



---

**Instituto Politécnico Nacional**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA  
Y TECNOLOGÍA AVANZADA**

UNIDAD QUERÉTARO

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES TERMODINÁMICAS Y ÓPTICAS DE UN  
RECUBRIMIENTO HECHO DE MATERIAL COMPÓSITO DE MATRIZ  
POLIMÉRICA CARGADO CON MICRO-PARTÍCULAS.**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA

PRESENTA

**Carlos Sandoval Ríos**

Directores de proyecto:

Dr. Adrián Luís García García, Dr. Iván Domínguez López



Querétaro Qro. Diciembre de 2011





# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Querétaro siendo las 12:00 horas del día 20 del mes de Octubre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-IPN-Qro.

para examinar la tesis titulada:

"Estudio de las propiedades termodinámicas y ópticas de un recubrimiento hecho de material compósito de matriz polimérica cargado con micro-partículas"

Presentada por el alumno:

Sandoval  
Apellido paterno

Ríos  
Apellido materno

Carlos  
Nombre(s)

Con registro: 

A	1	0	0	3	5	0
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

\_\_\_\_\_  
Dr. Adrián Luis García García

\_\_\_\_\_  
Dr. Iván Domínguez López

\_\_\_\_\_  
Dra. Mónica Araceli Vidales Hurtado

\_\_\_\_\_  
Dr. José Dolores Oscar Barceinas

\_\_\_\_\_  
Dr. Francisco Javier García Rodríguez

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

\_\_\_\_\_  
Dr. Jorge Adalberto Huerta Huertas



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN EN  
CIENCIAS APLICADAS  
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de Querétaro Qro. el día 31 del mes de Octubre del año 2011, el (la) que suscribe Carlos Sandoval Ríos alumno (a) del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro A100350, adscrito al Centro de Investigación de Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Adrián Luis García García y el Dr. Iván Domínguez López y cede los derechos del trabajo intitulado **“Estudio de las propiedades termodinámicas y ópticas de un recubrimiento hecho de material compósito de matriz polimérica cargado con micro-partículas”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección de CICATA-Querétaro: Cerro Blanco No 141, col. Colinas del Cimatarío, Santiago de Querétaro, Querétaro, México. C.P. 76090. Teléfonos 01(442)2290804 o 01(55)57296000 Ext. 81002. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Carlos Sandoval Ríos



## AGRADECIMIENTOS

A Dios por el regalo de la vida y la salud, por darme la oportunidad de tener aún a mis seres queridos compartiendo grandes momentos de orgullo y felicidad. Dedico esta tesis a mi madre Rosalina Ríos, a mi padre Patricio Sandoval, a mi hermana Rossana, a mi tía Olimpia y a toda mi familia, que me han apoyado en mi búsqueda de superación.

Al Dr. Javier Arturo Montes de Oca Valero<sup>†</sup> por la oportunidad y confianza que me brindó al haberme aceptado para colaborar en un proyecto de investigación.

Agradezco a mi novia Angélica Viviana por su apoyo incondicional durante toda mi maestría, por estar siempre a mi lado aún en los momentos difíciles.

A la familia De la Rosa Medina por su apoyo y sus finas atenciones a mi persona.

Al Dr. Adrián Luís García<sup>2</sup>, por su apoyo, por sus palabras de aliento, por las pláticas tan interesantes que teníamos, por su paciencia mostrada y sobre todo, porque las puertas de su oficina siempre estuvieron abiertas y él siempre estaba ahí para escucharme.

Al Dr. Iván Domínguez López por sus conocimientos y experiencias transmitidas, por su paciencia en la aclaración de mis múltiples dudas y por su dedicación en la revisión de este trabajo.

A la Dra. Mónica Araceli Vidales Hurtado, por sus consejos y su interés mostrado por el proyecto realizado.

Al Dr. José Dolores Oscar Barceinas y al Dr. Francisco Javier García Rodríguez, por su disposición y colaboración en la revisión de esta tesis.

Deseo agradecer a todos los que ayudaron a la realización satisfactoria de esta tesis, ya que sin su apoyo no hubiese sido posible alcanzar la meta. A la Dra. Eva Gonzales Jasso por haberme brindado su apoyo cada que se lo pedía, al Dr. Reynaldo Carlos Pless Elling por su disposición y ayuda durante este proyecto, al Dr. Juan Hurtado y al CENAM por su apoyo en la realización de pruebas relevantes para éste proyecto. Al Dr. Gonzalo Alonso Ramos por su ayuda en la interpretación de resultados importantes para el proyecto. Al Dr. Martín de Jesús Nieto por la ayuda en el entendimiento de conceptos.

Deseo agradecer a CICATA-Qro. Porque encontré apoyo cuando lo necesitaba y nunca obtuve una respuesta negativa.

Agradezco a CONACyT por la beca brindada durante mi estancia.





## CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	iii
ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
Resumen .....	ix
Abstract .....	xi
Introducción .....	1
Marco Teórico.....	5
2.1 Termopares.....	5
2.2 Fenómenos de transferencia de calor.....	6
2.2.1 Transferencia de calor por conducción .....	7
2.2.2 Transferencia de calor por convección .....	8
2.2.3 Transferencia de calor por radiación.....	9
2.3 Espectrofotómetro .....	14
2.4 Modelo termodinámico de la transferencia de calor en una placa horizontal iluminada con una fuente de calor por radiación .....	15
Materiales y Métodos.....	19
3.1 Diseño de experimentos .....	19
3.2 Preparación de las muestras .....	21
3.3 Aplicación de formulaciones sobre placas de acero ASTM A-36 .....	23
3.4 Diseño y construcción del calorímetro .....	24
3.5 Mediciones de temperatura en las muestras.....	25
Análisis y discusión de resultados.....	27
4.1 Resultados del calorímetro .....	27
4.2 Resultados de las mediciones de reflectancia difusa .....	33
4.3 Comparación entre ecuación 17 y resultados experimentales .....	35
Conclusiones .....	41
Bibliografía.....	43
Apéndice.....	45





## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Conexión típica de un termopar. A y B representan alambres de distintos materiales. $T_1$ y $T_2$ representan la temperatura en las uniones. ....	6
<b>Figura 2.</b> Esquema de transferencia de calor por conducción a través de una placa de espesor $X_1$ - $X_0$ y área A. En esta figura $T_1 > T_2$ . ....	7
<b>Figura 3.</b> Placa metálica de superficie A, enfriándose por convección. Se observa que el flujo de calor va de la superficie de la placa hacia el ambiente, cuya temperatura es $T_\infty$ . ....	9
<b>Figura 4.</b> Espectro de radiación electromagnética, consulta en internet (Frank).....	10
<b>Figura 5.</b> Esquema de la interacción de la luz con la materia, dependiendo del material se pueden presentar alguno o los tres siguientes fenómenos: (a) reflexión (b), transmisión y (c) absorción. ....	11
<b>Figura 6.</b> Transmitancia espectral del vidrio común, tomada de (González Velasco, 2009). 12	
<b>Figura 7.</b> Configuración espacial de los principales componentes de un espectrofotómetro para mediciones de reflectancia difusa. (a) Fuente de luz, (b) muestra, (c) prisma, (d) espejo, (e) rejilla de difracción, (f) esfera de integración.....	14
<b>Figura 8.</b> Ingredientes pesados y almacenados .....	21
<b>Figura 9.</b> Mezclador .....	21
<b>Figura 10.</b> Mezcla del resto de los ingredientes .....	22
<b>Figura 11.</b> Almacenado de las 9 formulaciones.....	22
<b>Figura 12.</b> Método de aplicación de formulaciones sobre placas de acero ASTM A-36.....	23
<b>Figura 13.</b> (a) Diseño del calorímetro en Solid Works 2010, (b) Calorímetro construido.....	24
<b>Figura 14.</b> Partes del calorímetro. ....	25





## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1.</b> Irradiación espectral solar .....	11
<b>Gráfica 2.</b> Reflectancia frente a longitud de onda para la plata (Ag), oro (Au), cobre (Cu) y aluminio (Al). (Hecht, 2002) .....	13
<b>Gráfica 3.</b> Representación gráfica de la ecuación 17 .....	18
<b>Gráfica 4.</b> Comparación de la muestra C1R1 en sus 3 diferentes espesores .....	28
<b>Gráfica 5.</b> Representación gráfica de las temperaturas de equilibrio del diseño de experimentos, en función de las cargas (C), resinas (R) y para cada uno de los tres diferentes espesores.....	28
<b>Gráfica 6.</b> Gráfica de intervalos de los 3 diferentes espesores aplicados en las muestras ...	29
<b>Gráfica 7.</b> Efectos principales sobre la temperatura de equilibrio .....	30
<b>Gráfica 8.</b> Grafica de la prueba de normalidad de los residuales.....	31
<b>Gráfica 9.</b> Temperaturas de equilibrio de las 9 muestras diferentes en función de la proporción de resinas. ....	32
<b>Gráfica 10.</b> Gráfica de temperatura de equilibrio en función de la proporción de cargas cerámicas. ....	33
<b>Gráfica 11.</b> Reflectancia difusa de los 9 diferentes materiales .....	34
<b>Gráfica 12.</b> Comparación de reflectancia difusa entre los materiales C3R1, C3R2, C1R1. ...	34
<b>Gráfica 13.</b> Datos experimentales obtenidos en el calorímetro, de una placa de acero ASTM A-36 sin recubrimiento. ....	35
<b>Gráfica 14.</b> $\ln K_2 - Twt$ vs $t$ , para los resultados experimentales de la placa de acero ASTM A-36 sin recubrir. ....	37
<b>Gráfica 15.</b> Comparación entre ecuación 17 y resultados experimentales. ....	39





## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Comparación entre diversos productos existentes en el mercado .....	2
<b>Tabla 2.</b> Valores arbitrarios para representar la solución de la ecuación 17. ....	18
<b>Tabla 3.</b> Nombre de las formulaciones y sus proporciones de cargas y resinas del diseño de experimentos. ....	20
<b>Tabla 4.</b> ANOVA de los resultados experimentales obtenidos del calorímetro.....	30
<b>Tabla 5.</b> ANOVA para la temperatura de equilibrio, despreciando el efecto del espesor. ....	31



---

## Resumen

---

La fabricación de recubrimientos con propiedades térmicas deseables para el ahorro de energía es de relevancia social, ecológica, económica y energética. En este trabajo se exploró el efecto de la variación de algunos componentes de un recubrimiento comercial en sus propiedades térmicas y ópticas, con la intención de elucidar su aplicación como recubrimiento reflejante de radiación solar. Para el estudio se utilizó un diseño de experimentos que consideró tres variables: cargas cerámicas, espesor del recubrimiento y proporción de resinas. Cada variable en tres diferentes niveles: alto, medio y bajo, lo que dio un total de nueve formulaciones. Cada una de éstas se aplicó sobre placas de acero ASTM A-36 de 15 x 15 cm<sup>2</sup>, con tres espesores distintos. En total se llevaron a cabo 27 experimentos. Las propiedades térmicas se determinaron a partir de un calorímetro construido ex profeso, con una lámpara de filamento de Tungsteno-Halógeno. Los experimentos realizados en el laboratorio simulan las condiciones de radiación solar a la que estará sometido el recubrimiento. Las pruebas en el calorímetro mostraron diferencias de hasta 4 °C entre muestras. Los resultados obtenidos se complementaron con mediciones de reflectancia difusa realizadas en el Centro Nacional de Metrología. Finalmente, se elaboró un modelo físico basado en las leyes termodinámicas de transferencia de calor por radiación y convección que se ajusta razonablemente a los resultados obtenidos en el calorímetro.



---

## Abstract

---

Manufacturing of special coatings for energy saving purposes has important implications: social, environmental, in economics and energy. In this work, a study of the effect of some components of a commercial coating product in its thermal and optical properties is presented, with the objective of deciding a future application of this material as a solar reflecting coating. An experimental design was elaborated to test three variables: ceramic loads, coating thickness and resin content. Each variable was evaluated with three different levels: high, neutral, and low, giving a total of nine formulations. These were applied onto ASTM A-36 steel sheets, 15 x 15 cm<sup>2</sup>, with three different values of thickness. A total of 27 experiments were carried out. Thermal properties of the coating samples were tested in an in-house built calorimeter, equipped with a Tungsten filament lamp. The thermal measurements in the calorimeter simulate the solar irradiation conditions. The calorimeter experiments showed differences of up to 4 °C between samples. The thermal measurements were complemented by diffuse reflectance measurements at the Centro Nacional de Metrología. Finally, a physical model based on the thermodynamical laws of heat transfer by radiation and convection was developed and applied reasonably well to the experimental data.



# CAPÍTULO

# 1

## **Introducción**

---

Actualmente existe en el mundo una gran preocupación por el mejor uso y explotación de los recursos naturales. Esta preocupación incluye el uso racional y eficiente de la energía. Este tema ha tomado gran relevancia, debido a que los cambios climáticos que está sufriendo el planeta se vuelven más claros día a día. Uno de los mayores consumos de energía se efectúa en el acondicionamiento de ambientes multitudinarios que utilizan techumbres de acero galvanizado como: supermercados, cines, edificios y áreas industriales. Todos estos espacios consumen grandes cantidades de energía eléctrica para mantener una temperatura interior confortable por medio de sistemas de aire acondicionado, debido al calentamiento que resultaría en el interior si estos últimos no se utilizaran. Por otra parte, la república mexicana tiene estados cuya ubicación geográfica les proporciona niveles de radiación solar significativos en comparación con otros países, (Estrada, y otros, 2005). Esto trae como consecuencia que algunos edificios que tienen superficies metálicas expuestas al sol, se calienten y transfieran calor, mediante conducción térmica, al interior del edificio, una alternativa a esta problemática es recubrir las superficies expuestas al sol, con recubrimientos especializados para evitar su calentamiento y reducir la cantidad de calor transferida al interior del edificio.

Existe gran variedad de productos comerciales fabricados para el propósito antes descrito, recubrimientos reflejantes de radiación solar, que se aplican de manera similar a una pintura; su función es, evitar el calentamiento de la superficie por radiación solar. Esto se logra debido a los componentes del recubrimiento, los cuales varían dependiendo de la marca del producto comercial.

Estos materiales están hechos de una combinación de diversos productos químicos como: resinas, disolventes, minerales (cargas), aditivos, pigmentos, todos estos en ciertas proporciones, dependiendo de la aplicación específica.



Cada componente presente en un recubrimiento tiene una función en particular, las resinas son las encargadas de hacer que el material quede adherido a una superficie deseada; comúnmente se utilizan resinas epóxicas, las cargas son las responsables de interactuar con el ambiente al que estará expuesto el recubrimiento, por ejemplo radiación electromagnética y humedad, algunos ejemplos de cargas son, micro-esferas de sílice, polvo de  $TiO_2$  y  $NaCl$ . Los pigmentos dan color a los recubrimientos y los aditivos se usan para dispersar algún componente de manera homogénea o para modificar la viscosidad del material, (Joachim Streitberger, y otros, 1995). Los productos mostrados en la tabla 1, son algunos de los que existen actualmente en el mercado de los recubrimientos reflejantes de radiación solar, los datos mostrados se tomaron de los sitios web de las empresas.

