



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
MÉXICO**
FACULTAD DE CIENCIAS
LICENCIATURA EN FÍSICA



TESIS:

**Modelando el desempeño de metamateriales
térmicos base cemento adicionados con fibras
naturales.**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN FÍSICA**

PRESENTA:

Luis Raymundo Bravo Muñoz

**ASESORES DE TESIS
Dra. Lorena Romero Salazar
Dr. Miguel Mayorga Rojas**

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, FEBRERO DE 2025.

Agradecimientos

Resumen.

El presente trabajo tuvo como propósito el analizar los datos de pruebas de desempeño térmico de un metamaterial el cual constaba de cemento adicionado con distintas concentraciones y razones de aspecto de fibras de coco.

Galicia-Aldama et al. realizaron una investigación sobre las propiedades físicas del concreto reforzado con fibras de coco, un subproducto de la agroindustria, en la Universidad Autónoma del Estado de México. Se realizaron pruebas reológicas y de desempeño térmico en diferentes cementos con variados porcentajes de fibras de coco y relaciones de aspecto. Los resultados preliminares mostraron que las fibras de coco mejoraban el desempeño mecánico del cemento, pero los resultados del desempeño térmico requerían más análisis [1].

El objetivo del proyecto de tesis fue modelar el transporte de calor de metamateriales, obtenidos al modificar el arreglo y composición de placas de composites de cemento adicionados con fibras naturales de coco. Se trabajó en la comparación de sus propiedades como aislante o conductor térmico con respecto a un arreglo con placas de cemento sin fibras.

Los objetivos específicos del proyecto de tesis incluyeron la descripción del transporte de calor en estos metamateriales en términos de su capacidad calorífica y conductividad térmica. Se implementaron los resultados experimentales con un modelo teórico adecuado para identificar el ajuste del decaimiento en diferentes configuraciones de metamateriales.

Los preliminares indicaron una variación en la rapidez de enfriamiento conocido como τ en los cementos adicionados con fibras de coco en comparación con el cemento de prueba llamado cemento tipo P, esto implica una mayor eficiencia en la transferencia de calor comparado con el aire, sugiriendo un material más aislante. La no uniformidad en la distribución de las fibras de coco resalta la importancia de la homogeneidad en la mezcla para optimizar el comportamiento térmico del material. Se encontró que los cementos compuestos con fibras de coco presentaron valores de τ diferentes al cemento testigo sin fibras, lo que indica que las fibras de coco influyen en el desempeño térmico de los materiales.

Abstract.

The purpose of this study was to analyze the thermal performance test data of a metamaterial consisting of cement with added coconut fibers at various concentrations and aspect ratios.

Galicia-Aldama et al. investigated the physical properties of concrete reinforced with coconut fibers, an agro-industrial byproduct, at the Autonomous University of the State of Mexico. Rheological and thermal performance tests were performed on different cements with varying percentages of coconut fibers and aspect ratios. Preliminary results showed that coconut fibers improved the mechanical performance of the cement, but the thermal performance results required further analysis [1].

The objective of the thesis project was to model the heat transport of metamaterials obtained by modifying the arrangement and composition of cement composite plates with added natural coconut fibers. The study focused on comparing their properties as a thermal insulator or conductor with respect to an arrangement of cement plates without fibers.

The specific objectives of the thesis project included describing the heat transport in these metamaterials in terms of their heat capacity and thermal conductivity. The experimental results were implemented with a suitable theoretical model to identify the decay fit in different metamaterial configurations.

The preliminaries indicated a variation in the cooling rate, known as τ , in cements with added coconut fibers compared to the test cement called type P cement. This implies greater efficiency in heat transfer compared to air, suggesting a more insulating material. The non-uniformity in the distribution of coconut fibers highlights the importance of homogeneity in the mixture to optimize the thermal behavior of the material. It was found that the composite cements with coconut fibers showed τ values different from the control cement without fibers, indicating that coconut fibers influence the thermal performance of the materials.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	3
Resumen.....	4
Abstract.....	5
Introducción	11
Antecedentes.....	12
Planteamiento del problema.....	13
1. Marco Teórico.....	14
Metamateriales.....	14
Tipos de metamateriales.....	14
Calorimetría.....	16
Calor.....	17
Temperatura.....	17
Calor específico.....	18
Transferencia de calor.....	18
Ley de enfriamiento de Newton.....	19
2. Marco Experimental.....	20
Cemento Portland y sus variantes.....	20
Fibras de coco.....	21
Cámara adiabática.....	22
Arreglo del metamaterial y su nomenclatura.....	23
3. Metodología termodinámica y las ecuaciones de calor.....	24
4. Resultados.....	31
4.1 Temperaturas obtenidas.....	31
4.2 Ley de enfriamiento de Newton y ajuste de curva.....	32
5. Análisis de resultados.....	39
5.1 Histograma de las PM con 1% de fibras de coco.....	39
5.2 Histograma de las PM con 2.5% de fibras de coco.....	40
5.3 Histograma de las PM con 5% de fibras de coco.....	40
6. Conclusiones.....	41
Análisis y Perspectivas.....	42
7. Referencias.....	44

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: ΔT con la fuente encendida de la prueba testigo	26
Gráfica 2: ΔT con la fuente apagada de la prueba testigo	27
Gráfica 3: Datos obtenidos del enfriamiento del concreto llamado “testigo” al igual que su ajuste de curva.....	28
Gráfica 4: Temperatura ΔT a través del tiempo en unidades de minutos para el metamaterial con la nomenclatura P3P3T	32
Gráfica 5: Temperatura ΔT a través del tiempo en unidades de minutos y con su ajuste de curva para el metamaterial con la nomenclatura P3P3T.....	33
Gráfica 6: Comparación de todos los arreglos con respecto a τ (tau).	35
Gráfica 7: Comparación de los arreglos que contienen una concentración de 1% de fibras de coco con respecto a τ (tau).....	35
Gráfica 8: Comparación de los arreglos que contienen una concentración de 2.5% de fibras de coco con respecto a τ (tau).....	36
Gráfica 9: Comparación de los arreglos que contienen una concentración de 5% de fibras de coco con respecto a τ (tau).....	36
Gráfica 10: Comparación de los arreglos que contienen una relación de aspecto de 0.714 en las fibras de coco con respecto a τ (tau).	37
Gráfica 11: Comparación de los arreglos que contienen una relación de aspecto de 0.714 en las fibras de coco con respecto a τ (tau).	37
Gráfica 12: Comparación de los arreglos que contienen una relación de aspecto de 0.714 en las fibras de coco con respecto a τ (tau).	38

ÍNDICE DE ILUSTRACIÓN

Ilustración 1: Representación esquemática de la refracción positiva y negativa de la radiación electromagnética [25].	15
Ilustración 2: algunos ejemplos de las geometrías que pueden tener los metamateriales auxéticos [22]	16
Ilustración 3: Representación en 2D de la cámara adiabática que se usó en el arreglo experimental de la M. en C. Ester Galicia Aldama.....	23
Ilustración 4: set experimental.....	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Nomenclatura usada en el artículo de Galica Aldama, et al.	24
Tabla 2: Valores del ajuste de curva obtenidos del metamaterial con la nomenclatura P3P3T	33
Tabla 3: Valores de los ajustes de curva de cada uno de los arreglos.	34

Introducción

Galicia-Aldama et al. [1] investigaron el comportamiento reológico de la pasta de cemento adicionada con fibras naturales de coco, un subproducto de la agroindustria. Su estudio, realizado en el laboratorio de Nanotermodinámica y Sistemas Complejos de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma del Estado de México, demostró que la adición de estas fibras puede influir en las propiedades físicas del cemento, contribuyendo a la sustentabilidad de los productos derivados [1].

Este proyecto se basa en la investigación previa de Galicia et al. [1], quienes realizaron pruebas reológicas y de desempeño térmico en cementos con fibras de coco. A partir de sus hallazgos sobre la influencia de diferentes porcentajes y relaciones de aspecto de las fibras, este estudio propone profundizar en el análisis e identificar el modelo que mejor explique los resultados experimentales. Mi formación en física, con énfasis en métodos matemáticos y termodinámica, me permitirá abordar este desafío y contribuir a la comprensión del efecto de las fibras naturales en las propiedades del cemento.

Las placas estudiadas en la referencia [1], bajo pruebas de fuerza compresiva mostraron que la adición de fibras de coco aumentaba de manera efectiva el desempeño mecánico del cemento; sin embargo, los resultados asociados al desempeño térmico no fueron concluyentes para ajustarse a un modelo para predecir su comportamiento. Por tal motivo, la presente tesis se centrará en el estudio sobre el desempeño térmico en el cemento adicionado con fibras de coco.

El objeto de estudio para esta investigación es el modelar el transporte de calor de metamateriales, obtenidos al modificar el arreglo y composición de placas de composites de cemento adicionados con fibras naturales de coco, para comparar sus propiedades como aislante o conductor térmico, teniendo como referencia un arreglo similar, pero formado por placas de cemento sin fibras.

Como objetos de estudios específicos están la descripción del transporte de calor de esos metamateriales en cuanto a su capacidad calorífica y la conductividad térmica, la implementación de los resultados experimentales con un modelo teórico adecuado para identificar el ajuste del decaimiento analizando datos para diferentes configuraciones de metamateriales. De esta forma contar con un indicador termodinámico de los arreglos para determinar las configuraciones de los metamateriales aislantes o conductores.

La tesis inicia con algunos antecedentes del tema, el planteamiento del problema; en el marco teórico se definen los conceptos básicos del objeto de estudio. En el apartado de sección experimental se describe el set modelado, destacando la importancia de la geometría del sistema. Posteriormente se desglosan los datos y resultados, la discusión y análisis de resultados para terminar con la sección de conclusiones.

Antecedentes.

El poder generar aislamiento térmico en las paredes de los edificios ha sido una buena manera de reducir las pérdidas de calor en las edificaciones. Sin embargo, los aislamientos térmicos requieren un acercamiento enfocado a la selección de materiales y el entendimiento de sus propiedades térmicas, en particular, de la conductividad térmica, al momento de la preparación de composites a base de cemento. Los composites son materiales que combinan el cemento con otros componentes, como fibras o partículas, para obtener propiedades mejoradas de aislamiento. Este enfoque se integra en un concepto más amplio conocido como 'envolvente térmica', que es esencial para el diseño eficiente de edificaciones. La envolvente térmica no solo comprende las paredes, sino también los techos, suelos, ventanas y puertas, encapsulando todo el edificio en un sistema coordinado para controlar el flujo de calor [3][5].

Para maximizar la eficiencia térmica, es crucial combinar el aislamiento térmico con tecnologías avanzadas como intercambiadores de calor y materiales con conductividad térmica variable. Estos materiales innovadores pueden ajustar su conductividad en respuesta a cambios ambientales, lo que permite una adaptación dinámica a las diferentes condiciones climáticas. Por ejemplo, en un día de verano, estos materiales podrían limitar la entrada de calor al edificio, mientras que en invierno permitirían una mayor transferencia de calor hacia el interior.

Los intercambiadores de calor pueden utilizarse para recuperar calor que de otro modo se perdería, reutilizándolo para calentar el edificio de manera más eficiente. Esta combinación de aislamiento térmico, materiales con propiedades térmicas adaptativas y sistemas de recuperación de calor, constituye una solución integral para mejorar la eficiencia energética de las edificaciones. Este enfoque holístico no solo reduce la pérdida de calor, sino que también contribuye significativamente a la sostenibilidad y al confort térmico en el interior de los edificios [4][5].

