



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA

Universidad Autónoma De Querétaro

Facultad de Ingeniería

**"Desarrollo de un recubrimiento híbrido con
propiedades de aislamiento térmico"**

Tesis

**Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de:**

Lic. En Ingeniería en Nanotecnología

Presenta:

Ricardo Velázquez Hernández

Dirigido por:

M. EN C. Ludwig Lagarde Soto

Querétaro, Qro.

Marzo de 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



INGENIERÍA EN
NANOTECNOLOGÍA

"Desarrollo de un recubrimiento híbrido con propiedades de aislamiento térmico"

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería en Nanotecnología

Presenta:

Ricardo Velázquez Hernández

Director de tesis:

M. EN C. Ludwig Lagarde Soto

M. EN C. Ludwig Lagarde Soto

Presidente

Ludwig Lagarde Soto

Dra. María de los Ángeles

Cuán Hernández

Secretario

María A.

Dr. Rufino Nava Mendoza

Rufino Nava Mendoza

Vocal

Dra. Carmen L. Peza Ledesma (CFATA

UNAM JURQUILLA)

Sinodal

Carmen L. Peza Ledesma

Centro universitario, Querétaro, Qro.

Marzo 2022

México



I. AGRADECIMIENTOS



Al finalizar esta etapa extraordinaria de mi vida quiero extender un intenso agradecimiento, a quienes hicieron posible este proyecto, aquellos que fueron mi inspiración, apoyo y fortaleza.

- Un agradecimiento especial a mis asesores de tesis, la Dra. María de los Ángeles Cuán Hernández, Dr. Rufino Nava Mendoza y Dr. Rodrigo Rafael Velázquez Castillo, por brindarme su apoyo, enseñanzas, su tiempo y sobre todo por aceptarme y formar parte de su grupo de trabajo.
- El agradecimiento al Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM (CFATA), ubicado en Juriquilla del estado de Querétaro, y a la Dra. Carmen L. Peza Ledesma y Manuel Aguilar Franco por brindarme apoyo técnico con el microscopio electrónico de barrido para la obtención de las imágenes morfológicas de las partículas presentes en los recubrimientos con propiedades de aislamiento térmico.
- El agradecimiento al Laboratorio de Conductividad Térmica del Centro Nacional de Metrología (CENAM) por apoyarme a realizar las mediciones de conductividad térmica de nuestro recubrimiento base.
- Agradezco a cada docente quienes con su apoyo y enseñanzas constituyen la base de mi vida profesional.
- Esta tesis está dedicada a mis padres (María de la luz Hernández Figueroa y Daniel Velázquez Figueroa) y hermanos (Omar Velázquez Hernández y Daniela Velázquez Hernández), quienes con todo su esfuerzo me han ayudado a alcanzar cada una de mis metas, y me han demostrado que con dedicación todo es posible.



II. ÍNDICE GENERAL



Contenido

I. AGRADECIMIENTOS	3
I. ÍNDICE GENERAL	5
II.I Abreviaturas	8
III. RESUMEN	10
III.I ABSTRACT	13
IV. INTRODUCCIÓN	15
IV.I Principios básicos de la Transferencia de calor	20
IV.II Mecanismos de transferencia de calor	20
IV.II.I Conducción	21
IV.II.II Convección	22
IV.II.III Radiación	24
IV.III Nanomateriales para aislamiento térmico	25
IV.III.I Mecanismo de transferencia de calor por conducción en nanoestructuras	25
IV.III.II Materiales mesoporosos de tipo esponja	29
IV.IV Técnicas de medición de conductividad térmica	31
IV.IV.I Caracterización térmica de material a granel	32
IV.IV.II Caracterización térmica de películas delgadas	33
V. JUSTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	35
VI. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	37
VII. METODOLOGÍA	39
VII.I Síntesis de la esponja mesoporosa de sílice (EMS-15)	40
VII.II Preparación del recubrimiento híbrido Sílice-Vinílico-EMS-15	42
VII.III Procedimiento para depositar el recubrimiento	43
VII.IV Caracterización de la esponja mesoporosa de sílice EMS-15	44
VII.V Metodología para determinación del comportamiento térmico de los recubrimientos	44
VIII. RESULTADOS	46
VIII.I Caracterización textural de material utilizado para desarrollo de recubrimientos	47
VIII.I.I Isotermas de adsorción-desorción de N₂ a 77 K	47
VIII.I.II Difracción de Rayos-X (DRX)	49



VIII.I.III Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).....	50
VIII.I.IV Microscopía Electrónica de Transmisión de Alta Resolución (HRTEM) .	51
VIII.II Caracterización de recubrimientos mediante microscopia electrónica de barrido (SEM).....	52
VIII.III Caracterización de recubrimientos mediante HRSEM (Microscopía electrónica de barrido de alta resolución).....	54
VIII.IV Medición de comportamiento térmico en placas de acero inoxidable ..	56
VIII.IV.I En aceite como fuente de calor	56
VIII.IV.II TGA (Análisis Termogravimétrico).....	60
VIII.IV.III (Aire segregado por una secadora como fuente de calor)	61
IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	67
X. CONCLUSIONES.....	70
XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
XII. ANEXOS.....	77
XII.I (ANEXO A).....	78
XII. II (ANEXO B)	82
XII. III (ANEXO C)	83
XII. IV (ANEXO D).....	87

II.1 Abreviaturas

- λ_{gas} es la conductividad térmica del gas en los poros, que también incluye la interacción del gas y la pared del poro (W / (mK)), $\lambda_{gas, 0}$ es la conductividad térmica del gas en los poros a temperatura y presión estándar (W / (mK)).
- β es el coeficiente que caracteriza la eficiencia (in) de transferencia de energía de colisión entre la molécula y la pared (entre 1,5 y 2,0).
- k_B es la constante de Boltzmann $\approx 1.38 \cdot 10^{-23}$ J / K, T es la temperatura (K).
- d es el diámetro de colisión de la molécula de gas (m).
- p es la presión del gas en los poros (Pa)
- δ es el diámetro característico de los poros (m)
- σ_{mean} es la trayectoria libre media de las moléculas de gas (m).
- λ_{rad} es la conductividad térmica de la radiación en los poros (W/(mK))
- $\sigma = \pi^2 k_B^4 / 60 \hbar^3 c^2$ la constante de Stefan-Boltzmann $\approx 5.67 \cdot 10^{-8}$ W/(m²K⁴)
- k_B la constante de Boltzmann $\approx 1.38 \cdot 10^{-23}$ J / K
- $\hbar = h / (2\pi) \approx 1.05 \cdot 10^{-34}$ Js la constante de Planck reducida (h = constante de Planck),
- c la velocidad de la luz $\approx 3.00 \cdot 10^8$ m / s
- δ diámetro de poro (m)
- ε emisividad de las paredes de los poros internos (asumiendo que todas son idénticas),
- T_i la temperatura interior (interior) (K),
- T_e la temperatura exterior (exterior) (K),
- $J_{rad,tot}$ el flujo de calor de radiación total (W / m²)
- n el número de poros a lo largo de una línea horizontal dada en el material.
- ρC_p , es considerada la capacidad volumétrica (J/(m³ K))
- k es la constante de conductividad térmica del material (conocida como k , K o λ)
- q es la rapidez de transferencia de calor



- e es la emisividad del sistema
- A es el área involucrada en la transferencia de calor
- T^4 Cuarta potencia de la temperatura absoluta
- dT/dx Gradiente de temperatura (la pendiente de la curva en un diagrama $T-x$), es decir, la razón de cambio de T con respecto a la ubicación x . El
- α Difusividad térmica (mm^2/s)
- ρ Densidad térmica
- C_p Capacidad calorífica específica



III. RESUMEN



El diseño y desarrollo de materiales con propiedades de aislamiento térmico está dirigido específicamente a la reducción del flujo de calor al limitar la conducción, convección, radiación o las tres, mientras a la par realiza una o varias funciones, este caso particular el control de la temperatura de la superficie para la protección y comodidad de las personas expuestas a un posible riesgo cuando se encuentran en contacto con temperaturas elevadas emitidas por equipos electrodomésticos, esto como resultado de un ineficiente aislamiento térmico. Por esta razón, la aplicación de la nanotecnología es importante para ofrecer una buena alternativa para la solución de este problema, presentando nanomateriales que reducen la transferencia de calor convectiva y a la vez reducen la conducción térmica del material.

La orientación de la aplicación de la nanotecnología en la fabricación de materiales de aislamiento térmico de alto rendimiento se desplaza de las partículas a los poros en la gama nano (Jelle 2011). Una estructura porosa resulta ventajosa para suprimir la conducción porque, la reducción de los poros ocasiona la colisión de las moléculas con las paredes de los poros y no con las otras moléculas de gas de acuerdo con el efecto Knudsen. En este sentido, los materiales como la sílice mesoporosa tipo esponja EMS-15 resultan ser adecuados para el aislamiento térmico debido a sus propiedades características, tal como, su estabilidad química y térmica, su área superficial y tamaño de poro. Durante esta investigación se sintetizaron partículas de material tipo esponja EMS-15 y Al_2O_3 mesoporosa para su posterior deposición aplicando la técnica Dip-Coating en los recubrimientos que se desarrollaron, también se utilizaron esferas huecas PMMA prefabricadas con un tamaño promedio de 3 a 5 μm . Después se realizó la caracterización mediante SEM y HRSEM, donde se observó la no homogeneidad de las partículas en el recubrimiento de la EMS-15 y las esferas huecas de PMMA, afectando de esta manera el espesor de las películas delgadas, por ende, explica su comportamiento térmico resultante. Posteriormente, se realizaron termogramas (TGA) del recubrimiento base (Rb) y recubrimiento (Rb) con partículas de la EMS-15, siendo



muy similares en cuanto a pérdida de peso como resultado de la descomposición térmica a la que fueron sometidos. Y finalmente se evaluó el comportamiento térmico de los recubrimientos mediante un sistema de medición diseñado en el laboratorio. El recubrimiento con mejores características de aislamiento térmico fue el nombrado Rb + EMS-15 + Rb, en donde la EMS-15 se encuentra en la capa intermedia.



III.I ABSTRACT

The design and development of materials with thermal insulation properties is specifically aimed at reducing the flow of heat by limiting conduction, convection, radiation or all three, while at the same time performing one or more functions, in this particular case controlling the surface temperature for the protection and comfort of people exposed to a possible risk when they are in contact with high temperatures emitted by electrical appliances, this as a result of inefficient thermal insulation. For this reason, the application of nanotechnology is important to offer a good alternative to solve this problem, presenting nanomaterials that reduce convective heat transfer and at the same time reduce the thermal conduction of the material.

The orientation of the application of nanotechnology in the manufacture of high-performance thermal insulation materials shifts from particles to pores in the nano range (Jelle 2011). A porous structure is advantageous in suppressing conduction because the narrowing of the pores causes the molecules to collide with the pore walls and not with other gas molecules according to the Knudsen effect. In this sense, materials such as EMS-15 sponge-type mesoporous silica turn out to be suitable for thermal insulation due to their characteristic properties, such as their chemical and thermal stability, their surface area and pore size. During this research, particles of EMS-15 sponge-like material and mesoporous Al₂O₃ were synthesized for subsequent deposition by applying the Dip-Coating technique in the coatings that were developed, prefabricated PMMA hollow spheres with an average size of 3 to 5 μm were also used. Afterwards, the characterization was carried out by means of SEM and HRSEM, where the inhomogeneity of the particles in the coating of the EMS-15 and the hollow PMMA spheres was observed, thus affecting the thickness of the thin films, therefore, it explains its resulting thermal behavior. Subsequently, thermograms (TGA) of the base coating (Rb) and coating (Rb) with EMS-15 particles were made, being very similar in terms of weight loss because of the thermal decomposition to which they were subjected. And finally, the thermal behavior of the



coatings was evaluated using a measurement system designed in the laboratory. The coating with the best thermal insulation characteristics was named Rb + EMS-15 + Rb, where EMS-15 is found in the intermediate layer.



IV. INTRODUCCIÓN



La palabra "aislamiento" derivada de la palabra latina para isla (insula) es el sustantivo que describe el material que aísla el calor (o la electricidad) de su entorno. Es un sustantivo científico y se registró por primera vez en 1870 (A. Bhatia 2011).

El aislamiento térmico se define como el uso de un material (o combinación de materiales) que limita o retarda el flujo de calor mediante conducción, convección, radiación o todas estas entre el sistema y el cuerpo adyacente o el entorno, además de adaptarse a cualquier tamaño, forma y superficie (A. Bhatia, B.E 2012). El término "aislamiento térmico" se aplica en el rango de temperatura de -75°C a 815°C y las aplicaciones por debajo de -75°C se denominan criogénicas, mientras que por encima de 815°C se denominan refractarias (Deshmukh et al. 2017), (TIASA -The Thermal Insulation Association of Southern Africa 2001).

Por otra parte, los materiales de aislamiento térmico además de retardar el flujo de calor cumplen una o más de las funciones enlistadas a continuación en la **Figura (1)** (Asociación de Aislamiento Térmico de Canadá 2013), (Romanova 2018), (TIASA -The Thermal Insulation Association of Southern Africa 2001):

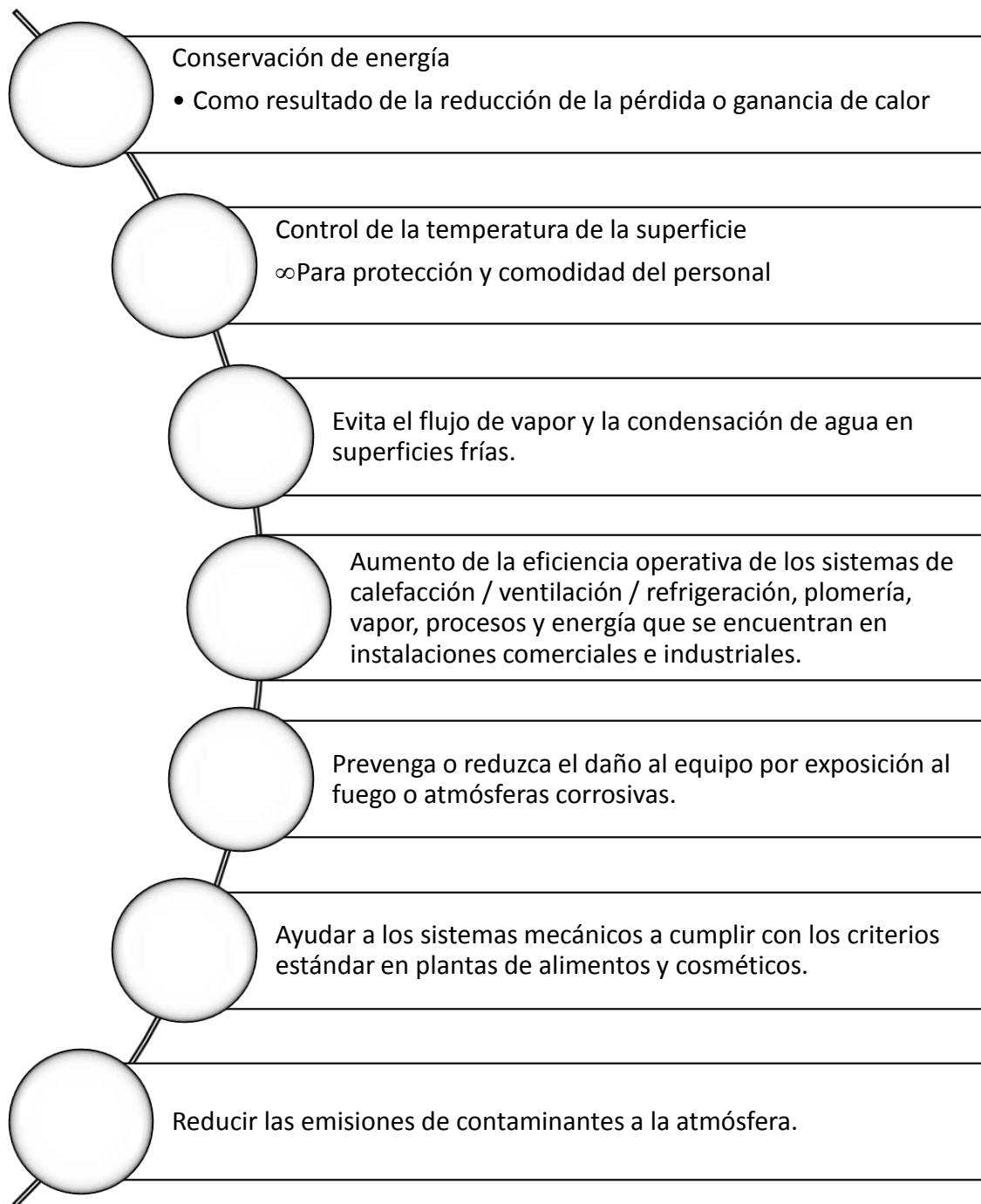


Figura 1.-Funciones de materiales aislantes



La historia de los materiales de aislamiento térmico no es tan larga, en cambio la necesidad de aislamiento es tan antigua como la actividad de la construcción. Las personas prehistóricas construyeron refugios para protegerse de las condiciones ambientales agresivas, originalmente utilizando materiales orgánicos, más tarde varios materiales artificiales como la lana de roca, fibra de vidrio, vidrio espumado, ladrillos huecos, perlita expandida, entre otros. Estos últimos se desarrollaron durante la revolución industrial con ventajas notables sobre los materiales naturales como su durabilidad, resistencia al fuego y al agua, por lo que el crecimiento general de estos productos ha sido sustancial en estos años (Bozsaky 2010).

El campo de la construcción es donde más se han empleado los materiales de aislamiento térmico, sin embargo, no existe uno solo que cumpla todos los requisitos con respecto a las propiedades más importantes (enlistadas en la **Figura (2 y 3)** del **ANEXO A**, junto a su definición), tal como, su conductividad térmica, vulnerabilidad de perforación, adaptabilidad y capacidad de corte del sitio, resistencia mecánica, protección contra incendios, emisión de humos durante incendio, robustez, durabilidad climática, resistencia al agua, costos e impacto ambiental. Por este motivo, la variedad de materiales y soluciones de aislamiento existentes dependen de las circunstancias y especificaciones exactas (el servicio, la ubicación y la longevidad requerida).

