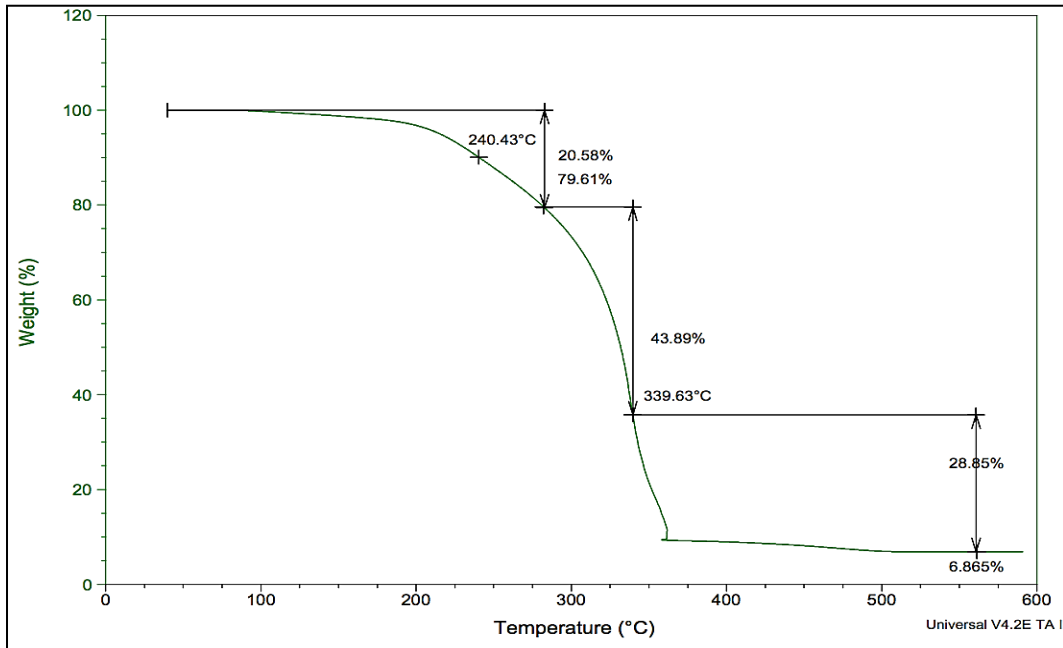
**Gráfica 7** Diagrama TGA con partículas de 7 nm.



Fuente: diagrama extraído de un analizador termogravimétrico.

El análisis termogravimétrico (TGA) se basa en la medida de la variación de la masa del material cuando éste es sometido a un proceso de calentamiento. La estabilidad térmica del mortero y de la resina fueron evaluados mediante experimentos con un programa de calentamiento “*rampa*” de 20°C/min en el rango de temperaturas de 30°C a 600°C en una atmósfera de hidrógeno.

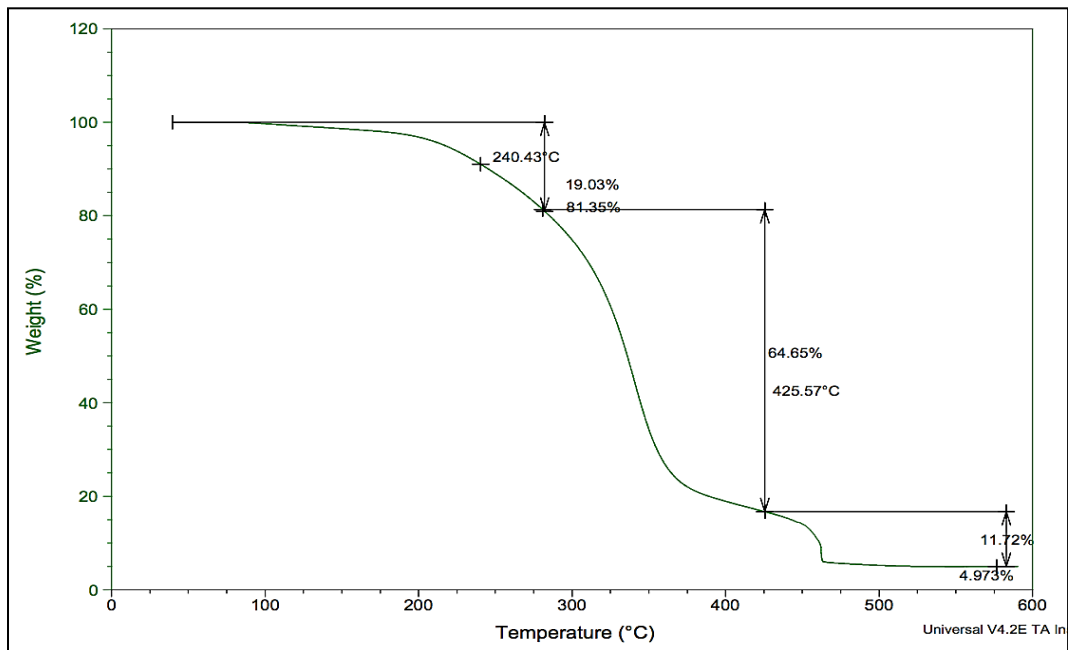
**Gráfica 8** Diagrama TGA con partículas de 12 nm.



Fuente: diagrama extraído de un analizador termogravimétrico.

En todos los casos se eligió la temperatura de inicio de la pérdida de peso como la temperatura a la cual se ha perdido el 20% de peso y el residuo a 600°C se consideró como el resto carbonado a alta temperatura. La velocidad de pérdida de peso se determinó mediante la derivada de la curva termogravimétrica con respecto al tiempo (o en relación a la temperatura), también llamada DTG. El intervalo de temperaturas que contiene un máximo de velocidad de pérdida de peso asociado con al menos una etapa de degradación.

