



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE PROPIEDADES
TÉRMICAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
NACIONALES Y DESARROLLO DE VENTANAS
AHORRADORAS DE ENERGÍA**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA

ENERGÍA – SISTEMAS ENERGÉTICOS

P R E S E N T A:

JESÚS CHÁVEZ GALÁN

TUTOR:

DR. RAFAEL ALMANZA SALGADO

2009





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. en C. Neftalí Rodríguez Cuevas
Secretario: Dr. Rafael Almanza Salgado
Vocal Dr. David Morillón Gálvez
1er Suplente: Dr. Vicente Flores Lara
2do Suplente: Dr. Iván Galileo Martínez Cienfuegos

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Coordinación de Mecánica y Energía
Instituto de Ingeniería, UNAM.

Túnel de Viento
Instituto de Ingeniería, UNAM.

TUTOR DE TESIS

Dr. Rafael Almanza Salgado

“Fue el hombre quien, para sobrevivir, empezó a infundir valor a las cosas. Por eso se llama hombre: es decir, el ser que mide y valora”

Friedrich Nietzsche

A mis padres: Jesús Chávez y Graciela Galán

*A mis hermanos: Graciela, Cesar, Gladis,
Faride, Leslie y Helder*

“Allí donde termina la especulación comienza en la vida real la ciencia real y positiva, la exposición de la actividad práctica, del proceso práctico de los hombres”

Karl Marx

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, que proporcionó toda la infraestructura utilizada en el desarrollo de este proyecto.

Un especial agradecimiento al Dr. Rafael Almanza Salgado por la paciencia concedida a mi persona durante la realización de este trabajo.

A los Sres. Víctor Hugo Orozco, Ceferino Figueroa Hernández, Julio Alberto González Medina y Raúl Maldonado por su enorme ayuda durante la fabricación de los prototipos experimentales y la realización de las pruebas.

Al Prof. Neftalí Rodríguez Cuevas por las facilidades proporcionadas para el uso del Túnel de Viento del Instituto de Ingeniería-UNAM, así como por sus oportunos comentarios sobre este trabajo.

A los Drs David Morillón Gálvez, Iván G. Martínez Cienfuegos y Vicente Flores Lara, agradezco ampliamente sus observaciones y sugerencias durante la revisión del presente trabajo.

Al M. en I. Filiberto Gutiérrez Martínez por sus valiosos comentarios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero.

A todos los impulsores e instauradores de la educación pública, uno de los peldaños necesarios para alcanzar la casi utópica igualdad social.

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
SIMBOLOGÍA	iii
TABLAS	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Consumo energético del sector residencial nacional	1
1.2 Algunos datos térmicos de materiales de construcción	5
1.3 Filtros solares	9
1.4 Planteamiento, hipótesis y objetivos del trabajo	11
2. ANTECEDENTES TEÓRICOS	12
2.1 Transferencia de calor por conducción	12
2.1.1 Conducción transitoria: Enfriamiento de cuerpos en régimen regular	13
2.2 Transferencia de calor por convección	16
2.2.1 Semejanza en los procesos de intercambio de calor por convección	17
2.3 Cálculo de incertidumbres en las mediciones experimentales	21
2.4 Erosión iónica con magnetrones	23
2.5 Propiedades ópticas de un sistema vidrio-película delgada	25
2.5.1 Propiedades promedio	26
3. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS	27
3.1 Conductividad térmica	27
3.1.1 Estimación de la densidad	27
3.1.2 Estimación del calor específico	28
3.1.3 Estimación de la difusividad térmica	30
3.2 Coeficientes de transferencia de calor por convección	34
3.2.1 Prototipo de pruebas para estimar coeficientes de convección	34
3.2.2 Túnel de viento del Instituto de Ingeniería-UNAM	36
3.2.3 Estimación de coeficientes de convección	40

4. RESULTADO DE PROPIEDADES TÉRMICAS	43
4.1 Densidad y calor específico	43
4.2 Difusividad térmica	46
4.3 Conductividad térmica	53
4.4 Coeficientes de transferencia de calor por convección	56
5. DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE FILTROS SOLARES	64
5.1 Descripción del equipo	64
5.2 Fabricación de filtros solares con base en hierro	68
5.2.1 Limpieza del sustrato	68
5.2.2 Erosión iónica del hierro	68
5.2.3 Reducción de las películas en atmósfera de H ₂ +N ₂	70
5.3 Análisis por RBS de los filtros solares con base en hierro	74
6. IMPACTO DE RESULTADOS EN EL DISEÑO TÉRMICO DE EDIFICACIONES	76
5.1 Descripción de Energy-10	76
5.2 Resultados de las simulaciones	78
CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	83
REFERENCIAS	85

RESUMEN

Una parte considerable del consumo energético de una edificación, durante temporadas calurosas, se origina de la necesidad de acondicionar el ambiente interior principalmente en las zonas Norte y costera del país. Por lo anterior, el correcto diseño de edificaciones de bajo consumo energético pasa necesariamente por un amplio conocimiento de las propiedades físicas de los materiales de construcción.

Debido a la poca, o algunas veces, nula información de este tipo con respecto a los principales materiales de construcción nacionales, mediante una técnica alternativa (basada en el método de Kondratyev) fueron llevadas a cabo algunas mediciones de conductividad térmica para muestras de diversos tipos de materiales de construcción nacionales. De esta forma, los valores obtenidos fueron: ladrillo rojo $k_L = 0.910 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, tepetate $k_T = 0.648 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, adobe $k_A = 0.573 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, tabicón $k_t = 0.931$ y concreto $k_C = 1.917 \text{ W/m}^\circ\text{C}$; los cuales están en concordancia con valores mencionados en bibliografía internacional. Dicha técnica tiene ventajas sobre las tradicionales porque no existen pérdidas de humedad en la muestra y la corta duración de las mediciones.

Por otro lado, para la estimación de coeficientes de convección fueron construidos muros de prueba de ladrillo rojo, tepetate, adobe y concreto; así como un prototipo para montar dichos muros y realizar las pruebas. Las mediciones fueron llevadas a cabo para un intervalo de velocidades de viento de 2 a 10 m/s y los resultados obtenidos se encuentran entre 14-71 $\text{W/m}^2\text{K}$, según el material evaluado, posición del muro y velocidad del viento.

Se desarrollaron además filtros solares con base en hierro, los cuales consisten en películas delgadas de FeO depositadas sobre sustratos de vidrio cal-sosa (600x300 mm) por medio de la técnica de sputtering asistida con radiofrecuencia y magnetrones. Para obtener el grado de oxidación deseado en el hierro, pequeñas muestras de 45x22 mm fueron sometidas a un proceso de calentamiento en una atmósfera reductora, constituida de 50% H_2 + 50% N_2 , durante un tiempo de 10 minutos a una temperatura de 400°C. Los filtros solares presentan una transmitancia de 30.2% para el intervalo visible del espectro de radiaciones, y de 39.9% para el infrarrojo cercano, mientras que su reflectancia es de 17.5 y 19%, para los intervalos visible e infrarrojo cercano, respectivamente.

Por último se realizaron simulaciones, mediante el programa (software) Energy 10, del comportamiento térmico de una casa-habitación con dos fines: evaluar el impacto en el diseño térmico de edificaciones cuando se emplean datos experimentales, y estimar el ahorro de energía por el uso de los filtros solares en las ventanas. Para el primer fin se comparó el consumo energético anual de la edificación, si en los cálculos se consideraron los valores recomendados por la norma oficial NOM-008-ENER-2001, para las propiedades térmicas de materiales de construcción, con el consumo energético si se consideraron los valores experimentalmente obtenidos en este trabajo; los análisis se efectuaron para 3 localidades del país. Se encontraron disminuciones en el consumo estimado de por lo menos 10%. Para el segundo fin, se comparó el consumo energético anual de la edificación si se utiliza en las ventanas vidrio cal-sosa de 3 mm de espesor, con el consumo energético si se usan los filtros solares con base en FeO desarrollados con resultados que indicaron ahorros de energía que oscilaron entre 5 y 6%.

ABSTRACT

The largest part of energy consumption in a building, during warm days, comes from air conditioning use in North and coastal zones of Mexico. Design of low energy consumption buildings requires a thoughtful knowledge of the physical properties of building materials.

Because of the little available information about thermal properties of the main building materials in Mexico, some measurements were carried out using an alternative technique based on the Kondratyev's methodology, which consider the cooling effect of bodies in regular state, for the evaluation of thermal diffusivity, in order to estimate the thermal conductivity. Red brick, tepetate (limestone), adobe, tabicón and concrete samples were selected. The values obtained for the thermal conductivity were: red brick $k_L = 0.910$ W/m°C, limestone $k_T = 0.648$ W/m°C, adobe $k_A = 0.573$ W/m°C, tabicón $k_t = 0.931$ and concrete $k_C = 1.917$ W/m°C. Such results are in agreement with values recommended or reported in diverse international bibliography, but the advantages of Kondratyev's methodology, like no humidity losses for the sample and short time of testing were observed.

Furthermore red brick, tepetate, adobe and concrete test walls were manufactured, as well as a testing prototype to mount the walls and evaluate their convective heat transfer coefficients. Measurements were carried out in a wind velocity interval of 2-10 m/s. Reported values for convective coefficients fluctuate between 14-71 W/m²K, depending on material and wall position, as well as wind velocity.

Also, solar filters based on iron were developed, which consisted of a thin film of FeO deposited on soda-lime glass substrates (600x300 mm) by rf magnetron sputtering. We subjected small samples of 45x22 mm to a heating reduction treatment, in a hydrogen and nitrogen atmosphere, for 10 minutes, at 400°C. This treatment allowed us to obtain the desired oxidation state of iron within these thin films. The solar filters had a transmittance of 30.2% for the visible light spectrum and 39.9% for the near-infrared spectrum. Furthermore, the reflectance of these filters was determined to be 17.5% and 19% for visible and near-infrared light, respectively.

In order to evaluate the impact of using experimental data in the thermal design of a building, and determine energy savings attributed to the use of iron-based solar filters on windows, Energy-10 software was used. First, a simulation was performed to evaluate the energy consumption of a building at three locations in Mexico for two cases: using data of building materials properties recommended by Mexican standards and using the observed experimental data. Estimated consumption of energy diminished 10% at least. Afterwards, a simulation was performed to compare the energy consumption of a building using soda-lime glass on windows, and using iron based solar filters. The energy savings became 5-6%.