Durante las últimas dos décadas, la nanotecnología ha desarrollado nuevos materiales aislantes avanzados capaces de proporcionar una notable resistencia al flujo de calor (obstaculizando una o más formas de transporte de calor) en las estructuras donde es aplicado, sin embargo, aparecen en un rango limitado de práctica. Hoy en día, se puede encontrar una variedad de estos materiales en el mercado: productos de poliestireno expandido, aerogel, paneles de aislamiento al vacío basados en nanopartículas y recubrimientos de aislamiento térmico de nanocerámica. (Bozsaky 2016).

En la **Tabla 1** se muestran distintos materiales convencionales con propiedades de aislamiento térmico, junto con sus valores de conductividad térmica.

Tabla 1.- Conductividad térmica para distintos materiales ((Koebel, Rigacci y Achard 2012))

Aislante	Estructura química	Lambda ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Lana mineral	Óxidos inorgánicos	0.034 a 0.045
Fibra de vidrio	SiO ₂	0.031 a 0.043
Espuma de vidrio	SiO ₂	0.038 a 0.050
Poliestireno expandido	Espuma polimérica	0.029 a 0.055
Poliestireno extruido	Espuma polimérica	0.029 a 0.048
Espuma de resina fenólica	Espuma polimérica	0.021 a 0.025
Espuma de poliuretano	Espuma polimérica	0.020 a 0.029
Aerogel de Sílice	SiO ₂ Aerogel	0.012 a 0.020
Aerogel orgánico	Depende del compuesto orgánico de procedencia	0.013 a 0.020
Paneles de Vacío	Núcleo de Sílice	0.003 a 0.011
Vidrio al Vacío (Vacuum glazing)	Doble vidrio con vacío entre ellos	0.0001 a 0.0005

Después en la **Tabla 2** del **ANEXO B** se comparan los materiales aislantes con sus ventajas y desventajas de tipos particulares.



IV.I Principios básicos de la Transferencia de calor

El calor transferido a través del aislante es una función de la resistencia del aislamiento con respecto a su espesor, la temperatura de funcionamiento de la superficie a aislar, las características de la superficie de la membrana externa (emitancia) y las condiciones ambientales involucradas. Es necesario conocer ciertos términos técnicos, con el fin de comprender los factores que intervienen en la transferencia térmica y así realizar los cálculos deseados (A. Bhatia 2011). Cada uno de estos términos son descritos en el **ANEXO C**.

Recordemos que, la ciencia de la transferencia de calor busca predecir la transferencia de energía que puede acontecer entre cuerpos materiales debido a una diferencia de temperatura, además de predecir la rapidez a la que se realizará este intercambio de energía bajo ciertas condiciones específicas.

La diferencia entre la transferencia de calor y la termodinámica es que la termodinámica se ocupa de sistemas en equilibrio, por ende, esta se puede utilizar para predecir la cantidad de energía requerida para pasar de un sistema en estado de equilibrio a otro; más no puede usarse para predecir la rapidez en que se realizará un cambio, ya que el sistema no se encuentra en equilibrio durante el proceso. La transferencia de calor completa al primer y segundo principios de la termodinámica, al proporcionar reglas experimentales adicionales que se pueden utilizar para establecer la rapidez de transferencia de energía (Holman, Valenzuela M, y Raúl 1986), (Kreith 2012).

IV.II Mecanismos de transferencia de calor

Por definición la transferencia del calor es la energía en tránsito desde un sistema con alta temperatura a otro sistema con más baja temperatura, esta puede ocurrir a través de tres mecanismos posibles, conducción, convección y radiación.

IV.II.I Conducción

La conducción de calor es considerada como el flujo de calor (a través de medios sólidos) ocasionado por la vibración interna de las moléculas y el constante choque de los electrones libres. Las moléculas con una velocidad más alta chocan con las moléculas menos excitadas y transfieren parte de su energía a las moléculas con menos energía en las regiones más frías del sistema. Las moléculas que absorben el excedente de energía también adquirirán una mayor velocidad vibratoria y generarán más calor (Cárdenas 2015).

La velocidad de conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica, el espesor y el tipo de material en cuestión, así como de la diferencia de temperatura a través de él (Transferencia de calor, 2014). Mediante la experimentación se ha demostrado que la velocidad de transferencia de calor por conducción a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de esta y al área de transferencia, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa, es decir:

$$V. \text{ de conducción de calor} \cong \left(\frac{(\text{Área}) (\text{Dif. de temperatura})}{\text{Espesor}} \right)$$

Esto se representa en la **ecuación (1)** como:

$$Q_{cond} = kA \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

En el caso límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la **ecuación (1)** se reduce a la forma diferencial como se describe en la **ecuación (2)**

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \rightarrow \text{Ley de Fourier (2)}$$

El calor es conducido en la dirección de la T decreciente y el gradiente de temperatura se vuelve negativo al crecer x . El signo negativo garantiza que la transferencia de calor en la dirección de x positiva sea una cantidad positiva, por

este motivo, el calor deberá fluir hacia abajo en la escala de temperatura tal como se encuentra indicado en el sistema de coordenadas en la **Figura (4)**.

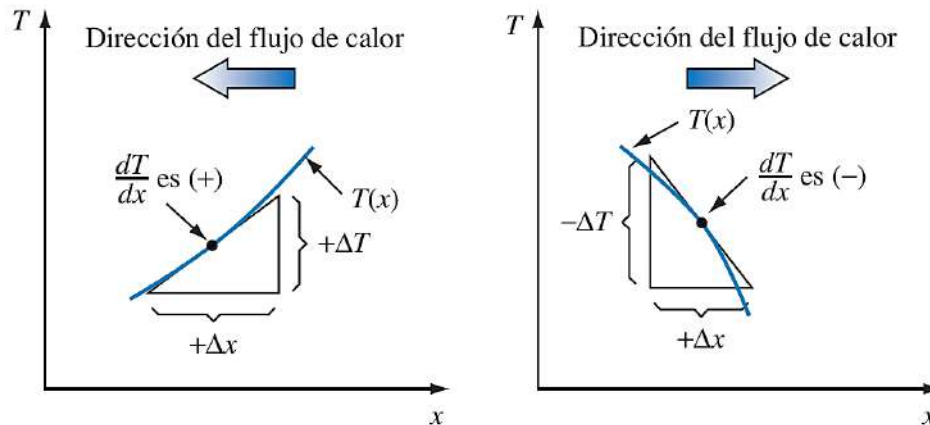


Figura 2.- Esquema que muestra la dirección del flujo de calor normal y en dirección contraria al gradiente de temperatura (Kreith 2012).

El área A de transferencia siempre es normal a la dirección de esa transferencia.

IV.II.II Convección

En el fenómeno de la convección el calor se transfiere mediante corrientes dentro de un fluido (líquido o gaseoso), esto debido al desplazamiento de las masas del líquido o gas, es decir, cuando la masa de un fluido se calienta sus moléculas se separan y se dispersan causando que la masa del fluido llegue a ser menos densa. Cuando pase esto, se desplazará hacia arriba u horizontalmente hacia una región fría, mientras que las masas menos calientes, pero más densas del fluido descenderán o se moverán en un sentido opuesto al del movimiento de la masa más caliente (el volumen de fluido menos caliente es desplazado por el volumen más caliente). Mediante este mecanismo los volúmenes más calientes transfieren calor a los volúmenes menos calientes de ese fluido (un líquido o un gas) (Nasif Nahle 2007).



La velocidad de transferencia de calor a través de un fluido es mucho mayor por convección que por conducción. Cuanto mayor es la velocidad del fluido mayor es la velocidad de transferencia de calor.

La transferencia de calor por convección depende de las propiedades del fluido, de la superficie en contacto con el fluido y del tipo de flujo. Entre dichas propiedades del fluido se encuentra la viscosidad dinámica m , la conductividad térmica k , la densidad r . También se podría considerar que depende de la viscosidad cinemática, puesto que $n = m / r$. Entre las propiedades de la superficie que intervienen en la convección están la geometría y la aspereza. El tipo de flujo, laminar o turbulento, también influye en la velocidad de transferencia de calor por convección.

En cualquier caso, la velocidad de transferencia de calor por convección siempre es proporcional a la diferencia de temperatura total entre la pared y el fluido, y el área de la superficie A . Este hecho se modela matemáticamente en la **ecuación (3)** mediante la **Ley de Enfriamiento de Newton**:

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

La influencia de las propiedades del fluido, de la superficie y del flujo se cuantifica con el coeficiente de película o coeficiente de transferencia de calor por convección h . Las unidades de h son watts por metro cuadrado por grado Celsius cuando el flujo de calor se expresa en watts. Este es el conjunto de unidades más utilizado.

La convección se clasifica en:

- φ Convección forzada. - se obliga al fluido o gas a fluir mediante medios externos, como por ejemplo un ventilador o una bomba.
- φ Convección natural. - el movimiento del fluido es debido a causas naturales, como el efecto de flotación, el cual se manifiesta con la subida del fluido caliente y el descenso del fluido frío.

La convección forzada se clasifica a su vez en externa e interna en base a la naturaleza del flujo del fluido (interno o externo). El flujo de un fluido se clasifica como interno o externo dependiendo de si se fuerza al fluido a fluir por un canal confinado (superficie interior) o por una superficie abierta.

IV.II.III Radiación

Es la transferencia de calor por medio de ondas electromagnéticas. No se requiere de un medio para su propagación. La energía irradiada se mueve a la velocidad de la luz. El calor irradiado por el Sol se puede intercambiar entre la superficie solar y la superficie de la Tierra sin calentar el espacio de transición.

La **ecuación (4)** nos ayuda a conocer la cantidad de calor transferido por radiación, es ejemplificado en el diagrama de la **Figura (5)**:

$$q = e\sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

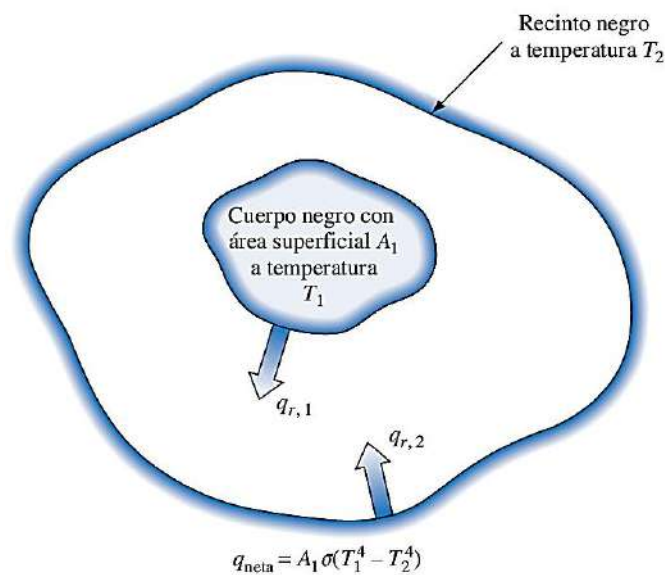


Figura 3.- Diagrama esquemático de la radiación entre el cuerpo 1 y el recinto 2 (Kreith 2012).



IV.III Nanomateriales para aislamiento térmico

IV.III.I Mecanismo de transferencia de calor por conducción en nanoestructuras

La conducción de calor en escala convencional es un proceso de difusión que se rige por la ley de Fourier. Por otra parte, en el caso de nanoestructuras, nanopartículas, nano cables y películas delgadas, la aproximación de difusión subyacente a la ley de Fourier ya no es válida debido a que las escalas de longitud asociadas con los portadores de energía (camino libre medio o incluso a la longitud de coherencia) se vuelven comparables o mayores que las longitudes características de las nanoestructuras (el diámetro de las nanopartícula, nanocables y el grosor de las películas delgadas) (Tien y Chen, 1994). Por esta razón es que se deben tener en cuenta el tamaño y los efectos de la interfaz.

Dependiendo de la magnitud relativa de la longitud característica de las nanoestructuras y las longitudes características de los portadores de energía, se pueden tratar los portadores de energía como partículas o como ondas. Esto último requiere considerar la información de fase de los portadores de energía. Los diferentes regímenes de transporte y los principios rectores de los fotones, electrones y fonones se resumen en la **Tabla 3** del **ANEXO D**.

Los nanomateriales aislantes se basan en la transferencia de energía por colisión de moléculas de gas. Al reducir el tamaño de los poros, por debajo de 40 nm de diámetro, en un determinado material según el principio del efecto Knudsen, las moléculas chocan principalmente con las paredes de los poros y no con las otras moléculas de gas. La reducción de la conductividad térmica se consigue sin aplicar vacío en los poros, la interacción entre el estado sólido y el gas está a cargo del coeficiente de eficiencia (α) de transferencia de energía de colisión entre la molécula y la pared β . Por lo tanto, el gas de conductividad térmica del gas resultante, que también incluye la interacción del gas y la pared de los poros, frente

al diámetro de los poros y la presión del gas de los poros, puede calcularse en este modelo simplificado:

La conductividad térmica del gas λ_{gas} puede escribirse de la siguiente manera (Baetens et al., 2010a; Bouquerel et al., 2012; Jelle, 2011a; Jelle et al., 2010a; Kaganer, 1969):

$$\lambda_{gas} = \frac{\lambda_{gas,0}}{1+2\beta K_n} = \frac{\lambda_{gas,0}}{1+\frac{\sqrt{2}\beta k_B T}{\pi d^2 p \delta}} \quad (5)$$

donde

$$K_n = \frac{\sigma_{mean}}{\delta} = \frac{k_B T}{\sqrt{2}\pi d^2 p \delta} \quad (6)$$

El efecto de la transferencia de radiación dentro de los poros se puede calcular aproximadamente aplicando la ecuación de Stefan-Boltzmann para encontrar el flujo de calor de radiación total $J_{rad, tot}$ (W / m^2) a través de un material con n espacios de aire en serie con infinitas superficies paralelas de igual emisividad, que puede aproximarse como n poros a lo largo de una línea horizontal dada en el material:

$$J_{rad,tot} = \frac{\sigma}{n \left[\frac{2}{\epsilon} - 1 \right]} (T_i^4 - T_e^4) \quad (7)$$

para encontrar la conductividad térmica de radiación λ_{rad} :

$$\lambda_{rad} = \frac{\sigma \delta}{n \left[\frac{2}{\epsilon} - 1 \right]} (T_i^4 - T_e^4) \quad (8)$$

o

$$\lambda_{rad} = \frac{\pi^2 k_B^4 \delta}{60 h^3 \left[\frac{2}{\epsilon} - 1 \right]} \frac{(T_i^4 - T_e^4)}{(T_i - T_e)} \quad (9)$$



De esta ecuación se puede observar que la conductividad térmica de la radiación λ_{rad} disminuye linealmente al disminuir el diámetro de los poros δ , donde la emisividad de las paredes internas de los poros determina la pendiente de la disminución. Es decir, cuanto más pequeños sean los poros y menor la emisividad, menor será la conductividad térmica de la radiación.

Si se logra una red de estado sólido de baja conductividad y una conductividad térmica de gas baja, y aún dominan el transporte térmico (es decir, más grande que la parte de radiación térmica), entonces los nanomateriales pueden convertirse en materiales de aislamiento térmico de alto rendimiento del futuro. Sin embargo, varios trabajos (por ejemplo, Joulain et al., 2005; Mulet et al., 2002; Zhang, 2007) describen un gran aumento en la radiación térmica a medida que el diámetro de los poros disminuye por debajo de la longitud de onda de la radiación térmica (infrarroja), donde el efecto túnel de las ondas evanescentes puede desempeñar un papel importante.

Con base a lo dicho anteriormente, la existencia y el control del tamaño de poro resultan de gran interés en un material, ya que brindan la capacidad para interactuar con átomos, iones o moléculas no solamente en la superficie del material, sino a través del interior de la pared de sus poros. Por lo que los materiales como la sílice mesoporosa resulta ser una alternativa para aislamiento térmico debido a sus propiedades. Entre estas propiedades destaca su alta superficie específica, desarrollo de porosidad controlable y excelente estabilidad química y térmica. Estos materiales pueden, además, modificarse con facilidad mediante la funcionalización de su superficie con alcóxidos metálicos. (García Martínez, J y Pérez Pariente, J. 2003)

Los materiales relacionados con sílice mesoporosa se sintetizan utilizando moléculas anfifílicas capaces de autoensamblarse de forma ordenada, constituyendo así una plantilla para la estructura interna durante la condensación de la sílice. Estas moléculas anfifílicas son denominadas surfactantes o tensoactivos, y son moléculas que tienen tendencia a adsorberse en las superficies



e interfases. Tienen una estructura química dual, una parte de la molécula es hidrófila y el otro es hidrófoba (Albert Barrabino 2011).

Para la síntesis de sílices mesoporosas, con la variación de las condiciones se pueden obtener diferentes tipos de estructuras internas, en este sentido, los materiales SBA han sido reportados como las sílices mesoporosas más estables desde el punto de vista hidrotérmico, debido a sus paredes más gruesas. Otra ventaja de los materiales SBA-15 es que tienen microporos desordenados, lo que permite la conexión entre mesoporos. En ocasiones el tamaño de poro se puede modificar agregando un agente de hinchamiento como el 1, 3, 5-trimetilbenceno (mesitileno). (Yenny Maribel Guerrero Salas 2008).

La SBA-15 se sintetiza por el método sol-gel y por medio de un mecanismo neutral que involucra interacciones del tipo de enlaces de hidrógeno entre surfactantes neutros (copolímeros anfífilicos de tres bloques) como agentes directores de estructura y precursores inorgánicos neutros. Como se mencionó anteriormente, el papel del surfactante es el de guiar la formación de la estructura mesoporosa. En el caso de un copolímero de tres bloques, se trata de un surfactante que en solución tiene dos partes dentro de la misma molécula (un grupo de cabeza hidrofílico y una larga cola hidrofóbica) las cuales se agregan y autoorganizan de tal manera que minimizan el contacto entre sus extremos incompatibles. Con la adición del precursor inorgánico, como se presenta más adelante, las especies inorgánicas participan en interacciones del tipo de enlaces de hidrógeno con los grupos de cabeza del surfactante dando como resultado la formación de una mesoestructura (inorgánico-surfactante) ordenada de forma hexagonal (Zhao 1998).