**Tabla 1.** Comparación entre diversos productos existentes en el mercado

<b>NOMBRE EMPRESA</b>	<b>NOMBRE PRODUCTO COMERCIAL</b>	<b>APLICACIÓN</b>	<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>
NASACOAT (NASACOAT)	SUN GLARE	Impermeabilizante real y aislante térmico	Soporta temperaturas de contacto desde -18 °C hasta +80 °C
AISLANTES TÉRMICOS DE COLIMA (Colima)	AISLACOOOL	Disipador de calor y pintura reflectiva	Baja la temperatura de los techos hasta 30 °C sobre láminas y hasta 10 °C sobre lozas de concreto
SUPER - THERM (SuperTherm)	SUPER – THERM	Recubrimiento termo-aislante universal	Bloquea más de un 95% la irradiación de calor, protege de corrosión y deterioro, ignífugo, permite un ahorro de hasta un 70% de energía
NANOTECH (Soluciones)	NANOTHERMIC 1	Aislante térmico Para reflectancia	Opera en temperaturas de hasta 80 °C, no tóxico, ignífugo, resiste la corrosión y proporciona ahorro de energía
NANOTECH (Soluciones)	NANOTHERMIC 4	Aislante térmico para reflectancia y conducción	Opera hasta temperaturas de 100 °C, refleja el 100% de los rayos UV, funciona como disipador de calor, reduce la temperatura interna hasta un 30% y en verano hasta un 50%, reduce el ruido por impacto

Algunos ejemplos de productos existentes en el mercado.



Se supone que los recubrimientos reflejantes de radiación solar traen ahorros significativos de energía eléctrica si se utilizaran para reflejar una cantidad importante de luz, particularmente en las longitudes de onda que mejor se absorben por las superficies irradiadas y que eventualmente se convierten en calor interior. Es en este sentido que el material se estaría comportando como una *barrera térmica*.

Es por esto que en el presente trabajo resulta relevante estudiar y entender los mecanismos de transferencia de calor y las propiedades ópticas en un recubrimiento comercial de la empresa Nanothermic Soluciones. El principal objetivo es estudiar el efecto de los ingredientes del recubrimiento en sus propiedades térmicas y ópticas.

El recubrimiento es un material compósito de matriz polimérica cargado con micro-esferas (filler); éste último presenta gran importancia ya que se ha reportado que tiene propiedades ignífugas y ayuda a reflejar la radiación infrarroja (Dombrovsky, y otros, 2006).

El recubrimiento funciona como barrera térmica mediante la reflexión de la luz solar para que, aplicado sobre la superficie de una techumbre de acero de tipo industrial, reduzca el calentamiento provocado por la exposición prolongada de ésta al sol. Durante la realización de este trabajo se ha supuesto que las propiedades de reflectancia y de transferencia de calor en el recubrimiento, son funciones de las proporciones de dos resinas y dos cargas cerámicas presentes en el mismo, para lo cual se elaboró un diseño de experimentos que consideró 3 variables: cargas cerámicas, espesor del recubrimiento y proporción de resinas, en tres niveles cada una.

En el capítulo 3, materiales y métodos, se muestran las técnicas usadas para medir las diferencias entre las 27 muestras, es en este capítulo donde se muestra el diseño y construcción de un calorímetro que sirvió para determinar las propiedades térmicas del material. En el capítulo 4, análisis y discusión de los resultados, se discuten los datos obtenidos experimentalmente en el calorímetro y los obtenidos con reflectancia difusa. Los resultados se explican mediante un modelo matemático que contempla los fenómenos de calentamiento y enfriamiento del recubrimiento siguiendo las leyes conocidas de transferencia del calor.



# CAPÍTULO

## 2

### Marco Teórico

---

El calor es una forma de energía que afecta la energía interna de los cuerpos. Ésta se manifiesta mediante cambios de temperatura en el cuerpo que se pueden medir con ayuda de termómetros. La expresión que define la variación de la energía interna de un sistema en función de sus cambios de temperatura, es la ecuación 1 (Smith, y otros, 2005).

$$Q = wC_p\Delta T \quad 1$$

Donde (**Q**) es el calor en un sistema, (**w**) es la masa del sistema, (**C<sub>p</sub>**) es la capacidad calorífica y (**ΔT**) es la diferencia de temperatura.

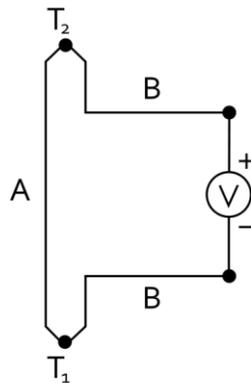
#### 2.1 Termopares

Existen varias formas de medir la temperatura. Uno de los métodos más comunes consiste en usar termopares. El principio del funcionamiento de estos dispositivos es el efecto Seebeck, descubierto por el físico alemán Thomas Johann Seebeck (1770 – 1831). El efecto termoeléctrico es la conversión directa de la diferencia de temperatura a voltaje eléctrico.



Cuando dos conductores eléctricos de diferentes materiales se conectan como se muestra en la figura 1, en el punto de contacto de los conductores se presenta una diferencia de potencial que, convenientemente calibrada, se utiliza para medir temperatura. El voltaje creado es del orden de varios microvoltios por kelvin de diferencia.

Dependiendo de su aplicación, los termopares utilizan distintas combinaciones de materiales. Existen 13 diferentes tipos de termopares, K, V, T, J, E, N, R, S, B, U, W, W<sub>5</sub>, W<sub>3</sub>, que se clasifican de acuerdo a su intervalo de temperatura de operación. En este trabajo se usaron termopares tipo T (Cu-Ni) ya que la temperatura de operación de estos termopares es de -285 a 400 (Des11).



**Figura 1.** Conexión típica de un termopar. A y B representan alambres de distintos materiales. T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub> representan la temperatura en las uniones.

## 2.2 Fenómenos de transferencia de calor

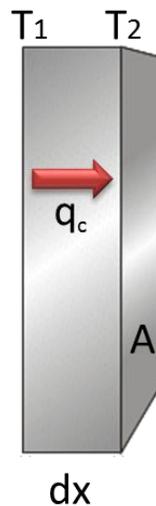
El calor es una forma de energía determinada por la energía interna de los cuerpos. Al variar esta última, se observan cambios en la cantidad de calor. Obedeciendo a la primera ley de la termodinámica, la energía de un cuerpo pasa a otro de menor temperatura dando lugar a los fenómenos físicos conocidos como transporte de calor. Los tres principales mecanismos de transferencia de calor son: conducción, convección y radiación.

### 2.2.1 Transferencia de calor por conducción

La transferencia de calor por conducción se presenta en sólidos, este mecanismo es el responsable de transmitir la energía de un punto a otro mediante vibraciones en las redes cristalinas que conforman los materiales (Theodore L. Bergman, 2011).

La ley que rige este mecanismo de transferencia de calor es la ley de la conducción de Fourier, la cual se enuncia como: *el flujo de calor entre dos puntos que están a diferentes temperaturas es directamente proporcional al gradiente de temperatura multiplicado por la conductividad térmica del material* (Bird, 2006). La Ecuación 1 muestra la ley de la conducción del calor de Fourier en una placa delgada, donde (**A**) es el área de la sección transversal del material, (**k**) es su conductividad térmica y  $\left(\frac{dT}{dx}\right)$  es la variación de la temperatura a lo largo del espesor que está en el eje **x**. El signo menos en el lado derecho de la ecuación indica que el calor fluye de la zona de mayor temperatura a la de menor.

$$q_c = -kA \frac{dT}{dx} \quad 2$$



**Figura 2.** Esquema de transferencia de calor por conducción a través de una placa de área A y espesor dx. En esta figura  $T_1 > T_2$ .



En la Figura 2 se aprecia el sentido del flujo de calor por conducción ( $q_c$ ) a través de una placa de área ( $A$ ), debido a la diferencia de temperaturas ( $T_1 > T_2$ ). En estado estacionario, el flujo de calor es constante.

En la ley de Fourier se desprecian las pérdidas de calor por los lados de la placa, suponiendo que las dimensiones perpendiculares a la dirección del flujo de calor son mucho más pequeñas que las dimensiones características de la sección transversal; es decir, se aplica a placas delgadas de material.

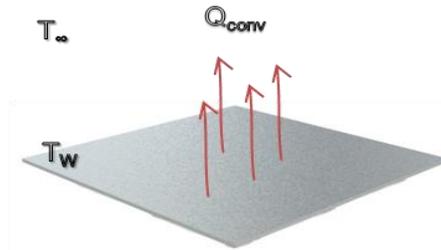
### 2.2.2 Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección está involucrada cuando el calor se transfiere por medio del movimiento de un fluido; por ejemplo, si una placa de acero está @ 100 °C y la dejamos en un cuarto cerrado donde la temperatura es de 20 °C, esta se enfriará en un tiempo  $t_1$ . Sin embargo, si dentro del cuarto colocamos un ventilador, la placa de acero se enfriará más rápidamente en un tiempo  $t_2$ , siendo  $t_2 < t_1$ . La diferencia radica en la cantidad de calor que se remueve de la placa caliente debido al proceso físico conocido como convección.

Existen dos tipos de convección: la denominada libre, dejando la placa de acero enfriar con las corrientes que se forman debido a los cambios en densidad del fluido causados por la temperatura de la placa; y la convección forzada, cuando la corriente de fluido se fuerza por medio de algún dispositivo, como un ventilador.

La ley que gobierna la transferencia de calor por convección es la ley de enfriamiento de Newton. En ésta, el flujo de calor ( $Q_{conv}$ ) removido de una superficie de área  $A$ , que se mantiene a temperatura ( $T_w$ ) es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie y la temperatura ambiente ( $T_\infty$ ), multiplicada por una constante llamada coeficiente convectivo de calor ( $h$ ), (Holman, 2010).

$$Q_{conv} = hA(T_w - T_\infty) \quad 3$$



**Figura 3.** Placa metálica de superficie A, enfriándose por convección. Se observa que el flujo de calor va de la superficie de la placa hacia el ambiente, cuya temperatura es  $T_{\infty}$ .

Para el uso de la ecuación 3 es necesario tener presente que la dificultad radica en conocer  $(h)$ , ya que este parámetro depende de las propiedades del fluido, la temperatura de la superficie, la forma de la misma y si la convección es natural o forzada.

Para estimar el coeficiente convectivo de calor en una placa horizontal cuadrada o rectangular, que está expuesta a convección libre generalmente se utilizan valores tabulados (Corcione, 2007); para algunos casos, es necesario determinar  $(h)$  por medio de un experimento sumamente controlado (Holman, 2010).

### 2.2.3 Transferencia de calor por radiación

Otro fenómeno físico relacionado con la transmisión del calor es la radiación electromagnética. Este fenómeno es el responsable de hacer llegar el calor desde el sol hasta la superficie de la tierra, la ley que rige este modo de transferencia de calor es la ley de Stefan-Boltzman. Este tipo de manifestación de energía se transfiere mediante fotones con cierta frecuencia de oscilación. Al interactuar con la materia, las ondas electromagnéticas pueden producir procesos de dispersión o absorción electromagnética, (Resnick, 2009). El espectro electromagnético se extiende desde la radiación gamma, hasta las ondas de radio.

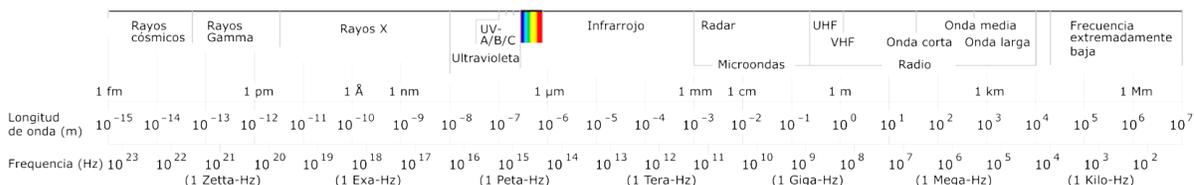


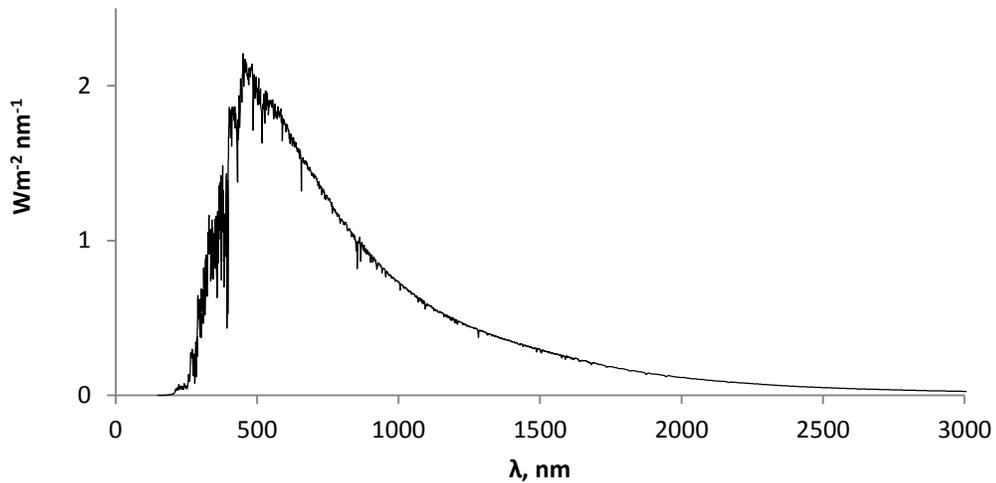
Figura 4. Espectro de radiación electromagnética, consulta en internet (Frank).

Como se puede observar en la Figura 4, a medida que la longitud de onda aumenta la frecuencia disminuye, esto se debe a que la energía por fotón (**E**), está asociada a su frecuencia ( $\nu$ ) y la constante de Planck (**h**), mediante la expresión 4. Es por eso que la energía por fotón es proporcional a su frecuencia (Hecht, 2002). Cuando se habla de la generación de fotones, este proceso está ligado a las interacciones inter-atómicas, es decir a los estados de transición electrónica de un átomo, lo cual significa que si a un átomo le aplicamos suficiente energía tal que logremos excitarlo (hacer que uno de sus electrones pase a un nivel más alto de energía), la diferencia de energía entre los estados iniciales y finales corresponderá a la energía desprendida por el átomo en forma de fotón, proceso que dura alrededor de 10<sup>-8</sup> s (Hecht, 2002).

$$E = h\nu \tag{4}$$

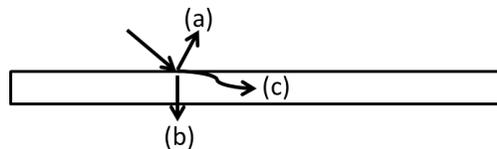
El estudio de la transmisión de energía por radiación se fundamenta en el comportamiento de un objeto idealizado que en física se denomina cuerpo negro. Un cuerpo que es capaz de emitir y absorber todas las longitudes de onda existentes, dependiendo de su temperatura (Holman, 2010). El sol puede considerarse como un cuerpo negro emitiendo energía, a una temperatura efectiva de 5762 K (Manrique, 1984), misma que define la constante solar (**I<sub>cs</sub>**) como el flujo de energía irradiada por el sol, la cantidad de energía por unidad de tiempo por unidad de área. El valor promedio de la constante solar es 1395 W/m<sup>2</sup>, de acuerdo con Holman. Este dato es confirmado por (Gueymard, 2003). La energía que emite el sol se encuentra distribuida en diferentes longitudes de onda, como se muestra en la distribución espectral de la Gráfica 1.