SIMBOLOGÍA

Minúsculas

b	Ordenada al origen de una recta.
c	Calor específico (J/kg°C).
c _a	Calor específico del agua (J/kg°C).
c _c	Calor específico del cascarón esférico (J/kg°C).
c _m	Calor específico de la muestra (J/kg°C).
e	Equivalente en agua del calorímetro (kg).
h	Coefficiente de transferencia de calor por convección (W/m ² °C).
\bar{h}	Coefficiente promedio de transferencia de calor por convección (W/m ² °C).
h _x	Coefficiente local de transferencia de calor por convección (W/m ² °C).
k	Conductividad térmica (W/m°C).
l	Longitud de un cilindro (m).
m	Masa (kg); Razón de enfriamiento en régimen regular (s ⁻¹); Pendiente de una recta.
m _a	Masa del agua en el calorímetro (kg).
m _c	Masa del cascarón esférico (kg).
m _m	Masa de la muestra (kg).
m _i	Constantes que se incrementan positivamente (m ₁ <m ₂ <m ₃ <...<m _i).
m ₁	Masa del agua inicialmente dentro del calorímetro (kg).
m ₂	Masa del agua que se agrega posteriormente al calorímetro (kg).
m _∞	Razón de enfriamiento en régimen regular, cuando el coeficiente de convección entre el cuerpo y el medio tiende a infinito (s ⁻¹).
q	Rapidez de transferencia de calor (W).
r	Radio de una esfera o un cilindro (m).
r _s	Reflectancia de la interfase del sustrato.
r ^f	Reflectancia de la interfase del recubrimiento, en la cara frontal.
r ^b	Reflectancia de la interfase del recubrimiento, en la cara posterior.
t	Tiempo (s); Transmitancia de la interfase del recubrimiento.
u	Velocidad del fluido (m/s).
v	Velocidad del viento (m/s).
x	Posición (m); Distancia desde el borde principal de la placa (m).
x _i	i-ésimo valor experimental de la variable independiente x.
x ₀	Distancia desde el borde principal hasta el punto donde se inicia el calentamiento, en la placa (m).
y _i	i-ésimo valor experimental de la variable dependiente y.

Mayúsculas

A	Área transversal al flujo de calor por conducción (m ²); Área de la superficie de la placa en contacto con el fluido, convección (m ²); Absorbancia.
A _i	Constante dependiente de la forma del cuerpo y la distribución inicial de temperatura.

C	Capacidad calorífica (J/°C); Constante que depende de la posición.
D	Dimensión característica del sistema (diámetro del tubo, longitud de placa, etc.) (m).
F	Área superficial del cuerpo (m ²).
G _m	Valor promedio de la medida G.
I _i	Irradiancia incidente (W/m ²).
I _t	Irradiancia transmitida (W/m ²).
K	Factor de proporcionalidad que depende del tamaño y forma del cuerpo (m ²).
L	Espesor de la película delgada (m).
N	Número de pares experimentales (x _i , y _i).
Nu	Número de Nusselt.
Nu _x	Número de Nusselt a una distancia x del borde principal.
P	Propiedad estudiada.
P _{base}	Presión base del sistema de vacío (mbar).
Pr	Número de Prandtl.
Q	Calor (J).
Q _a	Calor ganado o cedido por el agua y el calorímetro (J).
Q _m	Calor ganado o cedido por la muestra (J).
Q _c	Calor ganado o cedido por el cascarón esférico (J).
R	Coefficiente de correlación.
R _G	Incertidumbre relativa de la medida G.
R _{IR}	Reflectancia en el intervalo infrarrojo cercano del espectro de radiación solar.
R _{TOTAL}	Reflectancia total.
R _{UV}	Reflectancia en el intervalo ultravioleta del espectro de radiación solar.
R _{VIS}	Reflectancia en el intervalo visible del espectro de radiación solar.
R ^f	Reflectancia total del recubrimiento, en la cara frontal.
R ^b	Reflectancia total del recubrimiento, en la cara posterior.
Re	Número de Reynolds.
Re _x	Número de Reynolds a una distancia x del borde principal.
T	Temperatura (°C); Transmitancia total del recubrimiento.
T _b	Temperatura del baño María “frío” (°C).
T _c	Temperatura del cuerpo (°C).
T _{eq}	Temperatura de equilibrio del total de agua dentro del calorímetro (°C).
T _f	Temperatura del fluido (°C).
T _m	Temperatura del medio (°C); Temperatura de la muestra de material (°C).
T _w	Temperatura de la placa caliente (°C).
T _{IR}	Transmitancia en el intervalo infrarrojo cercano del espectro de radiación solar.
T _{TOTAL}	Transmitancia total.
T _{UV}	Transmitancia en el intervalo ultravioleta del espectro de radiación solar.
T _{VIS}	Transmitancia en el intervalo visible del espectro de radiación solar.
T ₁	Temperatura del agua que se encuentra inicialmente dentro del calorímetro (°C).
T ₂	Temperatura del agua que se agrega posteriormente al calorímetro (°C).
U	Coefficiente de transferencia de calor total W/m ² °C.
U _i	Función de coordenadas, la cual describe la distribución de temperaturas en el espacio.
V	Volumen (m ³).

Símbolos griegos

α	Difusividad térmica (m^2/s).
δ	Espesor de la capa límite hidrodinámica (m).
δ_t	Espesor de la capa límite térmica (m).
θ	Diferencia de temperatura entre el medio y el cuerpo, $\theta = T_s - T_m$ ($^{\circ}\text{C}$); Ángulo de incidencia de la radiación (rad).
κ	Coefficiente de extinción (m^{-1}).
λ	Longitud de onda (m).
μ	Viscosidad dinámica ($\text{kg}/\text{m s}$).
ν	Viscosidad cinemática (m^2/s).
ρ	Densidad (kg/m^3).
σ_m	Desviación estándar de la pendiente m, de una recta.
σ_y	Desviación estándar para la variable dependiente y.
τ_s	Transmitancia interna del sustrato.
ψ	Factor adimensional de proporcionalidad que caracteriza la distribución no uniforme de temperaturas en el cuerpo, función del número de Biot.
Γ	Función de ajuste de la respuesta del detector con el que se realizan las mediciones.
Δ	Incertidumbre absoluta de una medida; Cambio en el valor de alguna variable.
Φ	Función de ajuste del flujo de la radiación incidente.

TABLAS

Capítulo 1

Tabla 1. Propiedades térmicas para diversos materiales de construcción, según la norma española NBE-CT-79 [Real Decreto 2.429/79, 1979].

Tabla 2. Propiedades térmicas para diversos materiales según datos de la ASHRAE [ASHRAE, 2001].

Capítulo 3

Tabla 3. Promedio anual de velocidad (m/s) y frecuencia (%) de viento en cada una de las direcciones, porcentaje anual de calmas, promedio anual de velocidad y máximos valores de velocidad y frecuencia; para la Cd. de México, Guadalajara, Monterrey, León y Puebla.

Tabla 4. Promedio anual de velocidad (m/s) y frecuencia (%) de viento en cada una de las direcciones, porcentaje anual de calmas, promedio anual de velocidad y máximos valores de velocidad y frecuencia; para Chihuahua, Manzanillo, Salina Cruz, Tampico y Veracruz.

Tabla 5. Valores promedio y máximos diarios de velocidad del viento para La Venta, Oaxaca, durante el mes de agosto.

Capítulo 4

Tabla 6. Valores de densidad y peso volumétrico, obtenidos para muestras de ladrillo rojo, tepetate, adobe, tabicón y concreto.

Tabla 7. Valores de temperatura y masa medidos para la estimación del calor específico de una muestra esférica de ladrillo rojo, por el método de mezclas.

Tabla 8. Valores de temperatura y masa medidos para la estimación del calor específico de una muestra esférica de tepetate, por el método de mezclas.

Tabla 9. Valores de temperatura y masa medidos para la estimación del calor específico de una muestra esférica de adobe, por el método de mezclas.

Tabla 10. Valores de temperatura y masa medidos para la estimación del calor específico de una muestra esférica de tabicón, por el método de mezclas.

Tabla 11. Valores de temperatura y masa medidos para la estimación del calor específico de una muestra esférica de concreto, por el método de mezclas.

Tabla 12. Valores de calor específico c , estimados experimentalmente para muestras de ladrillo rojo, tepetate, adobe, tabicón y concreto.

Tabla 13. Valores típicos de T_m (temperatura del material) y T_b (temperatura del baño María), durante el proceso de enfriamiento en régimen regular de una muestra de ladrillo rojo.

Tabla 14. Valores típicos de T_m (temperatura del material) y T_b (temperatura del baño María), durante el proceso de enfriamiento en régimen regular de una muestra de tepetate.

Tabla 15. Valores típicos de T_m (temperatura del material) y T_b (temperatura del baño María), durante el proceso de enfriamiento en régimen regular de una muestra de adobe.

Tabla 16. Valores típicos de T_m (temperatura del material) y T_b (temperatura del baño María), durante el proceso de enfriamiento en régimen regular de una muestra de tabicón.

Tabla 17. Valores típicos de T_m (temperatura del material) y T_b (temperatura del baño María), durante el proceso de enfriamiento en régimen regular de una muestra de concreto.

Tabla 18. Valores de difusividad térmica para las muestras de ladrillo rojo, tepetate, adobe, tabicón y concreto.

Tabla 19. Propiedades térmicas evaluadas para diferentes materiales de construcción (Valores Promedio - VP), con sus respectivas incertidumbres absoluta (IA) y relativa (IR).

Tabla 20. Propiedades térmicas de materiales de construcción obtenidas experimentalmente (Propios) y aquellas mencionadas en bibliografía nacional e internacional.

Tabla 21. Coeficientes promedio de transferencia de calor por convección h ($W/m^2\text{°C}$) para muros de ladrillo rojo, tepetate, adobe y concreto; con su respectiva desviación estándar σ .

Tabla 22. Ecuaciones de relación entre Nu_x y Re_x para los diferentes muros considerados y $Pr=0.708$.

Capítulo 5

Tabla 23. Corrida típica de las variables que intervienen durante la erosión iónica con magnetrones asistida por radiofrecuencia del blanco de hierro puro.

Tabla 24. Valores promedio en % (integrados por zonas del espectro solar) de reflectancia y transmitancia, para los filtros solares antes y después del tratamiento térmico de reducción, además de la absorbancia deducida.

Capítulo 6

Tabla 25. Diferencia porcentual en el consumo energético según simulaciones en E-10, al usar datos experimentales vs datos de la norma NOM-008-ENER-2001 para diferentes localidades.

Tabla 26. Datos de clima y radiación para tres diferentes localidades en México, seleccionadas para este estudio.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Consumo energético del sector residencial nacional

El consumo nacional final total de energía en el año 2006 para México fue de 4524.688 PJ (Figura 1), un 3% mayor a lo registrado en 2005, de los cuales el sector Residencial, Comercial y Público contribuye con 844.186 PJ (18.7%). Dentro de dicho sector, el subsector residencial tiene una participación del 83.5% (705.165 PJ) del total, y deja en segundo término al subsector comercial con el 13.7% (115.276 PJ) y al final el subsector público, con un consumo de sólo el 2.8% del total (23.746 PJ). Desde el punto de vista ambiental, dicho consumo energético en el sector residencial, comercial y público tiene repercusiones directas, ya que el uso de combustibles fósiles predomina (Figura 2); el gas licuado es el energético mayormente utilizado, representa el 38.2% del total (322.094 PJ), mientras que la leña alcanza el 29.3% (247.202 PJ) y la electricidad el 27.4% (231.329 PJ); el gas seco 4.5% (37.756 PJ), el diesel 0.5% (3.956 PJ) y los querosenos participan con 0.2% del total (1.849 PJ).

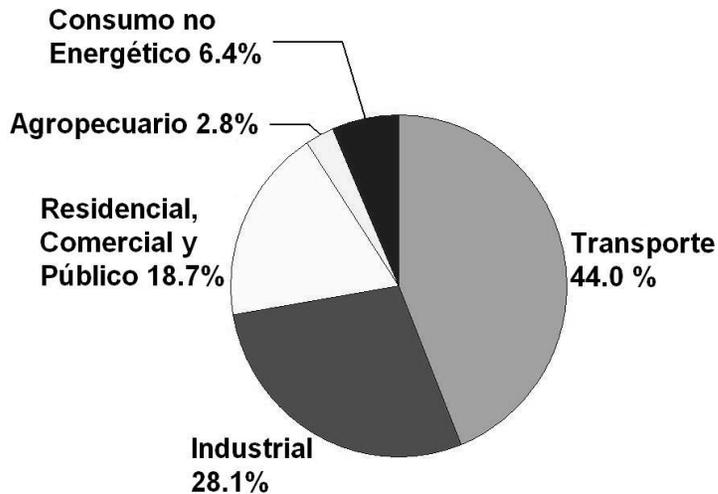


Figura 1. Estructura porcentual del consumo nacional final total de energía para el año 2006 (4,524.688 petajoules totales), [tomado de internet: http://www.sener.gob.mx/webSener/res/PE_y_DT/pub/Balance%20Nacional%20de%20Energia%202006.pdf].