Estudios previos han revelado que las pérdidas de calor en edificios ocurren a través de las paredes externas. Por ello son los elementos que modulan la temperatura del inmueble. Por esto mismo y para ahorrar energía es importante que el aislamiento en los edificios cumpla con su función de la mejor manera posible. Esto se puede

lograr no sólo con un material aislante sino un arreglo de materiales que modulen el transporte de calor [4][7].

El uso de fibras naturales, como las fibras de coco son una nueva alternativa para los aditamentos en el concreto, generando un compuesto con propiedades modificadas, respecto al caso del concreto clásico, dando como resultado beneficios adicionales, como, el incremento de su resistencia y dureza [8].

Planteamiento del problema.

El uso de fibras de coco como aditivo en el cemento mejora la resistencia y durabilidad de las estructuras de construcción. Las fibras de coco son consideradas un material natural y sostenible que se integra en el cemento como refuerzo, aumentando su resistencia a la tensión y a la flexión. Esto significa que las estructuras de construcción que utilizan cemento reforzado con fibras de coco son más resistentes a los desastres naturales y a la deterioración causada por el tiempo [2][6].

De igual manera, son un material aislante natural y, al integrarse en el cemento, ayudan a reducir la transferencia de calor y a mantener la temperatura interior de las estructuras de construcción. Esto significa que las estructuras que utilizan cemento reforzado con fibras de coco son más cómodas en términos de temperatura y pueden ser más eficientes en términos energéticos [4].

Es crucial investigar sus propiedades térmicas al adicionarse al cemento porque nos permite entender cómo este material puede afectar el rendimiento de las estructuras de construcción y conocer sus mejoras térmicas para desarrollar estrategias de construcción más eficientes en términos energéticos y mejorar la comodidad de quienes usen las estructuras. Además, la investigación en este campo también puede ayudarnos a desarrollar nuevos materiales y tecnologías que sean más eficientes y sostenibles.

La investigación en metamateriales térmicos, que son materiales avanzados diseñados para controlar y manipular el flujo de calor, está mejorando notablemente la calidad y eficiencia de las estructuras de construcción. Estos metamateriales se crean combinando las conductividades térmicas de dos o más materiales distintos, lo que permite generar zonas específicas de aislamiento de calor, así como dirigir el calor en direcciones precisas. Esta capacidad para controlar la transferencia térmica tiene importantes implicaciones para la sociedad. Por ejemplo, el uso de metamateriales que incorporan fibras de coco puede mejorar significativamente la

eficiencia energética de las estructuras, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono y al combate contra el cambio climático. Además, en regiones con temperaturas extremas, estos materiales pueden ser esenciales para proporcionar aislamiento térmico más efectivo, resultando en viviendas más cómodas y seguras, lo que mejora sustancialmente la calidad de vida de las personas en dichas áreas [6], [7], [9]–[11].

1. Marco Teórico.

En esta sección se explicarán los principios básicos necesarios para comprender el cómo funciona la transferencia de calor en nuestros materiales de prueba, y también se describen los que se usaron para esta investigación.

Metamateriales.

Los metamateriales son materiales artificiales diseñados para exhibir propiedades que no se encuentran en la naturaleza. Estas propiedades no se derivan de su composición química, sino de su estructura a micro o nanoescala, la cual interactúa con la radiación electromagnética, acústica u óptica de forma inusual [12].

La estructura de los metamateriales, compuesta por pequeños elementos dispuestos en patrones específicos, permite manipular las ondas de forma que no es posible con los materiales convencionales [12].

Tipos de metamateriales

Existen diversos tipos de metamateriales, cada uno con propiedades y aplicaciones únicas:

Metamateriales electromagnéticos: Diseñados para interactuar con ondas electromagnéticas, como la luz o las microondas. Ejemplos:

- **Cristales fotónicos:** Estructuras periódicas que controlan la propagación de la luz, utilizadas en láseres y fibras ópticas [24].

- **Metamateriales con índice de refracción negativo:** Pueden curvar la luz "hacia atrás", con aplicaciones en lentes perfectas y mantos de invisibilidad [24].

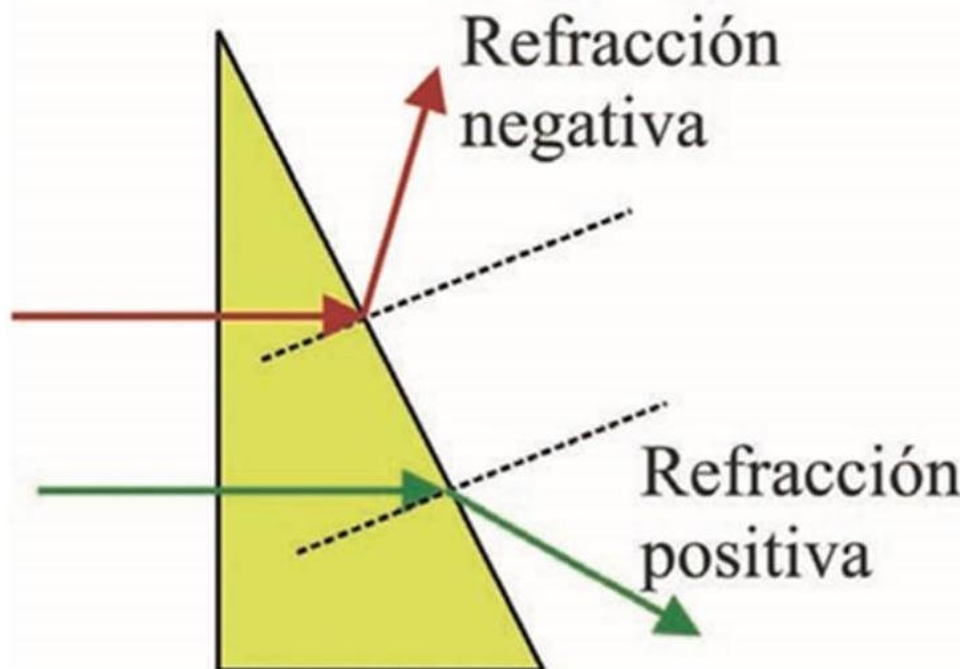


Ilustración 1: Representación esquemática de la refracción positiva y negativa de la radiación electromagnética [25].

Metamateriales acústicos: Diseñados para controlar las ondas sonoras. Ejemplos:

- **Materiales con índice de refracción acústico negativo:** Pueden curvar el sonido "hacia atrás", con aplicaciones en aislamiento acústico y dispositivos de ultrasonido [26].
- **Cristales fonónicos:** Estructuras periódicas que bloquean o permiten el paso de ciertas frecuencias de sonido, con aplicaciones en la reducción de ruido y la creación de dispositivos acústicos [26].

Metamateriales mecánicos: Diseñados para tener propiedades mecánicas inusuales, como alta resistencia, flexibilidad o capacidad de deformarse de forma controlada. Ejemplos:

- **Metamateriales quirales:** Presentan propiedades mecánicas diferentes según la dirección de la fuerza aplicada, con aplicaciones en robótica y dispositivos microfluídicos [27].

- **Metamateriales auxéticos:** Se expanden en todas las direcciones cuando se estiran, con aplicaciones en protección contra impactos y dispositivos biomédicos [27].

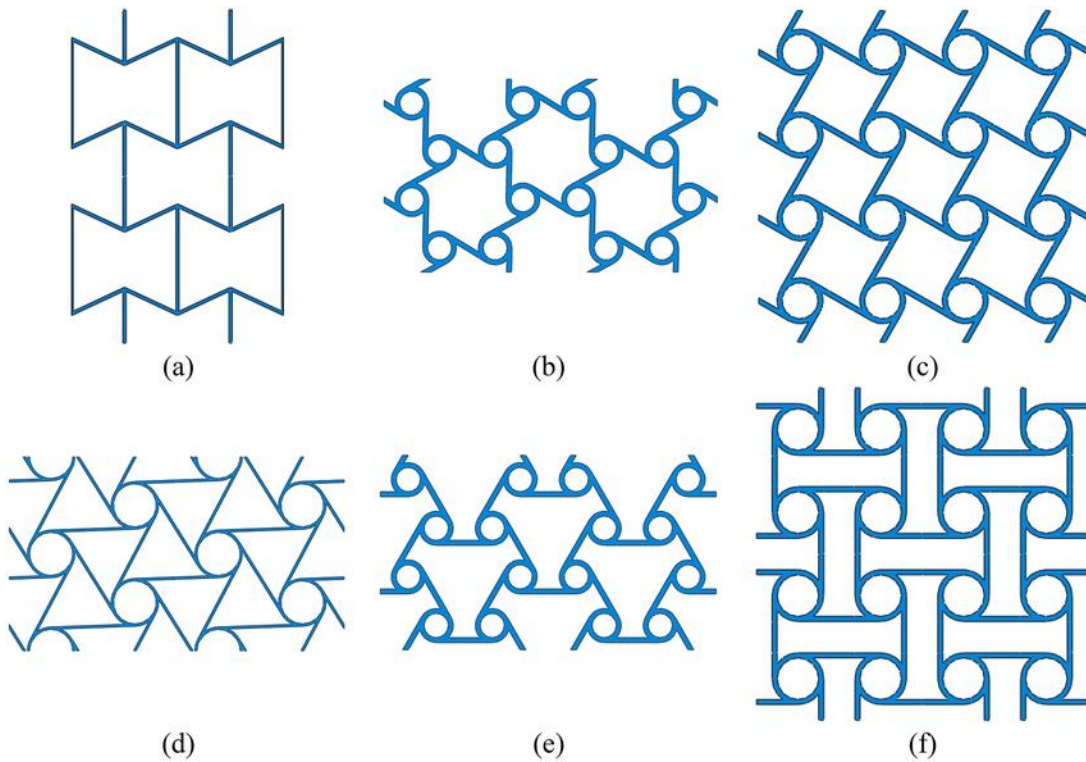


Ilustración 2: algunos ejemplos de las geometrías que pueden tener los metamateriales auxéticos [22]

Metamateriales térmicos: Diseñados para controlar el flujo de calor. Ejemplos:

- Superredes de fonones: Estructuras periódicas que pueden controlar la propagación de las vibraciones de la red (fonones), que son las responsables de la conducción del calor.
- Materiales con cambio de fase: Utilizan materiales que cambian de estado (sólido, líquido, gas) para controlar el flujo de calor.

Son estos metamateriales los cuales son de interés para esta tesis, ya que de corroborarse que el concreto adicionado con fibras de coco altera el flujo de calor entonces este sería un nuevo metamaterial térmico.

Calorimetría.

Para estos nuevos metamateriales es necesario el entender algunos términos sobre la conductividad térmica. La calorimetría es la rama de la termodinámica que se encarga de medir la cantidad de calor involucrado en un proceso físico o químico.

Esta área es fundamental para entender los cambios de energía en sistemas termodinámicos y para predecir la transferencia de calor entre los mismos [13].

La calorimetría se basa en la ley de conservación de la energía, que afirma que la energía total de un sistema termodinámico se mantiene constante durante un proceso. Por lo tanto, la cantidad de calor transferido a un sistema termodinámico es igual a la cantidad de calor liberado por el mismo [14][15].

La calorimetría se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde la evaluación de la eficiencia energética de edificios hasta la determinación de las constantes termodinámicas en reacciones químicas [15].

Calor.

El calor es una forma de energía que se transfiere de un sistema termodinámico a otro debido a una diferencia de temperatura. La cantidad de calor transferido depende de la temperatura de los sistemas involucrados y de la capacidad calorífica de cada uno [14][15].

Desde un enfoque físico, el calor se considera como un flujo de energía térmica causado por la transferencia de energía cinética, rotacional y vibracional de las partículas de una región de mayor temperatura a otra de menor temperatura. La transferencia de calor puede ser conducción, convección o radiación. Las cuales se revisarán en un apartado posterior de este mismo capítulo [15].