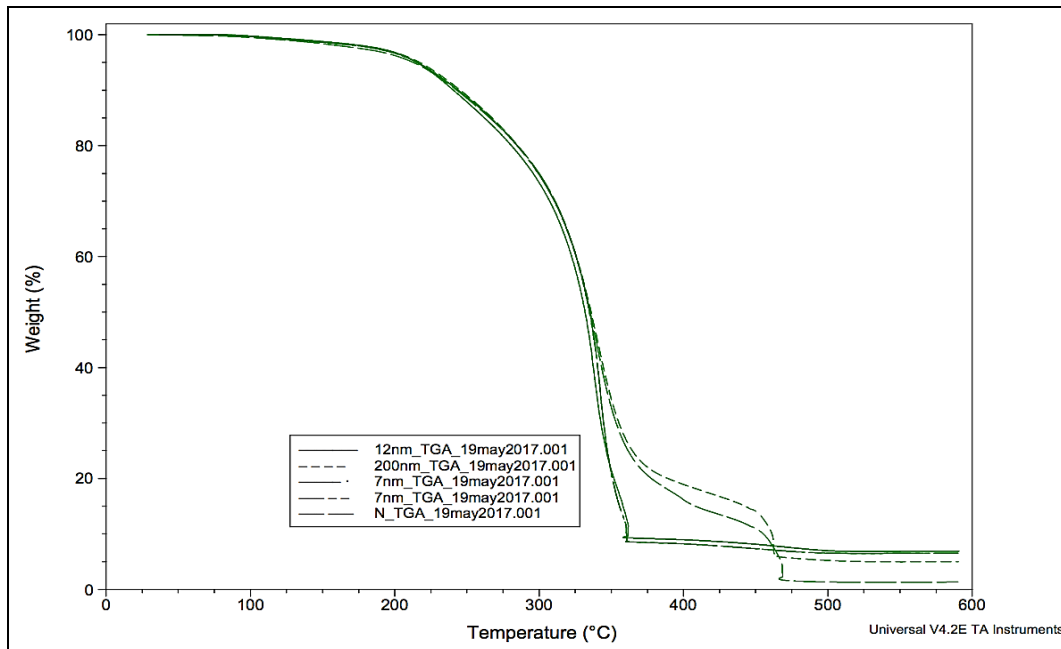
**Gráfica 9** Diagrama TGA con partículas de 200 nm.



Fuente: diagrama extraído de un analizador termogravimétrico.

El peso perdido se debió a la degradación del material expuesto a una alta temperatura. La siguiente gráfica muestra el porcentaje de peso que fue perdiendo la muestra en relación al incremento de la temperatura.

**Gráfica 10** Comparación de resultados TGA de 4 distintos tamaños de muestra.



Fuente: diagrama extraído de un analizador termogravimétrico.

De acuerdo a la gráfica anterior, se observa el momento cuando el material realmente comienza a perder peso, esto es alrededor de los 280°C. Además de que se puede observar que al 80% del experimento es posible observar que los tamaños más pequeños terminaron antes con su peso y por otro lado los de mayor tamaño fue más tardada su descomposición en un rango de 20°C de tolerancia al calor.

En la siguiente tabla se pueden observar claramente los 3 tiempos más importantes del comportamiento del material. Lo más sobresaliente, es que las muestras de mayor tamaño fueron las que tuvieron mejor comportamiento en las pruebas termogravimétricas, es el caso de la resina simple y la muestra con un tamaño de partículas de 200 nm.

**Tabla 14** Tiempos a los cuales el material cedió con la temperatura de la prueba TGA.

<b>Temperatura °C (escalones de gráfica)</b>			
Material	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Resina	280	400	470
7 nm	284	349	360
12 nm	275	340	360
200 nm	275	425	460

Fuente: elaboración propia.

En la tabla siguiente se puede observar como las cuatro muestras tienen un comportamiento similar al iniciar y terminar el proceso, sin embargo se puede observar un cambio de comportamiento en los materiales de mayor tamaño de partículas, en ellas se tuvo una pérdida de peso al llegar al 84% de la prueba, mientras que las muestras con un tamaño menor de 100 nm comenzaron a perder peso al 63% de la prueba.

**Tabla 15** Tiempos a los cuales el material perdió masa con la temperatura de la prueba TGA.

<b>Pérdida de masa (%)</b>			
Material	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Resina	20	85	100
7 nm	20	78	100
12 nm	20	63	100
200 nm	19	83	100

Fuente: elaboración propia.



Es recomendable hacer un precalentado de los compuestos en un horno, para así obtener una resistencia mayor a altas temperaturas.

#### **4.1.4. Ensayos a compresión con especímenes de mortero**

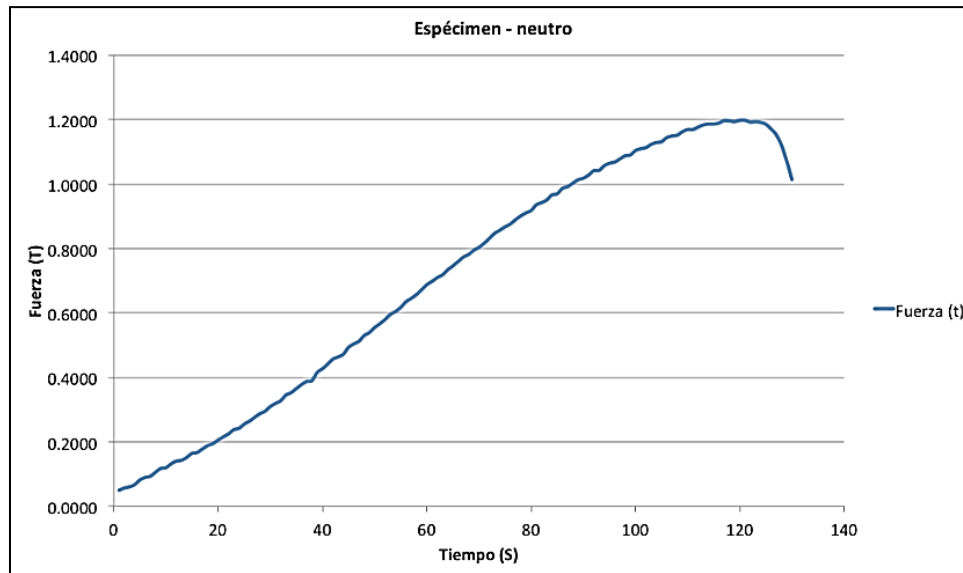
Como se ha mencionado anteriormente es fundamental la relevancia del ensayo a compresión, ya que con el mismo se determina no sólo una de las características substanciales del hormigón, sino también que se debe considerar su gran influencia en las otras propiedades del mismo, siendo la característica más influyente. En otras palabras, estamos evaluando a través de este ensayo varias cuestiones al mismo tiempo.

Antes de efectuar el ensayo a compresión es necesario tratar las bases de los testigos, probetas de hormigón de forma tal que las mismas resulten superficies planas y paralelas entre sí, y al mismo tiempo normales al eje longitudinal de la probeta. Lo cual no debe ser considerado como un tema menor.

Es necesario prestar atención al momento de determinar qué metodología de ensayo se utilizará, ya que el caso de encabezado tradicional ofrece la ventaja de propiciar superficies planas y paralelas entre sí mediante el azufre a la mayoría de las probetas y testigos que presenten irregularidades en sus bases (Ji, 2005).