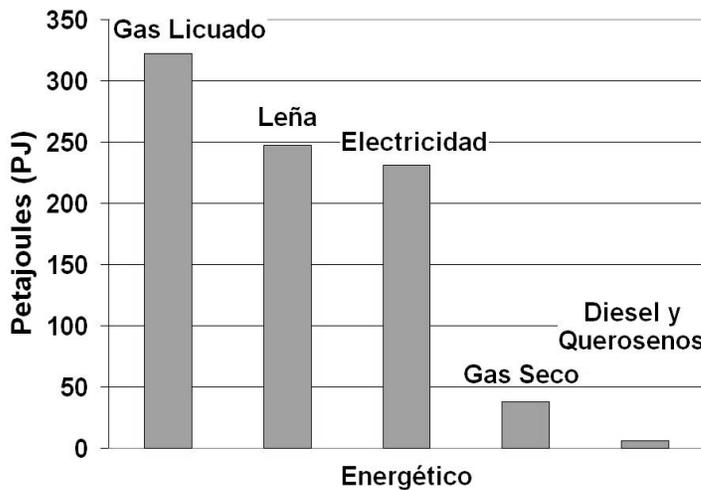


Figura 2. Consumo total de energía en el sector residencial, comercial y público por tipo de energético para el año 2006 (844.186 petajoules). [tomado de internet:

http://www.sener.gob.mx/webSener/res/PE_y_DT/pub/Balance%20Nacional%20de%20Energia%202006.pdf].

En particular, si únicamente se considera el consumo energético del subsector residencial en el año 2006, el gas licuado y la leña fueron los combustibles más usados, con una participación de 37.8% (266.481 PJ) y 35.1% (247.202 PJ) del total del subsector, respectivamente; seguidos por la electricidad, que aportó 22.7% (160.027 PJ); el gas seco 4.2% (29.605 PJ) y los querosenos 0.3% (1.849 PJ).

Una parte importante del sector residencial, comercial y público resultan ser las edificaciones, por lo cual son fundamentales los avances tecnológicos que se desarrollen, para propiciar el ahorro de energía en ellas, con el fin de disminuir el consumo energético en todo el sector. Esta importancia de las edificaciones se subraya ya que el subsector residencial (constituido esencialmente de casas-habitación) representa la mayor parte del consumo energético de todo el sector.

La sensación humana de confort dentro de una edificación depende principalmente de tres factores específicos: el confort higrotérmico (también llamado simplemente térmico), el acústico y el de iluminación. Indudablemente el más importante, y que comúnmente se encuentra fuera de los intervalos de tolerancia dentro de una edificación, es el confort higrotérmico. La ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) define el confort térmico como: aquella condición de la mente y el cuerpo que expresa satisfacción con la temperatura ambiente. El confort térmico depende de la temperatura radiante de los cuerpos y de la temperatura, humedad y velocidad del aire.

La inmensa mayoría de las viviendas y edificios que se construyen en los países en vías de desarrollo, no tienen equipos adecuados de calefacción o de aire acondicionado, para mantener las condiciones del aire interior dentro de los intervalos de confort higrotérmico humano. Esto supone que el edificio, por su diseño, orientación, materiales y dispositivos, es el que ha de defender a los ocupantes de la agresividad térmica y humedad del medio.

En México, se presenta un gran consumo de energía en las edificaciones por el concepto de acondicionamiento de aire, durante las épocas de mayor calor, principalmente en las zonas norte y costera del país. Este tipo de uso energético favorece la degradación del medio ambiente debido al consumo de combustibles de origen fósil para la generación de la

electricidad que hace funcionar los sistemas de acondicionamiento de aire, lo que provoca, continuar con la abundante emisión de gases contaminantes a la atmósfera. Por otro lado, la facturación por el consumo energético no resulta despreciable y llega a representar parte importante en los gastos de las empresas o de los mismos usuarios de casas-habitación. Para las viviendas cuyos habitantes no cuentan con los medios económicos necesarios para disponer de un sistema de acondicionamiento de aire, el problema no se reduce al ámbito puramente monetario o de daño ecológico, sino que repercute directamente en la calidad de vida, que día a día sufren.

El incorrecto diseño térmico de las edificaciones en varias localidades de nuestro país genera necesidades de acondicionamiento de aire al interior de ellas. En lo que se refiere a la etapa de selección de los materiales de construcción a utilizar, muy pocas veces la principal prioridad es optimizar el funcionamiento energético de la edificación, a partir de conocer, entre otros parámetros, las propiedades térmicas de los materiales de construcción, así como su disposición, para así determinar la conveniencia de su uso bajo las condiciones climáticas que predominan en la localidad en cuestión. Surge así una disfuncionalidad bioclimática de la edificación, que desemboca en un elevado consumo de energía convencional para abatir los altos niveles de discomfort que presentan.

Para mejorar el diseño térmico de las edificaciones, y lograr la comodidad de sus ocupantes con el mínimo consumo de energía, en México existe la norma oficial NOM-008-ENER-2001, de eficiencia energética en edificaciones para envolvente de edificios no residenciales [Diario Oficial de la Federación, 2001]. Su objetivo principal busca proporcionar los elementos e información a través de los cuales se pueda limitar la ganancia de calor de las edificaciones a través de su envolvente, con el objeto de racionalizar el uso de la energía en los sistemas de enfriamiento. Esta Norma se aplica a todos los edificios nuevos y las ampliaciones de edificios existentes; quedan excluidos aquellos edificios cuyo uso primordial sea industrial o habitacional. Si el uso de un edificio dentro del campo de aplicación de esta Norma, constituye el 90% o más del área construida, esta Norma se debe aplicar a la totalidad del edificio.

Para los cálculos de ganancia térmica de la edificación, dicha norma propone una metodología relativamente sencilla, que incluye el empleo de un conjunto de valores para las propiedades térmicas y de transferencia de calor, de diferentes materiales de construcción. Muchos de esos valores fueron obtenidos de bibliografía internacional, que parte de condiciones estándares, ya que la mayoría de las veces aún no han sido medidos para el tipo específico de materiales que son empleados en nuestro país, y mucho menos bajo las condiciones climáticas que predominan en las diferentes regiones nacionales.

Un ejemplo de lo anterior resulta el coeficiente de transferencia de calor por convección, para el cual únicamente se indican cuatro valores predeterminados según se trata de una superficie interior o exterior, así como su posición vertical u horizontal. Lo anterior sin lugar a dudas resulta en un cálculo mucho menos apegado a la realidad, es decir, es una norma con un margen de error amplio, lo que sin lugar a dudas afecta la precisión del diseño térmico de las edificaciones; por lo que la finalidad de la norma, en cuanto a proporcionar elementos e información para abatir el consumo energético en las edificaciones a través de su envolvente, no se podrá conseguir plenamente.

Con base en lo expuesto, resulta necesario determinar experimentalmente propiedades térmicas y de transferencia de calor (conductividad térmica y coeficientes de transferencia de calor por convección) de los materiales de construcción de mayor uso en nuestro país, así como de aquellos que son característicos de nuestras regiones y cuyas propiedades térmicas podrían ayudar a la construcción de edificaciones de menor consumo energético, bajo los diferentes tipos de climas que predominan en el territorio nacional. Al mismo tiempo se generaría información especializada y útil para todas aquellas personas inmersas dentro de la industria de la construcción, tales como los mismos constructores, ingenieros civiles, arquitectos, etc., ello aportaría datos valiosos para la elaboración futura de una norma de eficiencia energética de edificios residenciales en México, y lograr así impulsar el concepto de ahorro de energía en casas-habitación.

1.2 Algunos datos térmicos de materiales de construcción

La densidad aparente es un parámetro fundamental para diferenciar la conductividad de familias de materiales muy semejantes, como los concretos y aislantes. Existe una ecuación que relaciona bajas conductividades para bajas densidades, ya que la ligereza del material suele estar producida por huecos en su interior ocupados por aire, que es mucho más aislante que el material compacto. Esta propiedad permite llegar a conocer los valores de la conductividad, a partir de los valores correspondientes a densidades determinadas.

La densidad (kg/m^3) de los materiales de construcción puede tener valores muy dispares, desde 3000 kg/m^3 para algunas las rocas compactas, hasta sólo 25 kg/m^3 de los materiales aislantes, y es el factor determinante de la capacidad térmica de los materiales de los muros. Los valores de las densidades de los materiales de construcción habituales están perfectamente tabulados, no ocurre lo mismo con los valores del calor específico que han sido poco estudiados.

La capacidad térmica ($\text{J/m}^3\text{K}$) de los materiales de construcción de un muro, tiene una gran influencia en los procesos de transmisión de calor en un régimen transitorio, ya que se define el fenómeno de la inercia térmica, el retardo y amortiguación de la onda de calor; y favorece la estabilidad térmica del ambiente interior de los edificios. El calor específico (J/kg K) es uno de los dos factores que determinan la capacidad térmica de un material y su magnitud suele oscilar muy poco entre la mayoría de los materiales de construcción, con valores de 800 a 1200 J/kg K en los materiales pétreos y entre 900 y 1500 J/kg K en los materiales orgánicos, destaca como excepcionalmente alto el calor específico del agua con un valor de 4184 J/kg K . Ello implica que el calor específico de un material puede aumentar bastante si contiene una elevada proporción de agua en su masa, como ocurre con el terreno natural o los muros húmedos.

La capacidad térmica total de un muro ($\text{J/m}^2\text{K}$) es proporcional a su espesor, y dado que los materiales densos, además de tener una gran capacidad térmica, suelen ser buenos conductores térmicos y deben instalarse en grandes espesores para proporcionar el suficiente aislamiento térmico, existe la coincidencia que la construcción pesada (piedra, concreto...) tenga poco aislamiento y mucha inercia térmica, mientras que la construcción ligera (madera, aislantes...) tenga las propiedades opuestas.

En España, el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo tiene disponible la Norma Básica NBE-CT-79 sobre Condiciones Térmicas en los Edificios. Los valores de la conductividad térmica están ampliamente tabulados, y según dicha norma, han sido obtenidos por métodos experimentales. Los valores propuestos se suelen referir a materiales secos a 20°C .

A continuación, en la Figura 3 se muestran los valores de la conductividad de conjuntos de materiales de construcción similares, por orden de densidad, con la ecuación que relaciona ambas propiedades físicas; mientras que la Tabla 1 presenta diversas propiedades físicas, y en especial térmicas para varios tipos de materiales. Todos los datos han sido extraídos de la norma española NBE-CT-79: Es necesario señalar que en las siguientes tablas y párrafos, cuando aparece el término “hormigón” nos referimos al concreto. Dicho término es el utilizado en la norma ya que en España los concretos son comúnmente llamados “hormigones”.