Durante la etapa llamada de madurado, la mesoestructura se consolida adquiriendo sus características finales. Finalmente, el surfactante se elimina por extracción con un solvente o por calcinación para obtener el material mesoporoso ordenado. En breve se esquematiza la síntesis de la sílice mesoporosa SBA-15 (**Figura 6**)

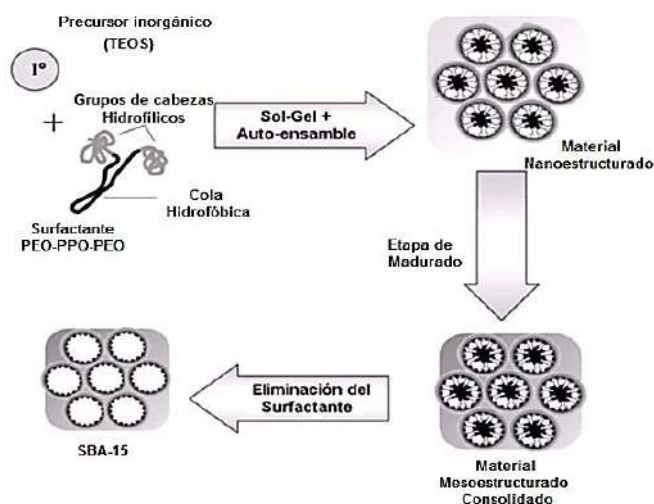


Figura 6.- Mecanismo de síntesis de la sílice mesoporosa SBA-15. Figura adaptada de (Van Der Voort et al. 1998) (Flodström y Alfredsson 2003)

IV.III.II Materiales mesoporosos de tipo esponja

Dentro de la familia de materiales mesoporosos se encuentran los materiales tipo esponja, los cuales se caracterizan por su estabilidad química y térmica, su área superficial alrededor de $1000 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ y ser adsorbentes debido a su tamaño de poro. Suelen presentar una forma hexagonal en los poros unidimensionales lo que permite su aplicación en diferentes ámbitos científicos, por ejemplo, en la remoción de contaminantes. Son obtenidos normalmente por síntesis hidrotérmica empleando hidróxido de calcio (NaOH) o amónico con tetraetilortosilicato (TEOS) como fuente de sílice (Lacerda Júnior et al. 2013), (Ma et al. 2015), (Mendoza 2021).

La esponja mesoporosa de sílice EMS-15 tiene tamaños de poro en el rango de 15-50 nm (Schmidt-Winkel et al. 2000), si son comparados con la SBA-15 y la MCM-41 resultan ser más grandes. Sus estructuras consisten en celdas esféricas y ventanas (Schmidt-Winkel et al. 2000) donde las celdas (tamaños de poro: 20-50 nm) están enmarcadas por una matriz desordenada de puntales de sílice (Figura 7) y las ventanas (tamaños de poro: 10-15 nm) interconectan las celdas para formar

un sistema poroso tridimensional continuo (3D) (Schmidt-Winkel et al. 1999). Las celdas y ventanas 3D se muestran en la **Figura 8**. Los grandes tamaños de poro son considerados favorables para ciertas aplicaciones, tal como, la incorporación de sitios activos de catalizadores o enzimas (Schmidt-Winkel et al. 2000). Además, ofrecen la reducción a la restricción de difusión de reactivos o sustratos, y permiten que se produzcan reacciones que involucren moléculas voluminosas (Schmidt-Winkel et al. 2000). La EMS-15 también tiene tamaños de poro ultra grandes dentro del sistema de poros 3D continuo (Schmidt-Winkel et al. 1999).

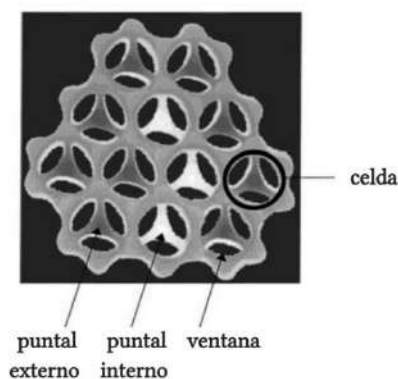


Figura 7. Esquema de una sección transversal de la estructura exhibida por ecm de sílice [adaptado de (Schmidt-Winkel et al. 2000)].

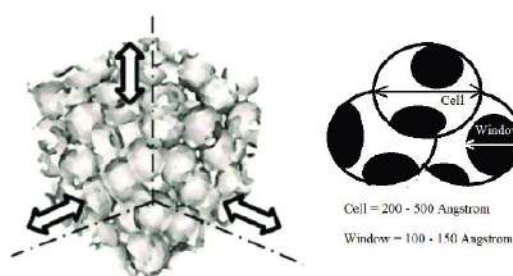


Figura 8: Celdas y ventanas tridimensionales en material de sílice MCF [adaptado de (Schmidt-Winkel et al. 1999)].

La EMS-15 se forma mediante la adición de un agente de hinchamiento hidrofóbico como el 1,3,5 trimetilbencenoxileno (TMB) en una cantidad suficientemente grande durante la síntesis de la SBA-15 para inducir una transformación de fase de simetría hexagonal altamente ordenada (P6mm) a la estructura ECM (Schmidt-Winkel, Glinka y Stucky 2000). La formación de materiales de tipo SBA es el resultado de la interacción de P123 (Pluronic 123), es decir, copolímero de bloque anfifílico (EOxPOyEOx) y especies silíceas inorgánicas a través del enlace de hidrógeno (Zhao et al. 1998).

IV.IV Técnicas de medición de conductividad térmica

Se conocen varios métodos para determinar la conductividad y difusividad térmicas de los materiales. La obtención de un porcentaje con bajo error (5%) conlleva una buena selección de la técnica de medición, es necesario tomar en cuenta diversos factores como los que se describen a continuación (Hechavarría Díaz, Delgado y Pazmiño 2016), (Zhao et al. 2016):

- 1) El conocimiento de la muestra cuyas propiedades termofísicas se determinarán, incluyendo la geometría, el tamaño de la muestra y el método de preparación del material.
- 2) Comprensión de los fundamentos y procedimientos de la técnica de prueba, puesto que, algunas técnicas presentan limitaciones con muestras con geometrías específicas y otras se limitan a un rango específico de propiedades termofísicas.
 - a. Por ejemplo, los métodos estacionarios son mayormente de larga duración y por ello no son convenientes para medir un gran número de muestras.
- 3) Comprensión de las posibles fuentes de error que podrían afectar los resultados finales, tal como, la convección y las pérdidas de calor por radiación.

Los métodos de medición de conductividad térmica de los materiales a granel y películas delgadas se clasifican en dos (métodos estacionarios y transitorios):

1. Los métodos de estado estacionario miden las propiedades térmicas al establecer una diferencia de temperatura que no cambia con el tiempo.
2. Las técnicas transitorias generalmente miden el proceso de disipación de energía dependiente del tiempo de una muestra.



IV.IV.I Caracterización térmica de material a granel

- Método de estado estacionario
- Método de hilo caliente transitorio
- Método de difusividad por destello láser
- Método de fuente de plano transitorio

El inconveniente que suelen presentar estas técnicas es que son demasiado grandes para medir la caída de temperatura y el flujo de calor en una escala de longitud que varía desde unos pocos nanómetros hasta decenas de micras. Por esta razón es que en los últimos años los investigadores han desarrollado técnicas para medir la conductividad térmica de materiales en forma de película delgada.

Para materiales a granel, la caída de temperatura a través de una interfaz se atribuye a la rugosidad de las superficies, la dureza de la superficie, las impurezas y la limpieza, la conductividad térmica de los sólidos acoplados y la presión de contacto. Por otra parte, para películas delgadas, la caída de temperatura a través de una interfaz se puede atribuir a la fuerza de unión y la diferencia de material. La resistencia de contacto térmico y la resistencia de límite térmico (o resistencia de Kapitza) se utilizan generalmente para describir la capacidad de conducción de calor de una interfaz en materiales a granel y películas delgadas.

Los materiales de película delgada se pueden unir sobre un sustrato, de forma independiente o en una pila de varias capas. Cuando el espesor de una película delgada es menor que la trayectoria libre media de sus portadores de calor, que son electrones y fonones dependiendo de si el material es conductor de electricidad o no, la conductividad térmica de las películas delgadas se reduce en comparación con sus contrapartes a granel debido a las restricciones geométricas.

La conductividad térmica de las películas delgadas generalmente depende del espesor y es anisotrópica, donde la capacidad de conducción de calor en la dirección perpendicular al plano de la película (plano transversal) es muy diferente de la paralela al plano de la película (en el plano). La conductividad térmica de las



películas delgadas también depende en gran medida del método de preparación (procesamiento) de los materiales y del sustrato sobre el que se asientan las películas delgadas (Zhao et al. 2016).

IV.IV.II Caracterización térmica de películas delgadas

- Método 3ω
- Técnica de termorreflectancia transitoria, incluye análisis tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

Método 3ω

La técnica de 3ω de Cahill utiliza una línea de metal microfabricada depositada sobre la muestra para que actúe como calentador / termómetro. Cuando se usa una señal de voltaje de corriente alterna (CA) para excitar el calentador a una frecuencia ω , el calentamiento periódico genera oscilaciones en la resistencia eléctrica de la línea de metal a una frecuencia de 2ω . A su vez, esto conduce a un tercer armónico (3ω) en la señal de voltaje, que se utiliza para inferir la magnitud de las oscilaciones de temperatura (Corbino 1911). La dependencia de la frecuencia de la amplitud de oscilación y la fase se puede analizar para obtener la conductividad térmica de la muestra.

La técnica 3ω reduce en gran medida la región afectada por el calor ya que la magnitud de las oscilaciones de temperatura decae exponencialmente alejándose del calentador de línea resistivo (Cahill y Pohl 1987). Además, los tiempos de equilibrio se reducen drásticamente porque la magnitud de las oscilaciones de temperatura alcanza el equilibrio dinámico en unos pocos ciclos de oscilación. Esta técnica se ha utilizado anteriormente para medir la conductividad térmica de una amplia variedad de materiales, incluidos varios dieléctricos (Cahill 1990; Lee y Cahill 1997), muestras porosas (Gesele et al. 1997) y materiales nanoestructurados, como

nanotubos de carbono (Hu et al.2006), y es muy adecuado para caracterizar materiales de bajo k utilizados en MEMS.

Termorreflectancia en el dominio del tiempo (TDTR).

TDTR utiliza pulsos de láser de picosegundos para calentar localmente la superficie de la muestra (Paddock y Eesley 1986; Chu et al. 2001). Los pulsos cortos depositan localmente una pequeña cantidad de energía en la muestra. La temperatura de la superficie de la muestra se infiere del cambio en la reflectancia de la superficie, que, en el límite de pequeños cambios de temperatura, depende linealmente de la temperatura de la muestra. En la **Figura 9** Se utiliza un segundo láser de sonda de baja potencia para detectar cambios en la reflectividad del material.

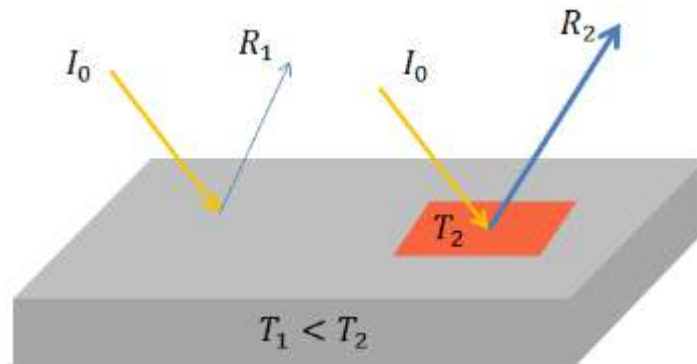


Figura 9.- Cambio de la intensidad debido a la temperatura.

La ventaja de esta técnica es que la profundidad de penetración térmica puede limitarse a decenas de nanómetros, dado un pulso de calentamiento lo suficientemente corto, lo que permite la medición directa de muestras de película delgada comúnmente utilizadas en microsistemas. Por otro lado, TDTR mide la difusividad térmica de la muestra; la conductividad térmica se puede inferir dada la capacidad calorífica volumétrica de la muestra. Además, el láser y el equipo óptico necesarios para TDTR hacen que esta sea una técnica relativamente costosa.



V. JUSTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA



En la actualidad, el consumo energético de los electrodomésticos representa un 25% del consumo total nacional mexicano, esto se relaciona con impactos negativos no sólo en el medio ambiente sino también en la salud de la sociedad.

El uso de la tecnología como facilitador en los quehaceres domésticos, ha provocado que la exposición a radiaciones electromagnéticas de diferentes tipos como las radiaciones ionizantes y las no ionizantes conlleven ciertos riesgos a la salud, dependiendo del tipo de radiación a la que se está expuesto.

Las normas internacionales consideran que los mecanismos implicados en afectar sistemas biológicos relacionan a los efectos térmicos inducidos por radiaciones no ionizantes. Un aumento en la temperatura puede afectar el funcionamiento de diversos sistemas biológicos de acuerdo con el incremento de temperatura, incluso podría ser irreversible si el grado es crítico. (Tchernitchin y Riveros [2004]). En este sentido, existe una problemática actual en los equipos electrodomésticos como son las lavadoras y secadoras, en donde el riesgo al utilizar estos equipos es que la temperatura alcanzada en la parte frontal (específicamente en la tercera parte inferior) puede llegar hasta los 80° C siendo un riesgo para los usuarios.

La estrategia actual para el aislamiento térmico de estos electrodomésticos es ineficiente, por esta razón, la nanotecnología ofrece una buena alternativa para la solución de este problema. El coeficiente de transferencia de calor puede reducirse de dos maneras con materiales basados en la nanotecnología. Algunos de ellos tienen una conductividad térmica menor que los materiales tradicionales, pero algunos otros materiales pueden reducir el coeficiente de transferencia de calor convectivo de la superficie aislada. En este caso, se busca ambas cuestiones mediante la síntesis del recubrimiento híbrido para reducir el coeficiente de transferencia de calor convectivo y a la vez reducir la conductividad térmica del material, obteniendo así mejor aislamiento térmico para los electrodomésticos y evitando posibles riesgos para los usuarios.



VI. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS



VI.I.- Hipótesis

La alta porosidad de las partículas nanoporosas de sílice EMS-15 dispersas en la solución de recubrimiento generará un material de recubrimiento con adecuadas propiedades de aislamiento térmico debido a que en los poros se almacena una gran cantidad de aire y se logrará el aislamiento térmico.

VI.II.- Objetivo General.

Desarrollar un recubrimiento híbrido con propiedades de aislante térmico.

VI.III. -Objetivos específicos

- Aplicar la metodología experimental para la obtención de esponja mesoporosa de sílice EMS-15
- Desarrollar la metodología experimental para la síntesis del recubrimiento con propiedades de aislamiento térmico
- Determinar las características texturales (área superficial, diámetro promedio de poro y volumen de poro) de la esponja mesoporosa de sílice EMS-15.
- Determinar el espesor del recubrimiento y la dispersión de las nanopartículas de la EMS-15 en el recubrimiento.
- Determinar la capacidad de aislamiento térmico de los recubrimientos.



VII. METODOLOGÍA

VII.I Síntesis de la esponja mesoporosa de sílice (EMS-15).

La EMS-15 se sintetizó de acuerdo al procedimiento descrito por (Flodström y Alfredsson 2003) y modificado por el Dr. Rufino Nava Mendoza y sus colaboradores [Resultados aún no publicados] utilizando el copolímero de tres bloques Pluronic (BASF, EO20-PO70-EO20, P123) como agente director de la estructura, tetraetil ortosilicato (TEOS, 98%, Aldrich) como la fuente de sílice y etil (trimetil) silano (MES) como un agente para la formación de la esponja (EMS-15).

A continuación, en la **Figura 10** se muestra un esquema del procedimiento llevado a cabo para sintetizar EMS-15:

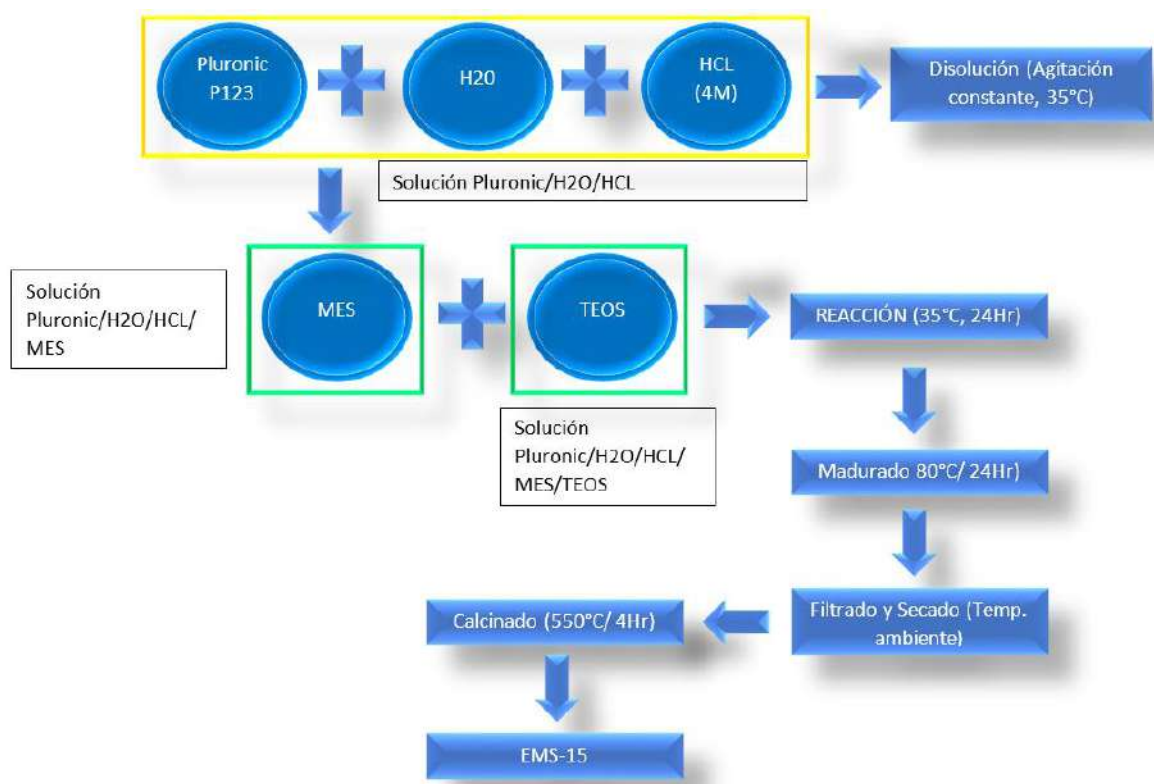


Figura 10.- Esquema del procedimiento de síntesis de la EMS-15

El proceso de hidrólisis comienza con el agente director de la estructura Pluronic P-123, un exceso de H₂O y HCL (4M) como catalizador, se mantiene en agitación constante hasta tener una solución homogénea (aproximadamente 50 min). En el paso uno de la **Figura 11** se muestra el comienzo de la disolución:



Figura 11.- Procedimiento llevado a cabo para la obtención de la EMS-15.