De acuerdo a la siguiente gráfica, se observa como el espécimen sin nanosílice tiene un comportamiento lineal hasta llegar a un peso final de 1.2 toneladas, para después comenzar a ceder.

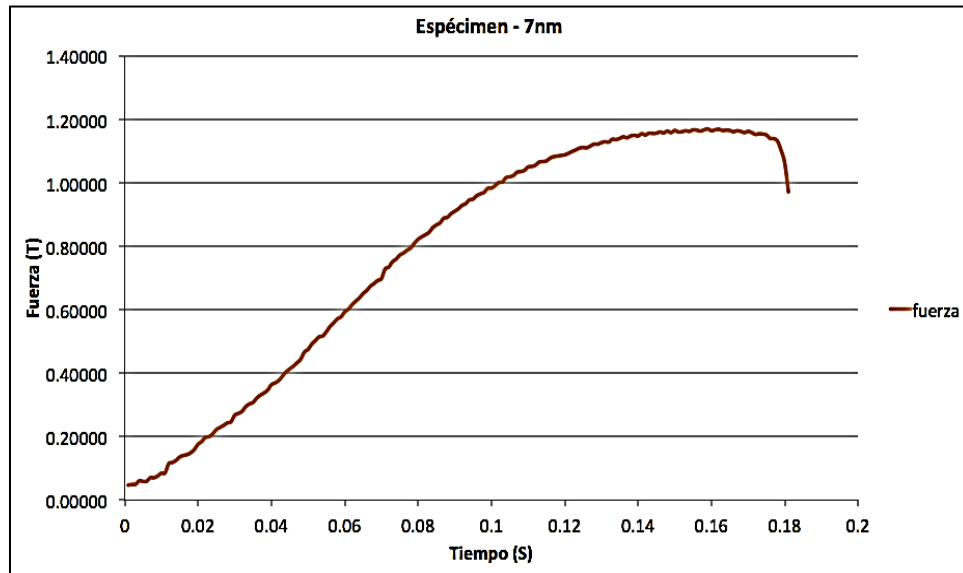
**Gráfica 11** Representación del trabajo a compresión de un espécimen testigo sin nanosílice.



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la siguiente gráfica, se observa como el espécimen al que le fue agregado un tamaño de partículas de 7 nm tuvo un comportamiento con una pequeña curva de resistencia antes de llegar a un peso final de 1.18 toneladas, para después comenzar a ceder.

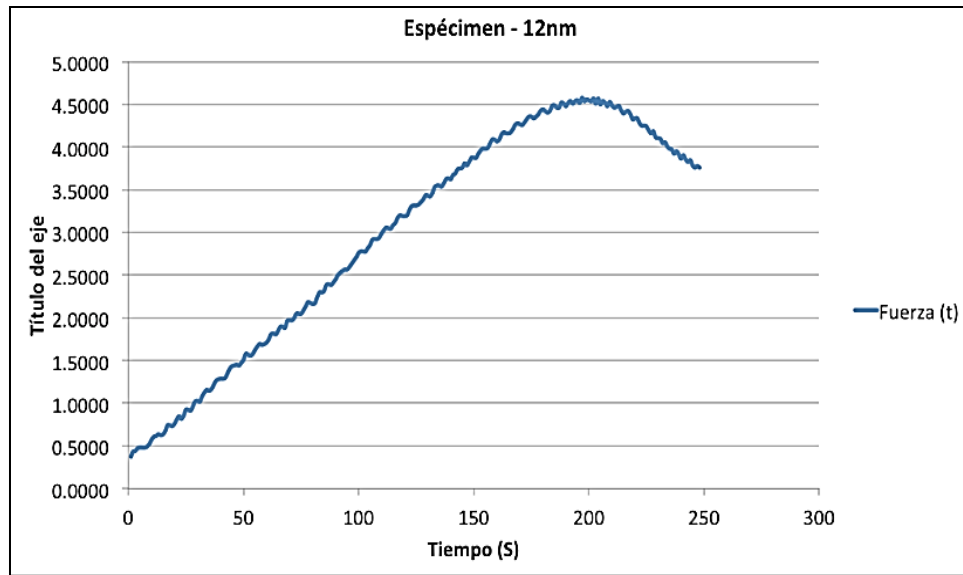
**Gráfica 12** Representación del trabajo a compresión de un espécimen – 7nm.



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la siguiente gráfica, se observa como el espécimen al que le fue agregado un tamaño de partículas de 12 nm tuvo un comportamiento con una pequeña curva de resistencia antes de llegar a un peso final de 4.5 toneladas, para después comenzar a ceder.

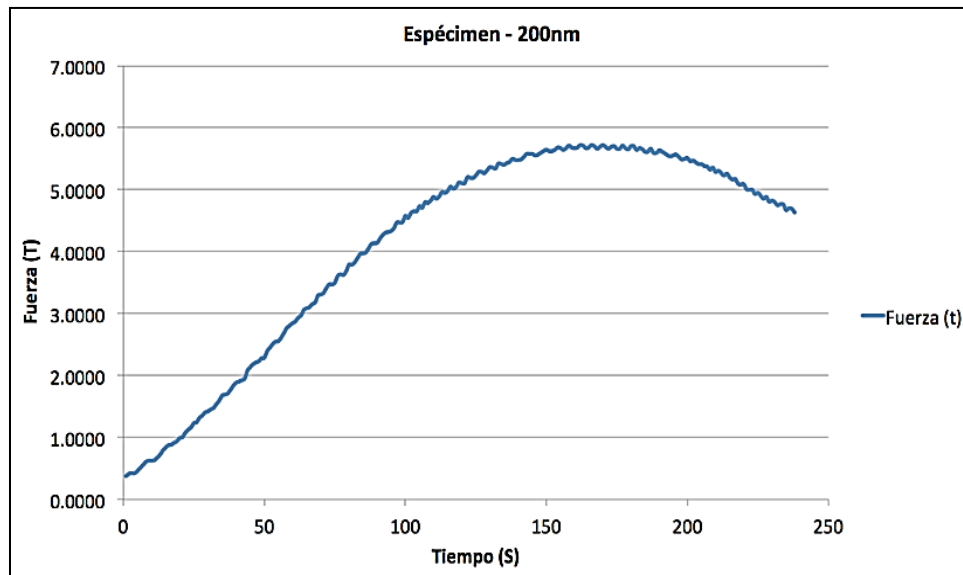
**Gráfica 13** Representación del trabajo a compresión de un espécimen – 12nm.



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la siguiente gráfica, se observa como el espécimen al que le fue agregado un tamaño de partículas de 200 nm tuvo un comportamiento lento que le ayudo a ser la probeta con mayor resistencia, llegando a un peso final de 5.8 toneladas para después comenzar a ceder.