Densidad Apar. kg/m ³	Conductividad W/m °K	Material: Fábricas de bloques y ladrillos
600	0.35	Fábrica bloques hormigón celular vapor L
800	0.41	Fábrica bloques hormigón celular vapor M
1000	0.44	Fábrica bloques huecos hormigón L
1000	0.47	Fábrica bloques hormigón celular vapor P
1200	0.49	Fábrica bloques huecos hormigón M
1200	0.49	Fábrica ladrillo hueco
1400	0.56	Fábrica bloques huecos hormigón P
1600	0.76	Fábrica ladrillo perforado
1600	0.79	Fabrica ladrillo silico-calcáreo
1800	0.87	Fábrica ladrillo cerámico macizo

Fuente: NBE-CT-79

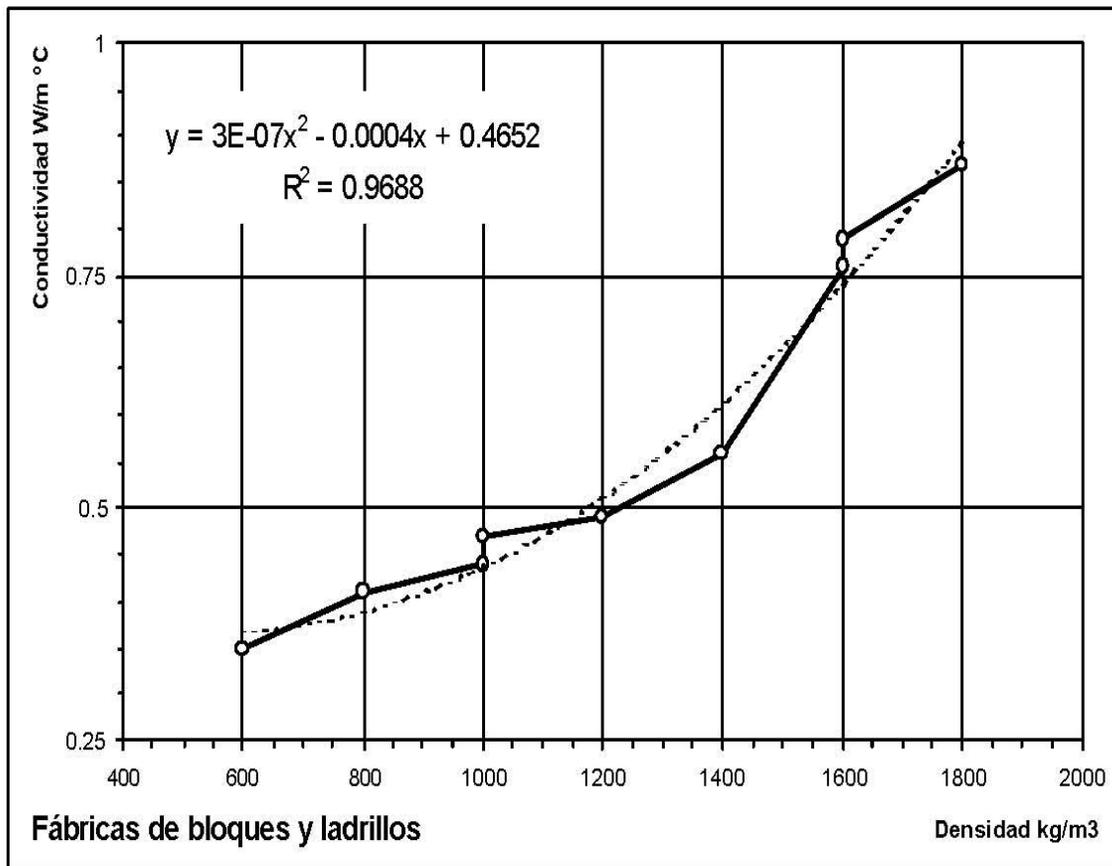


Figura 3. Conductividad en función de la densidad para fábricas de bloques de hormigón y ladrillos, según la norma española NBE-CT-79 [Real Decreto 2.429/79, 1979]

Tabla 1. Propiedades térmicas para diversos materiales de construcción, según la norma española NBE-CT-79 [Real Decreto 2.429/79, 1979].

Material	Densidad Kg/m ³	Calor Específico J/kg°C	Conductividad W/m°C	Capacidad Térmica MJ/m ³ °C	Difusividad mm ² /s
Alfombras y moquetas	1000	1350	0.05	1.35	0.04
Caucho vulcanizado (80% caucho)	1120	2000	0.15	2.24	0.07
Tablero aglomerado de partículas	650	1215	0.08	0.79	0.10
Pintura bituminosa	1200	1460	0.20	1.75	0.11
Agua (sin convección)	1000	4184	0.60	4.18	0.14
Corcho expandido con resinas +/-50kg	200	1460	0.05	0.29	0.16
Madera conífera	600	1380	0.14	0.83	0.17
Tablero fibra madera normal	625	1340	0.16	0.84	0.19
Madera frondosa	800	1255	0.21	1.00	0.21
Cartón-yeso	900	920	0.18	0.83	0.22
Bloque hormigón ligero macizo	1000	1050	0.33	1.05	0.31
Poliuretano expandido	40	1590	0.02	0.06	0.36
Asfalto puro	2100	920	0.70	1.93	0.36
Ladrillo macizo	1800	1330	0.87	2.39	0.36
Fibro cemento P +/- 200kg	2000	1250	0.93	2.50	0.37
Hormigón ligero	1000	1050	0.40	1.05	0.38
Bloque hormigón ligero	1400	1050	0.56	1.47	0.38
Guarnecido de yeso	800	920	0.30	0.74	0.41
Vidrio plano	2500	836	0.95	2.09	0.45
Fábrica ladrillo cerámico macizo	1800	878	0.87	1.58	0.55
Alicatado	2000	920	1.05	1.84	0.57
Adobe	1600	920	0.95	1.47	0.65
Hormigón armado	2400	1050	1.63	2.52	0.65
Mortero de cemento	2000	1050	1.40	2.10	0.67
Grava	1700	920	1.21	1.56	0.77
Terreno coherente humedad natural	1800	1460	2.10	2.63	0.80
Poliestireno	25	1590	0.03	0.04	0.83
Hormigón en masa vibrado	2400	805	1.63	1.93	0.84
Arena	1500	920	1.28	1.38	0.93
Mampostería granito	2800	920	2.50	2.58	0.97
Tierra vegetal	1800	920	1.80	1.66	1.09
Hielo 0°C	917	2035	2.25	1.87	1.21
Rocas compactas	2750	880	3.50	2.42	1.45
Acero y fundición	7600	502	54.00	3.82	14.15
Aluminio	2700	920	232.00	2.48	93.40

Por último, la Tabla 2 contiene datos de la American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, sobre densidad, conductividad térmica y calor específico, para algunos materiales de construcción, en donde los valores son considerados para una temperatura de 24°C.

Tabla 2. Propiedades térmicas para diversos materiales según datos de la ASHRAE [ASHRAE, 2001].

Material	Densidad (kg/m³)	Conductividad térmica (W/m°C)	Calor específico (J/kg°C)
Ladrillo recocido	2400	1.21-1.47	790
	2240	1.07-1.30	
	2080	0.92-1.12	
	1920	0.81-0.98	
	1760	0.71-0.85	
	1600	0.61-0.74	
	1440	0.52-0.62	
	1280	0.43-0.53	
1120	0.36-0.45		
Concreto (con arena y grava o piedra)	2400	1.4-2.9	800-1000
	2240	1.3-2.6	
	2080	1.0-1.9	
Concreto (con caliza)	2240	1.6	
	1920	1.14	
	1600	0.79	

1.3 Filtros solares

Para remediar el problema del disconfort generado en el interior de las edificaciones por las inadecuadas propiedades ópticas y térmicas de las ventanas, se ha probado la instalación de ventanas con doble vidrio en las que el espacio entre ambos vidrios se encuentra al vacío (presiones muy bajas) o relleno de aire o algún gas de baja conductividad térmica. Sin embargo, tal opción es demasiado cara, ya que dentro de los costos de fabricación se debe contemplar un doble costo en el vidrio, el marco especial de aluminio, así como el costo que implica generar la baja presión en la cámara entre ambos vidrios, o en su defecto su relleno con algún gas conveniente.

Una solución acorde al concepto de ahorro de energía y sin sacrificar por ello el confort humano dentro de la edificación, es colocar a los vidrios recubrimientos de materiales selectivos a la radiación, que se conoce como filtros solares. Se necesita que los filtros impidan el paso de la radiación solar, cuya longitud de onda está dentro del intervalo del infrarrojo cercano (radiación térmica), y permitan el paso de la radiación solar visible.

Se han desarrollado a nivel industrial algunos vidrios con recubrimientos que le confieren las coloraciones verdosas, azuladas y grisáceas que presentan los grandes edificios. Desgraciadamente buena parte de los vidrios con recubrimientos que se encuentran actualmente en el mercado, no funcionan de manera óptima, ya que presentan la peculiaridad de que absorben hasta el 80% de la radiación solar, la cual posteriormente es reirradiada por el mismo vidrio hacia el interior y exterior de la edificación, sólo que lo hace en forma de radiación de onda larga (radiación térmica o infrarroja).

Otros vidrios, su principal característica es que son recubrimientos altamente reflejantes, que disminuyen efectivamente la transmitancia en el infrarrojo cercano, pero también para el intervalo visible del espectro, lo cual ocasiona el problema de la disminución de la visibilidad en el interior del edificio, provocándose así un disconfort de iluminación, o sea, una disminución en el nivel de iluminación dentro de la edificación.

En el ámbito de la investigación, se han estudiado algunos materiales cuyas propiedades se tornan interesantes para su utilización como recubrimientos selectivos a la radiación solar en las ventanas de edificaciones. Ejemplos de ello son: las películas delgadas de $\text{SnS-Cu}_x\text{S}$, propuestas por Nair M.T.S. y Nair P.K. [1991] para su utilización como recubrimiento para el control solar. Nair M.T.S. y coautores [1999] producen películas de Cu_2O , a partir de baños químicos, analizan sus propiedades ópticas, estructurales y eléctricas, y señalan su posible utilización como filtros solares. Richardson y coautores [2001] mencionan el depósito de películas de Cu y Cu_2O sobre pequeños sustratos de vidrio, los cuales tenían un recubrimiento de SnO_2/F , destacan las propiedades ópticas selectivas del óxido. Correa G. [2002] fabricó también filtros solares al combinar películas delgadas de óxidos y sulfuros de cobre, utiliza ya sustratos de vidrio de dimensiones relativamente grandes (0.3 x 0.6 m).

Respecto a la absorción de radiación solar de un vidrio, en general para los intervalos ultravioleta e infrarrojo cercano del espectro electromagnético, puede afirmarse que la primera se origina por la presencia de Fe_2O_3 y la última por la de FeO , [Pulker H. K., 1984; Salmang H., 1962]. Con la técnica de sol-gel, Özer N. y Tepehan F. [1999] depositaron películas de Fe_2O_3 sobre sustratos de cuarzo y de vidrio; sin embargo, las mediciones de transmitancia de la película se limitaron sólo al intervalo visible del espectro.

Por lo anterior, resulta interesante analizar el comportamiento de una película de FeO sobre un sustrato de vidrio cal-sosa, para su uso como filtro solar ahorrador de energía, en las ventanas de edificaciones.