**Gráfica 1.** Irradiación espectral solar, adaptado de (Gueymard, 2003).



Todo cuerpo que está a una temperatura diferente de 0 K, emite radiación electromagnética. Un cuerpo negro emite un espectro continuo de longitudes de onda y de acuerdo a la ley del desplazamiento de Wien, el pico de la máxima longitud de onda de emisión estará en función de su temperatura (Holman, 2010). Para el caso del sol, debido a su temperatura superficial, presenta su pico de emisión más alto en los 475 nm (Gueymard, 2003). Parte de la radiación que proviene del sol interactúa con la atmósfera terrestre y producto de esta interacción es que la radiación ultravioleta (UV) llega pobremente a la superficie de la tierra ya que parte de los rayos UV son absorbidos por el ozono (Badarinath, y otros, 2007).

La radiación electromagnética y la materia pueden interactuar de manera que ciertas longitudes de onda pueden ser transmitidas, absorbidas, reflejadas o una mezcla de esas, por ejemplo, el vidrio es prácticamente transparente al espectro visible, absorbe en el UV y es opaco al infrarrojo lejano (González Velasco, 2009) por ello cuando se habla de interacción radiación-materia se puede hablar de transmitancia, absorbancia y reflectancia, siendo estas las propiedades ópticas de interés para el presente trabajo.

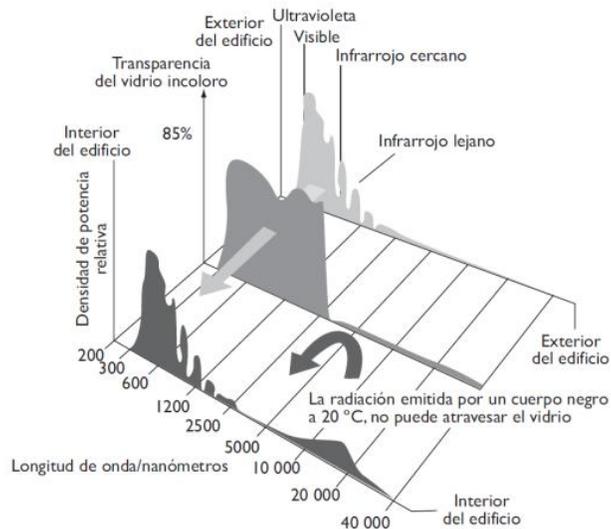


**Figura 5.** Esquema de la interacción de la luz con la materia: (a) reflexión (b), transmisión y (c) absorción.

### 2.2.3.1 Transmitancia, absorbancia y reflectancia

La transmitancia ( $\tau$ ), es un fenómeno físico que se define como la razón entre la energía incidente de una fuente de luz y la energía que pasa a través de un material (Hecht, 2002). Esta propiedad depende de las propiedades físicas de la materia con la que interactúa la luz; por ejemplo, un vidrio con alto contenido en óxido de hierro es más opaco a las longitudes de onda comprendidas entre 1 y 2  $\mu\text{m}$ , sin embargo un vidrio con bajo contenido en óxido de hierro es prácticamente transparente a las mismas longitudes de onda (Duffie, 1980).

En la Figura 6 se observan las longitudes de onda para las que es transparente el vidrio común.

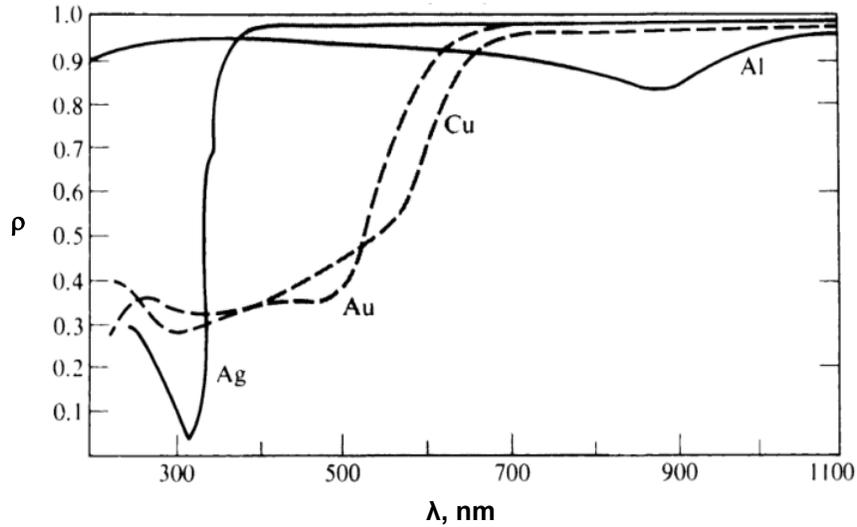


**Figura 6.** Transmitancia espectral del vidrio común, tomada de (González Velasco, 2009).

La reflectancia es la propiedad de los materiales que define las longitudes de onda e intensidades de las mismas con las que son reflejadas de una superficie de área unitaria por unidad de tiempo, se representa por la letra ( $\rho$ ).

Un ejemplo de la reflectancia que presentan los materiales se puede presentar en los espejos, ya que si deseamos fabricar uno que refleje el visible, necesitamos un material que tenga alta reflectancia en el intervalo de interés, por ejemplo la plata (Hecht, 2002), así que una superficie pulida de plata funciona como un espejo para el espectro visible Gráfica 2.

**Gráfica 2.** Reflectancia frente a longitud de onda para la plata (Ag), oro (Au), cobre (Cu) y aluminio (Al). (Hecht, 2002).



Por otra parte, la absorbancia está definida como la fracción de la energía incidente en una unidad de área y unidad de tiempo que es absorbida por algún material, generalmente se representa por ( $\alpha$ ). Cabe mencionar que todos los materiales existentes absorben algún tipo de radiación electromagnética y mediante técnicas de espectroscopia se pueden conocer dichas longitudes de onda.

Los materiales pueden exhibir una, dos o tres de las propiedades ya mencionadas, transmitancia, reflectancia y/o absorbancia, cada una de estas se relaciona por la expresión 5.

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \quad 5$$

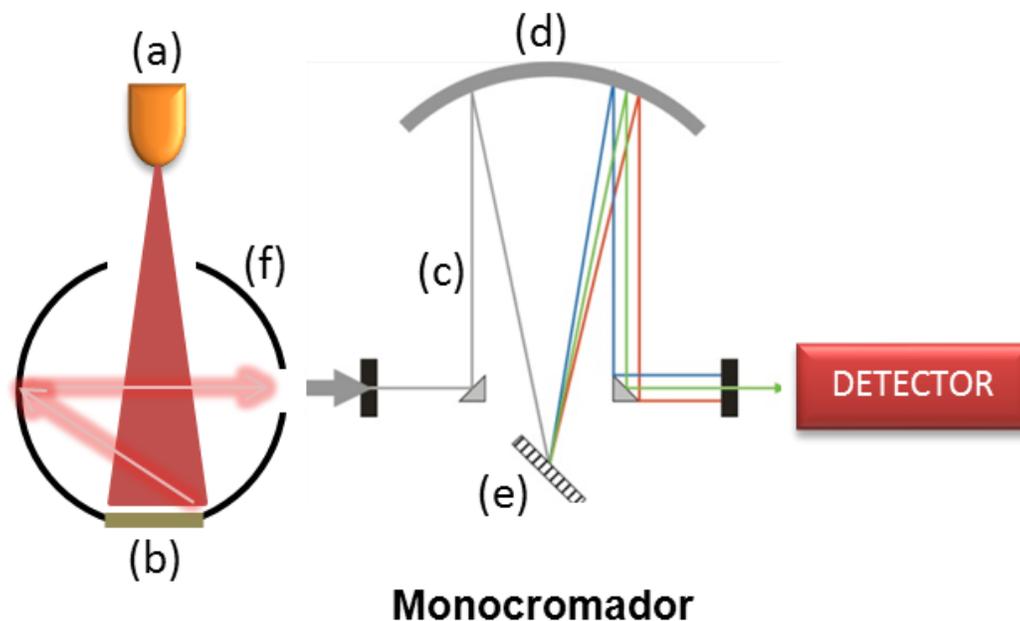
Así que definiendo dos de tres propiedades, podemos deducir la tercera, aunque la mayoría de los materiales en ingeniería no presentan transmitancia (Holman, 2010).

## 2.3 Espectrofotómetro

El espectrofotómetro es uno de los equipos más empleados para el estudio de la interacción radiación-materia. Las técnicas de medición espectrofotométricas se clasifican de acuerdo con las longitudes de onda que interactúan con la materia, como es el caso de la espectroscopia UV-Visible, espectroscopia de infrarrojo y espectroscopia Raman (Skoog A., y otros, 2005). Los espectrofotómetros se componen de tres partes principales, una fuente de luz, un monocromador y un detector. Una de las técnicas de interés para este trabajo es la medición de reflectancia difusa.

En la Figura 7 se observan los principales componentes en un espectrofotómetro, la fuente de luz puede variar, dependiendo del análisis que se desee efectuar. Existen diferentes tipos de fuentes de luz como lámparas de arco de Xenon, de  $H_2$  y  $D_2$ , tungsteno, halógeno y Nernst, que son las más comunes (Skoog A., y otros, 2005).

La esfera integradora se utiliza para realizar mediciones de reflectancia difusa, este aditamento se encarga de recoger la luz reflejada por la muestra para después enviarla al monocromador. En el monocromador se descompone el espectro de luz proveniente de la interacción de la muestra y la luz de la fuente emisora, y se selecciona la longitud o intervalo de longitudes de onda provenientes de la muestra (Skoog A., y otros, 2005).



**Figura 7.** Configuración espacial de los principales componentes de un espectrofotómetro para mediciones de reflectancia difusa. (a) Fuente de luz, (b) muestra, (c) prisma, (d) espejo, (e) rejilla de difracción, (f) esfera de integración.



## 2.4 Modelo termodinámico de la transferencia de calor en una placa horizontal iluminada con una fuente de calor por radiación

De acuerdo a los conceptos teóricos ya descritos, en este apartado se muestra su aplicación al desarrollo de una expresión matemática que describa la evolución de la temperatura en función del tiempo cuando una placa delgada se calienta por radiación y se enfría por convección. Para realizar este modelo se resolvió el siguiente balance de energía, donde el sistema se refiere a una placa delgada de sección transversal (**A**) y absorbancia ( **$\alpha$** ), expuesta a una fuente de luz con irradiancia (**I**).

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{ENERGÍA} \\ \text{ABSORBIDA POR} \\ \text{RADIACIÓN EN} \\ \text{EL SISTEMA} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{ENERGÍA PERDIDA} \\ \text{POR CONVECCIÓN EN} \\ \text{EL SISTEMA} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{CAMBIOS EN LA ENERGÍA} \\ \text{INTERNA DEL SISTEMA} \end{array} \right\}$$

Representada por la ecuación:

$$\{A\alpha I\} - \{hA(T_w(t) - T_\infty)\} = wc \frac{dT}{dt} \quad 6$$

Donde (**A**) es área del recubrimiento, ( **$\alpha$** ) es la absorbancia, (**I**) es la irradianción de la fuente emisora, (**h**) es el coeficiente convectivo de calor, ( **$T_w$** ) es la temperatura superficial del recubrimiento, ( **$T_\infty$** ) es la temperatura ambiente, (**w**) es la masa del recubrimiento, (**c**) es la capacidad calorífica del recubrimiento, (**t**) es el tiempo y ( $\frac{dT}{dt}$ ) es la variación de la temperatura del recubrimiento respecto al tiempo.

Factorizando la ecuación 6 se obtiene:

$$\frac{A\alpha I}{wc} - \frac{hA}{wc} T_w(t) + \frac{hA}{wc} T_\infty = \frac{dT}{dt} \quad 7$$



En la ecuación anterior suponemos que  $(h)$  permanece constante durante el proceso de calentamiento, así como también se supone constante el área del sistema, su capacidad calorífica, la absorbanza y la irradiación de la fuente. Codificando las constantes que se forman en la ecuación 7, obtenemos la ecuación 8.

$$\frac{dT}{dt} + DT_w(t) = B \quad 8$$

Dónde las constantes  $D$  y  $B$  están definidas por:

$$D = \frac{hA}{\rho Vc} \quad 9$$

$$B = \frac{hA}{\rho Vc} T_{\infty} + \frac{A\alpha I}{\rho Vc} \quad 10$$

La expresión anterior es una ecuación diferencial ordinaria de primer orden no homogénea con coeficientes constantes; por lo tanto la parte homogénea es.

$$\frac{dT}{dt} + DT_w(t) = 0 \quad 11$$

Para resolver la ecuación 11, se supone una solución de tipo exponencial y se obtiene la ecuación 12.

$$T_c(t) = C_1 e^{-Dt} \quad 12$$

Después se resuelve la parte no homogénea de la ecuación 8, dando como resultado

$$T_p(t) = \frac{B}{D} \quad 13$$

Por lo tanto, la solución general es

$$T_w(t) = C_1 e^{-Dt} + \frac{B}{D} \quad 14$$

Ahora encontramos el valor de  $C_1$  de la ecuación 14, para ello ocupamos la siguiente condición inicial,  $T_w(0) = T_0$ , donde  $T_0$  es la temperatura inicial del recubrimiento.

$$T_w(0) = C_1 + \frac{B}{D} = T_0 \quad 15$$

Simplificando 15 obtenemos

$$C_1 = T_0 - \frac{B}{D} \quad 16$$

Por lo tanto la solución a la ecuación 7 es

$$T_w(t) = \left[ T_0 - \frac{B}{D} \right] e^{-Dt} + \frac{B}{D} \quad 17$$

La Gráfica 3 es la representación de la ecuación 17, para construirla se usaron los valores que se indican en la Tabla 2. Como puede verse en esta gráfica, la temperatura de equilibrio ocurre para tiempos largos, i.e.  $\lim_{t \rightarrow \infty} T_w(t)$ . La temperatura de equilibrio queda determinada por la razón  $B/D$ , que involucra la irradiancia de la fuente ( $I$ ), la constante de enfriamiento ( $h$ ) y la temperatura ambiente ( $T_\infty$ ).