El segundo paso es el comienzo de la policondensación de nuestro material, por ende, se añadió gota a gota el precursor o fuente de sílice (TEOS) y el agente de formación MES (tensoactivo), el aspecto de la solución pasó de turbio a una solución blanquecina ya que se logró formar el gel después de las 24 hrs en agitación constante (paso tres de la **Figura 11**).

Después se realizó el madurado de la solución a 80°C durante 24 horas para la eliminación de la humedad causada por agua y alcohol. Continuó el proceso con el filtrado del gel denso obtenido y se realizaron lavados con agua desionizada para



reducir el pH ácido y acercarlo a un pH neutro. Antes de realizar el calcinado de la muestra durante 4 hrs a 550 °C para eliminar el molde orgánico (P123 y MES), se dejó secar algunos días a temperatura ambiente la materia obtenida con el fin de controlar y evitar la formación de grietas y destrucción del material (el proceso fue lento debido a la humedad del ambiente). Se obtuvieron 6.35 gr de la EMS-15 después de tres repeticiones de síntesis.

VII.II Preparación del recubrimiento híbrido Sílice-Vinílico-EMS-15.

Primero se preparó una solución mediante el proceso Sol-Gel del recubrimiento híbrido base Sílice-Vinílico.

A manera de resumen en la **Figura 12** se muestra el esquema de preparación del recubrimiento híbrido Sílice-Vinílico-EMS-15. El VTMS (viniltrimetóxisilano) se disolvió en metanol (MeOH), en agitación vigorosa por 10 minutos. Posteriormente, a esta solución se le adiciono lentamente la cantidad adecuada de MPTMS (mercaptopropiltrimetóxisilano), en agitación por 10 minutos. Entonces, se adicionó a esta solución el agua desionizada acidulada con HCl a pH de 2.0, en agitación y por 10 minutos.

A la solución anterior, se le adicionó la cantidad adecuada de la EMS-15. Con lo cual obtuvo la suspensión de recubrimiento.

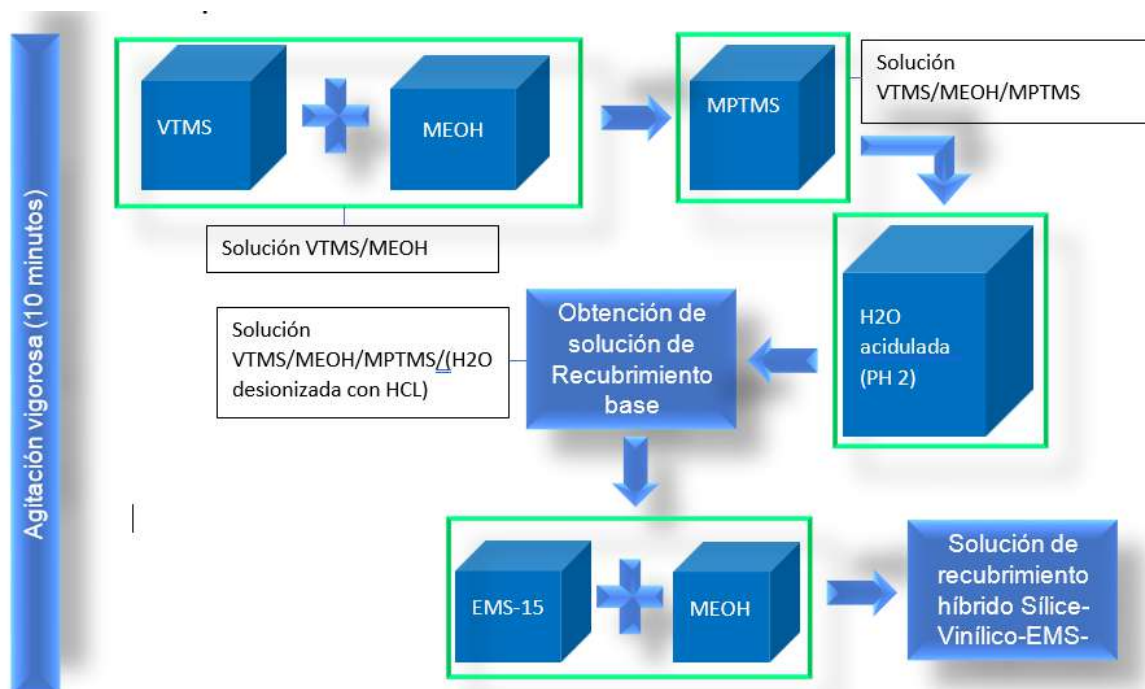


Figura 12.- Esquema de preparación del recubrimiento híbrido Sílice-Vinílico-EMS-15.

VII.III Procedimiento para depositar el recubrimiento.

Para poder depositar los recubrimientos se empleó la técnica de inmersión-extracción, conocido como dip-coating, dicho procedimiento es esquematizado en la **Figura 13**. Con la suspensión preparada con anterioridad, se realizaron los recubrimientos de las superficies de las placas de acero inoxidable de 10 cm de largo por 5 cm de ancho.

Las variantes en algunos de los recubrimientos fue el tiempo de residencia de la placa en la suspensión de recubrimiento (es decir, de entrada, por salida); Las placas fueron recubiertas por ambas caras.

Finalmente, los materiales recubiertos fueron sometidos a un tratamiento térmico a 80°C por 20 minutos.

De esta manera se obtuvieron las placas recubiertas.

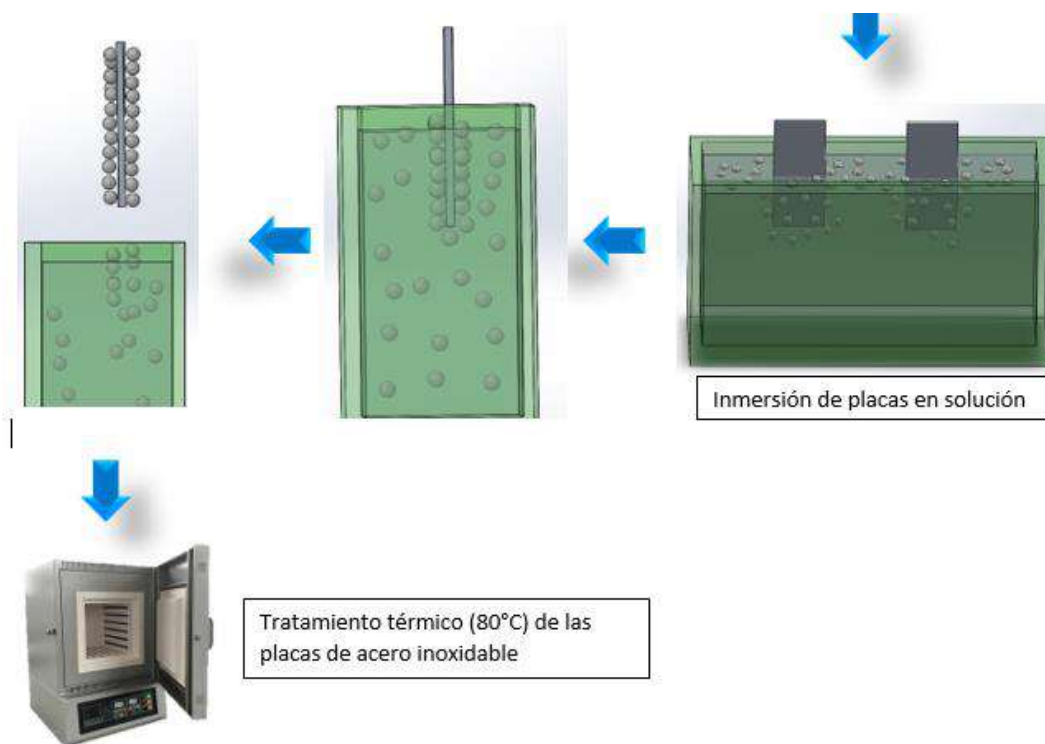


Figura 13.- Procedimiento para la depositar el recubrimiento.

VII.IV Caracterización de la esponja mesoporosa de sílice EMS-15.

Con el fin de obtener información sobre las propiedades texturales (área superficial, diámetro y volumen de poro); la formación de los mesoporos y la morfología y tamaño de las partículas, la esponja mesoporosa de sílice (EMS-15) fue caracterizada mediante las Isotermas de adsorción-desorción de N₂ a 77K (SBET), Difracción de Rayos-X (DRX) a bajos ángulos y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) (Scott E. McNeil 2011).

VII.V Metodología para determinación del comportamiento térmico de los recubrimientos.

Las mediciones del comportamiento térmico de los recubrimientos se realizaron utilizando un arreglo que fue desarrollado en el laboratorio, el cual se muestra esquemáticamente en la **Figura 14**. El sistema consiste en una fuente de

calor por convección forzada de aire caliente, una caja de acrílico con placas de unicel para ayudar a mantener el calor dentro de la caja y dos termopares para medir la temperatura de las placas con el recubrimiento en cuestión.

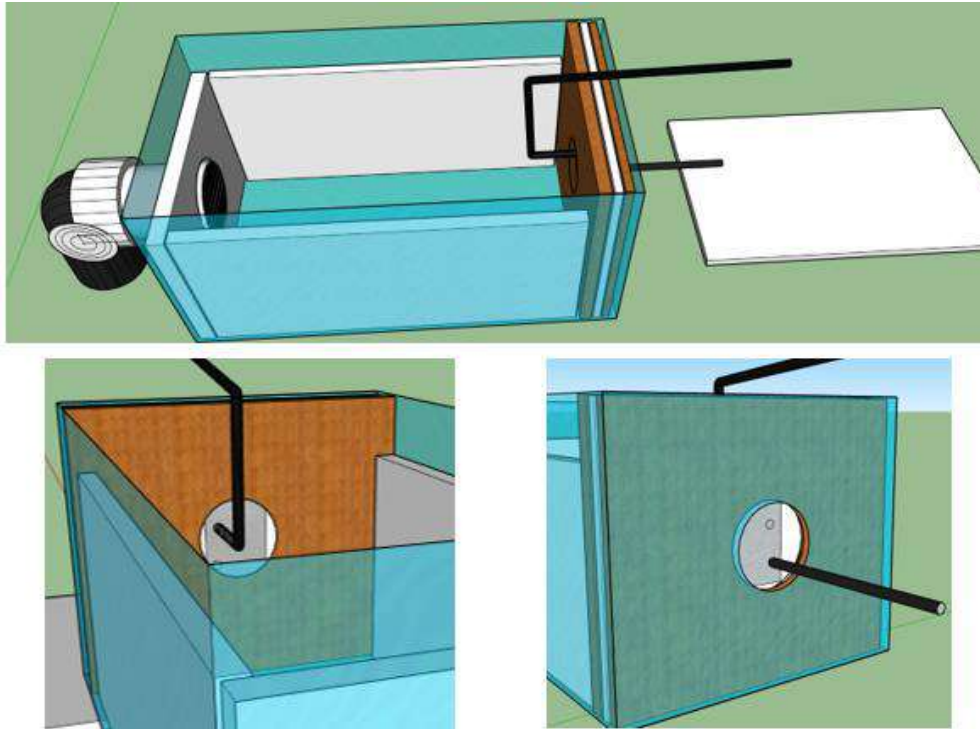


Figura 14.- Sistema de medición del aislamiento térmico esquematizado.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



INGENIERÍA EN
NANOTECNOLOGÍA

VIII. RESULTADOS

VIII.I Caracterización textural de material utilizado para desarrollo de recubrimientos.

VIII.I.I Isotermas de adsorción-desorción de N₂ a 77 K.

En la **Figura (15a)**, se presenta la isoterma obtenida de adsorción-desorción de N₂ de la EMS-15. Se exhibe un isoterma de adsorción del tipo IV (**Figura (15b)**), encontrado de forma general en materiales mesoporosos. La diferencia entre la curva de adsorción y desorción de la isoterma genero un ciclo de histéresis, es decir que hubo una adsorción física en multicapas en la isoterma. En este sentido, la forma del ciclo de histéresis de la EMS-15 es H1 de acuerdo a la clasificación de la IUPAC (Sing et al. 2008), (Juan Demetrio Cristóbal García 2015, p. 28); revelando un efecto de condensación capilar en los poros de la superficie del adsorbente, asociado con sólidos mesoporosos.

La isoterma de la EMS-15 muestra una región amplia en el rango de presiones relativas ($0.45 < P/P_0 < 0.95$), que indican la presencia de mesoporos con una distribución relativamente amplia en diámetro y sin arreglo en los mismos. La curva de adsorción-desorción de nitrógeno del material es similar a lo reportado en la literatura para el material EMS-15 derivada de SBA-15 (Ma et al. 2015).

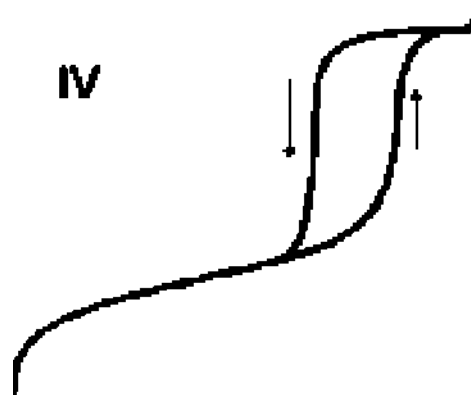
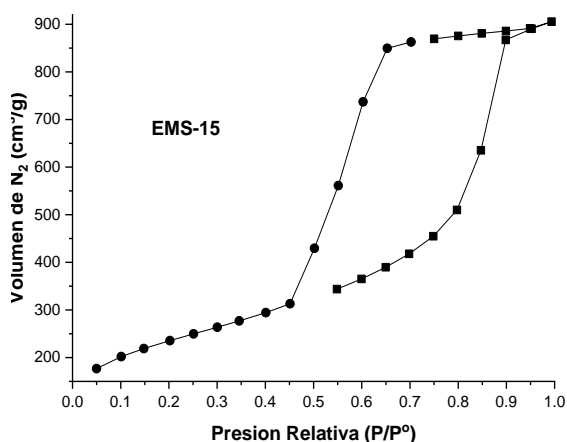


Figura 15a. Isotherma de adsorción-desorción de N₂ a 77 k de la EMS-15.

Figura 15b. Isotherma tipo IV de acuerdo a la clasificación de la IUPAC (Juan Demetrio Cristóbal García 2015, p. 28)

De manera posterior, se presenta la distribución del tamaño de poro de la EMS-15 (Figura 16). Esta se calculó con los datos de la isoterma de desorción mediante el método B.J.H.

La EMS-15 pura muestra una distribución de 40 a 70 nm en el tamaño de poro centrado aproximadamente en 50 nm.

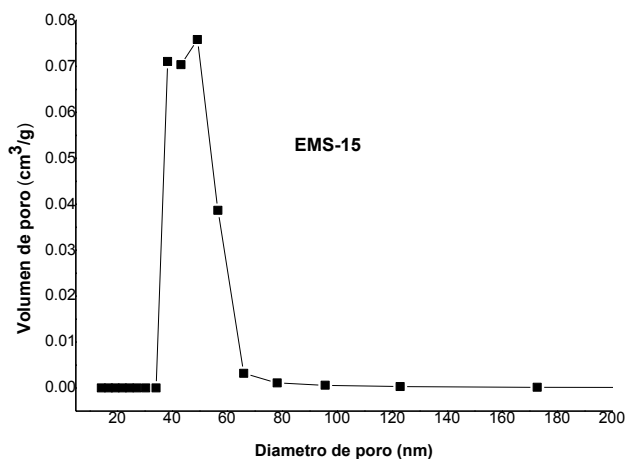


Figura 16. Distribución del diámetro de poro de la EMS-15.

En la **Tabla 4** se presentan las propiedades texturales (el área superficial, volumen promedio de poro y diámetro de poro) de la EMS-15.

Tabla 4. Propiedades texturales del material empleado para los recubrimientos

Material	Área superficial (m ² /g)	Volumen de poro (cm ³ /g)
EMS-15	816.20	1.40

VIII.I.II Difracción de Rayos-X (DRX)

A continuación, se muestra el patrón de difracción de rayos-X a bajos ángulos de la esponja de sílice mesoporosa EMS-15:

La **Figura 17** muestra el patrón de difracción de rayos-X a bajos ángulos de la esponja de sílice mesoporosa EMS-15. En ella se presentan dos reflexiones muy intensas centradas en aproximadamente 0.30° y 0.40° en 2θ, indicando la presencia de grandes poros en el rango mesoporoso (20-40 nm de diámetro), pero sin arreglo en los mismos. Este resultado está de acuerdo con lo reportado por (Ma et al. 2015), para una esponja de sílice mesoporosa.

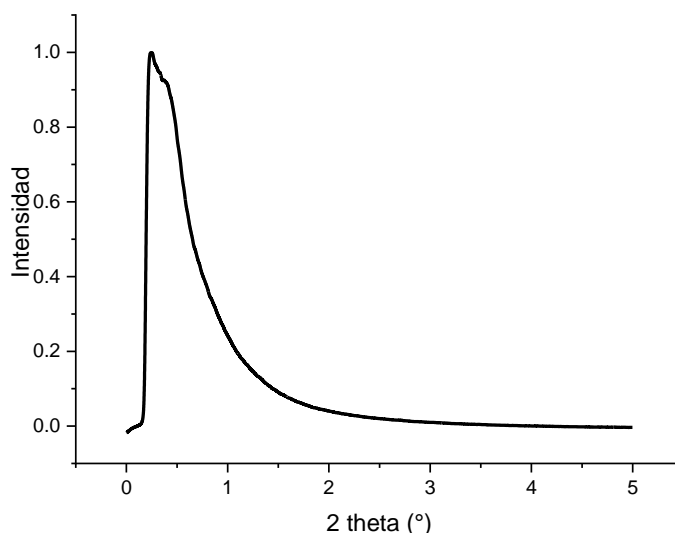


Figura 17. Patrón de difracción de rayos-x a bajos ángulos de la EMS-15.