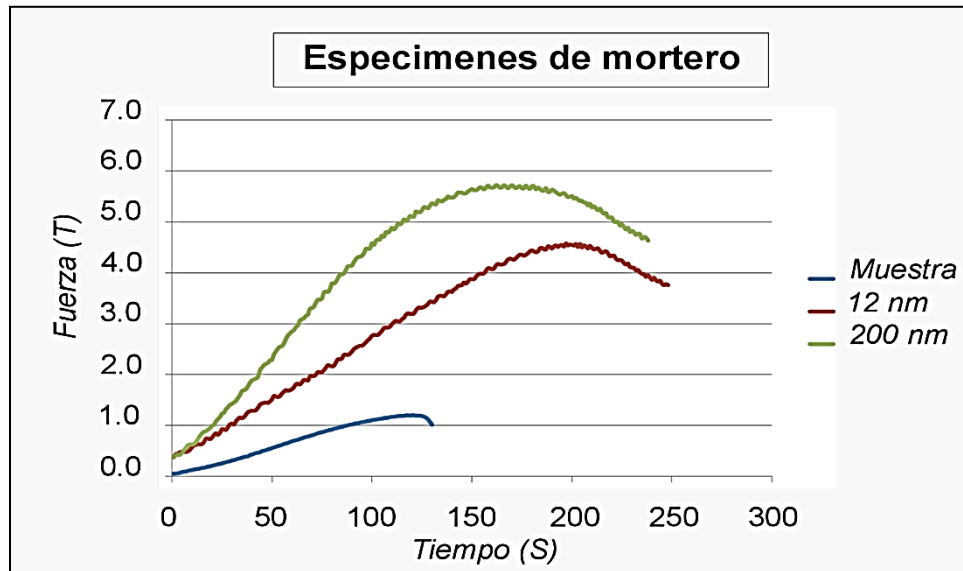
**Gráfica 14** Representación del trabajo a compresión de un espécimen – 200nm.



Fuente: elaboración propia.

Finalmente en la siguiente gráfica se muestra una comparativa, información que permite comprobar la presencia de la nanosílice en la matriz de los morteros donde se puede observar que la compresión de los especímenes fue duplicada considerablemente gracias a las nanopartículas, diferencia entre la que no poseen nanomateriales. En esta prueba se demuestra que el material trabajado puede servir como una nueva herramienta para uso en las futuras edificaciones.

**Gráfica 15** Comparativa del trabajo a compresión entre morteros con y sin nanosílice.



Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.5. Ensayos con probetas a base de resinas

Método para el uso de encabezado con placas de elastómero en la determinación de la resistencia a la compresión de probetas cúbicas” establece los pasos a seguir para su utilización.

La preparación de las bases de las probetas que se ensayarán con este método es casi inexistente. Sin embargo, se presentan ciertas limitaciones o requisitos en relación a la aceptación de las probetas o testigos, ya que se deben medir la perpendicularidad de los mismos y las depresiones en las bases con límites bastantes estrictos en cuanto a las desviaciones de los mismos. Siendo estas las únicas fronteras que se deben traspasar, ya que luego de verificar las características mencionadas se puede realizar el ensayo colocando las placas en los dos retenes metálicos y ubicando la probeta entre las placas de elastómero (Said, 2012).

En la siguiente ilustración y gráfica se muestran los resultados de la probeta sin nanopartículas, la cual tuvo un comportamiento constante hasta pasar las 4

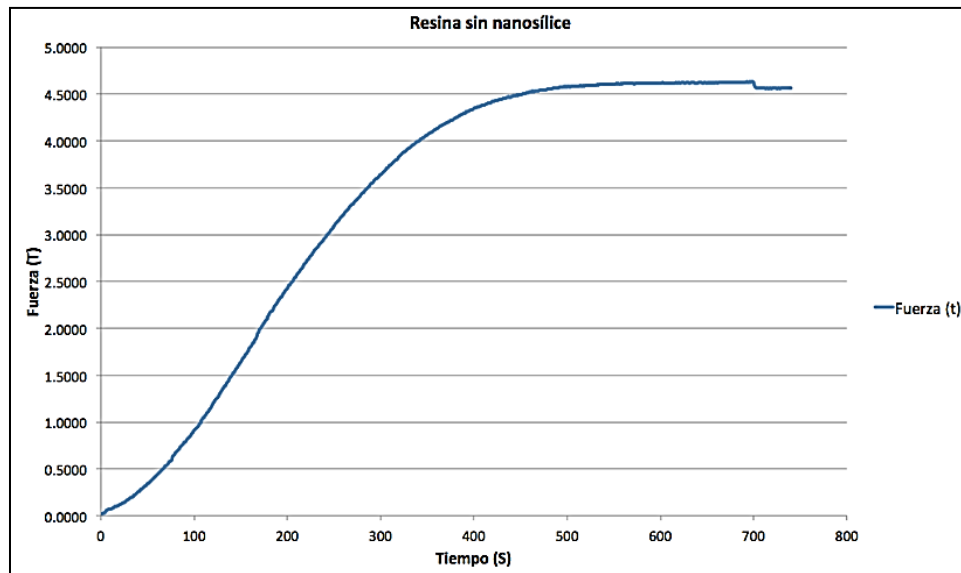
toneladas punto donde tuvo una curva considerable de flexión, para después llegar a un peso final de 4.6 toneladas.

**Ilustración 25** Probeta de resina sometida a prueba de compresión (testigo).



Fuente: prueba de laboratorio.

**Gráfica 16** Trabajo a compresión de una probeta de resina – testigo.



Fuente: elaboración propia.