El calor es una forma de energía importante en muchas aplicaciones, desde la generación de electricidad hasta la elaboración de alimentos y la refrigeración. La capacidad calorífica de una sustancia es fundamental en la termodinámica y determina la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de una cantidad dada de la sustancia en una unidad de tiempo [16].

Temperatura.

Considerando la Ley Cero de la Termodinámica, la cual establece que, si dos sistemas termodinámicos están en equilibrio térmico con un tercer sistema, entonces están en equilibrio térmico entre sí, la temperatura se puede definir como una medida del equilibrio térmico entre dos cuerpos que intercambian de energía. Se concibe como una propiedad intensiva que no solo refleja la cantidad de energía térmica o calor presente en un sistema, sino que también indica su potencial para alcanzar un equilibrio térmico al transferir calor hacia otro sistema con menor temperatura. La temperatura es una cantidad escalar que se mide en una amplia variedad de unidades, como grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), o Kelvin (K).

La temperatura es una propiedad fundamental en la termodinámica y es esencial para entender los cambios de energía en sistemas termodinámicos. Además, la temperatura también es importante en una amplia variedad de aplicaciones, desde la industria de alimentos, construcción, farmacéutica, sector salud, en cualquiera que la temperatura pueda modificar la operación o funcionamiento de un sistema [14].

La transferencia de calor de un sistema con mayor temperatura a otro con menor temperatura se produce hasta que ambos sistemas alcancen la misma temperatura. La dirección de dicha transferencia la rige la segunda ley de la termodinámica [14].

Calor específico.

El calor específico es una medida de la cantidad de energía térmica que se requiere para aumentar la temperatura de una masa determinada de un material en un grado Celsius o Kelvin. En otras palabras, representa la cantidad de calor necesaria para cambiar la temperatura de una unidad de masa de un material en una unidad de tiempo.

La comprensión del calor específico es fundamental en la termodinámica, ya que se utiliza para describir cambios en la energía térmica de un sistema y para predecir cambios en la temperatura [16] [17].

Transferencia de calor.

La transferencia de calor es una rama importante de la termodinámica que se enfoca en cómo el calor fluye desde un cuerpo con alta temperatura a otro con temperatura más baja. La transferencia de calor se produce debido a la diferencia de temperatura entre dos objetos y puede ser causada por conducción, convección y radiación.

Hay tres ecuaciones principales utilizadas en la transferencia de calor, que son la ley de Fourier para la conducción, la convección y la ley de Stefan-Boltzmann para la radiación.

La ley de Fourier establece que la tasa de transferencia de calor por conducción a través de un material es proporcional a la diferencia de temperatura y al área transversal, y es inversamente proporcional a la distancia a través de la cual se transmite el calor [16].

$$J = -K \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

Sea J la densidad de corriente de energía térmica (energía por unidad de área y por unidad de tiempo), K una constante característica del material denominada conductividad térmica y $\frac{\partial T}{\partial x}$ el gradiente de temperatura del material.

El fenómeno de convección establece que la tasa de transferencia de calor es proporcional a la diferencia de temperatura entre el objeto y su entorno, y a la velocidad del fluido que circula alrededor del objeto.

$$\frac{dQ}{dt} = hA(T_a - T) \quad (2)$$

Donde $\frac{dQ}{dt}$ es el flujo de calor, h es el coeficiente de intercambio de calor, A es el área de la superficie, T sea la temperatura del objeto y T_a la temperatura ambiente. [16]

La ley de Stefan-Boltzmann establece que la tasa de transferencia de calor por radiación es proporcional a la tasa en la que la superficie emite radiación, y es proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie y su entorno, elevada a la cuarta potencia [16][17].

$$\frac{P}{A} = -e\sigma T^4 \quad (3)$$

Donde $\frac{P}{A}$ es la potencia emisiva hemisférica total, e es la emisividad del objeto ($e = 1$ para el radiador ideal), σ es la constante de Stefan-Boltzmann y T es la temperatura elevada a la cuarta potencia [23].

Ley de enfriamiento de Newton.

La Ley de Enfriamiento de Newton es un principio físico que describe la relación entre la tasa a la que un cuerpo se enfría y la diferencia de temperatura entre ese cuerpo y su entorno. Esta ley fue propuesta por Sir Isaac Newton en 1693 y se formula de manera lineal en la siguiente forma:

$$\frac{dQ}{dt} = hA(T_a - T) \quad (2)$$

Donde $\frac{dQ}{dt}$ la tasa de transferencia de calor del cuerpo, h es el coeficiente de intercambio de calor, A es la superficie del cuerpo y T_a es la temperatura del ambiente.

La Ley de Enfriamiento de Newton es uno de los conceptos básicos de la termodinámica y tiene aplicaciones en una variedad de campos, incluyendo la ingeniería térmica, la medicina y la investigación sobre cambio climático. Por ejemplo, se utiliza en la fabricación de refrigeradores y aires acondicionados para controlar la temperatura de los alimentos y garantizar que se mantengan frescos. En medicina, se aplica en el uso de compresas frías para reducir la hinchazón y el dolor [14].

Sin embargo, es importante destacar que la Ley de Enfriamiento de Newton es solo una aproximación y no es válida en todas las situaciones. Por ejemplo, en ambientes con alta humedad, la tasa de enfriamiento puede ser menor debido a la capacidad de la humedad para retener el calor. Además, la ley no tiene en cuenta la presencia de flujos de aire o la convección, que también pueden afectar la tasa de enfriamiento [16].

2. Marco Experimental

En este capítulo se revisarán los elementos del set experimental para describir el objeto de estudio y la naturaleza del metamaterial térmico. El metamaterial utilizado a ser un compuesto de base cementicia, es importante el detallar el tipo de cemento utilizado, al igual que el diseño experimental (la cámara adiabática); así como los diferentes arreglos tricapa que dan lugar a modificaciones en el desempeño térmico del arreglo.

Cemento Portland y sus variantes.

El cemento Portland es un material de construcción esencial, obtenido mediante la calcinación de una mezcla específica de caliza y arcilla, seguido por la molienda del Clinker resultante. El Clinker es un granulado que se forma al cocer dicha mezcla en un horno a altas temperaturas, lo que confiere al cemento sus propiedades hidráulicas únicas. A menudo, a este Clinker se le añade una proporción cuidadosamente controlada de yeso y, en ocasiones, otros materiales como escoria, para mejorar ciertas propiedades del cemento. Su calidad y las propiedades se pueden controlar mediante la selección cuidadosa de los materiales y la regulación del proceso de fabricación [6].

Este cemento es fundamental en la fabricación de concreto, un compuesto que se destaca por su resistencia y durabilidad, haciéndolo indispensable en una vasta gama de aplicaciones constructivas. Su uso abarca desde la edificación de estructuras complejas como rascacielos y puentes, hasta la creación de

infraestructuras más comunes como carreteras, pavimentos y elementos de mampostería. La omnipresencia del cemento Portland en la industria de la construcción lo convierte en uno de los materiales más producidos y utilizados a nivel mundial, desempeñando un papel crucial en el desarrollo de la infraestructura moderna [6].

El cemento Portland es un material ampliamente reconocido por su durabilidad y resistencia a la humedad, características que lo hacen especialmente adecuado para su uso en entornos húmedos y condiciones ambientales agresivas. Siendo el material más producido en masa en todo el mundo, su relevancia en la industria de la construcción es indiscutible. Sin embargo, su producción es intensiva en energía y responsable de la emisión de grandes cantidades de gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono, durante el proceso de calcinación de la caliza. Este impacto ambiental significativo ha llevado a una creciente demanda de alternativas más sostenibles y eficientes energéticamente [20].

La innovación en el desarrollo de cementos sustentables se ha convertido en una prioridad para reducir la huella de carbono de la industria de la construcción. Esto incluye la investigación y el desarrollo de nuevas formulaciones de cemento que utilicen materias primas alternativas, como cenizas volantes, escoria de alto horno y otros subproductos industriales, que pueden reducir la cantidad de Clinker necesaria en la mezcla. Además, se están explorando tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia energética del proceso de producción y capturar las emisiones de carbono. La implementación exitosa de estos cementos sustentables podría revolucionar la industria, permitiendo un desarrollo más ecológico y sostenible sin comprometer la calidad y durabilidad del material, manteniendo su función esencial en la construcción de infraestructuras modernas [18][19].

Fibras de coco.

En la búsqueda de nuevas alternativas a la adición del cemento Portland se encuentra la incorporación de las fibras de coco como un subproducto natural derivado de la corteza del coco. Estas fibras son reconocidas por su resistencia, durabilidad y resistencia a la humedad, atributos que las hacen valiosas en diversas aplicaciones, desde textiles y construcción hasta la agricultura y la industria automotriz [3].

Su integración en el cemento puede ofrecer beneficios en sus propiedades físicas. Estas fibras pueden actuar como un aislante térmico dentro de la mezcla de cemento, lo cual lo puede volver en una alternativa ante climas variables o extremos, ayudando a mantener una temperatura interna más estable en las estructuras construidas. Este ajuste en la conductividad térmica se logra sin afectar las

propiedades mecánicas esenciales del cemento, como su resistencia y durabilidad [1].

Además, la flexibilidad y tenacidad inherentes de las fibras de coco pueden contribuir a la resistencia a la fractura del cemento, lo que es crucial en aplicaciones estructurales. Esto hace que el cemento reforzado con fibras de coco no solo sea más sostenible, sino también potencialmente más resistente y duradero en el tiempo, ofreciendo una solución de construcción innovadora y ecológica que se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible y la reducción del impacto ambiental en la industria de la construcción [11].

En la construcción, las fibras de coco se utilizan como refuerzo en materiales como el concreto y el mortero, lo que les da mayor resistencia a la tracción y a la flexión. Además, las fibras de coco también se utilizan como aislante térmico y acústico, lo que las hace adecuadas para su uso en la construcción de edificios y viviendas [11], [21].

Para nuestra descripción del agregado de fibras de coco, se requiere la caracterización de su longitud y su diámetro. Esto da como resultado un nuevo parámetro llamado razón de aspecto, esto es la proporción entre el ancho y la altura de un objeto, en este caso sería obtener la razón de aspecto de las fibras de coco.

Para el experimento que se realizó en el artículo de Galicia Aldama, et al. se utilizaron 3 tipos diferentes de razones de aspecto los cuales fueron 0.714, 7.412 y 14.285, donde la nomenclatura será el nombre asignado a cada tipo de fibra para tener una mejor clasificación, el % es el porcentaje total de fibras de coco que tendrá la mezcla de cemento y el AR será lo previamente definido como razón de aspecto.

Cámara adiabática.

Denominamos cámara adiabática al arreglo experimental con el que se recabaron los valores de temperatura, se muestra a continuación:

Una cámara adiabática es un recipiente hermético que se utiliza para mantener una temperatura constante en su interior, evitando la entrada o la salida de calor. Es un sistema aislado térmicamente que no permite la transferencia de calor, ni a través de las paredes, ni a través de las interfaces de los fluidos o gases dentro de la cámara. La temperatura en su interior es constante, incluso si se aplican cambios en la presión o la composición de los fluidos o gases en su interior [16], [17].



Ilustración 3: Representación en 2D de la cámara adiabática que se usó en el arreglo experimental de la M. en C. Ester Galicia Aldama.