También fueron incluidos los patrones de difracción de rayos-X a altos ángulos de la EMS-15 en la **Figura 18**. Se puede observar una reflexión amplia centrada en aproximadamente $2\theta = 24^\circ$ característica de la sílice amorfa (SiO_2).

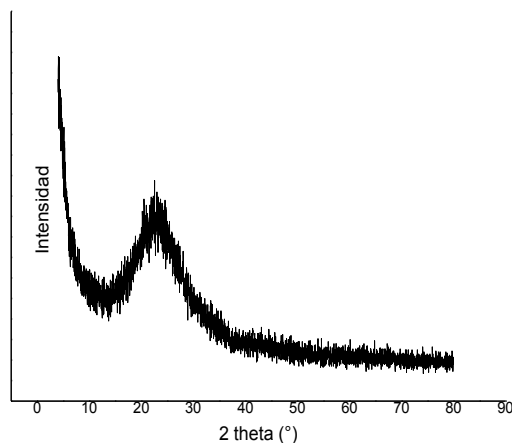


Figura 18. Patrón de difracción de rayos-x a altos ángulos de la esponja mesoporosa de sílice EMS-15.

VIII.I.III Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

A partir de la caracterización mediante SEM, fueron obtenidas las siguientes imágenes de la EMS-15 pura:

La **Figura 19** exhibe la imagen de SEM de la esponja mesoporosa de sílice EMS-15. En la **Fig. 19A** se evidencia que las partículas de nuestro material EMS-15 tiene la forma de esferas de tamaño altamente uniforme, de aproximadamente $3.5 \mu\text{m}$ de diámetro

Además, en la **Fig. 19B** se aprecia un material altamente poroso, es decir, con una alta cantidad de cavidades, con un diámetro entre 20-30 nm y un espesor de pared de aproximadamente 18 nm. Por ende, este material corresponde a una esponja de sílice mesoporosa.

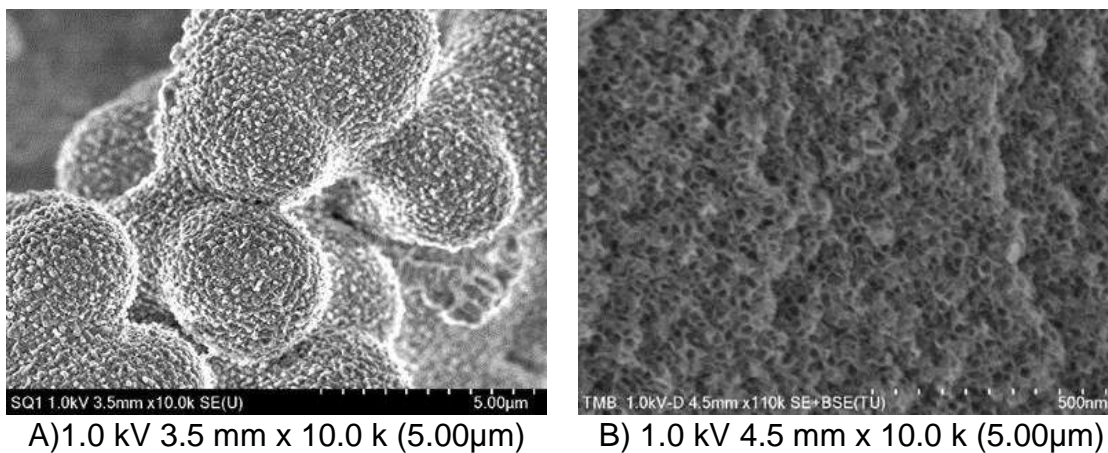


Figura 19. SEM de la EMS-15 A) Demuestra la morfología de la EMS-15 B) Porosidad de la EMS-15, (alta cantidad de cavidades) (JOSÉ CARLOS OLVERA OLVERA 2020)

VIII.I.IV Microscopía Electrónica de Transmisión de Alta Resolución (HRTEM)

A continuación, se muestra el HRTEM de la EMS-15 (ver **Figura 20**):

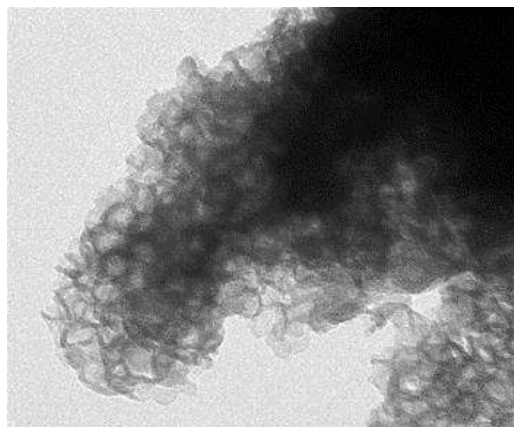


Figura 20. HRTEM de la esponja mesoporosa de sílice EMS-15 (José Carlos Olvera Olvera 2020).

La **Figura 20** demuestra que la EMS-15 corresponde a una estructura de esponja mesoporosa con cavidades de diámetro en 20-30 nm y que concuerda con la estructura reportada en la literatura (Chen et al. 2011).

VIII.II Caracterización de recubrimientos mediante microscopía electrónica de barrido (SEM)

Con fines comparativos se muestra a continuación la caracterización de los recubrimientos mediante SEM, en la **Figura 21a**, se presenta la caracterización mediante SEM del recubrimiento base (Rb) con partículas de la EMS-15 sobre las placas de acero inoxidable, donde podemos observar la morfología y crecimiento del recubrimiento, donde se confirma que la película delgada es de forma aparente homogénea, ya que tiene ciertas grietas ocasionadas por el proceso de curado del material (80 °C durante 30 minutos) y el sometimiento de las placas a mayor temperatura en las mediciones de transferencia de calor (aproximadamente 112°C). En cuanto a la dispersión de las partículas de la EMS-15 sobre el recubrimiento podemos apreciar que está presente en toda la placa en pequeños cúmulos. En la **Figura 21b** es medido el espesor de la película delgada presente en la placa metálica, en este caso está en un rango de espesor entre 71.6 μm y 84.2 μm .

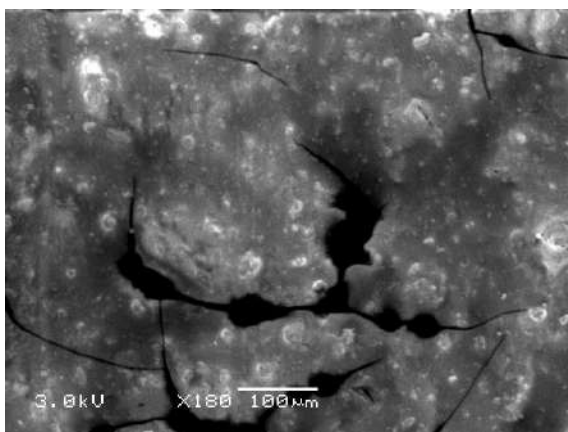


Figura 21a.- SEM de recubrimiento base con partículas de la EMS-15 sobre las placas de acero inoxidable

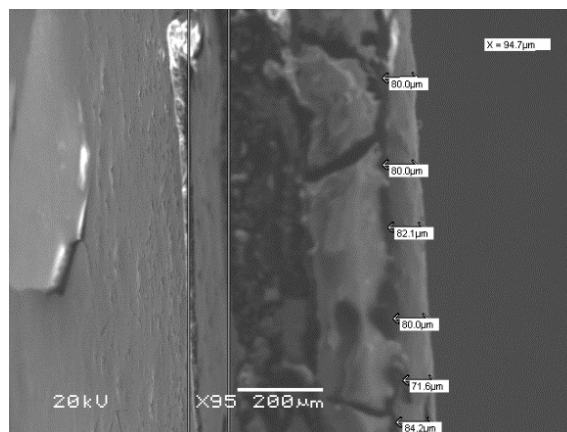


Figura 21b.- SEM de vista transversal de recubrimiento base con partículas de la EMS-15 sobre las placas de acero inoxidable

En la **Figura 22^a**, se confirma la presencia y la morfología de las esferas huecas de PMMA en el recubrimiento base con las partículas de la EMS-15. También se puede apreciar que la fractura del recubrimiento es mayor comparada con el recubrimiento anterior sin PMMA, esto como consecuencia del incremento de exposición térmica de las placas, es decir, que a cada capa de material fue aplicado el curado, el primer curado fue para generar la capa de Rb+EMS-15 y se aplicó otro para adicionar otra capa de esferas huecas de PMMA. En la **Figura 22b** confirmamos que el espesor del recubrimiento está entre 34.1 μm y 41.6 μm . En este sentido, representa la mitad en cuanto al espesor de la película delgada del recubrimiento pasado de la **Figura 21b**, esto se atribuye al uso de $\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$ donde se dispersaron las esferas huecas de PMMA.

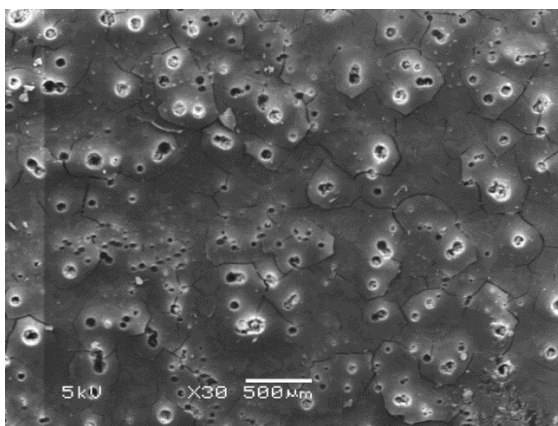


Figura 22a.- SEM de recubrimiento base con partículas de la EMS-15 y esferas huecas de PMMA sobre las placas de acero inoxidable (curado a 50 °C)

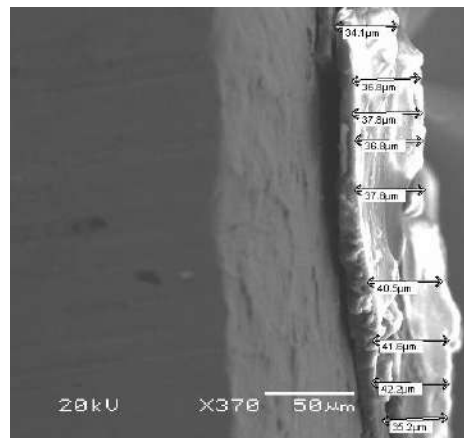


Figura 22b.- SEM de vista transversal de recubrimiento base con partículas de la EMS-15 y esferas huecas de PMMA sobre las placas de acero inoxidable (curado a 50°C)

En la **Figura 23a**, se muestra una zona de la placa metálica con un elevado número de esferas huecas, lo cual tuvo efecto en el espesor de la capa obtenida entre 82.5 μm y 122 μm (ver **Figura 23b**), la tendencia del incremento del espesor también es

ligado la velocidad de condensación de la solución a la cual fue sumergida la placa para recubrirla. Se hace notar que la rapidez de extracción de la muestra también es considerada un punto crítico que conlleva la homogeneidad final obtenida por la película delgada.

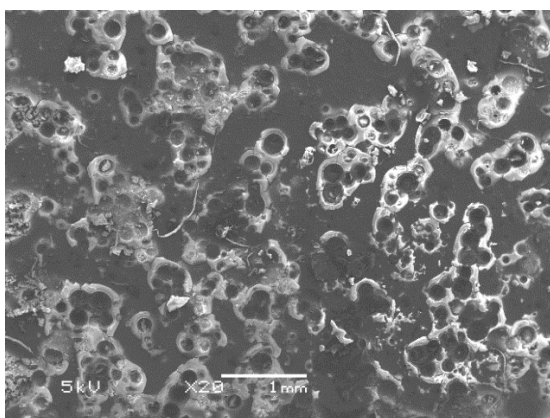


Figura 23a.- SEM de recubrimiento base con partículas de la EMS-15 y esferas huecas PMMA sobre las placas de acero inoxidable (curado a 90 °C)

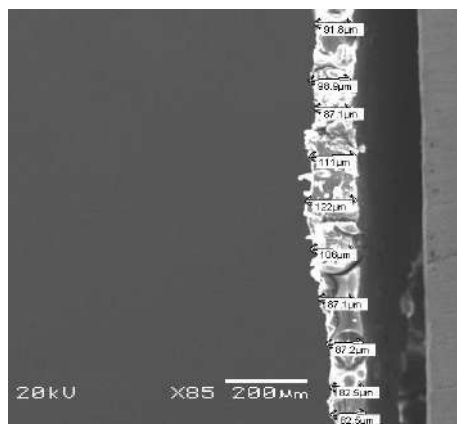


Figura 23b.- SEM de vista transversal de recubrimiento base con partículas de la EMS-15 y esferas huecas de PMMA sobre las placas de acero inoxidable (curado a 90 °C)

VIII.III Caracterización de recubrimientos mediante HRSEM (Microscopía electrónica de barrido de alta resolución)

En la **Figura 24**, se muestra la morfología superficial de la placa metálica, donde se aclara el comportamiento del crecimiento del recubrimiento Rb, los surcos rectos mostrados en esta imagen fueron ocasionados por la preparación de la placa metálica al lijarla para favorecer a la adherencia mecánica de los recubrimientos. Se hace notar que la superficie de la placa tiene ciertos desniveles, lo cual explica la afinidad de concentración en ciertas zonas de las partículas en la placa junto con el recubrimiento aplicado.

Para el recubrimiento base (Rb) con cinco minutos de residencia, la **Figura 25** no se pudo obtener una imagen tan nítida debido a la naturaleza orgánica del recubrimiento Rb.

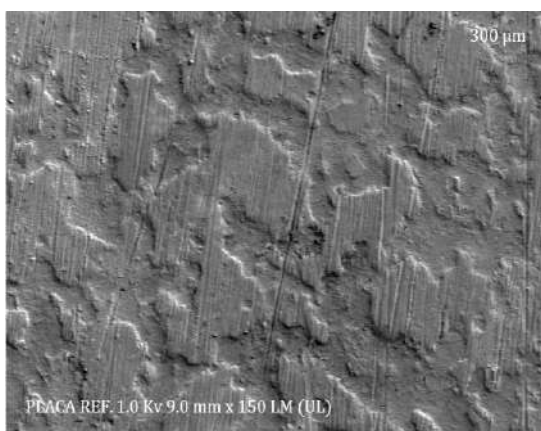


Figura 24.- HRSEM de placa de acero inoxidable sin recubrimiento



Figura 25.- HRSEM de recubrimiento base (RB) con 5 min de residencia sobre las placas de acero inoxidable

En la **Figura 26 y 27**, con HRSEM se reafirma la presencia de la EMS-15 así como su morfología en las placas metálicas. Se destaca que, en la **Figura 27** a pesar de tener presente la EMS-15 entre dos capas de recubrimiento Rb, se sigue obteniendo una imagen nítida de las partículas.

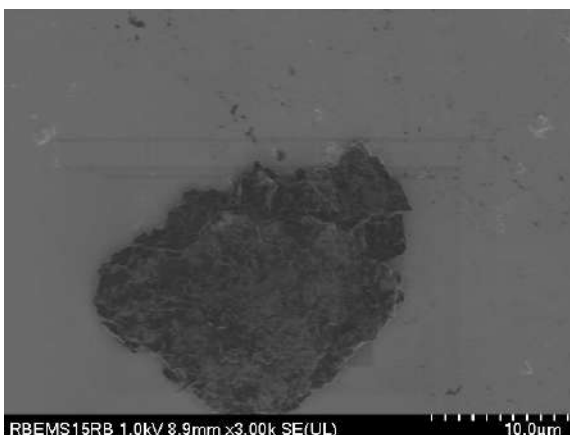
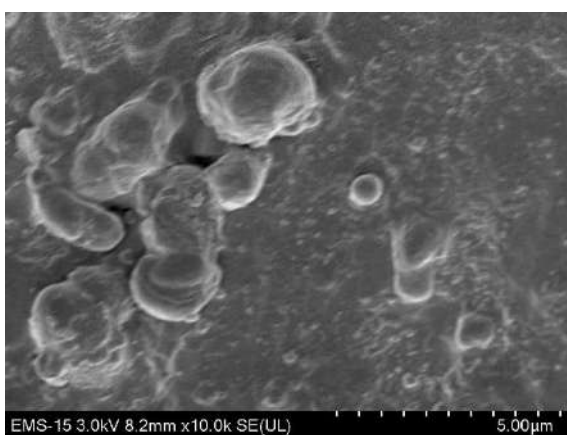


Figura 26.- HRSEM de la EMS-15 sobre las placas de acero inoxidable

Figura 27.- HRSEM de Rb+EMS-15+Rb sobre las placas de acero inoxidable

Por último, en la **Figura 28** se examina la morfología del recubrimiento de alúmina (Al_2O_3) mesoporosa, en donde podemos destacar su adherencia a la placa metálica, puesto que no se necesitó de manera inicial el recubrimiento base para mantener las partículas dentro de la placa metálica, así como el crecimiento homogéneo de las partículas.

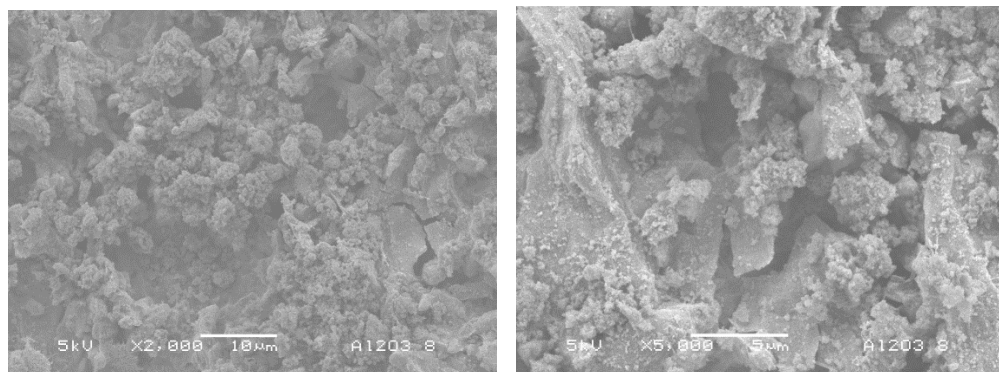


Figura 28.- SEM de Al_2O_3 mesoporosa sobre las placas de acero inoxidable

VIII.IV Medición de comportamiento térmico en placas de acero inoxidable

VIII.IV.I En aceite como fuente de calor

Se realizaron algunas pruebas calentando todas las muestras en aceite, con la finalidad de tener un calentamiento homogéneo en las placas. Se colocaron dos sensores de temperatura para realizar las mediciones, uno para obtener la temperatura alcanzada por el aceite (termómetro de mercurio) y otro directo en un extremo de la placa (termopar). De esta manera se obtuvo el ΔT de ambos sistemas.