En la siguiente ilustración y gráfica se muestran los resultados de la probeta con tamaño de partículas de 7nm, la cual tuvo un comportamiento lineal constante

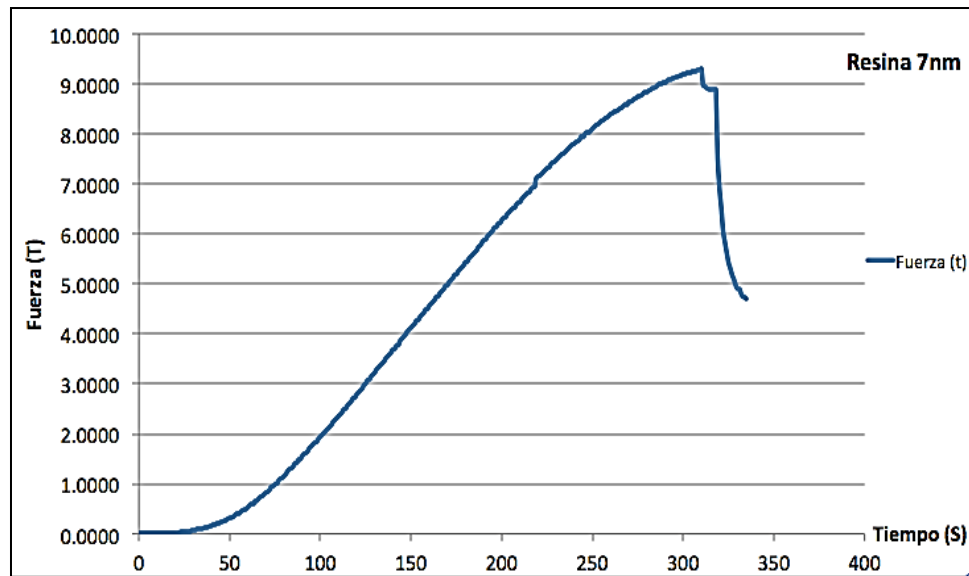
llegando a un peso final de 9.4 toneladas, colocándola como la probeta de mayor resistencia a la compresión para este experimento.

**Ilustración 26** Probeta de resina sometida a prueba de compresión (7 nm).



Fuente: prueba de laboratorio.

**Gráfica 17** Trabajo a compresión de una probeta de resina – 7nm.



Fuente: elaboración propia.

En la siguiente ilustración y gráfica se muestran los resultados a compresión de la probeta con tamaño de partículas de 12nm, la cual tuvo un comportamiento con una ligera curva de flexión antes de llegar a un peso final de 7.9 toneladas.

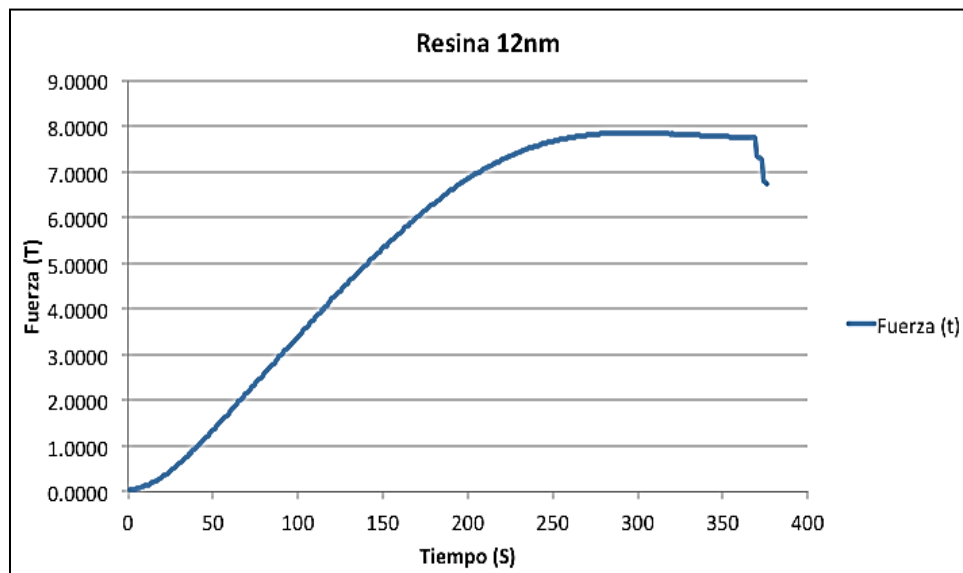


**Ilustración 27** Probeta de resina sometida a prueba de compresión (12 nm).



Fuente: prueba de laboratorio.

**Gráfica 18** Trabajo a compresión de una probeta de resina – 12nm.



Fuente: elaboración propia.

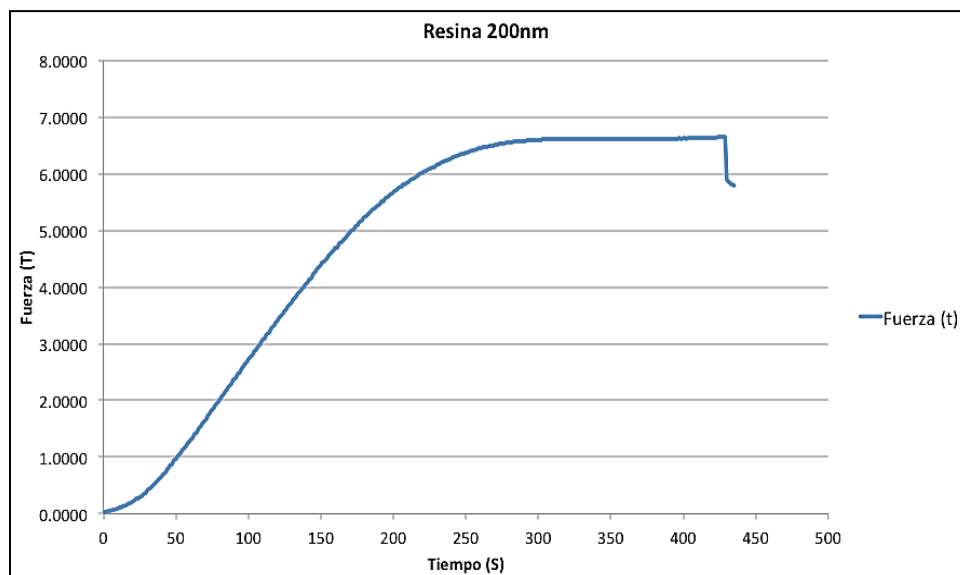
En la siguiente ilustración y gráfica se muestran los resultados a compresión de la probeta con tamaño de partículas de 200nm, la cual tuvo un comportamiento con una ligera curva de flexión antes de llegar a un peso final de 6.8 toneladas.

**Ilustración 28** Probeta de resina sometida a prueba de compresión (200 nm).



Fuente: prueba de laboratorio.