Arreglo del metamaterial y su nomenclatura

Las fibras de coco tienen un diámetro promedio de $15 \mu m$ y una longitud natural de entre 15 y 30 cm. Existen dos variables importantes en estos arreglos de los compositos: el porcentaje de fibras de coco en el cemento y la relación de aspecto de las fibras de coco. Recordemos que relación de aspecto o *aspect ratio* lo definimos como el cociente de la longitud entre el diámetro equivalente. Para el porcentaje de fibras de coco son 1%, 2% y 5%, mientras que para la relación de aspecto son 0.714, 7.412 y 14.285. Con estas 2 variables y 6 posibles valores tenemos 9 arreglos diferentes de cemento los cuales son:

Tabla 1: Nomenclatura usada en el artículo de Galica Aldama, et al.

Nomenclatura	%	AR
M1	1	0.714
M2	2.5	
M3	5	
D1	1	7.412
D2	2.5	
D3	5	
P1	1	14.285
P2	2.5	
P3	5	

3. Metodología termodinámica y las ecuaciones de calor

El procedimiento empieza a partir de la recopilación de los datos experimentales previamente obtenidos por Ester Galicia Aldama, et al. El experimento en cuestión fue el elevar la temperatura de manera externa de la cámara adiabática, donde una de sus caras sería donde se colocaron los diferentes tipos de arreglo del concreto.

Durante la primera fase, se aplicó una fuente de calor durante 40 minutos, registrando la temperatura interna y externa del objeto cada minuto. Posteriormente, se apagó la fuente de calor, iniciando la fase de enfriamiento. Esta fase, influenciada por la temperatura ambiente, y se recuperaron datos experimentales durante 60 minutos, siendo la temperatura interna y externa del material minuto a minuto.

Los arreglos constaban de 3 secciones las cuales eran capa interna, media y externa del cemento como en la *Ilustración 3*. De igual manera constó de una base o prueba testigo la cual no contenía aditivos de fibra de coco, con el fin de obtener en los resultados si existía alguna diferencia en sus propiedades de transferencia de calor.

Fueron un total de 37 arreglos, incluyendo la prueba testigo. Cada arreglo constaba por lo menos con una capa que no contenía fibras de coco, denomina capa T. de estos 36 arreglos los podemos dividir en 2 grupos principales. En el primer grupo son todos los arreglos que constan de una sola capa de concreto adicionado de fibras de coco por dos capas testigo o capas T, mientras que el segundo grupo son todos los arreglos que tienen 2 capas de concreto adicionado con fibras de coco por una capa T. Esto quiere decir que todos los arreglos tendrán por lo menos una capa T.



Ilustración 4: set experimental

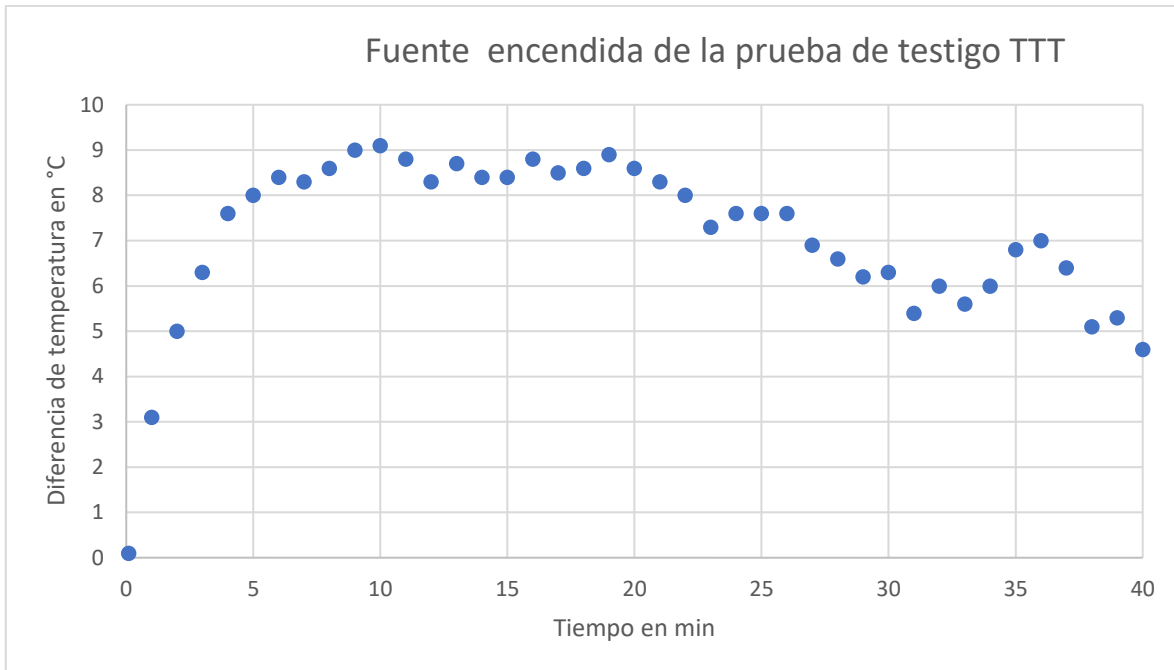
En la *Ilustración 4* se observa el set experimental que se utilizó para recolección de datos, el cual consta de una luz infrarroja, una caja adiabática y diferentes concretos. Los diversos concretos tenían la misma forma y superficie de área denominada A pero cada uno tiene un arreglo en multicapa el cual varía en dos aspectos, en el porcentaje de fibras de coco que contiene la capa y su relación de aspecto tal y como se indica en la nomenclatura de la *Tabla 1*.

Para el experimento se recabaron 2 temperaturas, las cuales eran la temperatura externa denominada T_e y la temperatura interna de la cámara adiabática denominada T_i , como en la *Ilustración 4*.

La recolección de datos se realizó mediante el registro visual de las temperaturas mostradas en las pantallas de los termómetros, utilizando una cámara de video enfocada en dichos dispositivos durante el experimento.

Posteriormente, los datos se clasificaron y graficaron de acuerdo con las fases de calentamiento y enfriamiento para cada configuración experimental.

Finalmente, se calculó el ΔT , definido como la diferencia entre la temperatura externa y la temperatura interna de la cámara adiabática. Este parámetro permitió analizar la evolución temporal de las temperaturas, ya que lo que se busca es si existe alguna diferencia en la transferencia de calor entre un concreto testigo o un concreto que fue adicionado con fibras de coco.



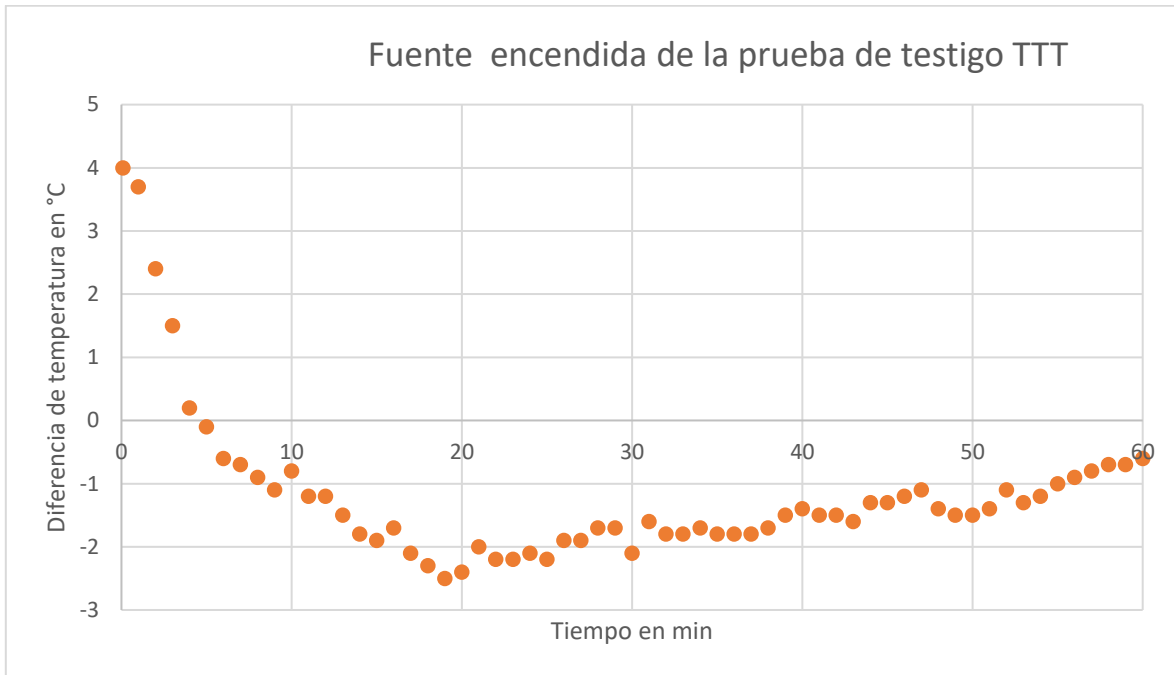
Gráfica 1: ΔT con la fuente encendida de la prueba testigo

El Gráfico 1 ilustra la evolución del ΔT durante la fase de calentamiento. Al inicio de la prueba, el ΔT se aproxima a 0. Este comportamiento se debe a que, en este punto, el material y el interior de la cámara adiabática se encuentran en equilibrio térmico.

A medida que el metamaterial absorbe la radiación infrarroja, la temperatura de su superficie externa aumenta, generando un incremento en el ΔT . Este fenómeno evidencia que la fuente de calor está actuando directamente sobre el material.

Transcurridos 20 minutos, se observa un decaimiento en el ΔT . Esta disminución sugiere una transferencia de calor desde el material hacia el interior de la cámara

adiabática, lo que provoca un aumento en la temperatura interna y, por consiguiente, una reducción en la diferencia de temperaturas.



Gráfica 2: ΔT con la fuente apagada de la prueba testigo

El Gráfico 2 ilustra la evolución del ΔT durante la fase de enfriamiento, una vez que la fuente de luz infrarroja se ha apagado y comienza la transferencia de calor hacia el ambiente.

Inicialmente, se observa un ΔT de 4, lo que indica que la temperatura de la capa externa del metamaterial es superior a la temperatura del interior de la cámara adiabática.

Alrededor del minuto 5, el ΔT se aproxima a 0, esto significa que ambas temperaturas se igualan, alcanzando un equilibrio térmico temporal.

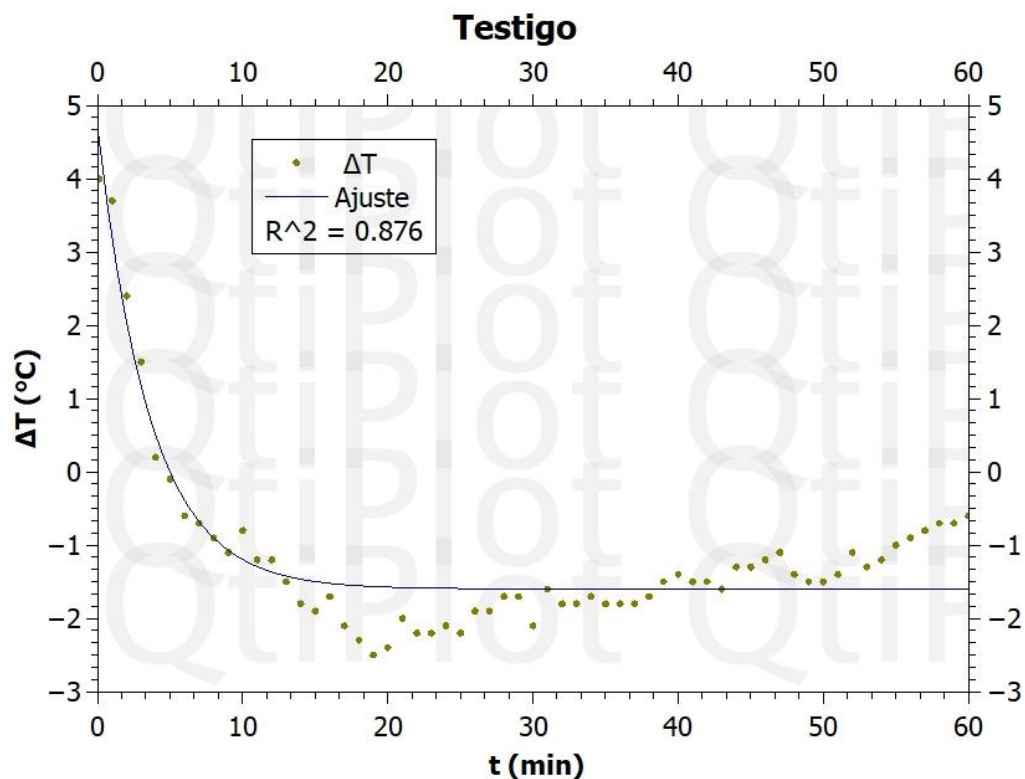
Sin embargo, con el transcurso del tiempo, el ΔT adquiere valores negativos. Esta inversión en la diferencia de temperatura implica que la temperatura interna de la cámara adiabática supera la temperatura de la capa externa del material. Este fenómeno puede atribuirse a una mayor transferencia de calor desde la capa externa hacia el ambiente, impulsada por la diferencia de temperaturas entre ambas.