1.4 Planteamiento, hipótesis y objetivos del trabajo

Es posible estimar experimentalmente algunas de las principales propiedades térmicas y de transferencia de calor de los materiales de construcción más utilizados en México; ello mediante técnicas de medición mejores que las más usadas y difundidas, lo cual permitirá tener datos más cercanos a la realidad, y coadyuvar al ahorro de energía en las edificaciones a través de un correcto diseño térmico que se realice de ellas. Además, los resultados de una evaluación del desempeño energético de una edificación, cuando se usen dichos datos experimentales, contrastarán con los resultados que se obtienen cuando son empleados los datos sugeridos por la norma mexicana vigente NOM-008-ENER-2001.

Se plantea también que se puede propiciar un ahorro en el consumo de energía en una vivienda por concepto de calefacción y aire acondicionado, cuando se utilizan filtros solares con base en óxidos de hierro en las ventanas, donde actuarán como elemento selectivo a la radiación solar con una transmitancia baja en el infrarrojo, para evitar el calentamiento excesivo en el interior de la edificación con ganancia térmica grande a través de las ventanas para las temporadas calurosas; así como la pérdida de calor generado en el interior, durante las temporadas de clima frío.

Los objetivos que se buscó obtener fueron: evaluar de forma experimental las propiedades térmicas y de transferencia de calor (conductividad térmica y coeficientes de transferencia de calor por convección) de los materiales de construcción más utilizados en nuestro país, bajo las condiciones que predominan en el territorio nacional. Así, se contribuirá de manera importante a la conformación de una norma de eficiencia energética para edificaciones mucho más completa y precisa, lo cual favorece el correcto diseño térmico de edificaciones a nivel nacional; y se generará información útil para los constructores, ingenieros civiles, arquitectos, etc. para el mejor diseño térmico de casas-habitación, con datos interesantes para la consolidación de una norma de eficiencia energética de edificios residenciales en México, y lograr impulsar el concepto de edificaciones sustentables.

Además, fabricar filtros solares con base en óxidos de hierro, los cuales consisten en películas delgadas de dicho materiales depositadas sobre sustratos de vidrio cal-sosa mediante la técnica de la erosión iónica (sputtering) asistida con magnetrones, a partir de blancos de alta pureza; y mostrar también los posibles ahorros en el consumo energético de una vivienda, cuando se utilizan en las ventanas.

Capítulo 2

ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1 Transferencia de calor por conducción

Existen tres diferentes mecanismos por medio de los cuales es posible que se lleve a cabo la transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

Para la conducción, la rapidez de transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura [Holman J.P., 1998]:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} \propto \frac{\partial T}{\partial x}$$

Si se inserta una constante de proporcionalidad [Holman J.P., 1998],

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

donde Q es el calor (J), A el área transversal al flujo de calor (m²) y T la temperatura (°C). A la constante positiva k se le llama la *conductividad térmica* y mide la capacidad del material para conducir el calor. El signo negativo se inserta para que la dirección del flujo de calor sea la correcta, esto es, contraria al gradiente de temperatura dentro del material. La ecuación 1 es conocida como *Ley de conducción de calor de Fourier*, en honor al físico matemático Joseph Fourier. Es prudente mencionar que en el Sistema Internacional, la conductividad térmica k tiene las unidades de W/m°C.

En todos los sólidos y líquidos el calor se conduce mediante la transferencia de energía vibratoria de los átomos. En los metales hay un número grande de electrones libres que se mueven fácilmente en el objeto. A ellos se debe la rápida transferencia de calor en los metales. La propiedad aislante (conductividad térmica pequeña) del vello y de la lana se debe principalmente a su capacidad de retener aire.

La ecuación general de conducción de calor en tres dimensiones y sin fuentes de calor es [Holman J.P., 1998]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (2)$$

donde α es la difusividad térmica (m²/s). En esta expresión se considera que la temperatura es una función de la posición (x,y,z), así como del tiempo (t); esto es, se trata de conducción en estado transitorio. Si la temperatura no depende del tiempo, se conoce como conducción en estado estacionario.

2.1.1 Conducción transitoria: Enfriamiento de cuerpos en régimen regular

El enfriamiento de un cuerpo homogéneo e isotrópico de forma arbitraria dentro de un medio con una temperatura constante y un coeficiente de transferencia de calor presente en la superficie del cuerpo, el cual se considera constante con respecto al tiempo, se determina por medio de la ecuación diferencial de conducción 2. Una solución para dicha ecuación con la temperatura del medio constante, indica que la variación de la temperatura en cualquier punto del cuerpo sigue una ley exponencial [Nashchokin V.V., 1979]:

$$\theta = \sum_{i=1}^{i=\infty} A_i U_i e^{-m_i t} \quad (3)$$

donde $\theta = T_c - T_m$;

- A_i – constante dependiente de la forma del cuerpo y la distribución inicial de temperatura;
- U_i – función de coordenadas, la cual describe la distribución de temperaturas en el espacio;
- m_i – constantes que se incrementan positivamente ($m_1 < m_2 < m_3 < \dots < m_i$);
- T_c, T_m – temperatura del cuerpo y del medio respectivamente;
- t – tiempo.

Un análisis de la ecuación 3 indica que a pequeños valores de t , el proceso de enfriamiento depende de las condiciones iniciales y es de una naturaleza aleatoria no asociada con las condiciones de enfriamiento. Esta etapa de enfriamiento depende no solamente del primero, sino además de los subsecuentes términos de las series de la ecuación 3. A dicha etapa se le llama *etapa aleatoria de enfriamiento*.

Conforme el tiempo t va incrementándose, las series convergen rápidamente así como todos sus términos, excepto el primero que tiende a cero. Cuando t excede cierto valor, las condiciones iniciales tienen una importancia secundaria y el proceso está completamente determinado sólo por las condiciones de enfriamiento en la superficie del cuerpo, sus propiedades físicas y sus dimensiones. La segunda etapa se llama *etapa de enfriamiento en régimen regular* y es descrita por el primer término de las series de la ecuación 3:

$$\theta = A_1 U_1 e^{-m_1 t} \quad (4)$$

Al obtener logaritmos en ambos lados de la ecuación 4, puede verse que con el régimen regular de conducción, el logaritmo natural de la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y el medio, varía linealmente con el tiempo:

$$\ln \theta = \ln(AU) - mt = -mt + C(x, y, z) \quad (5)$$

Al diferenciar ambos lados de la ecuación 5 con respecto al tiempo, se obtiene

$$m = -\frac{1}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (6)$$

La cantidad m es llamada la *razón de enfriamiento en régimen regular*, con unidades de s^{-1} .

Al considerar cualquier punto dentro del cuerpo y medir su temperatura, el proceso de enfriamiento puede ser representado en una curva T vs t , que representaría ambas etapas del enfriamiento; sin embargo, la parte lineal de dicha curva sería indiscutiblemente la etapa de

régimen regular, y de la ecuación 5 es claro que la cantidad m es igual a la pendiente de dicha parte de la curva, sólo que de signo contrario.

La teoría de enfriamiento de cuerpos en régimen regular, desarrollada por G. Kondratyev, es aplicable a cuerpos de cualquier forma. En el caso general, la cantidad m está determinada por la ecuación [Nashchokin V.V., 1979]:

$$m = \psi F \frac{h}{C} \quad (7)$$

donde h – coeficiente de transferencia de calor entre el medio y el cuerpo ($W/m^2\text{°C}$)

F – superficie del cuerpo (m^2)

C – capacidad calorífica ($J/\text{°C}$)

ψ – factor adimensional de proporcionalidad que caracteriza la distribución no uniforme de temperaturas en el cuerpo, función del número de Biot.

Si el coeficiente de transferencia de calor h tiende a infinito, entonces m es directamente proporcional a la difusividad térmica α (m^2/s) del cuerpo enfriado [Nashchokin V.V., 1979]:

$$\alpha = Km_{\infty} \quad (8)$$

donde K es un factor de proporcionalidad que depende del tamaño y forma del cuerpo, con dimensiones de m^2 . Para una esfera de radio r [Nashchokin V.V., 1979],

$$K = \left(\frac{r}{\pi}\right)^2 \quad (9)$$

mientras que para un cilindro de radio r y longitud l [Nashchokin V.V., 1979]:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{2.405}{r}\right)^2 + \frac{\pi}{l}} \quad (10)$$

A pesar de que existen diversos métodos para determinar experimentalmente la conductividad térmica de diferentes tipos de materiales [Eckert E.R.G. y Goldstein R.J., 1976; Chaddock J.B. y Todorovic B., 1991; Soloukhin R.I. y Afgan N.H., 1985], la ventaja del método de Kondratyev radica en la simplicidad de los estudios experimentales y equipo utilizado; además, a diferencia de otros métodos tradicionales, el método de Kondratyev no implica un calentamiento excesivo de la muestra, y se evita la evaporación de la humedad que contiene, por lo que el valor de conductividad térmica obtenido será mucho más apegado al que presentaría la muestra en una edificación real.

Calor específico

Si una cantidad de calor ΔQ produce un cambio ΔT en la temperatura del cuerpo, su *capacidad calorífica* se define por:

$$\text{Capacidad calorífica} = \Delta Q / \Delta T \quad (11)$$

La unidad de la capacidad calorífica en el Sistema Internacional es el J/K o J/°C. La cantidad de calor ΔQ necesaria para producir un cambio ΔT en la temperatura es proporcional a la masa m de la muestra y a ΔT (para ΔT pequeña); es decir, depende de la sustancia. Estos hechos pueden incorporarse en la ecuación [Benson H., 1996]:

$$\Delta Q = mc\Delta T \quad (12)$$

en donde c es el *calor específico* del material. La ecuación 12 se transforma en

$$c = \frac{1}{m} \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (13)$$

Que muestra que el calor específico es la capacidad calorífica por unidad de masa. Su unidad en el Sistema Internacional es J/kgK o J/kg°C.

El calor específico de una sustancia varía, por lo común, al cambiar la temperatura, así como también cambia de forma abrupta cuando la sustancia pasa de sólido a líquido o de líquido a gas. Además, depende del proceso mismo por medio del cual se llevó a cabo la transferencia de calor, ya que se tienen valores diferentes de calores específicos de sustancias a presión o a volumen constante. Sin embargo, para sólidos y líquidos la diferencia es pequeña y, en la práctica, lo que suele medirse, es el calor específico a presión constante c_p .

2.2. Transferencia de calor por convección

Si se tiene una placa de cualquier material a cierta temperatura mayor que la temperatura ambiente, dicha placa se enfría con mayor rapidez si se coloca frente a un ventilador, que si se expone al aire en reposo. El calor se disipa por convección y se designa al proceso como transferencia de calor por convección, forzada para el primer caso y natural para el segundo.

El término convección proporciona una noción intuitiva sobre el proceso que se lleva a cabo; para tratar el problema de una forma analítica y predecir qué tan rápido se enfriará específicamente dicha placa. Para ello se debe relacionar dicha rapidez de enfriamiento con respecto a las distintas condiciones que intervienen en el fenómeno, tales como el tipo de material del que está hecha la placa, la temperatura y velocidad del viento, etc.

Cuando un fluido se calienta o enfría localmente, su densidad cambia con respecto a la del fluido de los alrededores, y se crea una fuerza de flotación, la cual causa que aquellas partes del fluido más calientes, y por tanto más ligeras, se muevan en forma ascendente, y las más frías descendan, y se instaura una circulación natural [Athienitis A.K. y Santamouris M., 2002]. Dicho esquema de transferencia de calor se denomina como convección natural. Así, una placa caliente puede enfriarse por medio de la circulación natural que se genera en el aire circundante. En oposición, cuando el movimiento del fluido es incrementado por un medio exterior a los simples gradientes de temperatura (como por ejemplo un ventilador), entonces la transferencia de calor se le conoce como convección forzada.