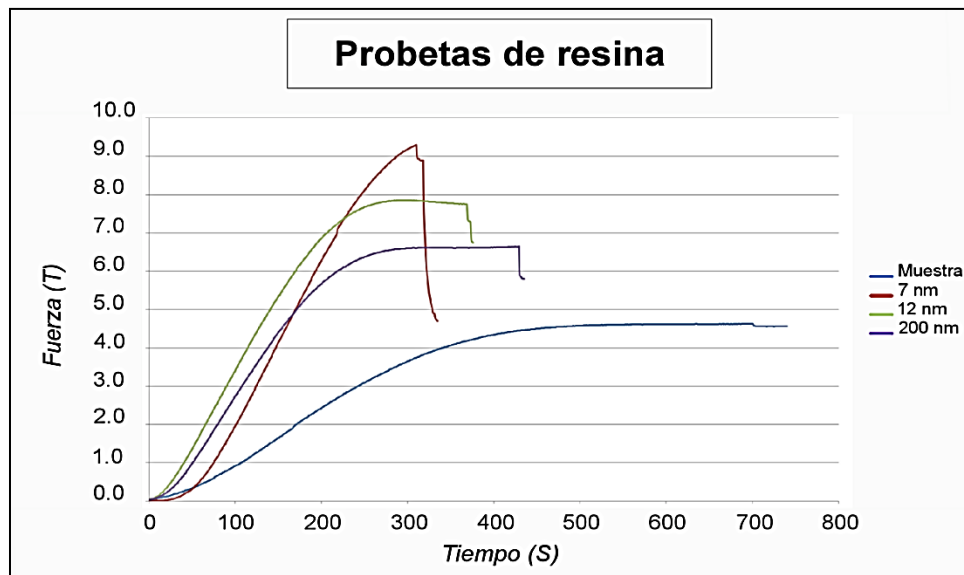
**Gráfica 19** Trabajo a compresión de una probeta de resina – 200nm.



Fuente: elaboración propia.

Finalmente en la siguiente gráfica se muestra una comparativa, información que permite comprobar la presencia de la nanosílice en la matriz de las resinas donde se puede observar que la compresión de los especímenes fue duplicada considerablemente gracias a las nanopartículas en especial la que fue integrada con partículas de 7 nm teniendo una carga mayo de 9 toneladas, diferencia que es clara entre los que no poseen la NS. En esta prueba se demuestra que el material trabajado puede servir como una nueva herramienta para uso en las futuras edificaciones.

**Gráfica 20** Comparativa de probetas de resina las cuales poseen 3 diferentes tamaños de partículas.



Fuente: elaboración propia.

## Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones generales

- Se ha realizado un análisis comparativo donde se evaluó el efecto que promueve la presencia de nanopartículas en los materiales de la construcción, por medio de la experimentación con diferentes tamaños de partículas adheridas a los morteros y las resinas. En cada uno de los casos se pudo observar que los resultados varían dependiendo de la cantidad y tamaño de nanosílice empleada.
- El presente trabajo, aporta un nuevo material con un mejor desempeño térmico por lo que se puede decir que al tener propiedades relevantes ellos pueden desarrollar o ejercer un efecto favorable en las edificaciones habitables de acuerdo a lo establecido en la NOM-18.
- Las resistencias mecánicas de morteros y de resinas se ven beneficiadas positivamente tras ser mezcladas con la nanosílice, duplicando su capacidad de carga en el caso del mortero y en el caso de la resina este fue cuadruplicado.
- La dispersión de nanosílice en los morteros, acelera el proceso de hidratación sólo durante las primeras 24 horas de su experimentación.
- Por medio de la elaboración de paletas de concreto y resina fue posible comprobar que el material elaborado es completamente resistente al fuego, ya que la flama que le fue aplicada, se extinguió en menos de 10 segundos y no se dispersó en la probeta.
- Se ha comprobado que las nanopartículas juegan un papel multifuncional en materiales celulares con base nano-SiO<sub>2</sub>. La presencia de la fase nanométrica va asociada a múltiples efectos tales como: reducción del tamaño de celda e incremento de la densidad celular, así como de un buen comportamiento térmico.

## Conclusiones particulares

- La aplicación del tratamiento de partículas de NS, puede resultar benéfica para aumentar la durabilidad e impedir el cambio drástico de temperatura de los materiales, debido a que los poros microscópicos de la materia son ocupados por las partículas de nanosílice, tratamiento que pudo reducir la llegada de partículas de CO<sup>2</sup>, evitando el acceso de estos agentes en la materia con lo cual se puede tener una más lenta conducción térmica.
- La incorporación de partículas de sílice aplicados a los materiales de la construcción producen numerosos efectos como lo son la resistencia a la compresión, resistencia al fuego, buen comportamiento térmico y mayor durabilidad. El implemento de estas partículas permite modificar la composición de los polímeros de baja densidad.
- En esta fase de experimentación, se lograron identificar factores significativos. Será necesario fabricar más muestras para lograr una mayor significancia estadística. Con el diseño de experimentos, se logró determinar que las tres muestras probadas (especímenes) reaccionan distinto al estar en contacto con el agua, ya que presentan mayor índice de absorción al ser integrada la nanosílice.
- El mejoramiento de las propiedades mecánicas de los materiales han sido gracias al estudio de los nano-elementos, su obtención y combinación es un proceso complejo debido a la morfología celular de sus estructuras.
- Este aislante térmico a base de nanopartículas podrá ser usado en antiguas y modernas construcciones para la renovación y conversión del proceso constructivo, de este modo, estos materiales podrán ser aplicados a las envolventes de las edificaciones, por lo que será posible reducir el uso del aire acondicionado en un 20% con el uso de esta nanotecnología según los resultados obtenidos en este trabajo.
- De este modo el papel del arquitecto se transforma de ser un consumidor de productos a ser parte de la producción de los mismos, en las envolventes de los espacios arquitectónicos, el también tendrá un papel importante como

mediador entre diversas áreas del saber, y así, contribuir al desarrollo de soluciones que estén a la mano de la sociedad.

- Por lo anterior, se comprobó que la aplicación del tratamiento de la nanosílice puede resultar prometedora, la cual se comenzará a introducir en el mercado en un futuro próximo.

## **Recomendaciones**

- Se recomienda estudiar la estabilidad de estos materiales con pruebas de intemperismo para determinar cuál será la vida útil y hacer un estudio del comportamiento del material.
- Es recomendable llevar a cabo pruebas de caracterización de los materiales para identificar y cuantificar los elementos presentes en una muestra así como fases cristalinas, estados de oxidación y estructuras moleculares.
- Se invita a estudiar el uso de pretratamientos con la nanosílice para aumentar su conductividad térmica, con esto eliminar los fenómenos de aglomeración de partículas y fomentar su propia dispersión, y dar paso al mejoramiento e interacción estructural del material y la matriz de los mismos.

## **Líneas futuras de investigación**

Los resultados obtenidos en este trabajo despliegan un amplio abanico de posibilidades para el futuro, unos directamente relacionados con los materiales analizados y otras que se pueden comenzar utilizando otros tipos de nanopartículas o matrices poliméricas. Quizá algunas de las más interesantes serían las siguientes:

- Ampliar el rango de densidades bajo estudio para los materiales con base nano-SiO<sub>2</sub>. Dado que los dos procesos de producción utilizados permiten un buen control de la densidad, sería interesante comprobar si los efectos de las nanopartículas se conservan al reducir la densidad de los materiales.