El comportamiento térmico del sistema de medición respecto a los cambios aplicados en el transcurso del tiempo es mostrado en las **Figuras 29-32**.

La **Figura 29a y 29b** representa la prueba de transferencia de calor a la placa metálica sin recubrir (referencia) por efecto de calentamiento del aceite, en la cual la placa se encontraba sumergida. El tiempo de calentamiento fue alrededor de 175 hrs. En la **Figura 29a** se puede observar que, cuando se asegura el contacto físico del termopar con la superficie de la placa sin recubrimiento, incrementa la temperatura registrada por el sensor. Además, con el objetivo de disminuir pérdidas de calor dentro del sistema de medición, se cubrió este con fibra de vidrio, consiguiendo de esta forma aumentar la temperatura registrada por el termopar aún más. En la **Figura 29b** se puede observar que la temperatura máxima alcanzada por la placa metálica de referencia en las últimas 31.79 hrs de la prueba fue de 63.44°C, mientras que la temperatura alcanzada por el aceite fue de 112°C. La breve reducción mostrada de forma posterior a la temperatura máxima se debió al cambio de temperatura ambiental. Por lo que se observa un ΔT de 48.56 grados.

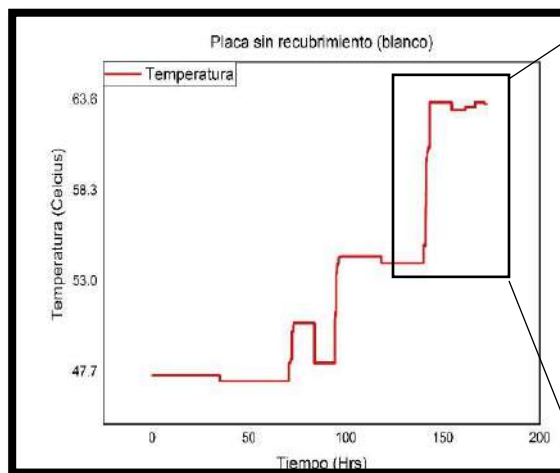


Figura 29a. Placa sin recubrimiento (blanco)

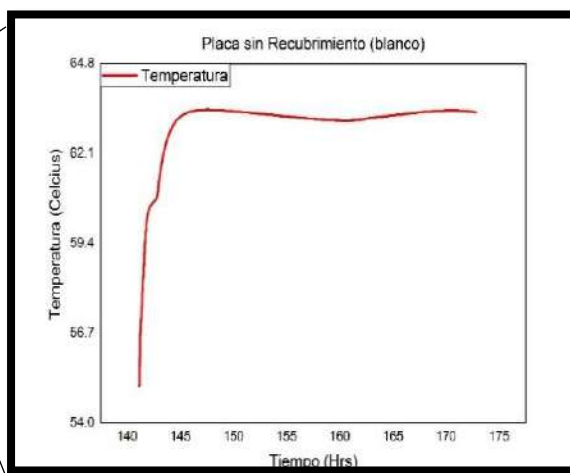


Figura 29b. Placa sin recubrimiento (blanco) en las últimas 31.79 hrs de la prueba

En la **Figura 30** se muestra el comportamiento del recubrimiento base (Rb) con la incorporación de las partículas de la EMS-15, obteniendo una película, este recubrimiento de la placa metálica alcanzó una temperatura de 63.44°C en un lapso de 3.06 hrs, 0.23 hrs más de diferencia respecto a la placa blanco en sus últimas

31.79 hrs (esto es sin recubrimiento), y la temperatura máxima alcanzada fue de 63.83°C en 27 hrs continuas de calentamiento (la temperatura alcanzada por el aceite fue de 118°C). Lo cual indicó una mejora poco significativa cuando se recubrió la placa, en referencia a la placa metálica pura (blanco).

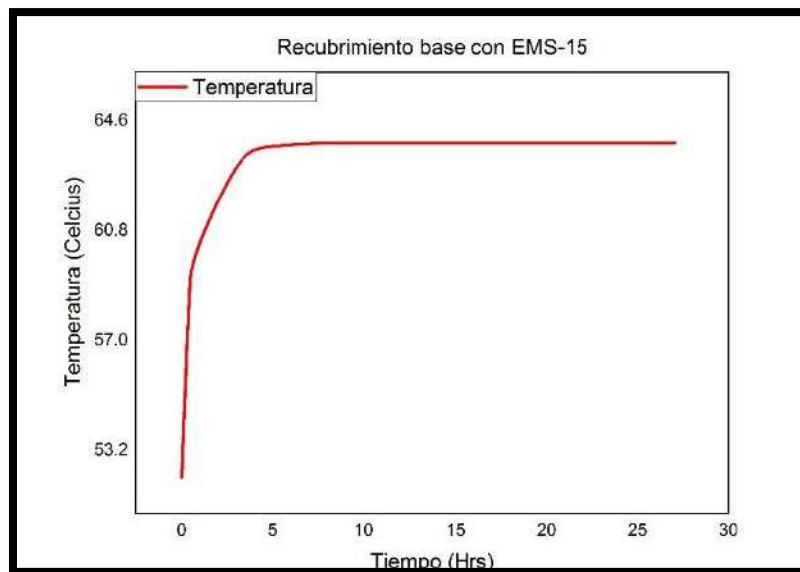


Figura 30.- Recubrimiento base con EMS-15

La **Figura 31** se presenta el recubrimiento base con partículas de la EMS-15 y esferas huecas de PMMA (aplicando un curado a 90°C), para este recubrimiento mixto, se obtuvo una temperatura máxima de 65.05°C en 1.6 hrs, -1.23 hrs comparado con la placa blanco. Este se calentó durante 23 hrs continuas y el aceite registro una temperatura de 118.5°C). Por ende, no se obtuvo una mejora en cuanto aislamiento térmico comparado con la placa metálica de referencia. Este resultado se considera como un error de medición, puesto que, durante la prueba el termopar no tenía un adecuado contacto físico con la superficie de la placa metálica con el recubrimiento mixto.

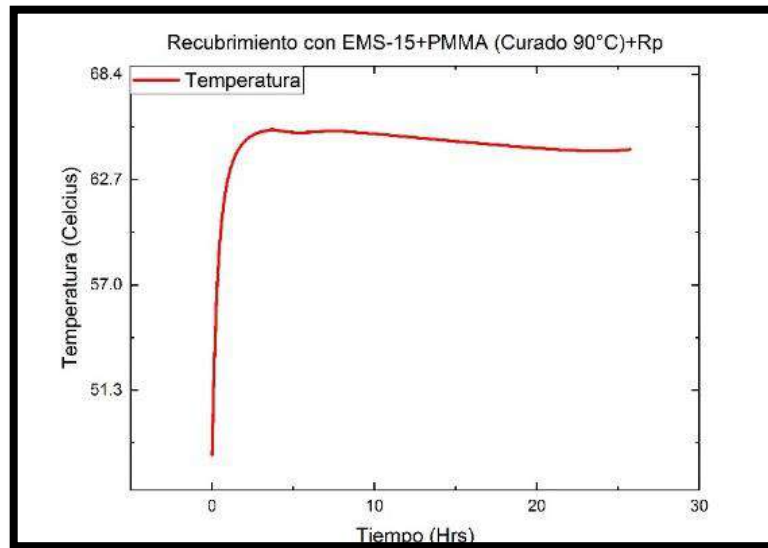


Figura 31.- Recubrimiento de la EMS-15 y PMMA (curado a 90°C)

En la **Figura 32** se muestra el mismo material de la **Figura 31** pero un curado de 50°C, para este recubrimiento se obtuvo una temperatura máxima de 65.0°C en 6.68 hrs, se calentó durante 47.28 hrs continuas y el aceite registro una temperatura de 119°C. En este caso, la incorporación de las esferas huecas de PMMA no promovió mejora en el recubrimiento, cabe mencionar, que, de acuerdo con las micrografías obtenidas por SEM para esta muestra, se observó que las esferas huecas de PMMA se habían colapsado probablemente por el tiempo de exposición a la temperatura a la que se sometió la muestra. Esto se puede observar en las **Figuras 22a y 23a**.

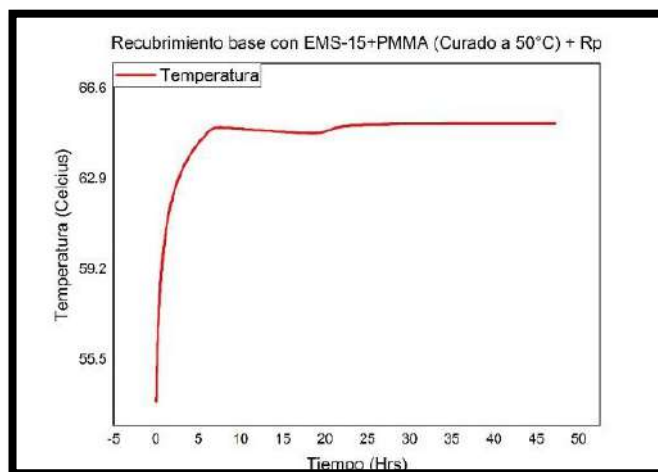


Figura 32. Recubrimiento con EMS-15 y esferas huecas de PMMA (CURADO A 50°C)

VIII.IV.II TGA (Análisis Termogravimétrico)

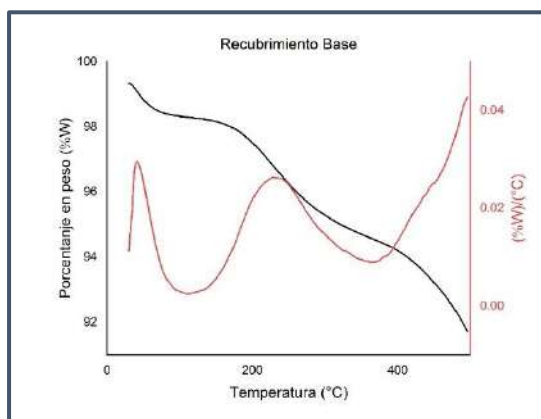


Figura 33. TGA de recubrimiento base (Rb).

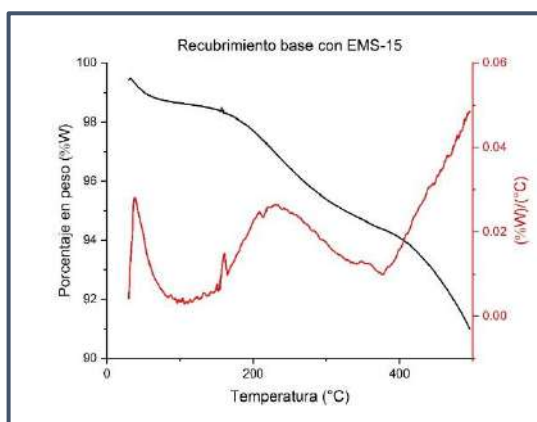


Figura 34. TGA de la EMS-15 con recubrimiento base.

De acuerdo con los gráficos obtenidos mediante análisis termogravimétrico (**Figura 33** y **34**), se llevó a cabo la descomposición térmica de los recubrimientos con formación de productos de reacción volátiles debido al tratamiento térmico que se le da a la muestra, en el cual se realiza un incremento de temperatura, los enlaces



químicos de los compuestos orgánicos se rompen y forman dióxido de carbono o monóxido de carbono, lo cual está relacionado con la pérdida de peso registrada en los termogramas de las **Figuras 33 y 34**. Los termogramas se ven muy similares para ambas muestras, en estos la primera pérdida de peso está relacionada con la pérdida de agua y la segunda con los compuestos orgánicos, la tercera probablemente con compuestos carbonáceos atrapados en la muestra.

VIII.IV.III (Aire segregado por una secadora como fuente de calor)

Se realizó un cambio en la fuente de calor utilizando una secadora, para medir la transferencia de calor en los recubrimientos realizados, esto con el fin de evitar la contaminación y destrucción de los recubrimientos (como fue en el caso del aceite), en este caso se emplearon termopares para medir la temperatura, un termopar se colocó en contacto directo con el recubrimiento por la parte interior de la caja de acrílico (dispositivo usado para controlar el intercambio de calor), mientras otro fue colocado en la parte de atrás de la placa la cual estaba externa a la caja de acrílico, esto es en contacto con el medio exterior. Las placas se calentaron por 5 o 6 minutos continuos antes de desconectar la fuente de calor (secadora) y medir la velocidad de enfriamiento.

En la **Tabla 5** se muestran las características generales de las placas recubiertas con los diferentes materiales, a saber, tiempo de residencia (es el tiempo de exposición de la placa en la solución muestra para formar la película), Tiempo de calentamiento (tiempo de exposición de las placas recubiertas con la secadora), Temperatura interna durante el calentamiento (temperatura de lectura del termopar en contacto directo con la película de recubrimiento en la placa al interior del dispositivo elaborado para medir las diferencias de temperatura, caja de acrílico), Temperatura externa durante el calentamiento (temperatura de lectura del termopar en contacto directo con la placa por la parte de atrás de la placa, parte externa del dispositivo elaborado para medir las diferencias de temperatura, esto es parte externa de la caja), Tiempo de enfriamiento (está relacionado con el tiempo que le tomo a la placa llegar a una temperatura baja cercana a la ambiente), Temperatura



Interna durante el enfriamiento (Temperatura a la cual llego la placa con el recubrimiento durante el tiempo de enfriamiento en la parte interior del dispositivo), Temperatura Externa durante el enfriamiento (Temperatura a la cual llego la placa por la parte exterior de dispositivo durante el tiempo de enfriamiento).

Tabla 5.- Comportamiento térmico de los recubrimientos realizados

Recubrimiento (muestras)	Tiempo de Residencia (min)	Tiempo de calentamiento (min)	Temp. Interna (°C) durante el calentamiento	Temp. Externa (°C) durante el calentamiento	Tiempo de enfriamiento (min)	Temp. Interna (°C) durante el enfriamiento	Temp. Externa (°C) durante el enfriamiento
Blanco	0	3	103	97	33.5	31.5	30.5
Rb	0	5.5	105.7	99.9	25	37.6	36.9
Rb	5	5.5	104	96.3	29.5	36.2	35.1
EMS-15	0	5	113.3	104	28.5	39	37.7
Rb + EMS-15 + Rb	0	6.5	103.5	92.1	24	38.6	37.7
Al ₂ O ₃	0	6	99.7	95.3	26	39.1	38.1
Al ₂ O ₃	3	4.5	106.3	100.2	20	36.7	35.9

En la primera muestra (Blanco) se refiere a una placa sin recubrimiento, la cual se usó como referencia para determinar cómo era el comportamiento de ésta y compararla con las placas con recubrimiento, ver **Figura 35**. Esta fue calentada durante 3 min, la temperatura que alcanzó durante ese tiempo fue de 103 °C en la zona interna del dispositivo mientras que la zona externa alcanzo una temperatura de 97 °C, es decir, se alcanzó un $\nabla T = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$. En cuanto al enfriamiento, esta placa sin recubrimiento tardo 33.5 minutos para regresar a una temperatura de 31.5 °C en la zona interna y 30.5 °C en la externa.

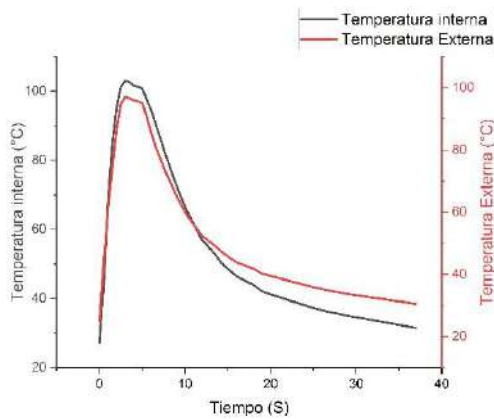


Figura 35.- Comportamiento térmico de placa sin recubrimiento base (Rb) (referencia)

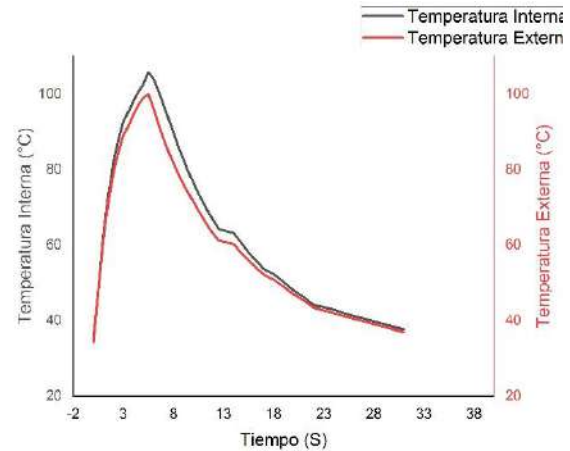


Figura 36.- Comportamiento térmico de placa con recubrimiento base (Rb) sin tiempo de residencia

El comportamiento térmico de la placa metálica con recubrimiento base (Rb), se muestran en las **Figuras 36 y 37**, la diferencia en estas muestras es el tiempo de residencia la cual es de 0 y 5 min (con el tiempo de residencia se obtiene una película de una sola capa o más capas, esto es con mayor espesor). Ambas placas alcanzaron su temperatura máxima en 5.5 minutos, en la **Figura 36** se obtuvieron 105.7 °C en la parte interna y 99.9 °C en la zona externa, presentando un $\nabla T = 5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$., en cambio en la **Figura 37** se obtuvieron 104 °C en la parte interna y 96.3 °C en la zona externa, teniendo un $\nabla T = 7.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Con esto nos damos cuenta de que, con tan solo aplicar el recubrimiento base casi se duplicó el tiempo necesario para alcanzar su temperatura máxima, si éstas se comparan con la placa sin recubrir (blanco).

Con respecto al tiempo de enfriamiento de las placas recubiertas con Rb, en la **Figura 36**, se puede observar que el tiempo de enfriamiento tomo 25 minutos, para llegar a la temperatura de 37.6°C en la zona interna (dentro de la caja) y 36.9°C en la zona externa. El recubrimiento base (Rb) tiene un comportamiento similar cuando está en una capa o varias capas (tiempo de exposición 0 o 5 min), como se puede ver en el gráfico en la **Figura 37**, donde el tiempo que le tomo enfriarse a la

placa fue de 29.5 minutos para alcanzar los 36.2 °C en la zona interna (dentro de la caja), mientras la zona externa llego a 35.1°C.