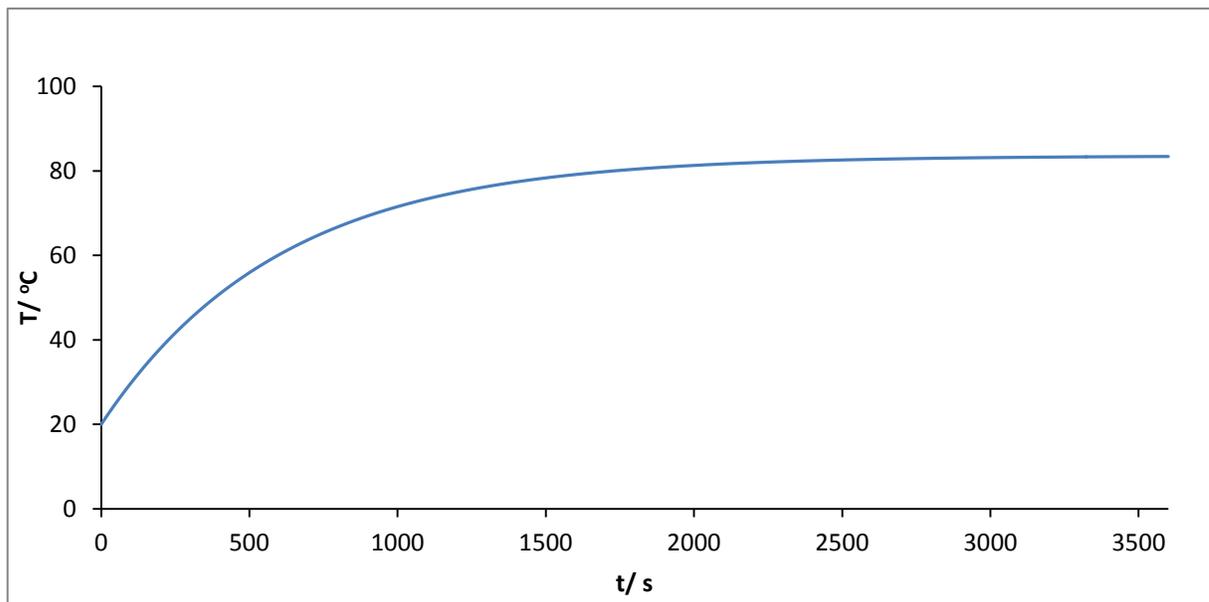
Al tiempo  $t = 0$ , la temperatura corresponde a la temperatura ambiente a la que comienza la medición, i.e.  $T_w(0) = T_0$ .



**Tabla 2.** Valores usados para representar  $T_w(t)$ .

<b>COEFICIENTE CONVECTIVO DE CALOR</b>	$h$	35	$J/^{\circ}C\ m^2\ s$
<b>VOLUMEN MATERIAL</b>	$V$	0.00016	$m^3$
<b>DENSIDAD MATERIAL</b>	$\rho$	7700	$kg/m^3$
<b>ÁREA DE CONTACTO DEL MATERIAL</b>	$A$	0.023	$m^2$
<b>TEMPERATURA AMBIENTE</b>	$T_{\alpha}$	40	$^{\circ}C$
<b>CAPACIDAD CALORÍFICA DEL MATERIAL</b>	$c$	460	$J/kg^{\circ}C$
<b>IRRADIANCIA</b>	$I$	1000	$J/m^2^{\circ}C$
<b>TEMPERATURA INICIAL</b>	$T_0$	23	$^{\circ}C$
<b>ABSORBANCIA</b>	$\alpha$	0.9	

**Gráfica 3.** Representación gráfica de la función  $T_w(t)$ .



## CAPÍTULO

# 3

## **Materiales y Métodos**

---

Siguiendo la hipótesis de trabajo planteada se exploró el efecto causado por la variación en la concentración de dos de las principales cargas cerámicas y dos de las resinas que lo componen, en las propiedades térmicas y ópticas del recubrimiento. Por lo tanto se elaboró un diseño de experimentos con tres factores: cargas, resinas y espesor. A cada uno de éstos se asignaron tres diferentes niveles: bajo, medio y alto. De acuerdo con este diseño de experimentos, se fabricaron nueve formulaciones que se aplicaron sobre placas de acero ASTM A-36 de 15x15 cm<sup>2</sup>, con tres espesores distintos.

En lo sucesivo, se denominará recubrimiento a la formulación aplicada sobre las placas de acero. Lo anterior dio un total de 27 placas recubiertas – muestras experimentales. Las mediciones térmicas se realizaron en un calorímetro construido exprofeso para realizar la comparación de desempeño entre las 27 muestras, en condiciones controladas. La fuente de calor por radiación fue una lámpara de tungsteno-halógeno. Suponiendo que en las mismas condiciones termodinámicas las diferencias en desempeño deben estar determinadas por las propiedades ópticas del recubrimiento, también se llevaron a cabo mediciones de espectrofotometría por luz difusa.

### **3.1 Diseño de experimentos**

El diseño de experimentos se realizó con un diseño 3<sup>3</sup> factorial en el cual el primer factor es la relación gravimétrica entre el cerámico (C) y las microesferas (Filler), de la siguiente manera: C + Filler = constante, variando C en  $\pm 25\%$ . El segundo factor relaciona gravimétricamente la resina tipo 1 (Rsel) y la resina tipo 2 (Rep), de manera similar a la anterior: Rsel + Rep = constante, variando Rsel en  $\pm 25\%$ .



Finalmente, el tercer factor es el espesor del recubrimiento. El resultado de este diseño de experimentos fueron 9 formulaciones, cada una con 3 diferentes espesores, dando un total de 27 muestras, como se muestra en la Tabla 3. Las cantidades que se muestran equivalen a la preparación de  $\frac{1}{4}$  L de formulación; así mismo, en la tabla se muestra la formulación original de la empresa Nanothermic Soluciones codificada ( $C_2R_2$ ), con respecto a la cual se hacen las variaciones; por ejemplo,  $C_1$  representa el nivel bajo de filler y alto del cerámico,  $R_1$  representa el nivel bajo de Rep y alto de Rsel.

**Tabla 3.** Nombre de las formulaciones y sus proporciones de cargas y resinas del diseño de experimentos.

NOMBRE	CARGAS	RESINAS	ESPESOR
$C_1R_1-E1$	-1	-1	-1
$C_1R_1-E2$	-1	-1	0
$C_1R_1-E3$	-1	-1	1
$C_1R_2-E1$	-1	0	-1
$C_1R_2-E2$	-1	0	0
$C_1R_2-E3$	-1	0	1
$C_1R_3-E1$	-1	1	-1
$C_1R_3-E2$	-1	1	0
$C_1R_3-E3$	-1	1	1
$C_2R_1-E1$	0	-1	-1
$C_2R_1-E2$	0	-1	0
$C_2R_1-E3$	0	-1	1
$C_2R_2-E1$	0	0	-1
$C_2R_2-E2$	0	0	0
$C_2R_2-E3$	0	0	1
$C_2R_3-E1$	0	1	-1
$C_2R_3-E2$	0	1	0
$C_2R_3-E3$	0	1	1
$C_3R_1-E1$	1	-1	-1
$C_3R_1-E2$	1	-1	0
$C_3R_1-E3$	1	-1	1
$C_3R_2-E1$	1	0	-1
$C_3R_2-E2$	1	0	0
$C_3R_2-E3$	1	0	1
$C_3R_3-E1$	1	1	-1
$C_3R_3-E2$	1	1	0
$C_3R_3-E3$	1	1	1

Los espesores siguen el siguiente orden,  $E1 < E2 < E3$ .



### 3.2 Preparación de las muestras

Las formulaciones resultantes del diseño de experimentos se fabricaron en el laboratorio de Química de CICATA-Qro. El equipo usado fue un mezclador con capacidad de hasta 2 L/lote, los materiales para la preparación de la formulación fueron proporcionados por la empresa Nanothermic Soluciones y son propiedad de ésta. Todas las formulaciones preparadas se almacenaron en recipientes de plástico translucido, con tapa, que se colocaron en un anaquel aislado de la luz. A continuación se describe el proceso de preparación de las formulaciones.

- a) Se pesaron las cantidades necesarias para preparar cada una de las 9 formulaciones con una balanza granataria, con resolución de 1 g. Los ingredientes pesados se almacenaron en recipientes de plástico y se etiquetaron para ser mezclados según el proceso propiedad de Nanothermic Soluciones.



**Figura 8.** Ingredientes pesados y almacenados

- b) Se procedió a iniciar la preparación de la formulación mezclando el filler, resinas, alúmina, entre otros aditivos y cargas.



**Figura 9.** Mezclador

- c) Posteriormente se fueron agregando los demás ingredientes de la formulación, uno por uno, después de un lapso de tiempo preestablecido, para una correcta homogenización de los ingredientes.



**Figura 10.** Mezcla del resto de los ingredientes

- d) Por último, al terminar de agregar todos los ingredientes se mezclaron por un tiempo preestablecido, para, finalmente, vaciar la formulación en un recipiente cerrado. Las formulaciones se almacenaron protegiéndoles de la luz.



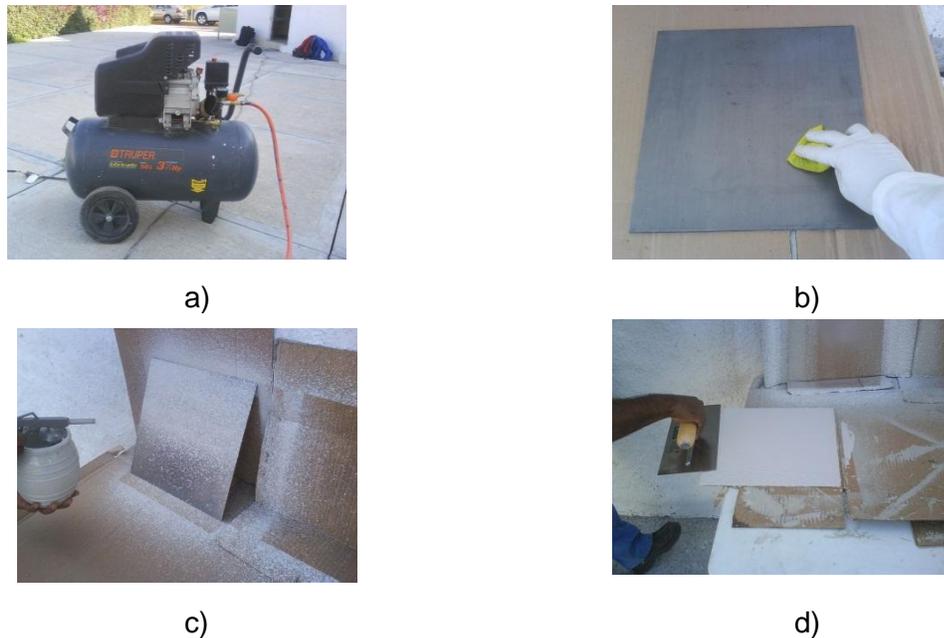
**Figura 11.** Almacenado de las 9 formulaciones

Las formulaciones se almacenaron por 15 días hasta su aplicación sobre las placas de acero ASTM A-36.

### 3.3 Aplicación de formulaciones sobre placas de acero ASTM A-36

La aplicación de las formulaciones se llevó a cabo con un equipo Karcher, conectada a una pistola de gravedad HVLP a la cual se le adaptó un aspersor de 25 cm de longitud; las placas de acero se limpiaron aplicando etanol a la superficie con una franela limpia, posteriormente se dejó secar al sol para eliminar los residuos del etanol, antes de aplicar la formulación.

La formulación se aplicó con la salida del aspersor a 15 cm de la placa de acero, esto con el fin de cubrir el área total de la placa. Al final de la aplicación de la formulación sobre el acero se deslizó una placa metálica sobre la superficie fresca para obtener un acabado homogéneo, como se muestra en las imágenes de la Figura 12-d.



**Figura 12.** Método de aplicación de formulaciones sobre placas de acero ASTM A-36. a) Equipo Karcher. b) Método de limpieza de la superficie metálica. c) Aplicación de la formulación a la placa, la salida del aspersor está a 15 cm de la misma. d) Acabado superficial de la formulación sobre la placa de acero.

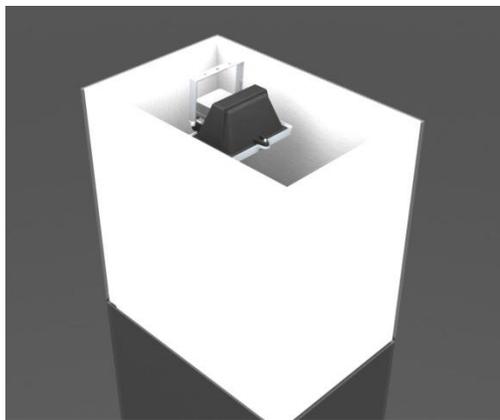
Cada una de las 9 formulaciones se aplicó en 3 diferentes espesores sobre placas de acero ASTM A-36, dando en total 27 placas recubiertas, este proceso de aplicación lo llevó a cabo personal dedicado a la aplicación de recubrimientos ya que se requería de cierta experiencia y equipo para poder aplicar este tipo de material.

### 3.4 Diseño y construcción del calorímetro

Como se explicó en la introducción, el objetivo principal del presente trabajo fue comparar entre sí el desempeño de las 27 muestras del diseño de experimentos como barrera térmica de radiación solar. Para ello se diseñó un calorímetro de convección. El objetivo principal de este equipo fue poder seguir la evolución de la temperatura en la parte inferior de la muestra al ser irradiada normalmente a la placa recubierta con una fuente de luz artificial, espectralmente parecida al que llega del sol a la superficie de la tierra, así que se eligió una lámpara de halógeno con una resistencia de tungsteno. Éste tipo de lámparas se comportan como un cuerpo negro (Davidson).

Para efectos de este proyecto se usó una lámpara marca Philips de 100 W, esta lámpara tenía una temperatura de filamento aproximada de 2800 K (Davidson). Una vez elegido el tipo de fuente de luz, se decidió que el calorímetro debería tener cuatro paredes que evitaran corrientes de convección forzada durante las mediciones. Éstas debían resistir la radiación proveniente de la fuente de iluminación, por ello se decidió usar poliestireno expandido.

La lámpara usada en el calorímetro ilumina pobremente después de los 2500 nm y antes de los 500 nm, así que el uso de poliestireno expandido no deberá interferir con absorción significativa de luz proveniente de la lámpara en el intervalo mencionado. En la Figura 13-a se puede apreciar el diseño conceptual del calorímetro, elaborado en Solid Works 2010, mientras que en la Figura 13-b se muestra el calorímetro construido.