- Analizar la respuesta como absorbedores acústicos de las probetas de resina sería útil para comprobar si estos materiales nos ofrecen más propiedades que beneficien a la construcción.
- Por otro lado, la metodología desarrollada para cuantificar el grado de dispersión de las nanopartículas puede ser útil para relacionar el efecto de la dispersión de las cargas en los nanocompuestos sólidos con los que producen en los materiales celulares.

## Referencias bibliográficas

ACCIONA. (2013). Nanomaterials for Energy Efficient Buildings. En J. Cubillo (Ed.), *EuroNanoForum*. Dublin.

NOM 18 (2011) Norma Oficial Mexicana: Aislantes térmicos para edificaciones. Características y métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación. Secretaría de Gobernación.

Development of nanotechnology-based high performance opaque & transparent insulation systems and biocic formulation for Energy Efficient buildings (31 de 05 de 2013).

CCNNPURRE. (2011). *NOM-18, Aislantes térmicos para edificaciones. Características y métodos de prueba*. Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos, Recursos Energéticos, Ciudad de México.

Díaz Gallego, J. F. (2008). Resinas de Poliéster.

Gil, A. (2008). Resinas de poliéster. Medellín Colombia, Universidad EAFIT. <http://www.eafit.edu.co/servicios/centrodolaboratorios/infraestructura/laboratorios/Documents/Guia%20de%20manejo%20de%20resinas.pdf>.

GQ. (2007). *Catalogo de Productos*. Ficha técnica, Grupo Químico Industrial de Toluca S.A. de C.V.

Kingspan. (31 de 05 de 2013). Development of nanotechnology-based high performance opaque&transparent insulation systems and biocic formulation for Energy Efficient buildings.

Leydecker, S. (2008). *Nano Materials in Architecture and Desing*. Germany.

Maratum. (16 de Mayo de 2017). *El impacto del aislamiento térmico en la eficiencia energética de los edificios*. Recuperado el 30 de Agosto de 2017, de Edificación y energía: <http://blogedificacionyenergia.com/impacto-aislamiento-termico-eficiencia-energetica/>

Q. Kern, D. (1999). *Procesos de transferencia de calor* (Trigésima primera reimpresión ed.). (I. N. Ambrossi, Trad.) Continental.

Veith, M. (2008). Nano Materials in Architecture, Interior Architecture and Desing. En S. Leydecker, *Nano Materials in Architecture, Interior Architecture*



Erokhim, Kumar, & Yavuz. (2008). *The new frontiers of organic and composite nanotechnology*. UK: Elsevier Ltd.

Fenniri. (2001). *Helical rossete nanotubes: Design, Self-Assembly, and Characterization*.

Feynman, R. (1959). There's plenty of room at the bottom.

Drexler (1986) Creación de la máquina: La siguiente era de la nanotecnología.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (1991). *Metodología de la investigación* (Cuarta ed.). (R. A. del Bosque Alayón, Ed.) D.F., México: MacGraw-Hill.

Hosono, Mishima, Takezeo, & MacKenzie. (2006). *Nanomaterials from research to applications*. Elsevier Ltd.

Kaineg, R., Kraft, G., Seifried, R., Neuhauss, W., Ebel, W., Theumer, S., Wehner, S. (2013).

Randall Lawson, J. (2009) A History of Fire testing. Building and fire research laboratory national institute of standards and technology.

M. A. Gálvez Huerta; Instalaciones y Servicios Técnicos. publicación de la Sección de Instalaciones de edificios. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, UPM. 2012

*NAMA Apoyada para la Vivienda Sustentable en México - Acciones de Mitigación y Paquetes Financieros*. México.

Leydecker, S. (2008). *Nano Materials in Architecture and Desing*. Germany. NAMAs. (s.f.). USA.

Owens, F. (2003). *Introducción a la nanotecnología*. España: Reverte S.A.

Rojas C., M. (2002). *Manual de Investigación y redacción científica* (Tercera ed.). Lima, Perú.

Shelley, T. (2006). *Nanotecnología-nuevas promesas, nuevos peligros*. New York: El viejo topo.

Veith, M. (2008). *Nano Materials in Architecture, Interior Architecture and Design*. En S.

Leydecker, (2010) *Nano Materials in Architecture, Interior Architecture and Design* (J. Reisenberger, Trad., pág. 5). Almania: Birkhauser Verlag AG.

- Wiley, J. (2014). *Nanomaterials for environmental protection*. New Jersey.
- J. I. Tobón, "Evaluación del desempeño del cemento pòrtlan adicionado con nanopàrticulas de sílice," Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- J. I. Tobón, "Evaluación del desempeño del cemento pòrtlan adicionado con nanopàrticulas de sílice," Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- P. K. Jal, M. Sudarshan, a. Saha, S. Patel, and B. K. Mishra, "Synthesis and characterization of nanosilica prepared by precipitación method," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2004.
- J. Shih, T. Chang, and T. Hsiao, "Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite," *Materials Science and Engineering*, 2006.
- G. Constantinides and F.-J. Ulm, "The nanogranular nature of C-S-H," *Journal of the Mechanics and Physics of solids*, 2007.
- A. Nazari and S. Riahi, "The effects of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on Physical and mechanical properties of high strength compacting concrete," *Composites Part B: Engineering*, 2011.
- B. Jo, C. Kim, G. Tae, and J. Park, "Characteristics of cement mortar with nano-SiO<sub>2</sub> particles," *Construction and building Materials*, 2007.
- T.-W. Lin and H.-H. Shen, "The Synthesis of silica nanotubes through chlorosilanization of single wall carbon nanotubes," *Nanotechnology*, 2010.
- T.J. Pinnavia, G.W. Beall. *Polymer-Clay Nanocomposites*. John Wiley & Sons, Chichester=England, (2000).
- F. Sanchez and K. Sobolev, "Nanotechnology in concrete – A review," *Construction and Building Materials*, vol.24, 2010.
- A. Sobolkina, V. Mechtcherine, V. Khavrus, D. Maier, M. Mende, M. Ritschel, and A. Leonhardt, "Dispersion of carbone nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix," *Cement and Concrete Composites*, 2012
- M. Kim, J. Hong, J. Lee, C. K. Hong, and S. E. Him, "fabrication of silica nanotube uing silica coated multi-walled carbon nanotubes as the template.," *Journal of colloid and interface science*, 2008.
- Y. Qing, Z. Zean, K. Deyu, and C. Rongshen, "Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume," *Construction and Building Materials*, 2007.