Finalmente, hacia el final del experimento, se aprecia una disminución en el valor absoluto del ΔT , acercándose nuevamente a 0. Este comportamiento sugiere una

pérdida de calor desde el interior de la cámara adiabática hacia el ambiente, lo que provoca una gradual equiparación de las temperaturas.

A partir de los resultados iniciales, se decidió focalizar el análisis en las fases de enfriamiento de todos los arreglos experimentales. Esta decisión se fundamenta en la necesidad de modelar la transferencia de calor.

En la primera etapa de recopilación de datos de cambio de temperatura en función del tiempo, se analizaron los resultados de la prueba testigo con concreto. Los datos obtenidos fueron procesados y graficados mediante el programa Qtiplot en su versión demo. Si bien esta versión presenta restricciones en cuanto al almacenamiento de proyectos y tiempo de uso (limitado a 20 minutos), resultó adecuada para la visualización de los datos. Tras visualizar los datos de la prueba



Gráfica 3: Datos obtenidos del enfriamiento del concreto llamado "testigo" al igual que su ajuste de curva.

testigo en la Gráfica 3, se identificó una tendencia que sugiere una función exponencial negativa. Se procedió a realizar un ajuste de curva utilizando dicha función, con el objetivo de evaluar su grado de ajuste mediante el coeficiente de determinación (R^2). El valor de R^2 obtenido fue de 0.876, lo que indica un ajuste satisfactorio. Por lo tanto, se seleccionó este ajuste de curva, cuya forma se detalla en la Ecuación 4, para continuar con el análisis.

$$f(t) = C + De^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

El ajuste de curva nos habla mejor de qué tipo de ecuación física puede tratarse este fenómeno de transferencia de calor. Esta ecuación confirma que el enfriamiento de la cabina debido a la pared del material es exponencial decreciente, lo cual significa que su temperatura decrece con mayor rapidez al inicio del enfriamiento, pero conforme más se acerque a la temperatura de equilibrio menor será su cambio de temperatura.

En la *ecuación (4)* hay 4 variables que definen el comportamiento de cómo se enfría el cemento, siendo t el tiempo en el que transcurre el enfriamiento y en unidades de minutos, C y D son constantes de temperatura las cuales afectarán el valor inicial de temperatura del experimento en cuestión y estarán dadas en unidades de °C, y por último τ será una constante de proporcionalidad, que dependerá de la constitución de cada material, la cual es inversamente proporcional a la rapidez de enfriamiento del material y estará en unidades de minutos.

Con la *ecuación (4)* obtenida se deduce que el resultado de la función al estar dado en unidades K de temperatura, esto quiere decir que C debe ser una constante en unidades de temperatura al igual que D . De igual manera, la constante τ corresponde a un valor con unidades de tiempo.

Para entender de mejor manera la *ecuación (4)* aplicamos los valores en la frontera dado que siempre sabremos los valores iniciales.

Al evaluar la *ecuación (4)* en 0 se obtiene:

$$f(0) = C + D \quad (5)$$

Como indica en la *ecuación (5)* se observa que tanto C como D son independientes de la variable tiempo, esto quiere decir que la suma de ambas constantes nos dará el valor inicial de temperatura

Al evaluar la *ecuación (4)* en su valor final del experimento que es a los 60 min se obtiene:

$$f(60) = C + D \cdot e^{-\frac{60}{\tau}} \approx C \quad (6)$$

En la *ecuación (6)* se puede observar que está siendo evaluada en el último valor del tiempo que es 60 pero de igual manera sabemos que el experimento siempre tenderá al equilibrio térmico por lo que $e^{-\frac{60}{\tau}} \approx 0$ debido a que la rapidez del cambio de temperatura cada vez será menor conforme se acerque al equilibrio térmico. Por esto mismo, la constante C es la única variable que queda al final y esto nos indica que es la temperatura final del experimento ya que D está siendo multiplicado por la exponencial negativa la cual tiende a 0 en su valor final.

Por lo último, τ , la constante de proporcionalidad es inversamente proporcional a la rapidez con la que cambia la temperatura, por lo tanto, si τ aumenta entonces disminuirá su rapidez de cambio de temperatura. Entonces, una τ de mayor valor será ideal para un aislante ya que la transferencia de calor o enfriamiento será un proceso lento, mientras que si τ es de un menor valor será ideal para un conductor ya que tendrá una mayor rapidez en la transferencia de temperatura.

Para comparar la práctica con la teoría partiremos del enunciado de la ley de enfriamiento de Newton que dice “La rapidez de cambio de la temperatura de un cuerpo es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y el medio circundante”, esto quiere decir:

$$T'(t) = k(T(t) - Ta) \quad (7)$$

Donde $T'(t)$ es la derivada de la función de temperatura con dependencia en el tiempo que también es la rapidez de cambio de la temperatura, k es la constante de conductividad térmica, $T(t)$ es la temperatura del objeto a través del tiempo y Ta que será la temperatura ambiente que se mantiene constante.

Resolviendo la *ecuación (7)* que es una ecuación diferencial.

$$\frac{dT}{T - Ta} = k dt \quad (8)$$

Integramos la *ecuación (8)*:

$$\int \frac{dT}{T - Ta} = \int k dt \quad (9)$$

$$\ln|T - Ta| = kt + C_1 \quad (10)$$

La *ecuación (10)* la elevamos como exponente:

$$T - Ta = e^{kt+C_1} = Ce^{kt} \quad (11)$$

Despejamos T de la *ecuación (11)*, como una función del tiempo:

$$T(t) = Ta + Ce^{kt} \quad (12)$$

De igual manera podemos reescribir la ecuación (12) de la siguiente manera, donde $k = -\frac{1}{\tau}$

$$T(t) = Ta + Ce^{-\frac{t}{\tau}} \quad (13)$$

Si comparamos la *ecuación (4)* y la *ecuación (13)* podemos observar que prácticamente es la misma ecuación con la única diferencia de que k es inversamente proporcional a τ .

Con esto mismo, se puede aclarar que las constantes Ta y C tendrán unidades de temperaturas. Ta indicará la temperatura ambiente al igual que la temperatura final debido al equilibrio térmico. La constante C indicará la diferencia de temperaturas entre la temperatura del material y la temperatura del ambiente. La constante k tendrá unidades $\frac{1}{min}$ y esto indicará la rapidez del decaimiento de la curva, por lo que se concluye que a mayor valor de k tendrá una mayor rapidez de cambio de temperatura y viceversa.

Una vez definido el establecimiento de la metodología correspondiente al ajuste de curvas, se procedió a la implementación de dicho ajuste. Este proceso reveló que la trayectoria de los datos se ajustaba consistentemente a una función exponencial negativa en todos los conjuntos de resultados analizados. La representación gráfica y el análisis detallado de estas curvas, junto con sus implicaciones, serán presentados y discutidos exhaustivamente en el capítulo subsiguiente.

4. Resultados.

En este apartado se desarrollan los resultados obtenidos para demostrar la influencia de las fibras de coco en el cemento en la retención de calor. Se pretende que los resultados demuestren que sí existe una diferencia térmica significativa con el uso de fibras de coco.

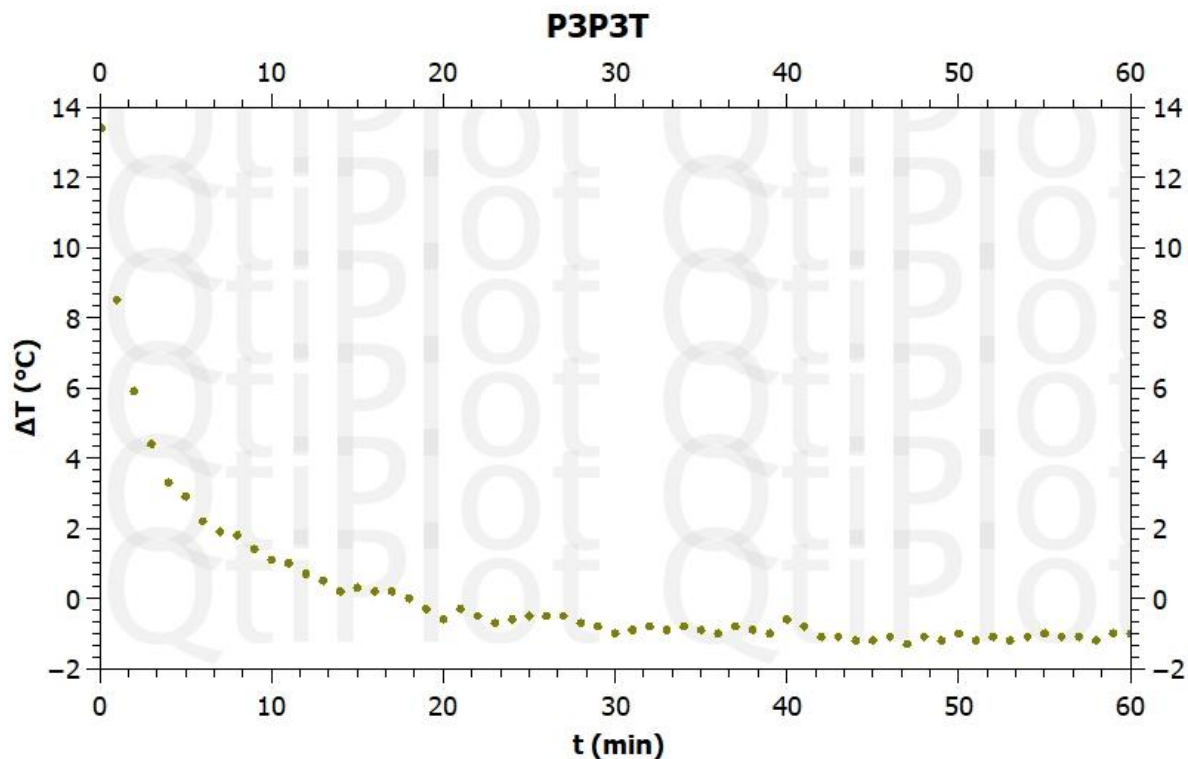
4.1 Temperaturas obtenidas.

Cabe aclarar que los datos respecto a las temperaturas obtenidas por las pruebas ya existían de manera cruda y sin analizar.

Es fundamental recordar la nomenclatura empleada, la cual se detalla en la *Tabla 1*. Esta nomenclatura se aplicó a una muestra compuesta por tres capas, conforme

se ilustra en la *Ilustración 4*. Una de estas capas corresponde a la muestra testigo, designada como T, mientras que las dos capas restantes pueden variar en su orden, siempre y cuando sean consistentes entre sí. Este arreglo se ejemplifica en la *Gráfica 4*, donde se observa la secuencia P3P3T.