Al considerar una placa caliente a una temperatura T_w ($^{\circ}\text{C}$), Figura 4, para expresar el efecto total de la convección se utiliza la ley de enfriamiento de Newton [Athienitis A.K. y Santamouris M., 2002]:

$$q = hA(T_w - T_f) \quad (14)$$

donde T_f es la temperatura del fluido ($^{\circ}\text{C}$), A el área de la superficie de la placa en contacto con el fluido (m^2), q la rapidez de transferencia de calor (W) y h se le llama el *coeficiente de transferencia de calor por convección* ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$). Ese coeficiente debe ser calculado de manera experimental, ya que depende de muchos factores tales como la velocidad, temperatura y tipo de fluido.

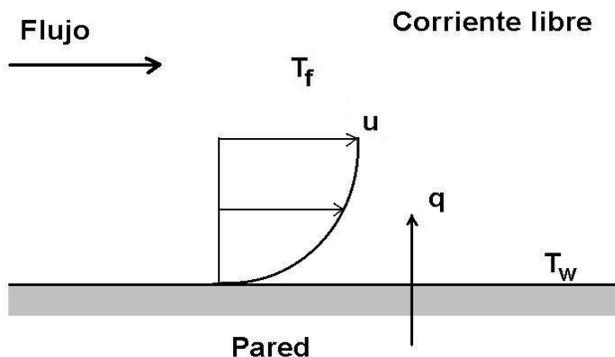


Figura 4. Transferencia de calor por convección forzada en una placa horizontal.

En el ámbito del diseño de edificaciones, la relación se constituye de manera directa, al considerar a la placa como una de las paredes que componen una edificación, y las variables que intervienen en el fenómeno de la convección, como las condiciones ambientales y de diseño.

En la bibliografía internacional existen estudios con respecto a la transferencia de calor por convección en edificaciones, enfocados a la obtención, experimental o analítica, de coeficientes de transferencia de calor por convección para los muros principalmente [Clear R.D. y coautores, 2003; Hagishima A. y Tanimoto J., 2003; Davies M. y coautores, 2005; Beausoleil-Morrison I, 2001]. Estudios de este tipo aún no se han llevado a cabo en nuestro país, y menos de una forma pormenorizada en cuanto a caracterizar cada uno de los materiales más usados en la industria de la vivienda en México. Algunos trabajos aislados pueden encontrarse [Corral M. y coautores, 2004]; sin embargo muchas de las veces son sólo análisis cualitativos que poco ayudan a la generación de información cuantitativa útil para el correcto diseño de edificaciones en nuestro país.

2.2.1 Semejanza en los procesos de intercambio de calor por convección

La *teoría de la semejanza* es la ciencia que estudia la similitud de los fenómenos [Mijeev M.A. y Mijeeva I.M., 1979]. El concepto de semejanza entre los fenómenos físicos se reduce a los postulados siguientes:

- a) El concepto de semejanza, en cuanto a los fenómenos físicos, es aplicable solamente a fenómenos de un mismo género con igual calidad, y que se describen analíticamente con ecuaciones similares tanto en forma, como en contenido.
- b) La premisa obligatoria para la semejanza entre los fenómenos físicos ha de ser su semejanza geométrica. Para que exista esta última, es necesario que los fenómenos en mención siempre se desarrollen en sistemas geoméricamente semejantes.
- c) Al llevar a cabo el análisis de los fenómenos semejantes sólo pueden compararse las magnitudes homogéneas (aquellas que tienen un mismo sentido físico e igual dimensión) en los puntos homólogos del espacio y en los momentos homólogos del tiempo.
- d) La semejanza de dos fenómenos físicos significa que todas las magnitudes que caracterizan los fenómenos examinados son similares.

En el proceso de intercambio de calor por convección la temperatura, la velocidad, la presión y frecuentemente los parámetros físicos del medio (viscosidad, conductividad térmica, densidad, etc.) pueden tener valores distintos en diferentes puntos. Sin embargo la similitud entre dos procesos semejantes se da cuando todas estas magnitudes en todo el volumen de los sistemas examinados son semejantes. Para cada una de estas magnitudes existe su propia constante de semejanza, y entre dichas constantes también siempre existen correlaciones estrictamente determinadas que se deducen a partir del análisis de la descripción matemática de los procesos. Dichas correlaciones tienen importancia central en la teoría de la semejanza, puesto que establecen la existencia de magnitudes especiales denominadas *números de semejanza*; los que conservan para todos los fenómenos

semejantes el mismo valor numérico. Los números de semejanza son complejos adimensionales formados por las magnitudes que caracterizan el fenómeno.

Los principales postulados de la teoría de la semejanza se pueden enunciar en forma de tres teoremas, que constituyen lo que se conoce como el Teorema de Buckingham [Mijeev M.A. y Mijeeva I.M., 1979]:

1. Los procesos semejantes tienen iguales números adimensionales.
2. La dependencia existente entre las variables que caracterizan cualquier proceso, puede representarse como la dependencia entre los números adimensionales.
3. Son semejantes aquellos procesos cuyas condiciones de univocidad son idénticas, y cuyos números adimensionales, compuestos por las magnitudes que forman parte de las condiciones de univocidad, tienen idéntico valor numérico.

Así, la teoría de la semejanza permite encontrar las ecuaciones de semejanza válidas para todos los procesos iguales sin integrar las ecuaciones diferenciales. A partir de éstas y al aplicar los datos experimentales se hallan los números adimensionales. La teoría de la semejanza no da una solución general: permite solamente generalizar los datos experimentales en la esfera limitada por las condiciones de similitud. Es correcto extender los resultados de un experimento separado sólo a fenómenos y procesos semejantes. El Teorema de Pi de Vaschy-Buckingham, establece que dada una ecuación física en la que están involucradas n variables físicas, si dichas variables se expresan en términos de k cantidades físicas independientes, entonces la ecuación original es equivalente a una ecuación con una serie de $p=n-k$ números adimensionales construidos con las variables originales. Este teorema proporciona un método de construcción de parámetros adimensionales incluso si la forma de la ecuación es desconocida. La elección de parámetros adimensionales no es única y el teorema no elige cuáles tienen significado físico.

El número de Reynolds determina la similitud hidromecánica entre las corrientes de los agentes portadores de calor, y está dado por la ecuación [Bejan A., 2004]:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (15)$$

donde:

ρ – densidad del fluido (kg/m^3)

u – velocidad del fluido (m/s)

D – dimensión característica del sistema (por ej: diámetro del tubo, longitud de placa, etc.) (m)

μ – viscosidad dinámica del fluido (kg/m s)

Para la mayor parte de los propósitos analíticos, el número de Reynolds crítico para la transición de flujo laminar a turbulento en una placa plana se toma generalmente como 5×10^5 ; el valor crítico depende en gran parte de las condiciones de rugosidad de la superficie y del nivel de turbulencia de la corriente libre.

El número de Prandtl es la característica termofísica del agente portador de calor, ya que es un parámetro que relaciona los espesores relativos de las capas límite hidrodinámica y térmica. Está compuesto solamente de los parámetros físicos viscosidad cinemática ν (m^2/s) y difusividad térmica α (m^2/s) [Bejan A., 2004]:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} \quad (16)$$

Cuando son iguales los números Re las condiciones de igualdad de los números Pr aseguran la semejanza térmica, es decir, la similitud de los campos de las diferencias de temperaturas entre dos medios y de los flujos térmicos en todo el volumen de los sistemas examinados.

Según la teoría de la semejanza, en los procesos donde ésta existe, deben ser también iguales los números de semejanza determinados. En los procesos de intercambio de calor por convección, también interviene el número Nusselt Nu, que caracteriza la intensidad del proceso de intercambio de calor por convección [Bejan A., 2004]:

$$\text{Nu} = \frac{hD}{k} \quad (17)$$

donde:

h – coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m²°C)

D –dimensión característica del sistema (por ejemplo el diámetro del tubo, longitud de placa, longitud desde el borde principal, etc.) (m)

k – conductividad térmica (W/m°C)

A la región de flujo que se desarrolla a partir del borde principal de la placa, en la que se observan los efectos de viscosidad, se le llama la *capa límite hidrodinámica*. Inicialmente, el desarrollo de la capa límite es laminar, pero a una distancia crítica del borde principal, según sea el campo de flujo y las propiedades del fluido, comienzan a amplificarse pequeñas perturbaciones en el fluido y tiene lugar un proceso de transición hasta que el flujo se vuelve turbulento. El espesor de la capa límite hidrodinámica δ en régimen de flujo laminar está dado según la siguiente ecuación [Holman J.P., 1998]:

$$\delta = \left(\frac{4.64}{\text{Re}_x^{1/2}} \right) x \quad (18)$$

donde:

x – distancia desde el borde principal (m)

Re_x – Número de Reynolds a una distancia x del borde principal

Por otra parte, en la zona de contacto entre el fluido y la placa caliente, la transferencia de calor se produce solamente por conducción, y a partir de ahí existe una zona en donde gradientes de temperatura están presentes en el flujo, la cual se define como *capa límite térmica*. Al considerar fluidos que poseen números de Prandtl mayores que 0.7 (la mayor parte de gases y líquidos caen dentro de esta categoría); al calentarse la placa en toda su longitud y bajo un régimen de flujo laminar, los espesores de la capa límite térmica δ_t y de la capa límite hidrodinámica δ se relacionan por [Holman J.P., 1998]:

$$\frac{\delta_t}{\delta} = \left(\frac{1}{1.026} \right) \text{Pr}^{-1/3} \quad (19)$$

El coeficiente local de transferencia de calor por convección, h_x , para una placa calentada en toda su longitud y con régimen de flujo laminar, se define por la relación [Holman J.P., 1998]:

$$h_x = \frac{3}{2} \left(\frac{k}{\delta_t} \right) \quad (20)$$

donde:

h_x – coeficiente local de transferencia de calor por convección ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

k – conductividad térmica ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$)

δ_t – espesor de la capa límite térmica

Para evaluar la transferencia de calor por convección sobre toda la superficie de la placa, se integra el coeficiente de transferencia de calor por convección sobre toda la longitud de la placa y así se obtiene el coeficiente promedio [Holman J.P., 1998]:

$$\bar{h} = \frac{\int_0^L h_x dx}{\int_0^L dx} = 2h_{x=L} \quad (21)$$

Otra manera de expresar el coeficiente local de transferencia de calor por convección, para una placa plana con flujo de aire paralelo en régimen laminar, es [Holman J.P., 1998]:

$$h_x = 0.332 \frac{k}{x} \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \left[1 - \left(\frac{x_0}{x} \right)^{3/4} \right]^{-1/3} \quad (22)$$

donde:

h_x – coeficiente local de transferencia de calor por convección ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

k – conductividad térmica del aire ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$)

x – distancia desde el borde principal (m)

x_0 – distancia desde el borde principal hasta el punto donde se inicia el calentamiento (m)

mientras que para una placa plana calentada en toda su superficie, la ecuación anterior se transforma en [Holman J.P., 1998]:

$$h_x = 0.332 \frac{k}{x} \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \quad (23)$$

2.3 Cálculo de incertidumbres en las mediciones experimentales

La incertidumbre en una medida es un parámetro necesario para la confiabilidad que se le puede otorgar a los resultados de un experimento. Dicha incertidumbre caracteriza la dispersión de valores que pueden ser atribuidos a una medida.