L. Senff, D. Hotza, W. L. Repette, V. M. Ferreira, and J. A. lambrincha, "Mortars with nano-SiO<sub>2</sub> and micro-SiO<sub>2</sub> investigated by experimental design," Construction and Building Materials, 2007

H. Li, "Microestructure of cement mortar with nano-particles," Composites Part B: Engineering, 2004.

Singh L.P., KaradeS.R., Bhattacharyya S.K., Yousuf M.M., Ahalawat S. (2013); Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review. Construction and Building Materials 2013.

Martínez Pérez, F. (2002) La tribología ciencia y técnica para el mantenimiento, Editorial limusa, hecho en México.

Said A.M., Zeidan M.S., Bassuoni M.T., Tian Y. (2012). "Properties of concrete incorporating nanosilica" Construction and building materials 2012;

Porro A., Dolado J.S., Campillo I., Erkizia E., de Miguel Y., Sáez de Ibarra Y., Ayuela A. (2005). "Effects of nanosilica additions on cement pastes; Applications of nanotechnology in concrete design" Thomas Telford; Londres; 2005.

Ltifia M., Guefrechb A., Mounangab P., Khelidj A. (2011). "Experimental study of the effect of addition of nano-silica on the behaviour of cement mortars". Procedia Engineering 2011.

Lin K.L., Chang W.C., Lin D.F., Luo H.L., Tsai M.C. (2008). "Effects of nano-SiO<sub>2</sub> and different ash particle sizes on sludge ash–cement mortar". Journal of Environmental Management 2008.

Kawashima S., Hou P., Corr D., Shah S.P. (2013). "Modification of cement-based materials with nanoparticles". Cement & Concrete Composites 2013.

Jo B.W, Kim C.H., Tae G.H., Park J.B., (2007). "Characteristics of cement mortar with nano-SiO<sub>2</sub> particles". Construction and Building Materials; 2007.

Heidari A., Tavakoli D. (2013). "A study of the mechanical properties of ground ceramic powder concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub> particles". Construction and Building Materials 2013.

Flores I. (2009). Obtención de nanopartículas de SiO<sub>2</sub> y su efecto en las propiedades microestructurales, mecánicas y reológicas en materiales cementantes PhD thesis, UANL., 2009.

Ali N., Shadi R. (2010). "Microstructures, thermal, physical and mechanical behavior of the self-compacting concrete containing SiO<sub>2</sub> nanoparticle". Materials Science and Engineering 2010.

Q. Li, D. Tang, J. Tang, B. Su, J. Huang, and G. Chen, —Carbon nanotube-based symbiotic coaxial nanocables with nanosilica and nanogold particles as labels for electrochemical immunoassay of carcinoembryonic antigen in biological fluids.,*|| Talanta* 2011.

H. J. Park, M. Park, J. Y. Chang, and H. Lee, —The effect of pre-treatment methods on morphology and size distribution of multi-walled carbon nanotubes.,*|| Nanotechnology*, 2008.

T. Ji, —Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>, *|| Cement and Concrete Research*, 2005.

L. Senff, D. Hotza, W. L. Repette, V. M. Ferreira, and J. a. Labrincha, —Mortars with nano- SiO<sub>2</sub> and micro-SiO<sub>2</sub> investigated by experimental design,*|| Construction and Building Materials*, 2010.

G. Li, —Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>, *|| Cement and Concrete Research*, 2004.

K. L. Lin, W. C. Chang, D. F. Lin, H. L. Luo, and M. C. Tsai, —Effects of nano-SiO<sub>2</sub> and different ash particle sizes on sludge ash-cement mortar.,*|| Journal of environmental management*, 2008.

R. K. Abu Al-Rub, A. I. Ashour, and B. M. Tyson, —On the aspect ratio effect of multi-walled carbon nanotube reinforcements on the mechanical properties of cementitious nanocomposites, *|| Construction and Building Materials*, 2012.

B.Ellis, Chemistry and technology of epoxy resins, 2a ed. Chapman & Hall, New York; (1993).

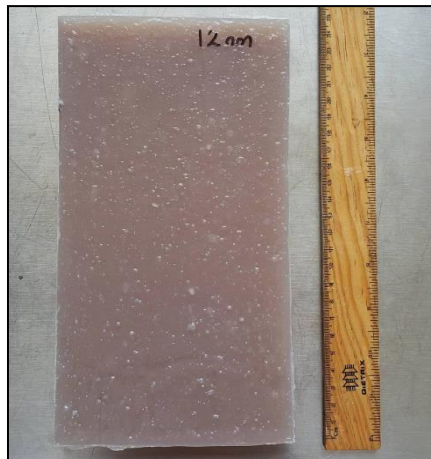
**Anexos.**

**Ilustración 29** Mezcla de resina con nanosílice.



Fuente: trabajo de laboratorio.

**Ilustración 30** Paleta de resina mezclada con nanosílice 12nm.



Fuente: trabajo de laboratorio.

**Ilustración 31** Elementos para la elaboración de mortero (arena, cemento y nanosílice).



Fuente: trabajo de laboratorio.

**Ilustración 32** Dispersión de nanosílice en mortero.



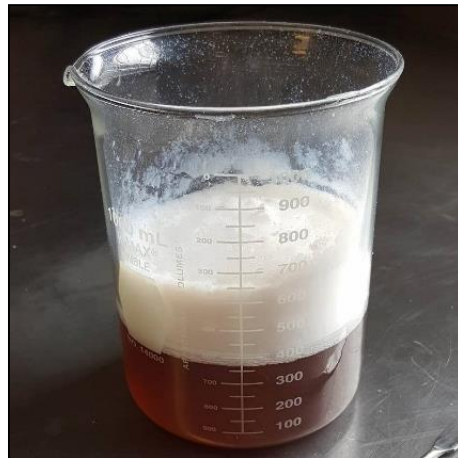
Fuente: trabajo de laboratorio.

**Ilustración 33** Apreciación de un cambio de color con el agregado del butanox.



Fuente: trabajo de laboratorio.

**Ilustración 34** Mezclado de resina con nanosílice.



Fuente: trabajo de laboratorio.

**Ilustración 35** Presentación del material SIGMA – ALDRICH en su empaque.



Fuente: página oficial SIGMA.

**Tabla 16** Precios de nanosílice 7 nm.

<b>SKU – Tamaño de envase</b>	<b>Precio (MXP)</b>
S5130 – 25 G	\$ 1,150.00
S5130 – 100 G	\$ 1,423.00
S5130 – 500 G	\$ 1,711.00

Fuente: página oficial SIGMA (2017).