Teniendo los datos de temperatura general dentro y fuera de la cámara aislante de cada las diferentes combinaciones de metamateriales adicionados con fibras de coco, se procedió a obtener un ΔT entre dichas temperaturas de cada una de las mediciones, esto es con el fin de saber como se comporta la perdida de calor a través del tiempo. Con esto obtenemos la primera parte de los resultados, que es el cambio de temperatura a través del tiempo tal y como se observa en la *gráfica 4*.

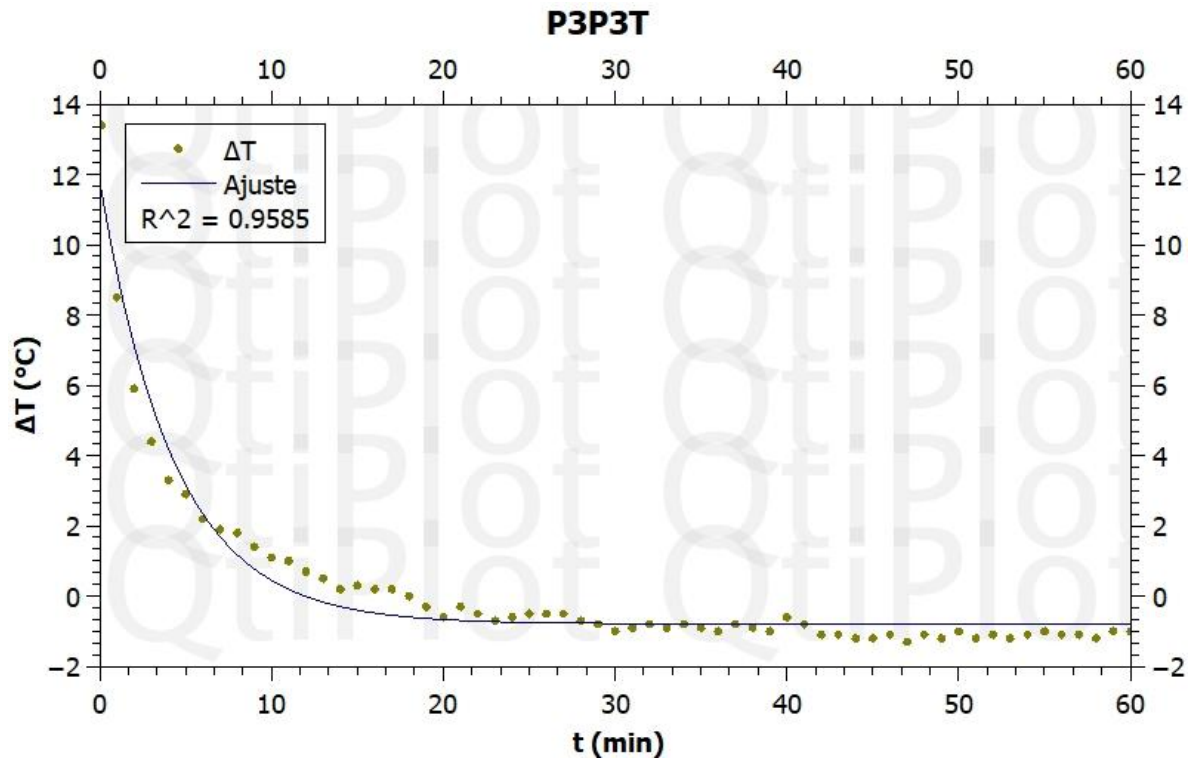


Gráfica 4: Temperatura ΔT a través del tiempo en unidades de minutos para el metamaterial con la nomenclatura P3P3T

4.2 Ley de enfriamiento de Newton y ajuste de curva

Previamente ya se ha mencionado que el principio físico que se presenta en esta tesis es la ley de enfriamiento de Newton, por lo que si esto es correcto a la hora de obtener un ajuste de curva de los datos obtenidos como en la *Gráfica 4* deberíamos de obtener una ecuación que tenga la misma forma de que la ley de enfriamiento de Newton. Por esto mismo como se observa en la *Gráfica 5* tenemos un ajuste de curva que realmente coincide con los datos experimentales.

De igual manera en la *Tabla 3* tenemos el valor de R^2 el cual es el coeficiente de determinación que evalúa la fuerza de la relación lineal entre dos variables. Este coeficiente va desde -1 a 1, siendo 1 el valor máximo que indica que la comparativa entre los valores experimentales y la ecuación de ajuste de curva se comportan exactamente de la misma forma.



Gráfica 5: Temperatura ΔT a través del tiempo en unidades de minutos y con su ajuste de curva para el metamaterial con la nomenclatura P3P3T

Este ajuste de curva que fue obtenido utilizando QtiPlot tiene los siguientes valores.

Tabla 2: Valores del ajuste de curva obtenidos del metamaterial con la nomenclatura P3P3T

Función	$C + De^{-\frac{t}{\tau}}$
C	-0.7934
D	12.607
τ	4.309
R^2	0.95

Este proceso de obtener el ajuste de curva se aplicó a todas las combinaciones de metamateriales de este proyecto. Una vez obtenido tanto todas las gráficas como

todos los valores de sus respectivos ajustes de curva se procedieron a juntar todos los valores de los ajustes de curva en la *Tabla 2*.

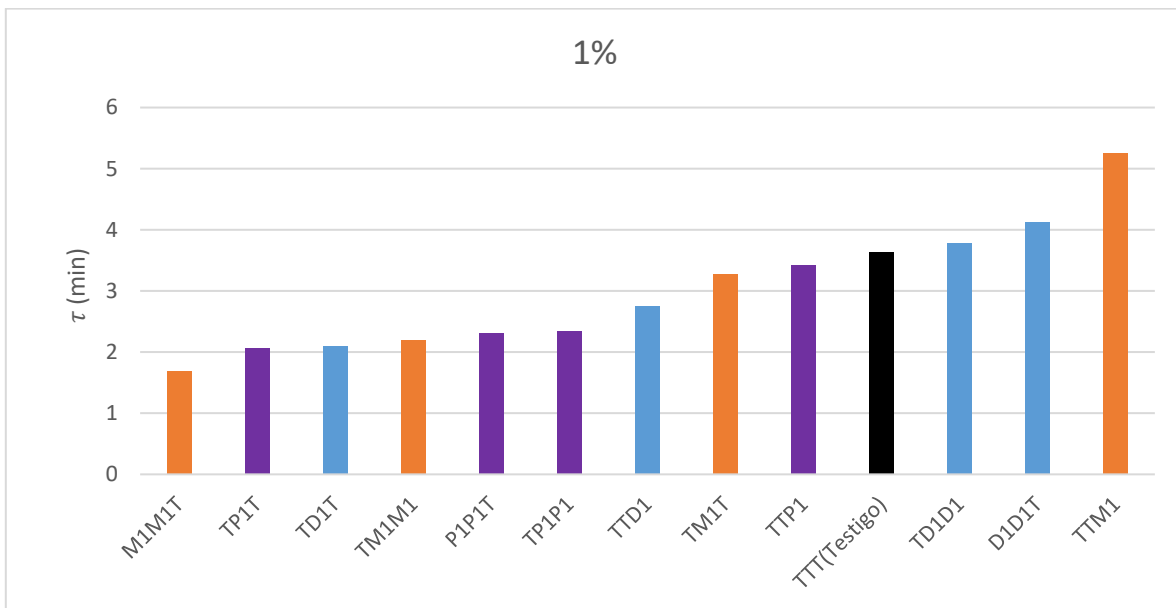
Tabla 3: Valores de los ajustes de curva de cada uno de los arreglos.

Arreglo	C	D	τ (tau)	R ²
TTP3	-1.377	8.975	1.426	0.962
TTD3	-1.650	1.407	1.617	0.881
TP2T	-1.124	7.716	1.675	0.893
M1M1T	-2.036	1.596	1.689	0.968
TP3T	-2.159	9.666	1.695	0.940
TP3P3	-9.115	1.407	1.845	0.990
P2P2T	-1.645	1.360	1.864	0.990
TD2D2	2.647	7.973	2.034	0.937
TD2T	-1.890	1.313	2.037	0.885
TP1T	-2.760	1.318	2.059	0.894
TP2P2	4.529	1.635	2.073	0.942
D3D3T	-1.432	1.431	2.092	0.986
TD3D3	-6.703	1.564	2.095	0.995
TD1T	-2.081	1.207	2.104	0.958
TM1M1	-6.827	1.350	2.197	0.637
P1P1T	-1.331	1.656	2.308	0.987
TP1P1	-1.603	1.750	2.346	0.982
TM2M2	-1.125	1.762	2.397	0.983
TTP2	-9.747	9.172	2.543	0.947
TM3M3	7.863	7.286	2.641	0.930
TTD1	-1.659	1.071	2.747	0.963
TTM2	-1.756	8.422	2.868	0.962
TM3T	-7.185	1.110	2.868	0.976
TM1T	-2.043	7.875	3.271	0.926
TTP1	-8.557	1.286	3.421	0.963
TTT(Testigo)	-1.600	6.333	3.627	0.876
TD1D1	-1.870	8.794	3.780	0.915
M2M2T	-1.086	1.514	3.854	0.960
D1D1T	-2.273	8.513	4.120	0.950
TTD2	-1.334	1.527	4.230	0.928
P3P3T	-7.934	1.260	4.309	0.958
TD3T	-2.032	1.522	4.468	0.966
TTM3	-2.103	1.365	4.864	0.897
M3M3T	-1.529	9.327	5.209	0.984
TTM1	-1.481	7.469	5.255	0.930
TM2T	-1.171	8.268	5.844	0.979
D2D2T	-8.655	7.664	7.358	0.933

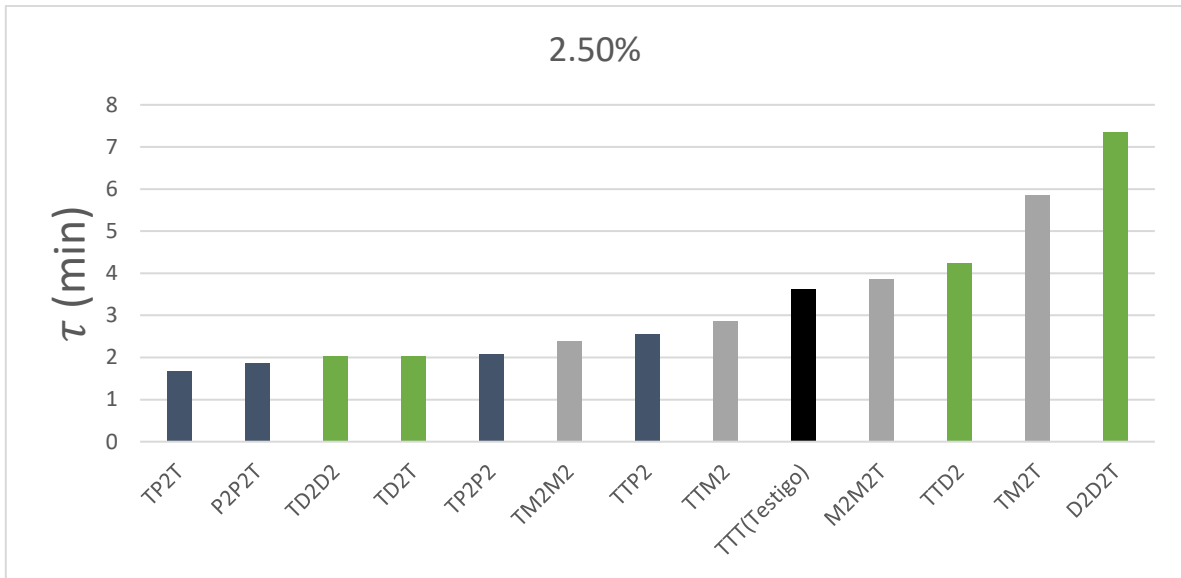
Posteriormente con los datos de la *Tabla 2* se clasificaron en 7 tipos de histogramas. El primer histograma sería la *Gráfica 6* la cual constaría de la recopilación de todos los arreglos con respecto a τ (tau).