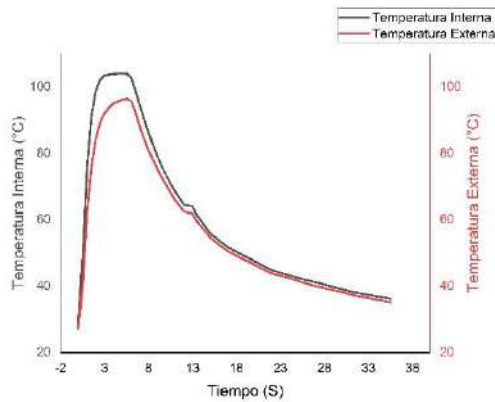


Figura 37.- Comportamiento térmico de placa con recubrimiento base (Rb) y cinco minutos de residencia

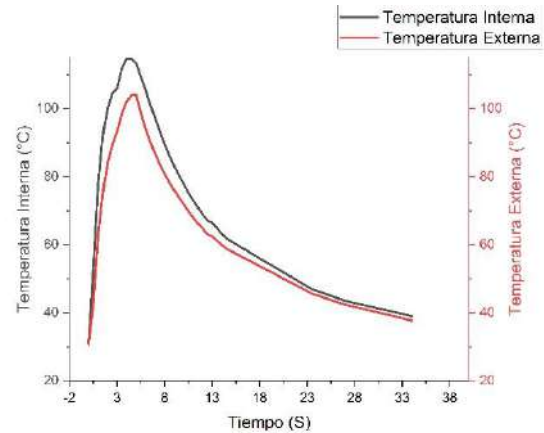


Figura 38.- Comportamiento térmico de placa con la EMS-15 sin recubrimiento base (Rb)

En la **Figura 38**, se muestra el comportamiento de la placa con recubrimiento de la EMS-15 pura, esto es, sin recubrimiento base (Rb). De la figura se puede apreciar la placa alcanzo una temperatura de 113.3°C en el pate interna y de 104°C en la parte externa, cuando se expuso por 5 minutos de calentamiento, obteniendo un $\nabla T = 9.4$ °C. Si se compara con la placa sola sin recubrimiento (blanco), resulta que mantiene más caliente al sistema en la zona interna y externa. El tiempo de enfriamiento fue de 28.5 minutos para obtener 39 °C de temperatura en el interior del dispositivo y 37.7°C de la zona externa.

La **Figura 39** muestra el comportamiento del recubrimiento con tres capas de recubrimiento, 1ra capa de recubrimiento base, 2da capa de la EMS-15 y 3ra capa de recubrimiento base. De acuerdo con el análisis de comportamiento se puede ver que alcanzó una temperatura de 103°C en la parte interna del dispositivo, mientras en la exterior fue de 92.1°C, la placa fue expuesta en calentamiento continuo por

6.5 minutos. Para este recubrimiento (Rb+EMS-15+Rb) se obtuvo un $\nabla T = 11.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, mejorando el aislamiento térmico con respecto a la placa metálica de referencia.

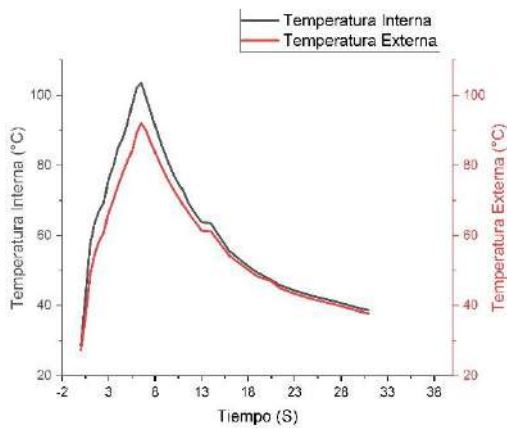


Figura 39.- Comportamiento térmico de placa con tres capas de recubrimiento; 1ra capa de recubrimiento base (Rb), 2da capa de la EMS-15 y 3ra capa de recubrimiento base (Rb).

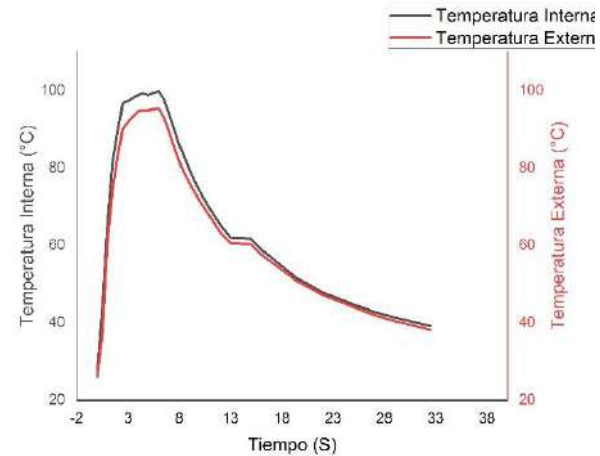


Figura 40.- Comportamiento térmico de placa con Al_2O_3 mesoporoso sin tiempo de residencia

En la **Figura 40** se presenta el comportamiento térmico de la placa metálica recubierta con puro Al_2O_3 mesoporoso, la placa se expuso por 6 minutos de calentamiento alcanzando una temperatura de $99.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ al interior del dispositivo y una temperatura de 95.3 grados en la parte exterior, obteniendo un $\nabla T = 4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se enfrió en un lapso de 26 minutos para alcanzar la temperatura aproximada de $39.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la zona interna del sistema de medición y $35.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la zona externa, para este recubrimiento se encuentra un parecido al de 3 capas (1ra capa de recubrimiento base, 2da capa de la EMS-15 y 3ra capa de recubrimiento base). Por último, en la **Figura 41** se muestra el recubrimiento Al_2O_3 mesoporoso formado con una exposición 3 minutos durante su formación, en este caso se observa la temperatura alcanzada (durante 4.5 minutos de calentamiento continuo) fue de $106.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ al interior del dispositivo y $100.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la parte exterior. Presentando de

esta forma un $\nabla T = 6.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se hace énfasis en que el tiempo de enfriamiento que necesito el recubrimiento de Al_2O_3 mesoporosa (con 3 minutos de residencia) fue de 20 minutos, alcanzando una temperatura de $36.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la parte interna del sistema y 35.9 en la zona externa.

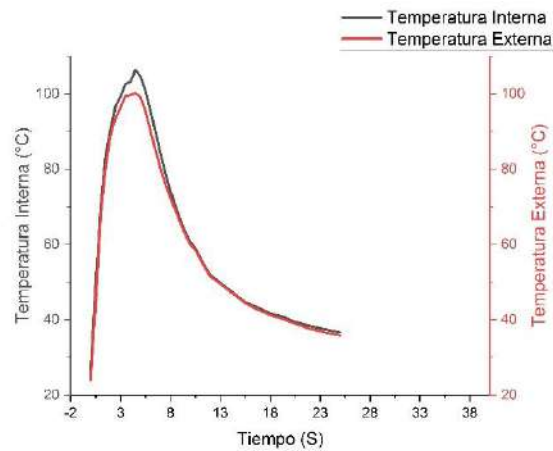


Figura 41.- Comportamiento térmico de placa con Al_2O_3 mesoporosa con tres minutos de residencia



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



INGENIERÍA EN
NANOTECNOLOGÍA

IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS



De acuerdo con los resultados obtenidos para los diferentes recubrimientos, se puede decir que, el recubrimiento base (Rb), no presenta solo ninguna ventaja en cuanto aislamiento térmico, ya que el comportamiento es muy similar a la placa sin recubrir (Blanco). Por otra parte, el recubrimiento de la placa con solo EMS-15, que debería de haber promovido un aislamiento mejor que la placa sola (debido a la alta porosidad mejora en los primeros minutos (del 0 al 3), pero según el comportamiento del gráfico (**Figura 38**) el calor se acumula incrementando la temperatura interior y por lo tanto la exterior también, muy probablemente porque el aire frío es desplazado por el caliente y no hay un medio de disipación del mismo, como es en el caso en donde la ESM-15 se encuentra en la parte media de las capas de las películas delgadas (1ra capa de recubrimiento base, 2da capa de EMS-15 y 3ra capa de recubrimiento base), ver **Figura 39**.

Este arreglo estructural de recubrimiento (Rb + EMS-15 + Rb) promueve un mejor aislamiento térmico en el sistema. Por ejemplo, con respecto al blanco existe un $\nabla T=4.9$ °C y de $\nabla T=3.8$ °C con respecto al Rb (Tiempo con residencia de 5 min). Se sabe que en el crecimiento de películas delgadas en pila o multicapa se forman interfases entre cada una de estas, relacionadas con la interrupción del crecimiento del material, lo cual promueve una caída de la temperatura como resultado de la resistencia de unión y la diferencia de material entre cada una de estas. Por lo general, para describir la capacidad de conducción de calor de una interfaz en materiales de películas delgadas se utiliza la resistencia de contacto térmico y la resistencia de límite térmico (Zhao et al. 2016).

Por otra parte, en el caso del recubrimiento de Al₂O₃ mesoporosa pura crecida en la placa con TR=0 min, se observó una pequeña diferencia con respecto a la EMS-15, a saber, no absorbe tanto calor y se obtiene un $\nabla T=4.4$ °C, entre la temperatura interior y exterior, con un tiempo de enfriamiento ligeramente mayor que el recubrimiento Rb + EMS-15 + Rb. En el caso de Al₂O₃ mesoporosa pura crecida en la placa con TR=3 min se observó un calentamiento más rápido en la superficie de la película; alcanzando una temperatura mayor con respecto al blanco



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



INGENIERÍA EN
NANOTECNOLOGÍA

y a Rb, con un $\nabla T=6.1$ °C y con una mejora en el tiempo de enfriamiento (esto es, se enfrió más rápido que el resto de los recubrimientos y el blanco), ver tabla 5. Debido a los tiempos y a la pandemia, no se pudo crecer la película con este material (Al_2O_3 mesoporosa) en capas, colocando el Rb en la primera capa y la 3ra capa, para hacer el sándwich y que se pudiera comparar con el recubrimiento Rb + EMS-15 + Rb, para ver si mejoraba el aislamiento térmico.

Las diferencias encontradas entre las películas de EMS-15 y Al_2O_3 mesoporosa, se puede relacionar con las características estructurales del crecimiento de ambos materiales, tamaños de los poros y su área superficial disponible (Bordoloi et al. 2014), aunado a que, en el caso del aluminio con respecto al silicio, el aluminio como elemento resulta tener una mejor capacidad aislante.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



INGENIERÍA EN
NANOTECNOLOGÍA

X. CONCLUSIONES



La metodología experimental utilizada en este estudio permitió la obtención de manera exitosa de un material de sílice mesoporoso tipo esponja, que manifestó poseer alta área superficial ($816.20 \text{ m}^2/\text{g}$), un diámetro promedio de mesoporo de alrededor de 40 nm y un alto volumen de poro ($1.40 \text{ cm}^3/\text{g}$).

Utilizando la técnica de inmersión dip-coating se logró la deposición de los recubrimientos con propiedades de aislamiento térmico sobre placas metálicas de acero inoxidable, se logró sintetizar varias películas delgadas con un espesor mínimo de $34.1 \mu\text{m}$ y un espesor máximo de $122 \mu\text{m}$. La variación del espesor de la película fue ocasionada por diversos factores, tales como, el tiempo de exposición de los sustratos dentro de la en la solución (0 a 5 minutos) que, en conjunto con la velocidad de extracción de la solución de las placas metálicas, fueron un factor importante, así como la no homogeneidad de la dispersión de las partículas en las placas (PMMA, EMS-15).

El diseño del sistema de medición de transferencia de calor presente en las placas con los recubrimientos realizados en la experimentación permitió evaluar el comportamiento de éstos, se obtuvieron ∇T de temperatura apropiadas oscilando en valores desde 4°C hasta 6°C , lo cual es un valor aceptable ya que el grosor de las películas es delgado, por lo que tienen la propiedad de tener capacidad de aislamiento térmico.

El recubrimiento que mejores características de aislamiento térmico presento fue el crecido en capas, nombrado Rb + EMS-15 + Rb, en donde la EMS-15 se encuentra en la capa intermedia. Varios factores son los que actúan en conjunto, por un lado, la formación de interfaces entre las películas, lo que promueve una caída de la temperatura, así como la alta porosidad de la ESM-15, que al ser aislada por las capas del polímero base (Rb), los poros quedan confinados con aire en su interior, lo que también ayudó a mejorar la propiedad de aislamiento térmico.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



INGENIERÍA EN
NANOTECNOLOGÍA

XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



- A. BHATIA, 2011. *Overview of Insulation Materials* [en línea]. 2011. S.l.: s.n. Disponible en: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Overview%20of%20Insulation%20Materials=R1.pdf>.
- A. BHATIA, B.E, 2012. *Process Plant Insulation & Fuel Efficiency*. [en línea]. [Consulta: 7 junio 2021]. Disponible en: <https://pdhonline.com/courses/m156/m156content.pdf>.
- ASOCIACIÓN DE AISLAMIENTO TÉRMICO DE CANADÁ, 2013. *INSULATION MATERIALS AND PROPERTIES* [en línea]. 2013. S.l.: s.n. Disponible en: http://tiac.ca/wp-content/uploads/2015/12/TIAC_Guide_English_2013-Section-02.pdf.
- BORDOLOI, A., SANCHEZ, M., NOEI, H., KALUZA, S., GROSSMANN, D., WANG, Y., GRÜNERT, W. y MUHLER, M., 2014. Catalytic Behaviour of Mesoporous Cobalt-Aluminum Oxides for CO Oxidation. *Journal of Catalysts*, vol. 2014, pp. 1-9. ISSN 2314-5102, 2314-5110. DOI 10.1155/2014/807545.
- CHEN, S.-Y., CHEN, Y.-T., LEE, J.-J. y CHENG, S., 2011. Tuning pore diameter of platelet SBA-15 materials with short mesochannels for enzyme adsorption. *Journal of Materials Chemistry*, vol. 21, no. 15, pp. 5693. ISSN 0959-9428, 1364-5501. DOI 10.1039/c0jm03591b.
- DAVIS DANIEL ENRÍQUEZ ARIAS, 2005. *Análisis y Cálculos Térmicos para una Planta Desalinizadora de Agua de Mar utilizando como fuente de energía los gases de una Turbina* [en línea]. Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral. [Consulta: 14 abril 2021]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/4334/1/6854.pdf>.
- DESHMUKH, G., BIRWAL, P., DATIR, R. y PATEL, S., 2017. Thermal Insulation Materials: A Tool for Energy Conservation. *Journal of Food Processing & Technology* [en línea], vol. 08, no. 04. [Consulta: 14 abril 2021]. ISSN 21577110. DOI 10.4172/2157-7110.1000670. Disponible en: <https://www.omicsonline.org/open-access/thermal-insulation-materials-a-tool-for-energy-conservation-2157-7110-1000670.php?aid=89102>.
- FLODSTRÖM, K. y ALFREDSSON, V., 2003. Influence of the block length of triblock copolymers on the formation of mesoporous silica. *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 59, no. 2-3, pp. 167-176. ISSN 13871811. DOI 10.1016/S1387-1811(03)00308-1.



- GARCÍA MARTINEZ, J y PÉREZ PARIENTE, J., 2003. Materiales zeolíticos: síntesis, propiedades y aplicaciones. S.l.: s.n.
- HECHAVARRÍA DÍAZ, R., DELGADO, O. y PAZMIÑO, F., 2016. ESTUDIO DE UN NUEVO PROCEDIMIENTO PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD Y DIFUSIVIDAD TÉRMICAS DE MATERIALES. *Ingenius*, no. 17, pp. 15. ISSN 1390-860X, 1390-650X. DOI 10.17163/ings.n17.2017.02.
- HOLMAN, J.P., VALENZUELA M, y RAÚL, 1986. *Transferencia de calor*. México: CECSA. ISBN 978-968-26-0649-6.
- JELLE, B.P., GUSTAVSEN, A. y BAETENS, R., 2009. BEYOND VACUUM INSULATION PANELS - HOW MAY IT BE ACHIEVED ? , pp. 10.
- JELLE, B.P., GUSTAVSEN, A. y BAETENS, R., 2010. The path to the high performance thermal building insulation materials and solutions of tomorrow. *Journal of Building Physics*, vol. 34, no. 2, pp. 99-123. ISSN 1744-2591, 1744-2583. DOI 10.1177/1744259110372782.
- JELLE, B.P., 2011. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 10, pp. 2549-2563. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.05.015.
- JOSÉ CARLOS OLVERA OLVERA, 2020. Aplicación de ondas de choque para producción de sílices de talla compatible para su internalización en células. [en línea]. Querétaro: s.n. [Consulta: 7 marzo 2022]. Disponible en: http://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/2519/1/IGLIN-221514-0920-1224-Jos%c3%a9%20Carlos%20Olvera%20Olvera_compressed%20%20-A.pdf.
- JUAN DEMETRIO CRISTÓBAL GARCÍA, C., 2015. SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE SBA-15 MODIFICADO CON ZrO₂-PO₄ 3- EMPLEADA COMO CATALIZADOR PARA LA OBTENCIÓN DE OLEFINAS LIGERAS [en línea]. Cd. Madero, Tamps.: s.n. Disponible en: <http://repositorio.tecnm.mx:8080/jspui/bitstream/123456789/338/1/TESIS.pdf>.
- KOEBEL, M., RIGACCI, A. y ACHARD, P., 2012. Aerogel-based thermal superinsulation: an overview. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 63, no. 3, pp. 315-339. ISSN 0928-0707, 1573-4846. DOI 10.1007/s10971-012-2792-9.
- KREITH, F., 2012. Principios de transferencia de calor. , pp. 787.
- LACERDA JÚNIOR, O. da S., CAVALCANTI, R.M., MATOS, T.M. de, VENÂNCIO, J. de B., BARROS, I.B. de, VEIGA-JÚNIOR, V.F. da y BARROS,



- I. de C.L., 2013. Síntese do material mesoporoso MCM-41 usando esponja de água-doce como fonte de sílica. *Química Nova*, vol. 36, no. 9, pp. 1348-1353. ISSN 0100-4042. DOI 10.1590/S0100-40422013000900012.
- LOSBICHLER, P., 1998. Recubrimientos Ultraduros de Ti-B-N obtenidos por PVD. Tesis doctoral en Ciencia de los Materiales. S.I.: Universidad de Montana.
 - MA, J., LIU, Q., CHEN, D., WEN, S. y WANG, T., 2015. Synthesis and characterisation of pore-expanded mesoporous silica materials. *Micro Nano Letters*, vol. 10, no. 2, pp. 140-144. ISSN 1750-0443. DOI 10.1049/mnl.2014.0413.
 - MICHAEL SHAWYER y AVILIO F. MEDINA PIZZALI, 2003. *The use of ice on small fishing vessels* [en línea]. S.I.: FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/3/y5013e/y5013e.pdf>.
 - ROMANOVA, I., 2018. The selecting of building insulation material by the analytic hierarchy process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 365, pp. 032016. ISSN 1757-8981, 1757-899X. DOI 10.1088/1757-899X/365/3/032016.
 - SCOTT E. MCNEIL, 2011. *Characterization of Nanoparticles Intended for Drug Delivery*. S.I.: Humana Press.
 - SING, K.S.W., EVERETT, D.H., HAUL, R.A.W., MOSCOU, L., PIEROTTI, R.A., ROUQUEROL, J. y SIEMIENIEWSKA, T., 2008. Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems. En: G. ERTL, H. KNÖZINGER, F. SCHÖTH y J. WEITKAMP (eds.), *Handbook of Heterogeneous Catalysis* [en línea]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp. hetcat0065. [Consulta: 2 marzo 2022]. ISBN 978-3-527-31241-2. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9783527610044.hetcat0065>.
 - SCHMIDT-WINKEL, P., GLINKA, C.J. y STUCKY, G.D., 2000. Microemulsion Templates for Mesoporous Silica. *Langmuir*, vol. 16, no. 2, pp. 356-361. ISSN 0743-7463, 1520-5827. DOI 10.1021/la9906774.
 - SCHMIDT-WINKEL, P., LUKENS, W.W., YANG, P., MARGOLESE, D.I., LETTOW, J.S., YING, J.Y. y STUCKY, G.D., 2000. Microemulsion Templating of Siliceous Mesostructured Cellular Foams with Well-Defined Ultralarge Mesopores. *Chemistry of Materials*, vol. 12, no. 3, pp. 686-696. ISSN 0897-4756, 1520-5002. DOI 10.1021/cm991097v.
 - SCHMIDT-WINKEL, P., LUKENS, W.W., ZHAO, D., YANG, P., CHMELKA, B.F. y STUCKY, G.D., 1999. Mesocellular Siliceous Foams with Uniformly



Sized Cells and Windows. *Journal of the American Chemical Society*, vol. 121, no. 1, pp. 254-255. ISSN 0002-7863, 1520-5126. DOI 10.1021/ja983218i.