La incertidumbre absoluta es el intervalo de valores entre los cuales el valor promedio de la medida probablemente se encuentra. Si las medidas son sumadas o restadas, sus incertidumbres absolutas deben ser sumadas.

La incertidumbre relativa resulta de dividir la incertidumbre absoluta entre la mejor estimación (valor promedio). Para una medida G, su incertidumbre relativa es [D'Hainaut L., 1978]:

$$R_G = \left(\frac{\Delta G}{G_m} \right) \quad (22)$$

donde : G_m = valor promedio de la medida G

ΔG – incertidumbre absoluta de la medida G

Si G se obtiene a partir de dos cantidades H y J, a través de su multiplicación ($G=H*J$) o división ($G=H/J$), la incertidumbre relativa de G es [D'Hainaut L., 1978]:

$$R_G = R_H + R_J \quad (23)$$

Si G es obtenida mediante la multiplicación de un número exacto n por una medida H ($G=n*H$), la incertidumbre relativa de G es [D'Hainaut L., 1978]:

$$R_G = R_H \quad (24)$$

donde R_H , R_J = incertidumbre relativa de H y J respectivamente.

Si G es obtenida de elevar a la potencia n la medida H ($G=H^n$), la incertidumbre relativa de G es [D'Hainaut L., 1978]:

$$R_G = n * R_H \quad (25)$$

Frecuentemente es necesario hacer ajustes de modelos lineales a los resultados de mediciones, cuando una de las variables medidas depende de otra de ellas. En estas situaciones, la información que debe obtenerse son los parámetros que caracterizan a la función que debe relacionar ambas variables. Sin duda, la relación más simple es la lineal, en la que deben determinarse como parámetros la pendiente y la ordenada al origen de una recta.

El método más simple para el ajuste de una recta a un conjunto de parejas de datos experimentales se refiere a la regresión lineal, también conocido como el de mínimos cuadrados lineales. En este método se hace una minimización de la suma cuadrática de las diferencias entre los datos experimentales y la recta por ajustar, se define la pendiente m y la ordenada al origen b. Esto da como resultado un sistema de ecuaciones para dichas variables, a partir del cual se obtiene la solución. La desviación estándar σ_y para la variable dependiente y es [Baird D.C., 1995; Taylor J.R., 1997]:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - mx_i - b)^2}{N - 2}} \quad (26)$$

y la desviación estándar σ_m de la pendiente m , de la recta, es [Baird D.C., 1995; Taylor J.R., 1997]:

$$\sigma_m = \sigma_y * \sqrt{\frac{N}{N * \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2}} \quad (27)$$

donde N = número de pares experimentales (x_i, y_i)

b = ordenada al origen

2.4 Erosión iónica con magnetrones

La utilización por el hombre de recubrimientos registró progresos limitados en la antigüedad, basados en enchapados, baños en metales líquidos y barnices; sin embargo, fue recién a partir de la revolución industrial cuando comenzó un desarrollo consistente del tema, y generó un hito importante con el uso de la técnica de electrodeposición a partir de 1840. Durante el siglo XIX se produjeron las primeras películas delgadas metálicas por evaporación en vacío (es decir, a muy bajas presiones), hecho atribuido a Nahrwold en 1887. La técnica de evaporación en vacío tuvo inicialmente una amplia aplicación en óptica y uno de sus resultados más notables fue el recubrimiento en 1935 del espejo del telescopio del observatorio de Mount Wilson, de 2.5 m de diámetro. A finales del siglo XIX también se gestaron las ideas básicas y se produjeron las primeras aplicaciones de la técnica de deposición química en fase vapor. A partir de comienzos del siglo XX se registraron avances en varios frentes. En 1925 se desarrolló la electrodeposición de níquel-cromo, con lo que tomó gran auge la producción industrial de recubrimientos decorativos y protectores. A partir de 1910 se estableció comercialmente el método de recubrimiento con metales de proyección, mediante una llama de oxiacetileno. Se basa en aportar el material a depositar bajo la forma de un polvo metálico a una llama de oxiacetileno. El polvo metálico caliente y en estado plástico se proyecta contra la superficie a ser cubierta, donde se adhiere y enfría, y forma un recubrimiento.

No obstante, fue recién después de la Segunda Guerra Mundial (~1945) cuando comenzó el uso de recubrimientos en escala industrial, mediante el método de evaporación en vacío. En 1966, Mattox introdujo el proceso de “plateado iónico”, basado en el uso de un plasma en un método clásico de evaporación, lo que dio lugar a una rápida incorporación de plasmas a las técnicas de deposición física y química en fase vapor (denominadas comúnmente como PVD y CVD respectivamente).

En la erosión iónica con magnetrones el campo magnético mantiene confinado al plasma en un área menor y cercana al cátodo. A comienzos de los sesenta se le reconsideró como un proceso útil en el depósito de películas delgadas y ya para la década siguiente era ampliamente usada para la elaboración de circuitos de silicio. Hoy en día sus aplicaciones a gran escala más importantes se encuentran en la microelectrónica, industria automotriz y en vidrios destinados a la industria de la construcción.

Existen dos tipos de magnetrones de acuerdo a la forma del blanco, el cilíndrico y el plano o rectangular; en ambos, se incluyen imanes permanentes por atrás del material a erosionar, con un campo magnético paralelo a su superficie y con una intensidad de cientos de gauss. La configuración perpendicular entre sí de los campos eléctrico y magnético induce a los electrones en el plasma a seguir un movimiento helicoidal (Figura 5) y en el cual el centro de su órbita se desplaza en la dirección del producto vectorial entre los dos campos (ExB). El campo magnético está orientado de tal manera que los electrones al moverse en dicha dirección ExB quedan confinados en un toroide sobre la superficie del blanco (Figura 6). Este confinamiento crea un plasma con mayor densidad de partículas, y por lo tanto más eficiente, que en los sistemas de erosión iónica donde el campo magnético está ausente (*diode sputtering*).

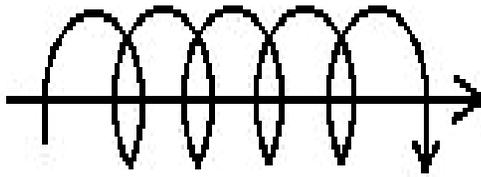


Figura 5. Trayectoria helicoidal de un electrón bajo un campo eléctrico y magnético perpendiculares entre sí.

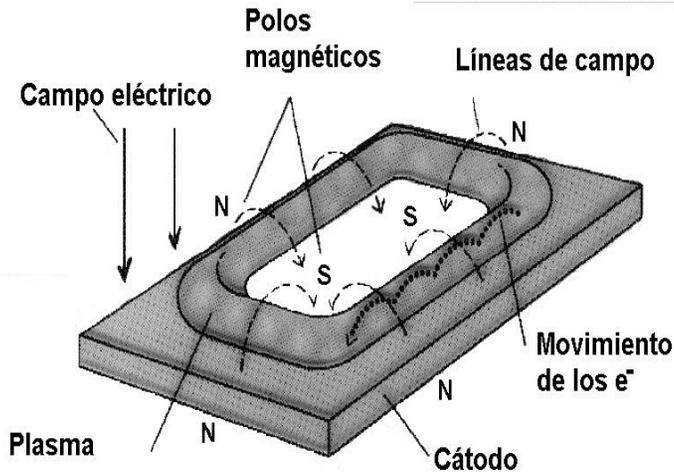
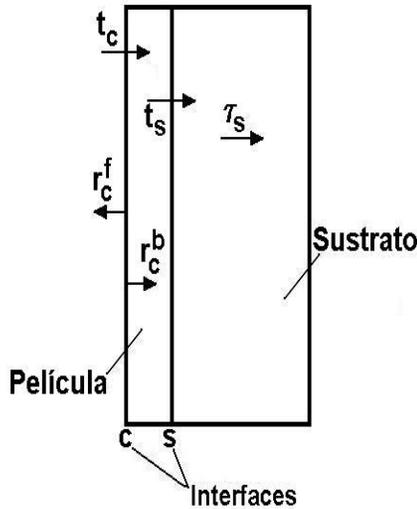


Figura 6. Movimiento de los electrones y confinamiento del plasma en magnetrones planos.

El resultado final es una mayor corriente y menor voltaje para mantener el plasma. Valores típicos corresponden a 500 V y 5 A, los cuales contrastan con los 2500 V y 0.5 A que se requieren si no existe campo magnético [Kiyotaka W. y Hayakawa S., 1992]. Asimismo, el movimiento helicoidal de los electrones incrementa la probabilidad de colisiones con las moléculas del gas y con ello la eficiencia de ionización, lo que se traduce en un descenso de la presión de trabajo del sistema hasta 1.33×10^{-2} Pa. Valores usuales se sitúan entre 0.133 y 1.33 Pa [Stephen M.R. y coautores, 1990]. Con una menor presión se incrementa la velocidad de depósito del material erosionado, dado que aumenta su camino medio libre (mean free path).

2.5 Propiedades ópticas de un sistema vidrio-película delgada

Con el fin de mejorar la apariencia y propiedades de las ventanas, los vidrios son recubiertos con ciertos materiales y de esta manera se consiguen filtros de radiación solar. Para predecir las propiedades ópticas de sistemas compuestos, como lo es un sustrato de vidrio con algún recubrimiento sobre una de sus caras (Figura 7), se tienen las siguientes ecuaciones [Rubin M. y coautores, 1998], las cuales permiten caracterizar a la ventana:



$$T = \frac{(1 - r_s) t \tau_s}{1 - r_s r^f \tau_s^2} \quad (28)$$

$$R^f = r_s + \frac{(1 - r_s)^2 r^f \tau_s^2}{1 - r_s r^f \tau_s^2} \quad (29)$$

$$R^b = r^b + \frac{t^2 r_s \tau_s^2}{1 - r_s r^f \tau_s^2} \quad (30)$$

Figura 7. Esquema de un sistema vidrio (sustrato)-película delgada.

donde: T – transmitancia total del recubrimiento

t – transmitancia de la interfase del recubrimiento

τ_s – transmitancia interna del sustrato

r_s – reflectancia de la interfase del sustrato

r^f , r^b – reflectancia de la interfase del recubrimiento, en la cara frontal y posterior respectivamente

R^f , R^b – reflectancia total del recubrimiento, en la cara frontal y posterior respectivamente

La influencia del ángulo de incidencia dentro del comportamiento del sistema vidrio-película delgada se considera al introducir el siguiente término en τ_s :

$$\tau_s = \frac{I_t}{I_i} = e^{\left(\frac{-\kappa L}{\cos \theta}\right)} \quad (31)$$

Donde: I_t – irradiancia transmitida

I_i – irradiancia incidente

κ – coeficiente de extinción

L – espesor de la película

θ – ángulo de incidencia

2.5.1 Propiedades promedio.

Las propiedades internas y externas señaladas anteriormente son función de la longitud de onda, ángulo de incidencia y polarización de la radiación que llega al vidrio; mientras que el índice de refracción y el coeficiente de extinción dependen de su longitud de onda. Con el fin de simplificar el manejo de estas cantidades, se definen propiedades promedio para intervalos de longitud de onda.