(a)



(b)

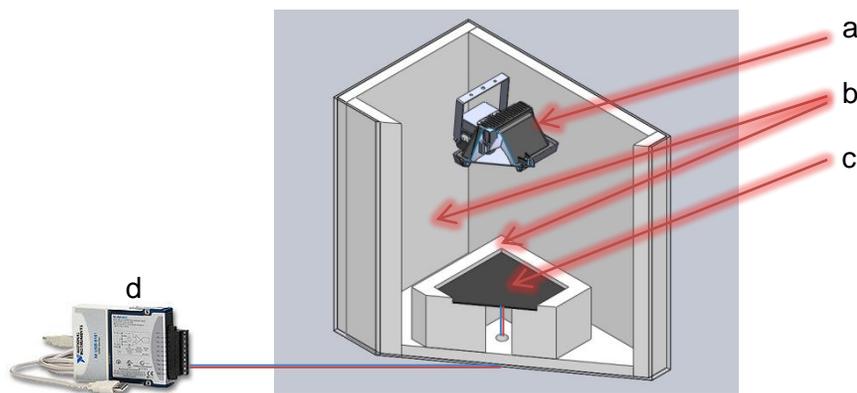
**Figura 13.** (a) Diseño del calorímetro en Solid Works 2010, (b) Calorímetro construido

### 3.5 Mediciones de temperatura en las muestras

Las mediciones de temperatura se llevaron a cabo con un sistema de adquisición de datos de National Instruments modelo NI9211, con conexión USB. Las señales del NI9211 se interpretaron con el software LabVIEW Signal Express 2010, utilizando termopares tipo T. El procedimiento para tomar las mediciones de temperatura fue el siguiente:

- 1) Se colocaron las muestras dentro del calorímetro con la parte recubierta hacia arriba. La lámpara se colocó a una distancia de 30 cm de la muestra, centrado sobre la misma.
- 2) El termopar se colocó en el centro de la parte inferior de la muestra, sin recubrimiento, para medir la temperatura como función del tiempo, sin que le afecte la radiación directa de la fuente de luz.
- 3) El software LabVIEW Signal Express 2010 se programó para que muestreara la temperatura cada 10 segundos.
- 4) El tiempo total de muestreo fue de 4000 s ya que se observó que a partir de 3500 s la temperatura variaba en menos de 0.4 °C.

Al final se realizaron triplicados de 4 muestras escogidas aleatoriamente para comprobar la repetitividad de los datos.



**Figura 14.** Partes del calorímetro.

- (a) Lámpara de Tungsteno-Halógeno marca Phillips, (b) poliestireno expandido, (c) Placa de acero ASTM A-36 recubierto con alguna formulación, (d) sistema de adquisición de datos modelo NI9211.



## CAPÍTULO

# 4

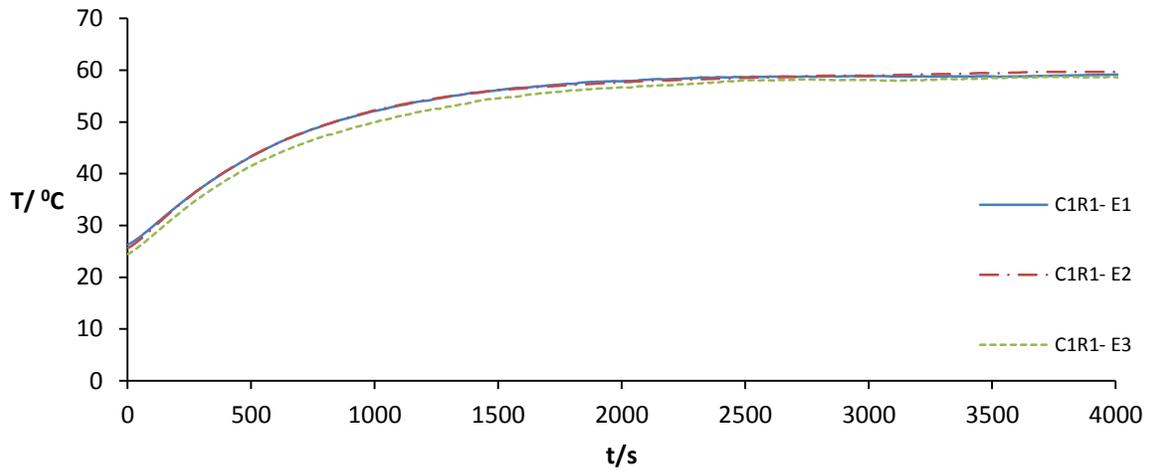
## Análisis y discusión de resultados

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos al someter las muestras a la fuente de radiación de una lámpara de tungsteno-halógeno, midiendo el incremento de temperatura como función del tiempo hasta alcanzar el equilibrio térmico. También se presenta el análisis estadístico de los resultados experimentales, los cuales se complementan con mediciones de reflectancia difusa.

### 4.1 Resultados del calorímetro

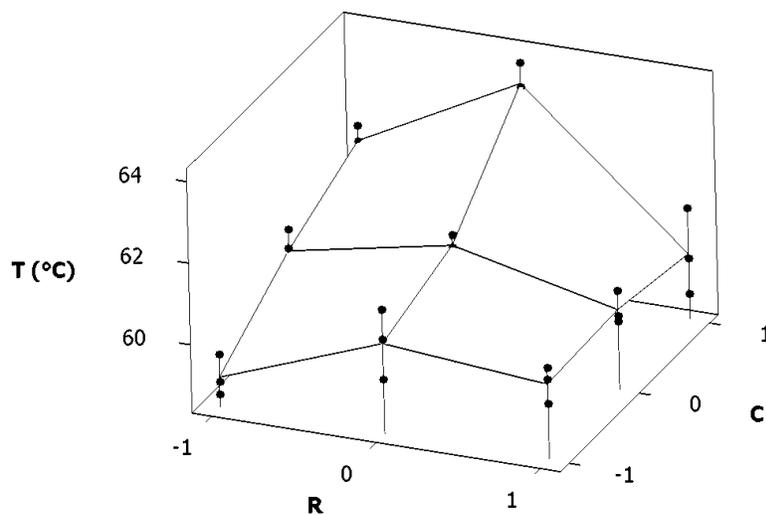
En la Gráfica 4 se muestra, a manera de ejemplo el comportamiento típico de la temperatura como función del tiempo de la muestra experimental  $C_1R_1$ . En ésta se puede apreciar que las temperaturas de equilibrio alcanzadas a los 4000 s, son prácticamente iguales en los tres diferentes espesores.

**Gráfica 4.** Comparación de la muestra C<sub>1</sub>R<sub>1</sub> en sus 3 diferentes espesores.



En la Gráfica 5 se muestran las temperaturas de equilibrio alcanzadas por cada una de las 27 muestras

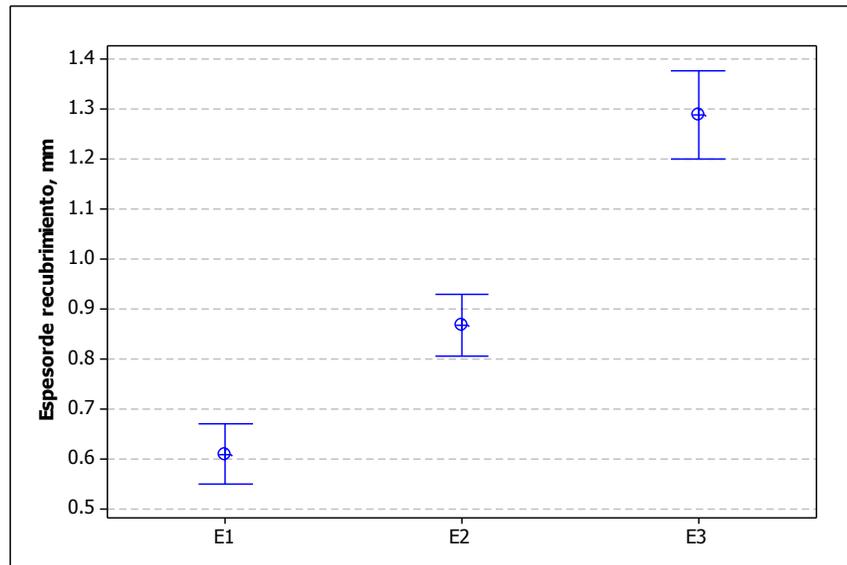
**Gráfica 5.** Representación gráfica de las temperaturas de equilibrio del diseño de experimentos, en función de las cargas (C), resinas (R) y para cada uno de los tres diferentes espesores.





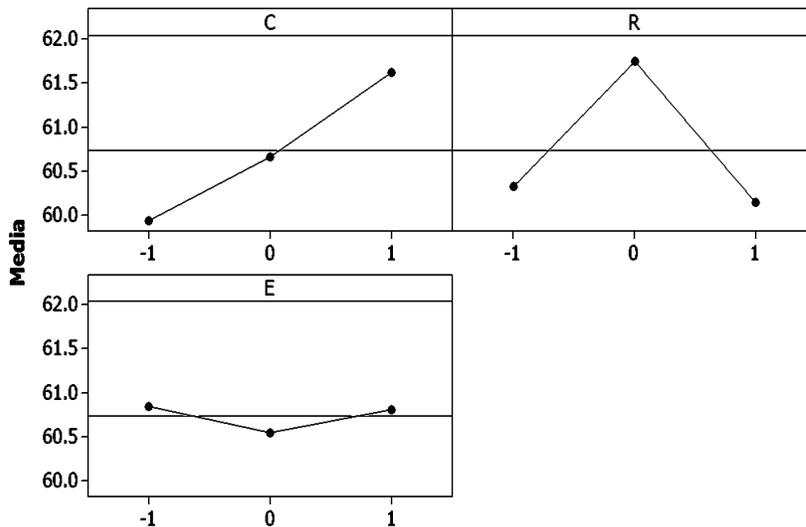
Los resultados de las mediciones de los espesores se muestran en la Gráfica 6. Se tomaron diez mediciones de cada muestra con un tornillo micrométrico, nueve muestras con espesor E1, nueve con espesor E2 y nueve con espesor E3, en total para cada espesor se tomaron 90 mediciones. Con estos resultados se construyó un intervalo de confianza del 95% para E1, E2 y E3.

**Gráfica 6.** Gráfica de intervalos de los 3 diferentes espesores aplicados en las muestras



En la Gráfica 7 se presentan los efectos principales de C, R y E, en ella se observa que la temperatura de equilibrio tiene un comportamiento monótono creciente con el nivel de la carga. Al variar la resina se presenta un máximo en el nivel 0, los niveles en -1 y 1 favorecen una disminución en la temperatura de equilibrio. No se observa un efecto significativo en los niveles del efecto del espesor.

**Gráfica 7.** Efectos principales sobre la temperatura de equilibrio.



La Tabla 4 resume en análisis de varianza (ANOVA) de los resultados experimentales; se presentan las sumas de cuadrados donde se aprecia que los efectos de (**E**), son prácticamente despreciables (1%) en comparación con los efectos de (**C**) y (**R**).

**Tabla 4.** ANOVA de los resultados experimentales obtenidos del calorímetro.

Fuente	GL	SC	Contribución porcentual
C	2	12.8963	30%
R	2	13.9781	32%
E	2	0.4709	1%
C*R	4	9.9316	23%
C*E	4	1.1463	3%
R*E	4	0.6656	2%
C*R*E	8	4.0098	9%

Donde C son las cargas, R las resinas, E es el espesor, GL son los grados de libertad.



Ya que se ha verificado que el espesor no impacta significativamente en la temperatura de equilibrio, se muestra un segundo análisis ANOVA, en donde se desprecia el efecto del espesor, y solo se incluye el efecto de C, R y su interacción, Tabla 5.

**Tabla 5.** ANOVA para la temperatura de equilibrio, despreciando el efecto del espesor.

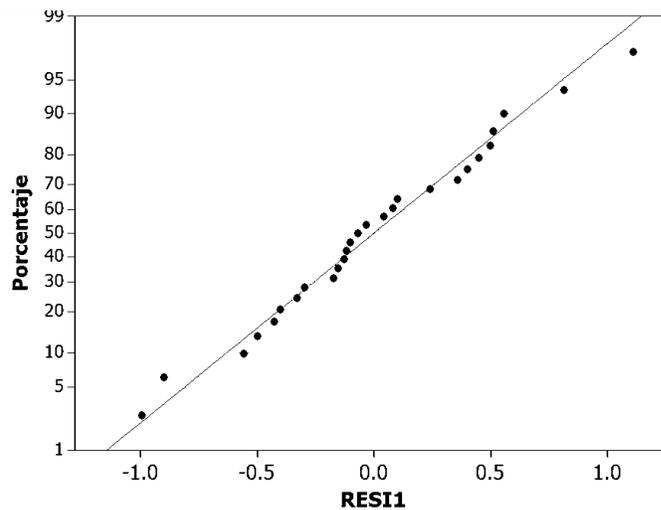
Fuente	GL	SC	MC	F	P
C	2	12.8963	6.4481	18.45	0.000
R	2	13.9781	6.9891	19.99	0.000
C*R	4	9.9316	2.4829	7.1	0.001
Error	18	6.2925	0.3496		
Total	26	43.0984			

$$S = 0.591256 \quad R\text{-cuad.} = 85.40\% \quad R\text{-cuad.}(\text{ajustado}) = 78.91\%$$

De acuerdo a la tabla anterior, se observa que C, R y su interacción influyen de manera significativa en la temperatura de equilibrio y estos tres términos explican el 85% de la variabilidad de los resultados.

En la Gráfica 8 se muestra la prueba de normalidad realizada a los resultados experimentales, en ella se grafica la diferencia entre la temperatura de equilibrio experimental y la temperatura esperada del modelo, en esta gráfica se observa que los resultados cumplen con la prueba de normalidad, con un valor  $P = 0.88$ .

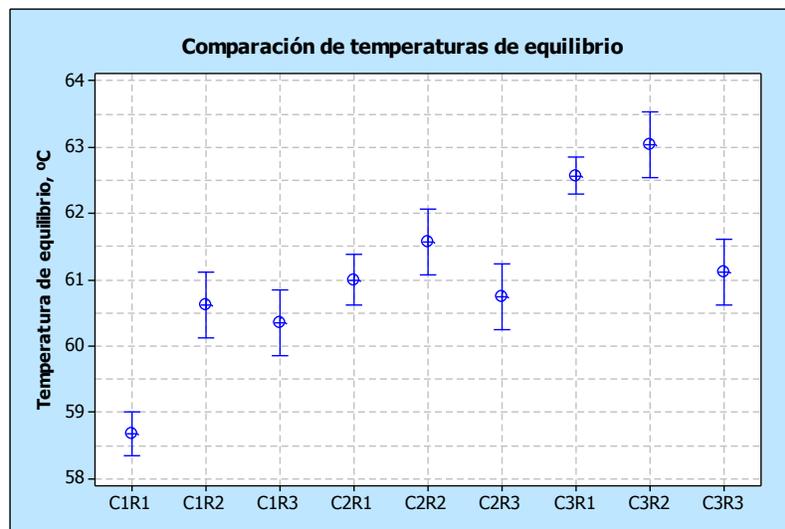
**Gráfica 8.** Grafica de la prueba de normalidad de los residuales.



De acuerdo a los resultados del análisis de varianza, se obtiene que el espesor no es un factor significativo en la temperatura de equilibrio de cada muestra, por lo que a continuación se analizan de manera gráfica los resultados correspondientes al espesor E2.

En la Gráfica 9 se presentan las temperaturas de equilibrio de las 9 diferentes formulaciones.