- TCHERNITCHIN, D.A.N. y RIVEROS, R., [2004]. Efectos de la Radiación Electromagnética sobre la Salud. pp. 14.
- TIASA THE THERMAL INSULATION ASSOCIATION OF SOUTHERN AFRICA, 2001. *THERMAL INSULATION HANDBOOK* [en línea]. abril 2001. S.l.: s.n. [Consulta: 6 junio 2021]. Disponible en: https://www.aaamsa.co.za/docs_new/TIASA/Handbook_Chapter1.pdf.
- TRANSFERENCIA DE CALOR. [en línea], 2014. [Consulta: 9 mayo 2021]. Disponible en: http://www.fisica.uns.edu.ar/albert/archivos/21/254/2438481309_f1.pdf.
- VAN DER VOORT, P., MATHIEU, M., MEES, F. y VANSANT, E.F., 1998. Synthesis of High-Quality MCM-48 and MCM-41 by Means of the GEMINI Surfactant Method. *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 102, no. 44, pp. 8847-8851. ISSN 1520-6106, 1520-5207. DOI 10.1021/jp982653w.
- YENNY MARIBEL GUERRERO SALAS, 2008. Síntesis de materiales mesoporosos tipo SBA-15 y su modificación mediante incorporación de 3-mercaptopropil trimetoxi silano (MPTMS). junio 2008. S.l.: s.n. Universidad de los Andes
- ZHAO, D., 1998. Triblock Copolymer Syntheses of Mesoporous Silica with Periodic 50 to 300 Angstrom Pores. *Science*, vol. 279, no. 5350, pp. 548-552. ISSN 00368075, 10959203. DOI 10.1126/science.279.5350.548.
- ZHAO, D., QIAN, X., GU, X., JAJJA, S.A. y YANG, R., 2016. Measurement Techniques for Thermal Conductivity and Interfacial Thermal Conductance of Bulk and Thin Film Materials. *Journal of Electronic Packaging*, vol. 138, no. 4, pp. 040802. ISSN 1043-7398, 1528-9044. DOI 10.1115/1.4034605. |



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



INGENIERÍA EN
NANOTECNOLOGÍA

XII. ANEXOS

XII.I (ANEXO A)

Propiedades Térmicas de aislantes



- Límites de temperatura
- Conductancia térmica "C"
- Conductividad térmica "K"
- Emisividad "E"
- Resistencia térmica "R"
- Transmitancia térmica "U"

Figura 4.- Propiedades térmicas de materiales de aislamiento térmico (NETZSCH [sin fecha]), (Davis Daniel Enríquez Arias 2005)

A. Límites de temperatura: Temperaturas superior e inferior dentro de las cuales el material debe conservar todas sus propiedades.

B. Conductancia térmica "C": La tasa de tiempo del flujo de calor en estado estable a través de una unidad de área de un material o construcción inducida por una unidad de diferencia de temperatura entre las superficies del cuerpo.

C. Conductividad térmica "K": La tasa de tiempo del flujo de calor en estado estable a través de una unidad de área de un material homogéneo inducido por un gradiente de temperatura unitaria en una dirección perpendicular a esa unidad de área.

D. Emisividad "E": La emisividad de un material (generalmente escrito ϵ o e) es la capacidad relativa de su superficie para emitir energía por radiación. Es la relación entre la energía irradiada por un material en particular y la energía irradiada por un cuerpo negro a la misma temperatura.

E. Resistencia térmica "R": Resistencia de un material al flujo de calor.

F. Transmitancia térmica "U": la conductancia general del flujo de calor a través de un "conjunto".

Propiedades químicas y mecánicas de aislantes térmicos

Se deben considerar otras propiedades además de las térmicas al elegir materiales para aplicaciones específicas. A continuación, se muestran en la **Figura (3)** algunas de estas:



- Tensión de rotura
- Aspecto
- Alcalinidad (pH)
- Capilaridad
- Reacción química
- Resistencia química
- Coeficiente de expansión y contracción
- Combustibilidad
- Resistencia a la compresión
- Densidad
- Estabilidad dimensional
- Resistencia al fuego
- Resistencia al crecimiento de hongos o bacterias
- Coeficiente de absorción acústica
- Toxicidad

Figura 5.- Propiedades mecánicas y químicas de materiales de aislamiento térmico (NETZSCH [sin fecha]), (Davis Daniel Enríquez Arias 2005)

A. Alcalinidad (pH) o acidez: Importante cuando hay humedad. Además, el aislamiento no debe contribuir a la corrosión del sistema.

B. Aspecto: Importante en áreas expuestas y para propósitos de codificación.



C. Tensión de rotura: En algunas instalaciones, el material aislante debe "puentear" una discontinuidad en su soporte. Sin embargo, este factor es más significativo como medida de resistencia al abuso durante la manipulación.

D. Capilaridad: Debe tenerse en cuenta cuando el material pueda estar en contacto con líquidos.

E. Reacción química: existen riesgos potenciales de incendio en áreas donde hay sustancias químicas inflamables. También se debe considerar la resistencia a la corrosión.

F. Resistencia química: Significativa cuando la atmósfera está cargada de sal o sustancias químicas y cuando el contenido de la tubería tiene fugas.

G. Coeficiente de expansión y contracción: entra en el diseño y espaciado de juntas de expansión / contracción y / o el uso de aplicaciones de aislamiento de múltiples capas.

h. Combustibilidad: una de las medidas de la contribución de un material al peligro de incendio.

I. Resistencia a la compresión: Importante si el aislamiento debe soportar una carga o soportar un abuso mecánico sin aplastarse. Sin embargo, si se necesita amortiguar o rellenar el espacio como en las juntas de expansión / contracción, se especifican materiales de baja resistencia a la compresión.

j. Densidad: la densidad de un material puede afectar otras propiedades de ese material, como la resistencia a la compresión. Se debe conocer el peso del sistema aislado para diseñar el soporte adecuado.

K. Estabilidad dimensional: significativa cuando el material está expuesto a la temperatura; Puede producirse una expansión o contracción del aislamiento que resulte en agrietamiento por tensión, huecos, combaduras o hundimientos.



L. Resistencia del fuego: Las clasificaciones de propagación de llamas y desarrollo de humo son de vital importancia; denominado "características de combustión de la superficie".

M. Resistencia a la luz ultravioleta: Importante si la aplicación es al aire libre y alta intensidad en el interior.

N. Resistencia al crecimiento de hongos o bacterias: es importante en todas las aplicaciones de aislamiento.

P. Coeficiente de absorción acústica: Debe tenerse en cuenta cuando se requiere atenuación acústica, como ocurre en las estaciones de radio, algunas áreas hospitalarias donde se requiere reducción de decibelios.

P. Valor de pérdida de transmisión de sonido: significativo al construir una barrera de sonido.

R. Toxicidad: debe tenerse en cuenta en la selección de todos los materiales aislantes.



XII. II (ANEXO B)

Tabla 2.- Materiales aislantes, valores R, ventajas y desventajas ((Michael Shawyer y Avilio F. Medina Pizzali 2003))

Material aislante	Valor "R" por pulgada (2,54 cm)	Ventajas	Desventajas
<i>Poliuretano, tablero</i>	6.25	Muy buen valor R, se puede utilizar con resinas de fibra de vidrio.	No siempre es fácil de conseguir, es relativamente caro
<i>Poliuretano, pulverizar</i>	7.0	Muy buen valor R, se puede utilizar con resinas de fibra de vidrio, fácil aplicación con equipo de pulverización.	No siempre está fácilmente disponible, es caro y requiere un equipo de pulverización especial.
<i>Poliuretano, vertido (químico de dos partes)</i>	7.0	Muy buen valor R, se puede utilizar con resinas de fibra de vidrio, relativa facilidad de aplicación.	No siempre está fácilmente disponible, es caro y requiere cálculos de volumen muy cuidadosos.
<i>Poliestireno, láminas (lisas) Nombre comercial "Styrofoam"</i>	5.0	Valor R razonable, de bajo costo y fácilmente disponible	No se puede usar con resinas de fibra de vidrio a menos que estén protegidas, se dañan fácilmente
<i>Poliestireno, espumado in situ y perlas moldeadas expandidas. Conocido como Isopor, Polypor, etc.</i>	3.75 a 4.0	Valores R razonables, menor costo que las láminas de superficie lisa	No se puede usar con resinas de fibra de vidrio a menos que estén protegidas, se dañan fácilmente
<i>Tablero de corcho</i>	3.33	Disponibilidad en muchos mercados, costo razonable, se puede cubrir con fibra de vidrio.	Valores R más bajos que el poliuretano para espumas de estireno
<i>Bloques de lana de fibra de vidrio</i>	3.3	Bajo costo, facilidad de instalación.	Absorbe fácilmente agua u otros fluidos, pierde valor aislante cuando está mojado
<i>Bloques de lana de roca</i>	3.7	Bajo costo, facilidad de instalación.	Absorbe fácilmente agua u otros fluidos, pierde valor aislante cuando está mojado
<i>Virutas de madera</i>	2.2	Fácilmente disponible, bajo costo	Absorbe la humedad y pierde los valores R cuando está mojado, se descompone
<i>Aserrín</i>		Fácilmente disponible, bajo costo	Absorbe la humedad y pierde el valor R cuando está mojado, se compacta bajo vibración
<i>Paja</i>	1 aprox.	Fácilmente disponible, bajo costo	Absorbe la humedad y pierde el valor R cuando está mojado, alberga insectos, etc.



XII. III (ANEXO C)

Definiciones relacionadas a la transferencia de calor:

a) Flujo de calor o tasa de flujo de calor Q:

La cantidad de calor transferida hacia o desde un sistema en unidad de tiempo. Normalmente se mide en Btu / h.

b) Btu (unidad térmica británica):

La cantidad de energía requerida para elevar 1 lb de agua a 1 ° F (La designación métrica equivalente es un joule, que se define como el trabajo realizado cuando el punto de aplicación de una fuerza de 1 N se desplaza una distancia de 1 m en la dirección de la fuerza).

c) Resistencia térmica (R) (F ft² h / Btu):

Propiedad del material mediante la cual resiste la transferencia de calor. La efectividad de aislamiento del material se expresa mediante factor R. Cuanto mayor sea el factor R, mayor será el poder aislante, es decir, mejor será el aislamiento. Para lograr una mayor potencia aislante total, los valores R se pueden sumar.

d) Conductividad térmica

La conductividad térmica de un material (k), es la medida de la capacidad del material para conducir calor. De acuerdo con el Sistema Internacional, esta se mide a partir de la relación:

$$k \left[\frac{W/m^2}{K/m} \right] = \left[\frac{W}{K \cdot m} \right]$$



Donde W son watts, K kelvin y m , metros. Esta unidad es equivalente a Joules sobre metro por segundo por Kelvin ($J/m \cdot s \cdot K$). Una conductividad térmica de 1 vatio por metro por kelvin significa que un Julio (J) de calor se propaga a través de un material de $1m^2$ de superficie y un grosor de $1m$, en 1 segundo, cuando la diferencia entre ambas sustancias sea de $1K$.

El valor de la conductividad depende del material y de su estado físico. Respecto a la conductividad, los cuerpos se clasifican en:

- **Isótropos**: cuerpos que no presentan direcciones privilegiadas en la conducción del calor. En consecuencia, la conductividad no varía con la posición materiales isótropos, la mayoría de los gases, líquidos y los sólidos cristalinos del sistema regular.

- **Anisótropos**: cuerpos en los que la conductividad es función de la posición y aparecen entonces direcciones privilegiadas en la transmisión de calor Como ejemplos cabe citar a los sólidos no regulares (fibra de vidrio, amianto, madera, etc.).

e) Emitancia (E):

Relación entre el flujo radiante emitido por un espécimen y el emitido por un cuerpo negro a la misma temperatura y en las mismas condiciones. La emitancia superficial de un cuerpo negro es "1". Para superficies distintas de la superficie de un cuerpo negro, el valor de emitancia es siempre <1 . Una emitancia más alta significa una alta transferencia de calor por radiación.

f) Radiancia:

La tasa de emisión radiante por unidad de ángulo sólido y por unidad de área proyectada de una fuente en una dirección angular establecida desde la superficie (generalmente la normal).

g) Reflectancia:



La fracción de la radiación incidente sobre una superficie que se refleja desde la superficie.

h) Densidad

La densidad se refiere a la masa (o 'peso') por unidad de volumen de un material y se mide en kg / m^3 . Un material de alta densidad maximiza el peso total y es un aspecto de difusividad térmica 'baja' y masa térmica 'alta'.

i) Difusividad Térmica

La difusividad térmica mide la capacidad de un material para conducir energía térmica en relación con su capacidad para almacenar energía térmica. Por ejemplo, los metales transmiten energía térmica rápidamente (frío al tacto) mientras que la madera es un transmisor lento. Los aislantes tienen baja difusividad térmica.

- Cobre = $98,8 \text{ mm}^2 / \text{s}$
- Madera = $0,082 \text{ mm}^2 / \text{s}$.

La **ecuación (5)** representa la difusividad térmica:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (10)$$

j) Permeabilidad al vapor

La permeabilidad al vapor es la medida en que un material permite el paso de agua a través de él. Se mide por la tasa de transmisión de vapor en el tiempo a través de una unidad de área de material plano de espesor unitario inducida por una diferencia de presión de vapor unitaria entre dos superficies específicas, bajo condiciones específicas de temperatura y humedad.

El aislamiento térmico generalmente se caracteriza como permeable al vapor o no permeable al vapor (reduce el riesgo de condensación).



k) Capacidad calorífica específica

Es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 kg del material en 1K (o en 1 ° C). Un buen aislante tiene una capacidad calorífica específica más alta, lo que significa que se necesita tiempo para absorber más calor antes de calentarse (mostrando un aumento de temperatura) y transferir el calor que ha absorbido. La alta capacidad calorífica específica es una característica de los materiales que proporcionan masa o amortiguación térmica.

l) Conductancia térmica interfacial (indicada como K o G):

Se define como la relación entre el flujo de calor y la caída de temperatura a través de la interfaz de dos componentes. La conductancia térmica interfacial es simplemente la inversa del contacto térmico / resistencia límite.

m) Rarefacción:

Disminución de la densidad de un cuerpo gaseoso al separarse las moléculas que lo forman.



XII. IV (ANEXO D)

En general, la teoría de Fourier se aplica sólo al régimen de difusión como se indica en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Regímenes de transporte para tres portadores de energía comunes: La longitud característica del dispositivo (como el grosor) es h ; O denota el orden de magnitud de una escala de longitud; Las longitudes de coherencia y MFP enumeradas son valores típicos, pero estos valores dependen en gran medida del material y la temperatura.

<i>Escala de longitud</i>	<i>Regímenes</i>	<i>Fotón</i>	<i>Electrón</i>	<i>Fonón</i>
Regímenes de ondas Longitud de coherencia, L Fotón: 1 m – 1 km Electrón: 1-100 nm Fonón: ~ 1–10 nm	$h < O (L)$ régimen de onda	Teoría de Maxwell EM	Mecánica cuántica	Mecánica cuántica
	$h \sim O (L)$ régimen de coherencia parcial	Teoría de la coherencia óptica	Teoría de la coherencia electrónica	Mecánica cuántica
Regímenes de partículas Camino libre medio, Λ fotón: 10 nm – 1 km electrón: 100 nm fonón: 100 nm	$h < O (\Lambda)$ régimen balístico	Trazado de rayos	Transporte balístico	Trazado de rayos
	$h \sim O (\Lambda)$ régimen cuasi-difusivo	Ecuación de transferencia radiactiva	Ecuación de transporte de Boltzmann	Ecuación de transporte de Boltzmann
	$h > O (\Lambda)$ régimen de difusión	Aproximación de difusión	Leyes de Ohm y Fourier	Ley de Fourier