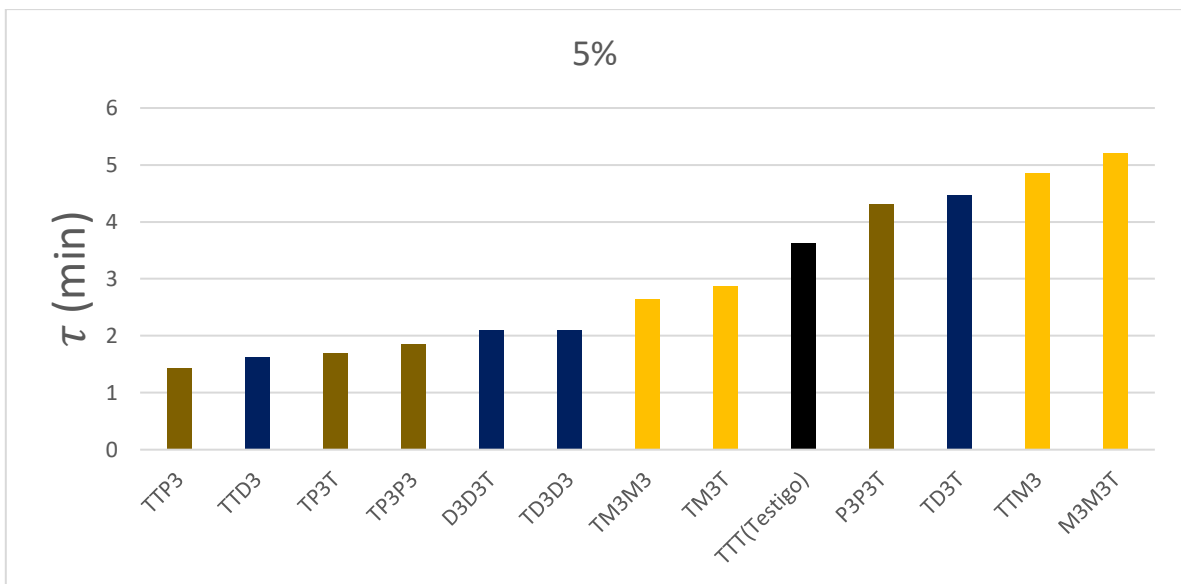
Gráfica 6: Comparación de todos los arreglos con respecto a τ .



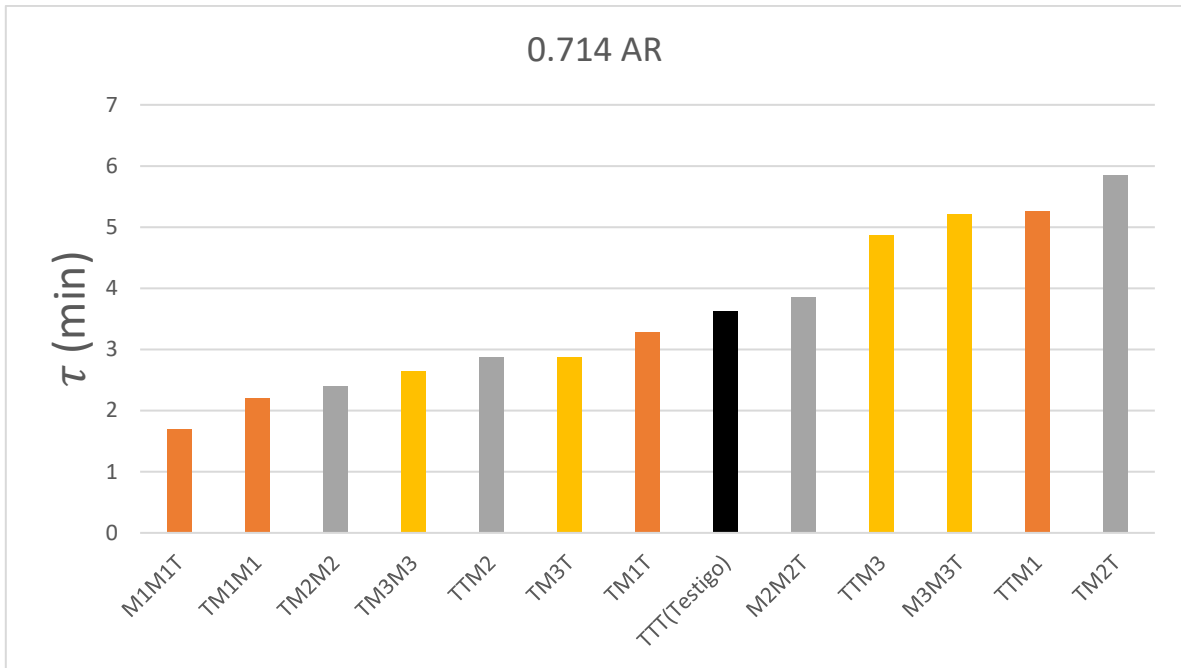
Gráfica 7: Comparación de los arreglos que contienen una concentración de 1% de fibras de coco con respecto a τ .



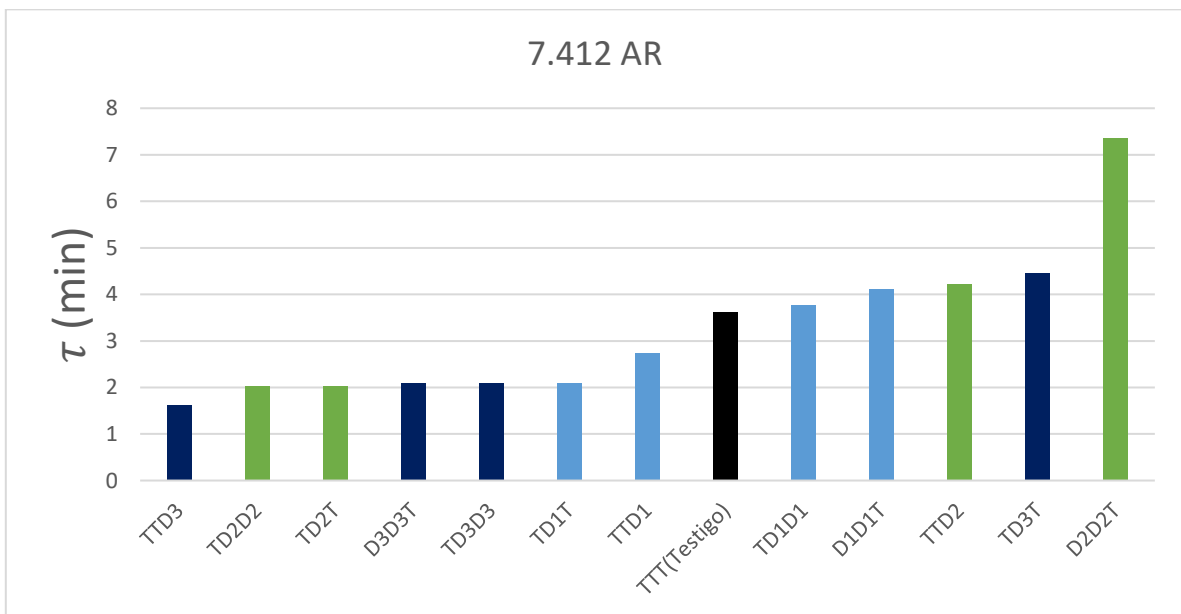
Gráfica 8: Comparación de los arreglos que contienen una concentración de 2.5% de fibras de coco con respecto a τ .



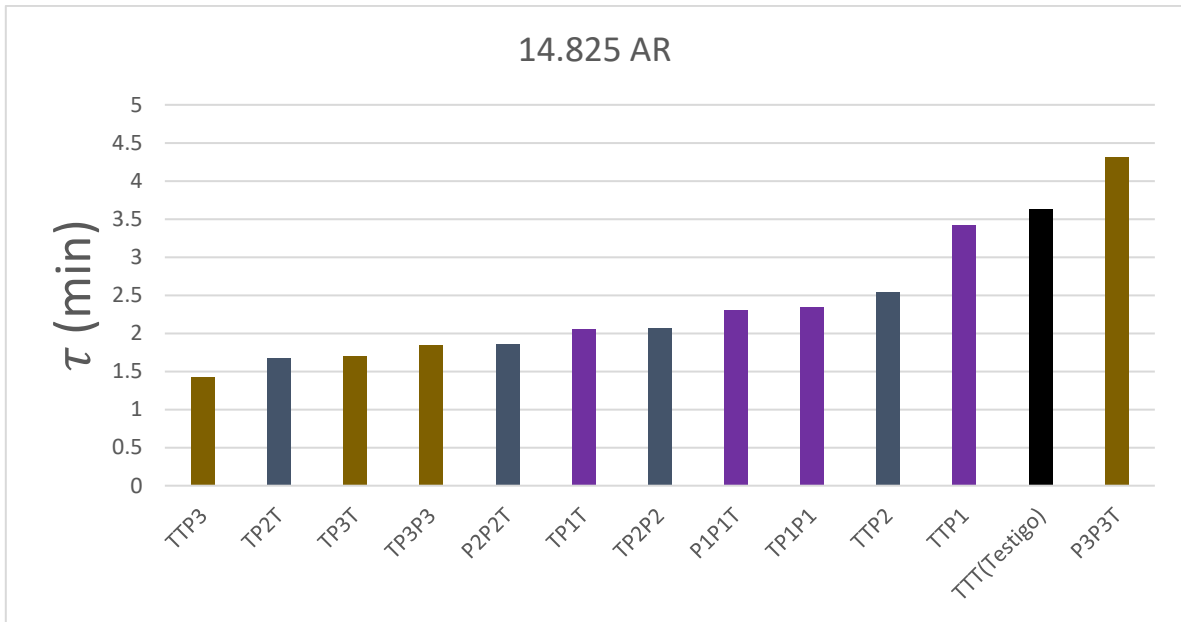
Gráfica 9: Comparación de los arreglos que contienen una concentración de 5% de fibras de coco con respecto a τ .



Gráfica 10: Comparación de los arreglos que contienen una relación de aspecto de 0.714 en las fibras de coco con respecto a τ .



Gráfica 11: Comparación de los arreglos que contienen una relación de aspecto de 0.714 en las fibras de coco con respecto a τ .



Gráfica 12: Comparación de los arreglos que contienen una relación de aspecto de 0.714 en las fibras de coco con respecto a τ .

5. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos permiten concluir que el modelo de enfriamiento empleado presenta una adecuada representación del fenómeno, ajustándose a una función exponencial decreciente. La validez de este modelo se corrobora mediante su aplicación a diversos arreglos de metamateriales de cemento reforzado con fibra de coco, donde la mayoría de las curvas de ajuste exhiben un coeficiente de determinación R^2 superior a 0.9. Las excepciones observadas podrían ser atribuidas a la influencia de factores externos no controlados o a la presencia de procesos de enfriamiento no lineales. A continuación, se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos, utilizando histogramas para representar la distribución del porcentaje de fibra de coco en cada configuración evaluada.