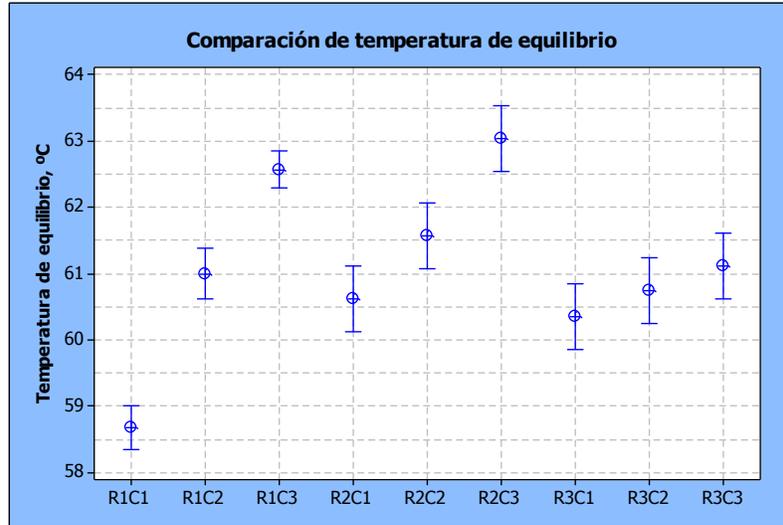
**Gráfica 9.** Temperaturas de equilibrio de las 9 muestras diferentes en función de la proporción de resinas.



En esta gráfica cada muestra presenta un intervalo de confianza del 95%.

En la Gráfica 9 se muestran los datos de manera tal que se aprecian 3 diferentes grupos, el primer grupo corresponde a las muestras  $C_1R_1$ ,  $C_1R_2$ ,  $C_1R_3$ , que significa que la proporción de cargas cerámicas se mantiene constante y solo varía la proporción de resina, este criterio se aplicó a los otros dos grupos presentes en dicha gráfica, se realizó de este modo para ver la variación de la temperatura de equilibrio alcanzada en cada muestra en función de la proporción de resinas, en la Gráfica 9 no se observa un comportamiento en particular al variar la proporción de resina, pero se aprecia que las formulaciones que tienen 25 % más de filler y 25 % menos de Cerámico, o sea el grupo  $C_3$ , presentan mayores temperaturas de equilibrio en comparación con el grupo  $C_1$ . Ahora corresponde ver si existe alguna tendencia en la temperatura de equilibrio alcanzada en cada muestra en función de la variación de las cargas cerámicas, para ello se muestra la Gráfica 10.

**Gráfica 10.** Gráfica de temperatura de equilibrio en función de la proporción de cargas cerámicas.

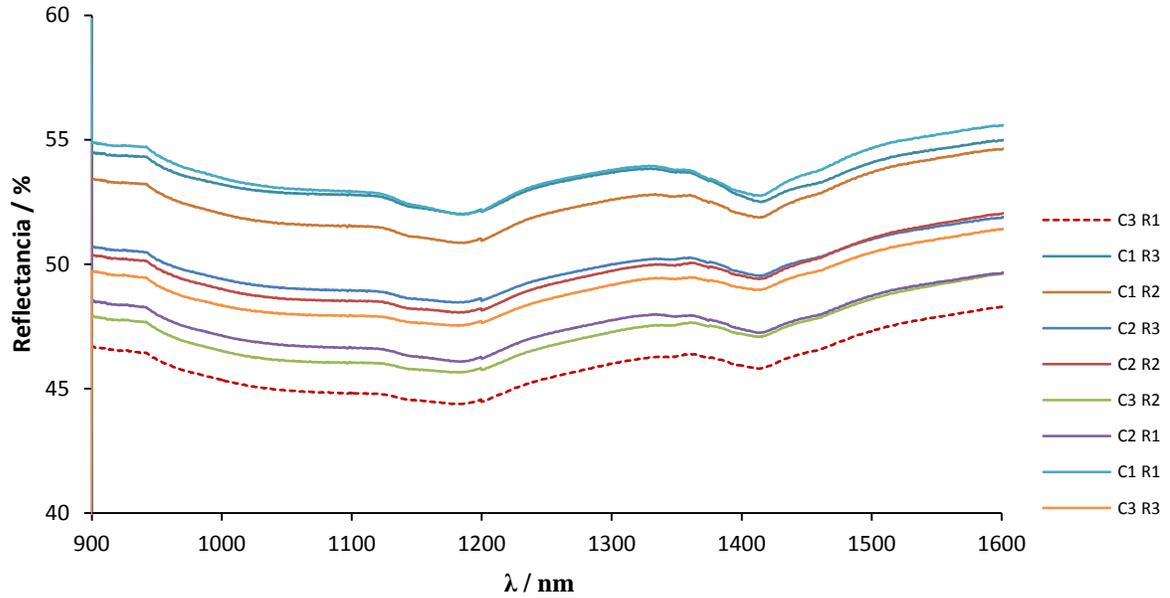
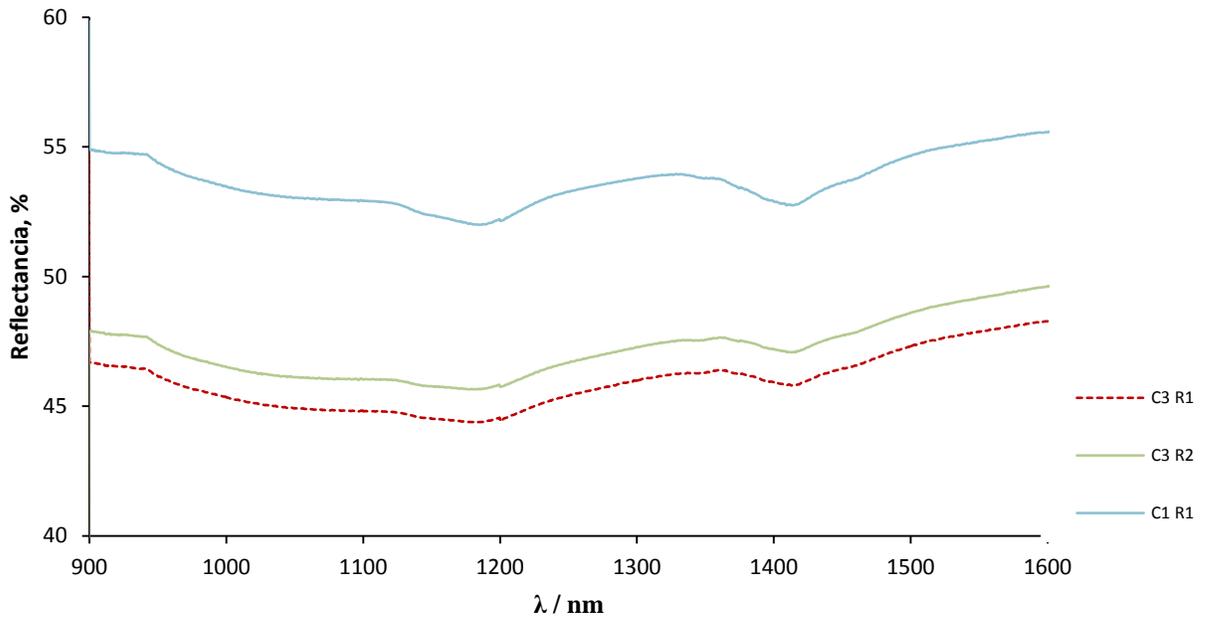


En esta gráfica cada muestra presenta un intervalo de confianza del 95%.

En la Gráfica 10 se observa que en los casos donde las resinas tipo  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  se mantuvieron constantes y solamente se hizo variar las proporciones de las cargas cerámicas, la temperatura de equilibrio de las muestras presentó una tendencia a subir, también se observa una diferencia de aproximadamente  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre la muestra  $R_2C_3$  y  $R_1C_1$ , la cual se explica por el contenido de filler en cada muestra, esto significa que a medida que aumentamos la concentración de filler en la formulación, ésta presentará más esferas en su superficie y por lo tanto presenta transparencia a las longitudes de onda a las cuales el vidrio lo permite, estas longitudes de onda se aprecian en la Figura 6.

## 4.2 Resultados de las mediciones de reflectancia difusa

Para complementar los resultados del calorímetro se realizó una medición de reflectancia difusa que se muestra en la Gráfica 11. Posteriormente se hace una comparación entre la muestra que tiene la mayor reflectancia difusa y las que presentan menor reflectancia difusa.

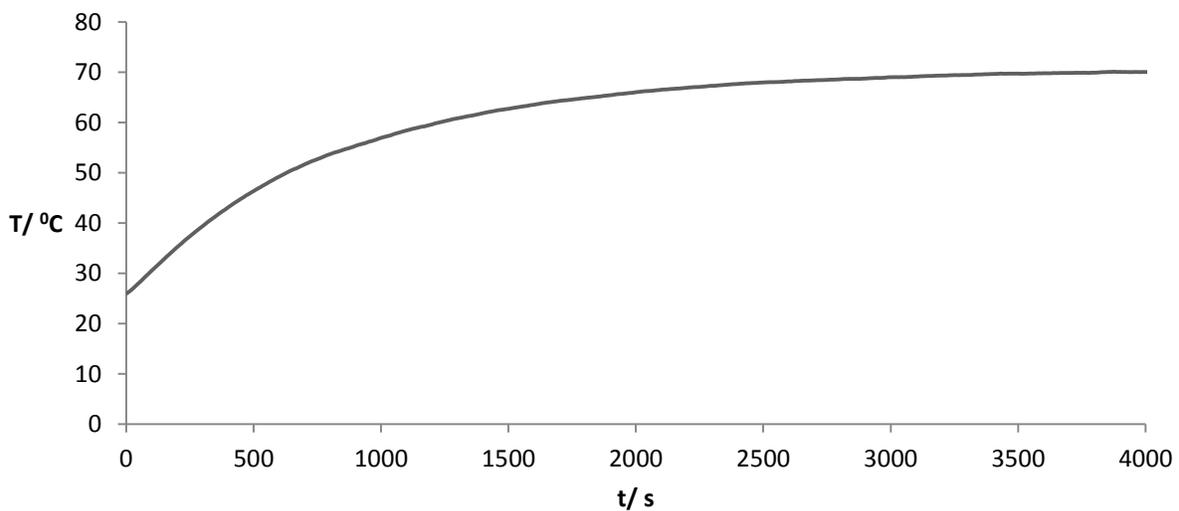
**Gráfica 11.** Reflectancia difusa de los 9 diferentes materiales**Gráfica 12.** Comparación de reflectancia difusa entre los materiales  $C_3R_1$ ,  $C_3R_2$ ,  $C_1R_1$ .



### 4.3 Comparación entre ecuación 17 y resultados experimentales

Para comparar los datos experimentales con la ecuación 17, se muestra el resultado del calentamiento de una placa de acero ASTM A-36 DE 15 X 15 cm<sup>2</sup> en el calorímetro durante 4000 s, Gráfica 13.

**Gráfica 13.** Datos experimentales obtenidos en el calorímetro, de una placa de acero ASTM A-36 sin recubrimiento.



Ahora si tomamos la ecuación 17 y la codificamos obtenemos la expresión 18.

$$T_w(t) = \left[ T_0 - \frac{B}{D} \right] e^{-Dt} + \frac{B}{D} \quad 17$$

$$T_w(t) = K_1 e^{-Dt} + K_2 \quad 18$$



Reacomodando la expresión anterior tenemos la ecuación 19.

$$T_w(t) - K_2 = K_1 e^{-Dt}$$

$$K_2 - T_w(t) = -K_1 e^{-Dt}$$

$$\text{Ln}|K_2 - T_w(t)| = \text{Ln}|-K_1 e^{-Dt}|$$

$$\text{Ln}|K_2 - T_w(t)| = -Dt + \text{Ln}|-K_1| \quad 19$$

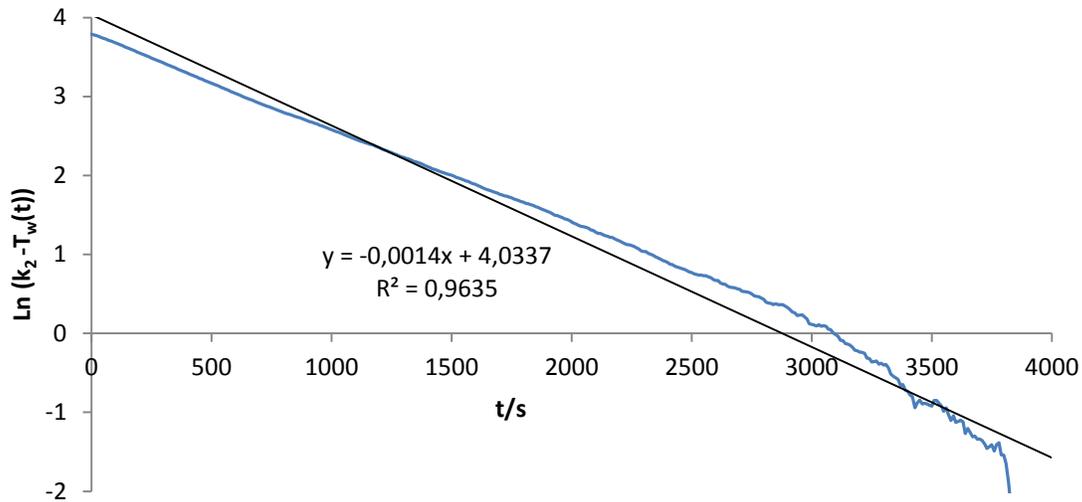
Cuando  $t \rightarrow \infty$ , se observa en la ecuación 18 que la temperatura de la superficie de la placa  $T_w(t)$ , es la temperatura de equilibrio, alcanzada a los 4000 s, por lo tanto la constante  $K_2$  es igual a 70.1 °C.

$$K_2 = T_\infty + \frac{\alpha l}{h} = 70.1 \quad 20$$

Si graficamos la ecuación 19 con los datos experimentales mostrados en la Gráfica 13 y hacemos un ajuste lineal, obtenemos la Gráfica 14.



**Gráfica 14.**  $\ln|K_2 - T_w(t)|$  vs  $t$ , para la placa de acero ASTM A-36 sin recubrir.



La ecuación 19 tiene la forma de la ecuación de una línea recta,  $y = mx + b$ , así que el valor de  $b = \ln(-K_1)$ , por lo tanto:

$$K_1 = T_o - K_2 = 3.7874$$

También se observa que la pendiente del ajuste lineal (-0.0014) es igual a  $(-D)$  de la ecuación 19.

$$m = -D$$

$$-0.0014 = - \left[ \frac{hA}{\rho V c} \right] \quad 21$$

Para la placa de Acero ASTM A-36,  $c=455 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C}$  (Holman, 2010), así que sustituyendo el valor de  $c$  en la ecuación 21, obtenemos un valor para  $h$ .



$$h = 10.0009$$

Ahora sustituimos los valores de  $h$ , y  $T_{\infty}$ , en la ecuación 20 para encontrar el valor de  $\alpha l$

$$\alpha l = (70.1 - T_{\infty})h = 351$$

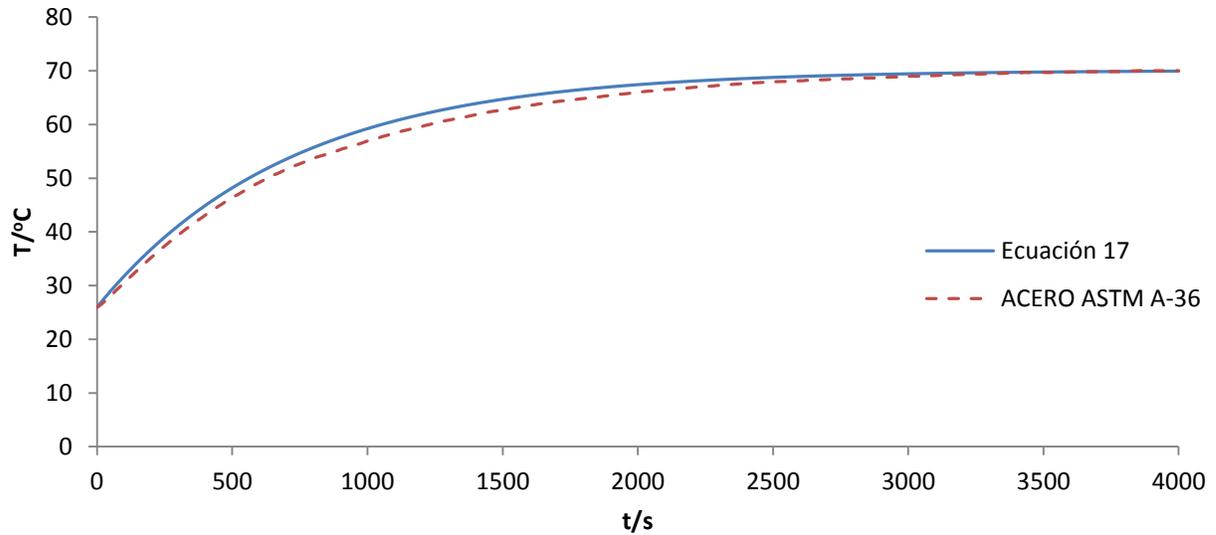
Si sustituimos los valores experimentales encontrados mediante el ajuste lineal, en la ecuación 17 y comparamos su gráfica con la de los datos experimentales, se observa que el modelo teórico predice el comportamiento de los datos experimentales, los valores experimentales encontrados se muestran en la Tabla 6 y la comparación en la gráfica 15.

**Tabla 6.** Valores conocidos del experimento del calentamiento de la placa de acero ASTM A-36 sin recubrir.

<b>COEFICIENTE CONVECTIVO DE CALOR</b>	$h$	10	$J/^{\circ}C m^2 s$
<b>VOLUMEN MATERIAL</b>	$V$	0.000045	$m^3$
<b>DENSIDAD MATERIAL</b>	$\rho$	7850	$kg/m^3$
<b>ÁREA DE CONTACTO DEL MATERIAL</b>	$A$	0.0225	$m^2$
<b>TEMPERATURA AMBIENTE</b>	$T_{\alpha}$	35	$^{\circ}C$
<b>CAPACIDAD CALORÍFICA DEL MATERIAL</b>	$c$	455	$J/kg^{\circ}C$
<b>IRRADIANCIA x ABSORBANCIA</b>	$\alpha l$	351	$J/m^2^{\circ}C$
<b>TEMPERATURA INICIAL</b>	$T_0$	26	$^{\circ}C$



**Gráfica 15.** Comparación entre ecuación 17 y resultados experimentales.



Como se observa en la gráfica anterior, la predicción de la ecuación 17 es aproximada a los resultados experimentales, la exactitud se debe a que el ajuste lineal realizado a los datos experimentales solo explica el 96% de los resultados experimentales.

Con la información que se ha discutido en este capítulo, se pueden hacer conclusiones acerca de cómo influyen las proporciones de cargas cerámicas y de resinas en el desempeño de un material compósito de matriz polimérica cargado con micro-partículas.



---

## Conclusiones

---

Los resultados obtenidos del calorímetro confirman la hipótesis planteada acerca de la modificación de las propiedades térmicas y ópticas de los recubrimientos, al variar algunos componentes presentes durante su formulación. Ya que los resultados del calorímetro muestran diferencias en las temperaturas de equilibrio alcanzadas en las muestras, atribuibles a diferencias en las propiedades de reflectancia de éstas, como se corroboró con las mediciones de reflectancia difusa.

El aumentar en 25 % la cantidad del cerámico 1 y disminuir el mismo porcentaje en filler, sobre la formulación original  $C_2R_2$ , logra una diferencia de temperaturas de hasta 4 °C, la cual se aprecia entre la muestra  $C_1R_1$  con una temperatura de equilibrio de  $58.55 \pm 0.25$  °C y la muestra  $C_3R_2$  con una temperatura de equilibrio de  $63.24 \pm 0.4$  °C.

Las mediciones de reflectancia difusa confirman los resultados obtenidos del calorímetro al reportar que las formulaciones con cargas  $C_1$  tienen mayor reflectancia que las formulaciones  $C_3$ . Se observó que a mayor cantidad de filler, menor es la reflectancia del recubrimiento.

El modelo matemático (ecuación 17) muestra que las propiedades térmicas del recubrimiento están en función de su absorbancia, capacidad calorífica, densidad y volumen.

Aunque las esferas de filler son huecas y muestran buen aislamiento térmico para la conducción del calor, sus propiedades ópticas tienen un efecto negativo en la reflectancia del recubrimiento.



---

# Bibliografía

---

**Badarinath K. V. S. [y otros]** Influence of atmospheric aerosols on solar spectral irradiance in an urban area [Publicación periódica] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. - India : Elsevier, 2007. - Vol. 69. - págs. 89–599.

**Bird R. Byron** Fenómenos de Transporte [Libro]. - México : Reverté, 2006.

**Colima Aislantes térmicos de** [En línea]. - 1 de Octubre de 2011. - <http://www.aislantescolima.com.mx>.

**Corcione Massimo** Heat transfer correlations for free convection from upward-facing horizontal rectangular surfaces [Publicación periódica] // WSEAS TRANSACTIONS on HEAT and MASS TRANSFER. - 2007. - págs. 48-60.

**Davidson Michael W.** <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/index.html> [En línea]. - 1 de Octubre de 2011. - <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>.

**Dombrovsky Leonid A., Randrianalisoa Jaona H. y Baillis Dominique** Infrared radiative properties of polymer coatings containing hollow microspheres [Publicación periódica]. - Moscow : Elsevier, 2006. - Vol. 50. - págs. 1516–1527.

**Duffie John A.** Solar Engineering of Thermal Processes [Libro]. - Madison Wisconsin : Wiley, 1980.

**Estrada Vicente, Ramírez Cajigal y Almada Salgado Rafael** Irradiaciones global , directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así irradiación directa normal, en la República Mexicana [Informe]. - México : UNAM, 2005.

**Frank Horst** Wikipedia [En línea]. - 1 de Octubre de 2011. - [http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_visible](http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_visible).

**González Velasco Jaime** Energías renovables [Libro]. - Barcelona : Reverté, 2009.

**Gueymard Christian A.** The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models [Publicación periódica] // Solar Energy. - USA : [s.n.], 2003. - págs. 423–453.

**Hecht Eugene** Optics [Libro]. - San Francisco : Addison Wesley, 2002.

**Holman Jack Philip** Heat Transfer [Libro]. - New York : Mc Graw Hill, 2010.



**Höpe Andreas y Hauer Kai-Olaf** Three-dimensional appearance characterization of diffuse standard reflection materials [Informe] / Metrologia ; Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). - Germany : IOP Publishing, 2010.

**Joachim Streitberger Hans y Friedrich Dössel Karl** Automotive paints and coatings [Libro]. - Germany : Wiley-VCH, 1995.

**Kidd Richard, Ardini James y Anton Anatol** Evolution of the modern photon [Publicación periódica] // American Association of Physics Teachers. - 1988. - págs. 27-35.

**Manrique José A.** Energía Solar [Libro]. - México : HARLA, 1984.

Nasacoat [En línea]. - 25 de Noviembre de 2009. - <http://www.nasacoat.com/en/products/sunglare/index.html>.

**NASACOAT** [En línea]. - 1 de Octubre de 2011. - <http://www.nasacoat.com/en>.

**Portela Rodríguez Raquel** Eliminación fotocatalítica de H<sub>2</sub>S en aire mediante TiO<sub>2</sub> soportado sobre sustratos transparentes en el UV-A. - 15 de Abril de 2008.

**R. Lide David** CRC Handbook of Chemistry and Physics [Libro]. - Florida : CRC, 2010. - 90th.

**Resnick Robert** Física cuántica [Libro]. - México : LIMUSA, 2009.

**Skoog A. Douglas [y otros]** Fundamentos de química analítica [Libro]. - México : Thomson, 2005.

**Smith JM, Van Ness HC y Abbott MM** Introducción a la termodinámica en ingeniería química [Libro]. - México : McGraw-Hill, 2005. - pág. 817.

**Soluciones Nanothermic** [En línea]. - 1 de Octubre de 2011. - <http://www.nanothermic.com.mx>.

**SuperTherm** SUPERTHERM Inc. [En línea]. - 1 de Octubre de 2011. - <http://www.supertherm.net/>.

**Tharamani C.N. y Mayanna S.M.** Low-cost black Cu-Ni alloy coatings for solar selective applications [Publicación periódica] // Solar Energy Materials and Solar Cells. - 2007. - págs. 664-669.

**Theodore L. Bergman Adrienne S. Lavine, David P. DeWitt, Frank P. Incropera** Introduction to heat transfer [Libro]. - United States of America : John Wiley & Sons, 2011.

Thermal Corporation [En línea] // Thermal Corporation. - 1 de 10 de 2011. - [www.thermalcorp.com/thermo\\_plastic.php](http://www.thermalcorp.com/thermo_plastic.php).

**Thornton Morrison Robert y Neilson Boyd Robert** Organic Chemistry [Libro]. - Boston Massachusetts : Addison Wesley, 1987.

**Xu Jiayue [y otros]** Bridgman growth and characterization of calcium fluoride crystals [Publicación periódica] // Journal of crystal growth. - 2006. - págs. 391-394.

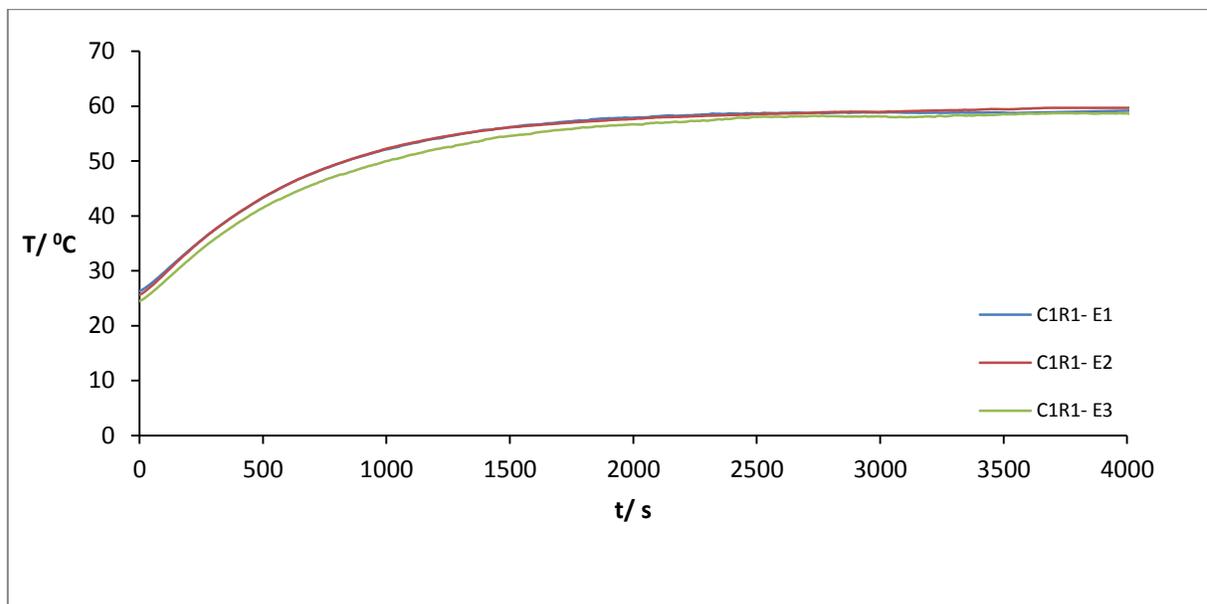
---

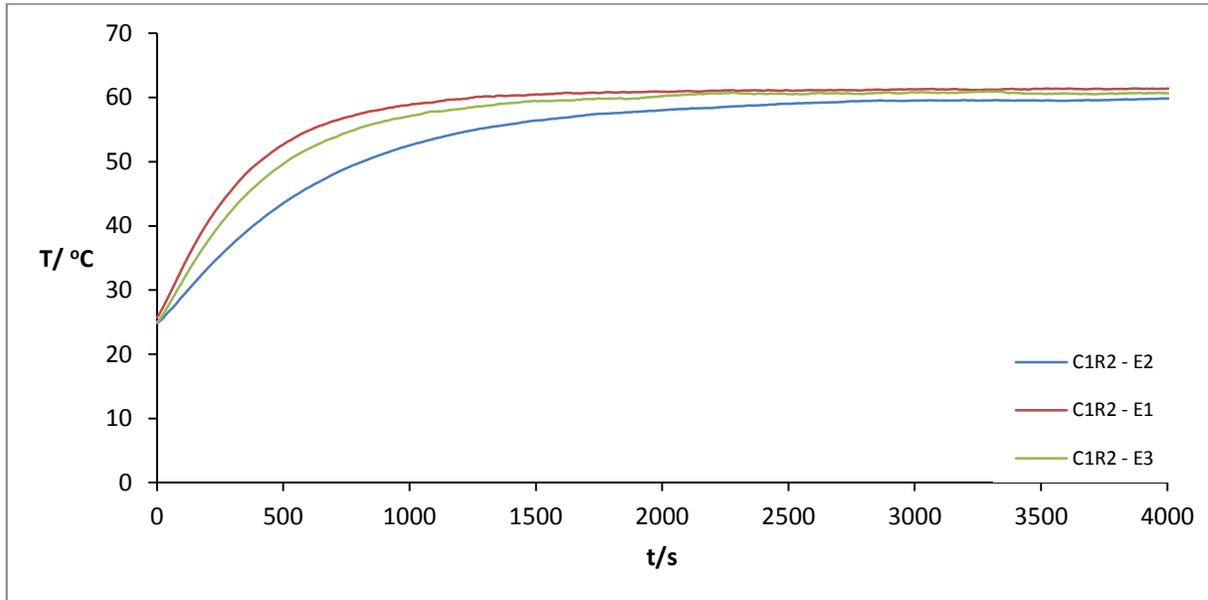
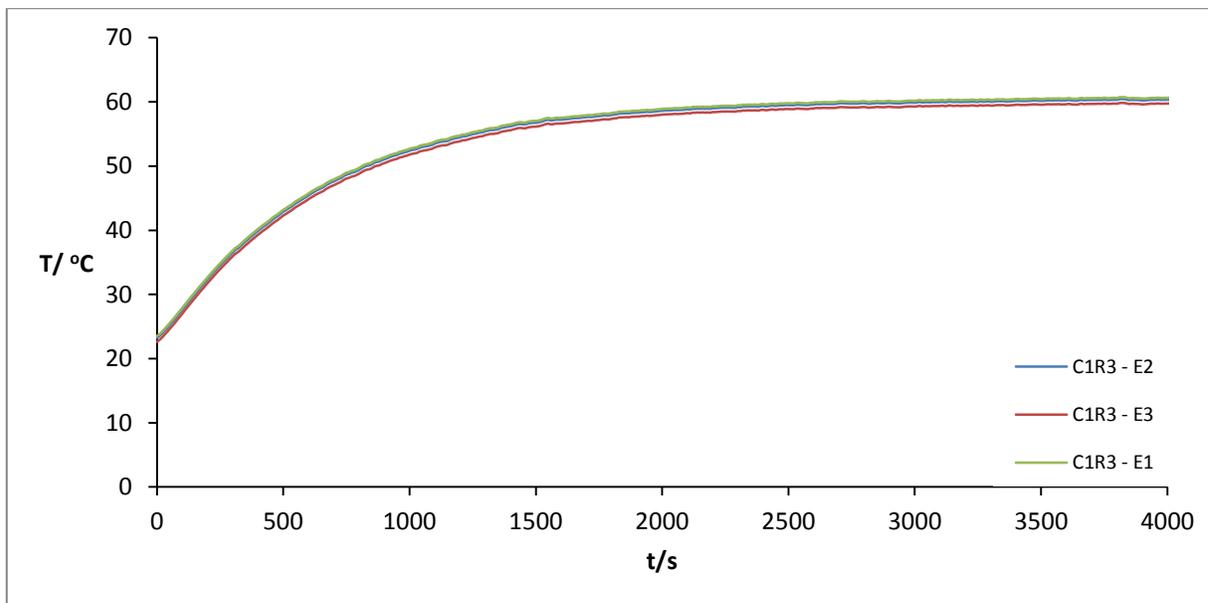
# Apéndice

---

Graficas de los resultados experimentales obtenidos de las 27 muestras en el calorímetro.