5.1 Histograma de las PM con 1% de fibras de coco.

El *Gráfico 7* consta de una comparativa en forma ascendente de todas las pruebas que contienen una concentración de 1% de fibra de coco en el arreglo de cemento donde el valor que se encuentra arriba de cada prueba es su relación de aspecto (AR). De igual manera, se incluyó el arreglo de testigo, el cual no tiene fibra de coco y sirve como base para los resultados.

Enfocándonos en dos barras del histograma, "TM1T" y "TTM1", encontramos que ambos están compuestos de los mismos materiales, y que M1 es parte del grupo de cementos con una relación de aspecto (AR) de 0.714.

Es de resaltar que el primer valor de la nomenclatura será la capa que se encuentra en contacto con el exterior mientras que el último valor será el que estará en contacto con el interior. Podemos observar que "TM1T" tiene una capa de cemento con fibras de coco la cual está rodeada por dos capas testigo, lo cual da con este arreglo un tau menor a la del arreglo TTT (testigo).

Por otro lado, tenemos a "TTM1" el cual está en un arreglo en el que las dos capas superiores son testigo y únicamente la interna es de cemento con fibras de coco y esto nos da como resultado una tau mayor a la del arreglo testigo.

A partir de esta comparación, se observa principalmente que, si puede existir un cambio en la termodinámica del arreglo debido al orden de las capas en cuestión, siendo un ejemplo "TTM1" el cual obtiene una tau mayor, y es esta variable la que define de manera inversa la rapidez del decaimiento exponencial de la función. Por esto mismo, se concluye que "TTM1" es un aislante respecto al arreglo testigo "TTT" y "TM1T" un conductor.

5.2 Histograma de las PM con 2.5% de fibras de coco.

Para el *Gráfico 8* que consta de una comparativa en forma ascendente de los arreglos de cemento que contengan un porcentaje de fibras de coco igual a 2.5%.

De este histograma podemos tomar 2 arreglos para una comparativa, "TD2D2" y "D2D2T". Ambos arreglos constan de los mismos materiales solo que en posiciones distintas, siendo "TD2D2" la cual tiene la capa testigo en la parte exterior y "D2D2T" tiene la capa testigo en el interior.

En esta comparativa se puede observar que "TD2D2" tiene un tau mucho menor de "D2D2T", esto quiere decir que "TD2D2" es un aislante y "D2D2T" con respecto al arreglo testigo "TTT"

5.3 Histograma de las PM con 5% de fibras de coco.

Para el *Gráfico 9* que consta de una comparativa en forma ascendente de los arreglos de cemento que contengan un porcentaje de fibras de coco igual a 5%.

De este histograma podemos tomar 2 arreglos para una comparativa, "TM3M3" y "M3M3T". Ambos arreglos constan de los mismos materiales solo que en posiciones distintas, siendo "TM3M3" la cual tiene la capa testigo en la parte exterior y "M3M3T" tiene la capa testigo en el interior.

En esta comparativa se puede observar que "TM3M3" tiene un tau mucho menor de "M3M3T", esto quiere decir que "TM3M3" es un aislante y "M3M3T" con respecto al arreglo testigo "TTT"

6. Conclusiones

- Se identifica un indicador de desempeño térmico asociado a la conducción de calor en el material según el arreglo de placas y por otra parte con la constante h de enfriamiento de Newton. Al cual conforme al modelo exponencial decreciente se le denomina τ . A partir de dicho parámetro se analizó el efecto de las fibras de coco (dimensiones y porcentaje de adición) en el desempeño del metamaterial representado por las diferentes configuraciones de las placas.
- El valor de τ se atribuiría la conductividad del material, al igual que también la constante de enfriamiento de Newton
- Se encontró que los cementos compuestos con fibras de coco presentaron valores de tau (coeficiente de transferencia de calor) diferentes al cemento testigo sin fibras, lo que indica que las fibras de coco influyen en el desempeño térmico de los materiales.
- Los cementos que contenían fibras de coco con una relación de aspecto 14.285, denominados con la nomenclatura de P, mostraron una mayor conductividad térmica que el cemento testigo sin fibras de coco. Esto se puede deber a que las fibras de coco crean una red de microcanales que facilitan el flujo de calor a través del material.
- El valor τ , fue mayor para los cementos P que para el cemento testigo. Esto indica que los cementos P son más eficientes en el aprovechamiento de la energía térmica y tienen un menor impacto ambiental.
- Los cementos P son una alternativa viable y sostenible para la construcción de edificaciones con un mejor desempeño térmico y estructural.
- Se observó que el orden de las placas que conforman los cementos compuestos también afectó los valores de tau, ya que se obtuvieron resultados tanto mayores como menores al cambiar el orden de estas, lo que sugiere que la distribución de las fibras de coco no es homogénea en el espesor del material.
- Se recomienda realizar más estudios para determinar el mecanismo físico que explica la variación de la conductividad térmica con el orden de las placas y la proporción óptima de fibras de coco para mejorar el desempeño térmico de los cementos compuestos.

Análisis y Perspectivas

- La adición de fibras de coco alteró significativamente la conductividad térmica de los cementos compuestos, evidenciado por la variación en los valores de tau. Esta influencia es atribuible a la estructura física que las fibras aportan, posiblemente formando microcanales que permiten una transferencia de calor más eficiente.
- Los cementos designados como P, con fibras de coco y una relación de aspecto de 14.285, no solo mostraron una conductividad térmica superior al cemento testigo, sino que también exhibieron propiedades mecánicas mejoradas, tales como resistencia a la compresión y flexión. Esto indica que la inclusión de fibras de coco puede reforzar la integridad estructural sin comprometer la eficiencia térmica.
- El incremento en el valor de tau en los cementos P implica una mayor eficiencia en la transferencia de calor comparado con el aire, sugiriendo un material más aislante y, por ende, más adecuado para la construcción sostenible y eficiente desde el punto de vista energético.
- La no uniformidad en la distribución de las fibras de coco, sugerida por la variabilidad en los valores de tau al cambiar el orden de las placas, resalta la importancia de la homogeneidad en la mezcla para optimizar el comportamiento térmico del material.
- Dada la relevancia de los resultados, se recomienda investigar más profundamente los mecanismos subyacentes que regulan la conductividad térmica en estos compuestos y determinar la proporción ideal de fibras para maximizar tanto las propiedades térmicas como mecánicas de los cementos compuestos.
- Se propone el uso de indicadores de sostenibilidad basados en la información de Fisher para evaluar cómo las variaciones en la conductividad térmica afectan la eficiencia energética de una edificación, lo que puede contribuir a la obtención de certificaciones de sostenibilidad como EDGE, ofreciendo así una metodología para cuantificar el impacto ambiental del uso de estos materiales innovadores en la construcción.

7. Referencias

- [1] E. Galicia-Aldama, M. Mayorga, J. C. Arteaga-Arcos, and L. Romero-Salazar, "Rheological behaviour of cement paste added with natural fibres," *Constr Build Mater*, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.179.
- [2] A. Sekar and G. Kandasamy, "Study on durability properties of coconut shell concrete with coconut fiber," *Buildings*, 2019, doi: 10.3390/buildings9050107.
- [3] H. Syed, R. Nerella, and S. R. C. Madduru, "Role of coconut coir fiber in concrete," in *Materials Today: Proceedings*, 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.477.
- [4] M. Ranjitham, S. Mohanraj, K. Ajithpandi, S. Akileswaran, and S. K. D. Sree, "Strength properties of coconut fibre reinforced concrete," in *AIP Conference Proceedings*, 2019. doi: 10.1063/1.5117917.
- [5] K. Villa, C. Echavarría, and D. Blessent, "Wood walls insulated with coconut fiber," *DYNA (Colombia)*, vol. 86, no. 210, 2019, doi: 10.15446/dyna.v86n210.73685.
- [6] S. K. Yadav and A. Singh, "An Experimental Study on Coconut Fiber Reinforced Concrete," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 6, no. 5, 2019.
- [7] R. Alavez-Ramirez, F. Chiñas-Castillo, V. J. Morales-Dominguez, and M. Ortiz-Guzman, "Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels," *Constr Build Mater*, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.053.
- [8] C. G. Mothé and I. C. De Miranda, "Characterization of sugarcane and coconut fibers by thermal analysis and FTIR," *J Therm Anal Calorim*, 2009, doi: 10.1007/s10973-009-0346-3.
- [9] M. Ranjitham, S. Mohanraj, K. Ajithpandi, S. Akileswaran, and S. K. D. Sree, "Strength properties of coconut fibre reinforced concrete," in *INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS, MANUFACTURING AND MACHINING 2019*, 2019. doi: 10.1063/1.5117917.
- [10] R. Nehvi, "Studies on Strength Properties of Coconut Fibre Concrete," *Int J Res Appl Sci Eng Technol*, 2019, doi: 10.22214/ijraset.2019.7061.
- [11] N. M. S. Hasan, H. R. Sobuz, M. S. Sayed, and M. S. Islam, "The use of coconut fibre in the production of structural lightweight concrete," *Journal of Applied Sciences*, 2012, doi: 10.3923/jas.2012.831.839.
- [12] R. M. Walser, "Metamaterials: What are they? What are they good for?," *APS March Meeting Abstracts*, 2000.
- [13] Gordon J. Van Wylen, Richard E. Sonntag, and C. Borgnakke., *Fundamentos de termodinámica*. 1999.
- [14] G. J. Van Wylen, R. E. Sonntag, and C. Borgnakke, *Fundamentos de termodinámica*. 2007.
- [15] J. A. Carrazana García, *Introducción a la termodinámica clásica*. 2020. doi: 10.15304/9788417595746.

- [16] G. F. Nellis and S. A. Klein, *Introduction to Engineering Heat Transfer*. 2020. doi: 10.1017/9781316832226.
- [17] D. M. McEligoi, "Fundamentals of momentum, heat and mass transfer," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 13, no. 10, 1970, doi: 10.1016/0017-9310(70)90063-3.
- [18] M. S. Imbabi, C. Carrigan, and S. McKenna, "Trends and developments in green cement and concrete technology," *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2012. doi: 10.1016/j.ijsbe.2013.05.001.
- [19] R. J. Flatt, N. Roussel, and C. R. Cheeseman, "Concrete: An eco material that needs to be improved," *J Eur Ceram Soc*, 2012, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2011.11.012.
- [20] P. Renaud, S. Chartier, and D. Kaufman, *Properties of concrete by A.M. Neville*. 2008.
- [21] H. Danso and D. Manu, "Influence of coconut fibres and lime on the properties of soil-cement mortar," *Case Studies in Construction Materials*, 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00316.
- [22] A. R. Sangsefidi, S. H. Dibajian, J. Kadkhodapour, A. P. Anaraki, S. Schmauder y Y. Schneider, "An Abaqus plugin for evaluation of the Auxetic structure performance", *Eng. with Comput.*, febrero de 2021.
- [23] "Ley del enfriamiento de Newton". Campus de Gipuzkoa - UPV/EHU. Disponible: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/otros/enfriamiento/enfriamiento.htm>
- [24] Fan, K., & Padilla, W. J. (2015). Dynamic electromagnetic metamaterials. *Materials Today*, 18(1), 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.07.010>
- [25] Palomino Ovando, M. A., & Cocolletzi, G. H. (1969). La refracción negativa y los metamateriales: los nuevos materiales para dispositivos ópticos. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 1(1). <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2008.1.52735>
- [26] Lu, Q., Li, X., Zhang, X., Lu, M., & Chen, Y. (2022). Perspective: Acoustic metamaterials in future engineering. *Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.020>
- [27] Jiao, P., Mueller, J., Raney, J. R., Zheng, X., & Alavi, A. H. (2023). Mechanical metamaterials and beyond. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41679-8>