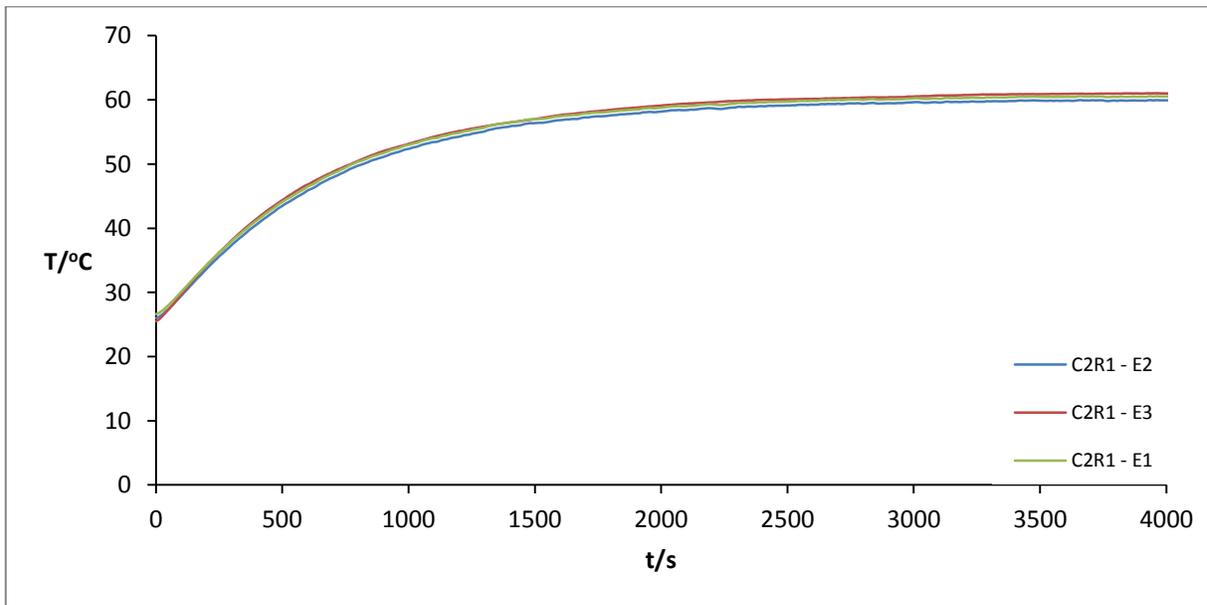
**Gráfica-A 1.** Comparación de la muestra  $C_1R_1$  en sus 3 diferentes espesores.



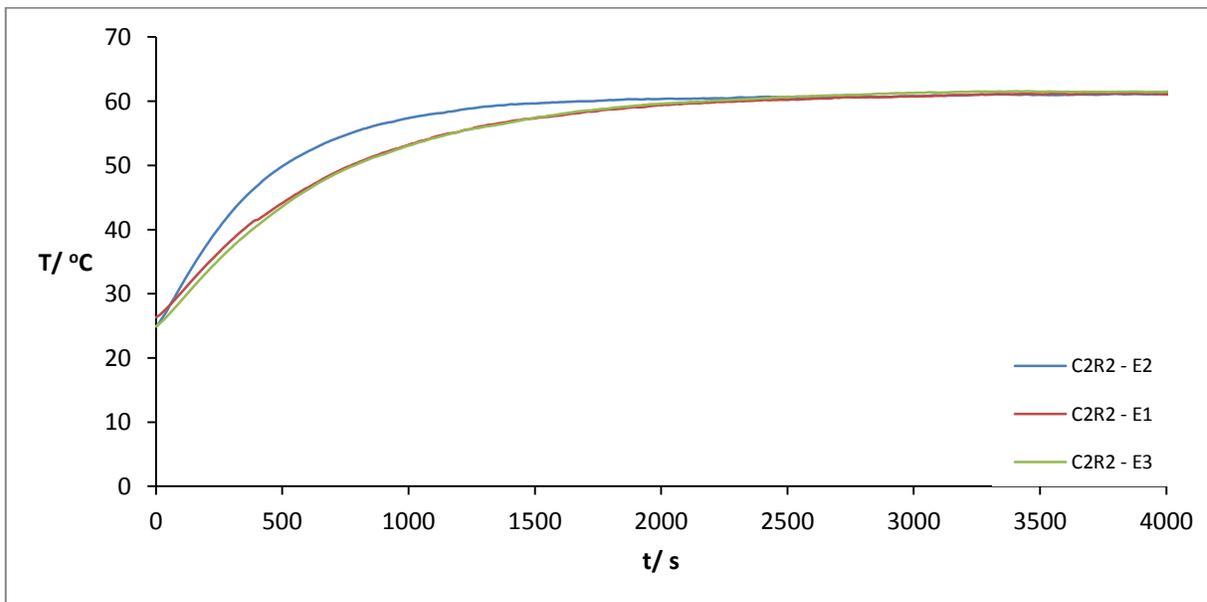
**Gráfica-A 2.** Comparación de la muestra C<sub>1</sub>R<sub>2</sub> en sus 3 diferentes espesores.**Gráfica-A 3.** Comparación de la muestra C<sub>1</sub>R<sub>3</sub> en sus 3 diferentes espesores.

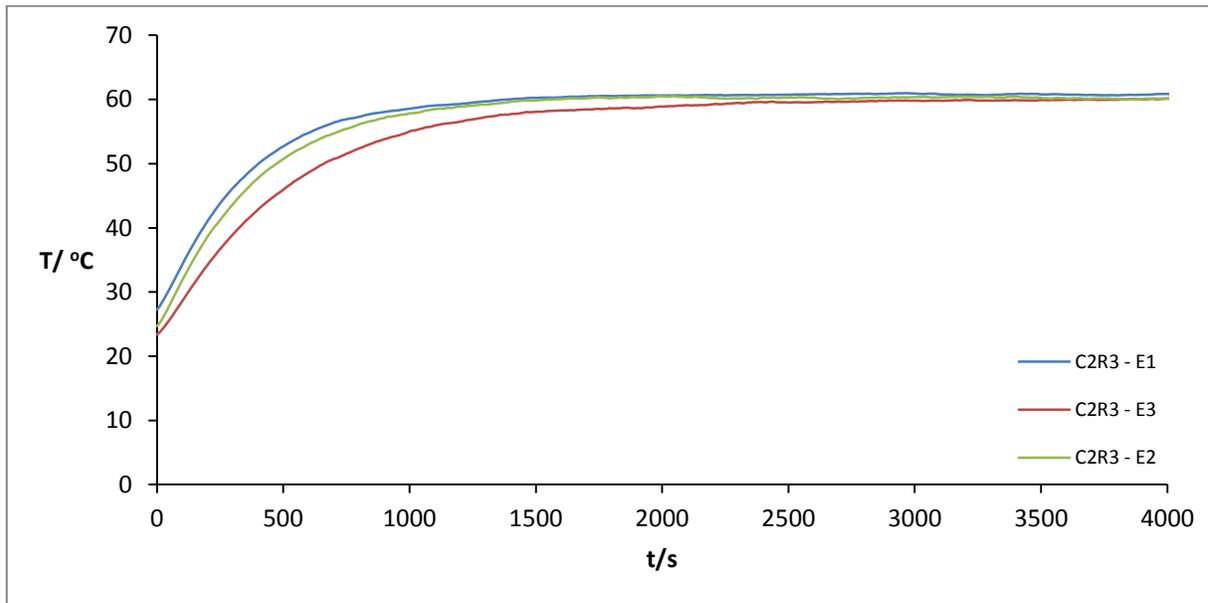
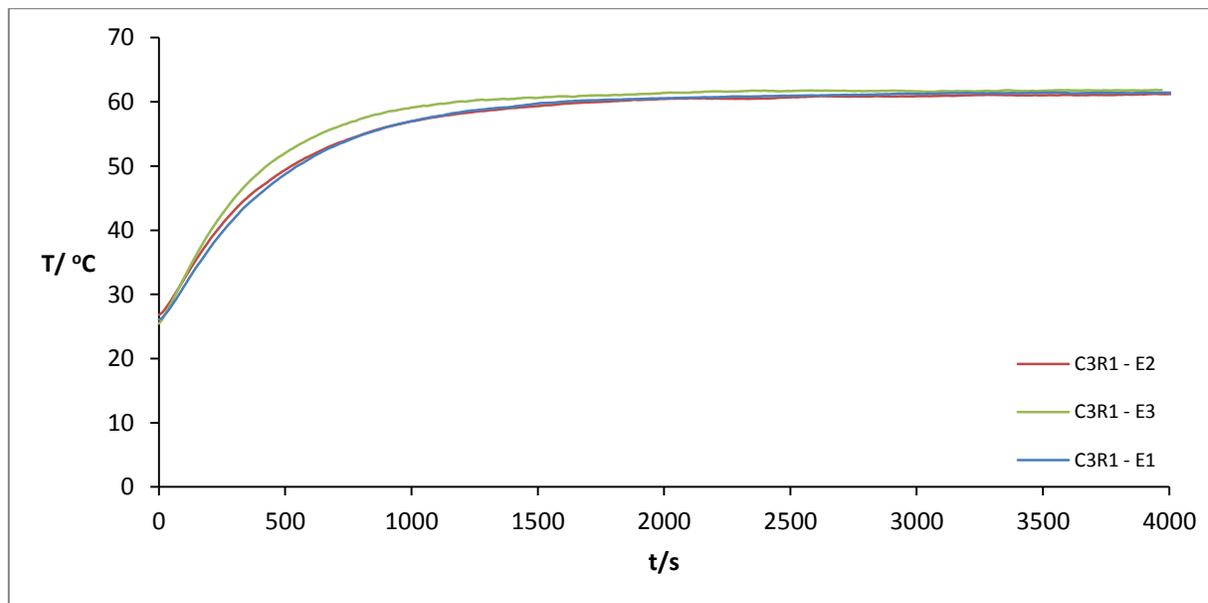


**Gráfica-A 4.** Comparación de la muestra  $C_2R_1$  en sus 3 diferentes espesores.



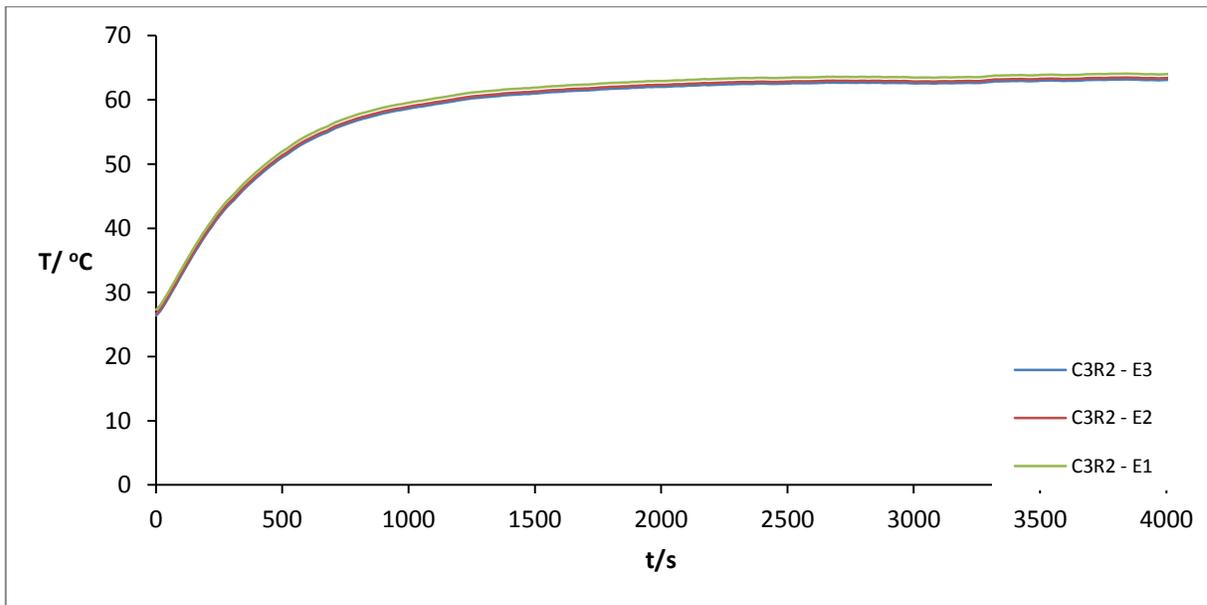
**Gráfica-A 5.** Comparación de la muestra  $C_2R_2$  en sus 3 diferentes espesores.



**Gráfica-A 6.** Comparación de la muestra  $C_2R_3$  en sus 3 diferentes espesores.**Gráfica-A 7.** Comparación de la muestra  $C_3R_1$  en sus 3 diferentes espesores.



**Gráfica-A 8.** Comparación de la muestra  $C_3R_2$  en sus 3 diferentes espesores.



**Gráfica-A 9.** Comparación de la muestra  $C_3R_3$  en sus 3 diferentes espesores.