Promedios espectrales

El valor promedio P de una propiedad determinada, para un intervalo deseado de longitud de onda, esta dado por la siguiente expresión:

$$P_x = \frac{\int_a^b P(\lambda)\Phi_x(\lambda)\Gamma_x(\lambda)d\lambda}{\int_a^b \Phi_x(\lambda)\Gamma_x(\lambda)d\lambda} \quad (32)$$

Donde: P – propiedad estudiada.

Φ – función de ajuste del flujo de la radiación incidente.

Γ – función de ajuste de la respuesta del detector con el que se realizan las mediciones.

λ – longitud de onda (m).

a, b – valores máximo y mínimo del intervalo de longitud de onda deseado.

Capítulo 3

METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS

3.1 Conductividad térmica

Se realizaron mediciones experimentales para determinar las conductividades térmicas de los siguientes materiales de construcción nacionales: ladrillo rojo, tepetate¹, adobe, tabicón y concreto. Se parte de la siguiente ecuación que relaciona a la difusividad térmica α con la conductividad térmica k [Nashchokin V.V., 1979]:

$$k = \rho c \alpha \quad (33)$$

donde k – conductividad térmica del material (W/m°C);
 c – calor específico del material (J/°C);
 ρ – densidad del material (kg/m³);
 α – difusividad térmica (m²/s).

El proceso consistió fundamentalmente en dos etapas: en la primera se obtuvo la densidad y calor específico de los materiales de construcción a través de los métodos de desplazamiento de agua y de las mezclas, respectivamente; y en la segunda se estimó la difusividad térmica mediante la metodología desarrollada por G. Kondratyev para el enfriamiento de cuerpos en régimen regular. Una vez que se tuvieron las variables requeridas en la ecuación 33, se calculó la conductividad térmica para las diferentes muestras de los materiales de construcción evaluados.

3.1.1 Estimación de la densidad

Se tomó una muestra de ladrillo rojo, cuya masa fue previamente medida, y se dejó dentro de un recipiente lleno con agua durante 24 horas para su consecuente saturación. Posteriormente, la muestra se introdujo en un segundo recipiente lleno con agua hasta el borde. Al introducir la muestra de ladrillo rojo en el segundo recipiente se produjo un desplazamiento de agua cuyo volumen es igual al volumen de la muestra de ladrillo. Dicho volumen de agua desplazada fue medido para determinar así el volumen de la muestra (Figura 8). La densidad de la muestra de ladrillo rojo fue determinada a partir de la definición de densidad para una muestra de masa m y volumen V :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (34)$$

¹ Tepetate proviene del náhuatl tepetlatl que significa estera de piedra, es una toba volcánica (polvos, cenizas o barros eruptivos, que por sedimentación y cementación han sufrido un proceso de consolidación) sedimentaria, absorbente, color del amarillo al blanco, se encuentra en mantos de gran espesor, a cielo abierto, extracción con pico, pala, cincel, marro; material ligero pero resistente. Los blocks usados en el presente trabajo fueron de color amarillo.

Se realizó el mismo procedimiento para muestras de tepetate, adobe, tabicón y concreto. Las muestras se obtuvieron a partir de bloques de ladrillo rojo, tepetate, adobe y tabicón, mientras que para el concreto se obtuvo de una mezcla fraguada de cemento, arena y grava con una proporción en volumen de 2:3:5 respectivamente, para un concreto con 200 kg/cm^2 de resistencia a la compresión, como el usado para fabricación de techos de edificaciones².

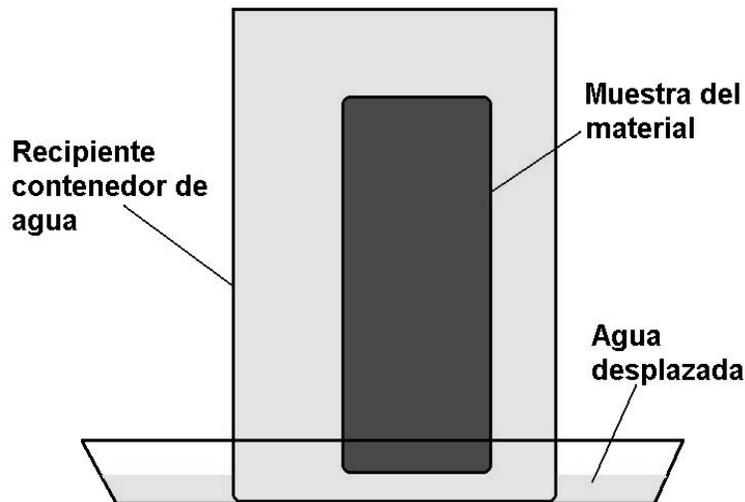


Figura 8. Esquema del experimento realizado para la estimación de la densidad de los materiales de construcción.

3.1.2 Estimación del calor específico

Se calculó el calor específico del ladrillo rojo, tepetate, adobe, tabicón y concreto mediante el método de las mezclas. Para tal fin se empleó un calorímetro con agua a temperatura ambiente. En virtud de que la tapa del calorímetro tenía deficiencias, fue sustituida por una de madera, a la cual le fue colocada en su parte inferior (la parte que queda hacia el interior del calorímetro cuando la tapa es colocada) una placa de acrílico de $0.12 \times 0.12 \text{ m}$ para evitar la absorción de vapor de agua por parte de la madera. En la zona periférica de unión entre la tapa y el recipiente del calorímetro se colocaron empaques de nylon con imanes internos para asegurar así un buen sellado y por lo tanto el correcto aislamiento térmico con el exterior (Figura 9). La capacidad aproximada del recipiente del calorímetro, fue igual a 0.0018 m^3 .

En la nueva tapa del calorímetro se practicaron tres orificios, dos para los termopares de la muestra y del agua, y otro más para un agitador de aluminio con un vástago de diámetro pequeño ($1.5 \times 10^{-3} \text{ m}$) con el fin de minimizar posibles pérdidas a través de éste. Las muestras del material a evaluar fueron colocadas dentro de cascarones esféricos de acero inoxidable de un diámetro de 0.065 m . y su temperatura se midió al introducir un termopar tipo K (cromel-alumel) en su centro geométrico (Figura 10).

² La resistencia a la compresión es la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a una carga axial, y sus unidades son kg/cm^2 .

Después de las modificaciones anteriores, se procedió a obtener el equivalente en agua del calorímetro con su nueva tapa. Para esto, se colocaron dentro del calorímetro 0.0009 m^3 de agua a temperatura ambiente; después se le agregaron 0.0009 m^3 más de agua a 40°C y se agitaron levemente hasta que alcanzaron el equilibrio térmico.



Figura 9. Vista del calorímetro con su nueva tapa, usado para la determinación del calor específico de materiales de construcción.



Figura 10. Cascarón esférico de acero inoxidable de 0.065 m de diámetro, relleno del material de construcción a evaluar.

El equivalente en agua del calorímetro se obtuvo con la finalidad de incluir dentro del análisis, el calor que absorbe el calorímetro y que debe ser considerado también; por lo cual se define como la cantidad de masa de agua que absorbería la misma cantidad de energía en forma de calor que la que absorbe la masa del calorímetro durante el experimento. El equivalente en agua del calorímetro e , está dado por:

$$e = \frac{-m_2(T_{eq} - T_2)}{T_{eq} - T_1} - m_1 \quad (35)$$

donde: m_1, T_1 – masa y temperatura del agua inicialmente dentro del calorímetro (kg, °C)
 m_2, T_2 – masa y temperatura del agua que se agrega posteriormente al calorímetro (kg, °C)
 T_{eq} – temperatura de equilibrio del total de agua dentro del calorímetro (°C)

Al aplicar la ecuación 35, el equivalente en agua para el calorímetro fue de 0.183 kg. La muestra esférica del material que iba dentro del contenedor esférico de acero inoxidable se fabricó a partir de bloques de ladrillo rojo, tepetate, adobe o tabicón, según el material que se evaluara en cada experimento. Para concreto se rellenó, y se dejó fraguar, cada mitad de un cascarón con una mezcla de cemento, arena y grava también en una proporción en volumen de 2:3:5 respectivamente. Ya fabricadas las muestras esféricas de cada material, se procedió al inicio del experimento. La muestra se sumergió dentro de un baño María a 40°C hasta que alcanzó dicha temperatura, después se introdujo en el calorímetro que tenía agua a temperatura ambiente. Se dejó pasar un periodo de 20 minutos y se registraron las variaciones de temperatura, tanto en la muestra esférica como en el agua dentro del calorímetro. Ya que el calor que pierde el cascarón y la muestra esféricas del material en cuestión, es el mismo que gana el agua en el calorímetro y el mismo cuerpo del calorímetro, se aplicó la ecuación del método de mezclas [Benson H., 1996]:

$$Q_a + Q_m + Q_c = 0 \quad (36)$$

donde Q_a, Q_m y Q_c representan el calor ganado o cedido: por el agua y el calorímetro, por la muestra esférica del material en cuestión y por el cascarón esférico que alberga la muestra del material, respectivamente. El calor Q ganado o cedido está dado por la ecuación 12, por lo que al sustituirla en la ecuación 36, se llega a la siguiente relación para el cálculo del calor específico del material:

$$c_m = \frac{(m_a + e)c_a \Delta T_a + m_c c_c \Delta T_c}{m_m \Delta T_m} \quad (37)$$

donde: $c_{m,a,c}$ – calor específico del material en cuestión, del agua y del cascarón esférico (J/kg°C)
 $m_{a,c,m}$ – masa del agua en el calorímetro, del cascarón y de la muestra del material (kg)
 $\Delta T_{a,c,m}$ – incremento de temperatura en el agua, el cascarón y la muestra del material (°C)
 e – equivalente en agua del calorímetro (kg)

3.1.3 Estimación de la difusividad térmica

La estimación de los valores de difusividad térmica para los materiales de construcción en cuestión, se realizó a través del método de G. Kondratyev. Para las pruebas experimentales se fabricó un sistema que consiste principalmente de los siguientes elementos: baño María “frío” (a 40°C), baño María “caliente” (a 50°C) y un recipiente metálico de forma esférica relleno del material de construcción a evaluar.

La Figura 11 muestra el recipiente esférico metálico, el cual tenía un diámetro de 0.1 m. Para el ladrillo rojo y el tabicón se tuvo que fabricar la esfera en dos mitades, ya que los bloques eran de dimensiones relativamente pequeñas. De un ladrillo rojo de 0.245 x 0.122 x 0.06 m, se fabricó una semiesfera de 0.05 m de diámetro y de otro ladrillo se fabricó la semiesfera restante. Para el tabicón, las dimensiones de los bloques originales fueron de

0.255 x 0.13 x 0.075 m. Como recipiente se empleó un flotador de WC de cobre de 0.1 m de diámetro, con un espesor de pared de 2.5×10^{-4} m, el cual fue cortado a la mitad para poder introducir ambas semiesferas de ladrillo rojo. Una vez que las semiesferas del material se colocaron dentro de las semiesferas del cascarón de cobre, se sellaron con una tira de cobre (cinturón) que se soldó a lo largo de la periferia de cada una de ellas. En las superficies planas de unión entre las semiesferas de ladrillo rojo, así como en las zonas de contacto con los cascarones de cobre, se aplicó una capa de polvo del mismo ladrillo rojo con la finalidad de evitar que quedaran pequeñas cámaras de aire en dichas zonas, para optimizar el contacto térmico entre todas las superficies.

Se practicó un orificio radial en el recipiente semiesférico, a través del cual se introdujo en su centro geométrico un termopar tipo K (cromel-alumel), con el que se efectuaron las lecturas de temperatura del material.

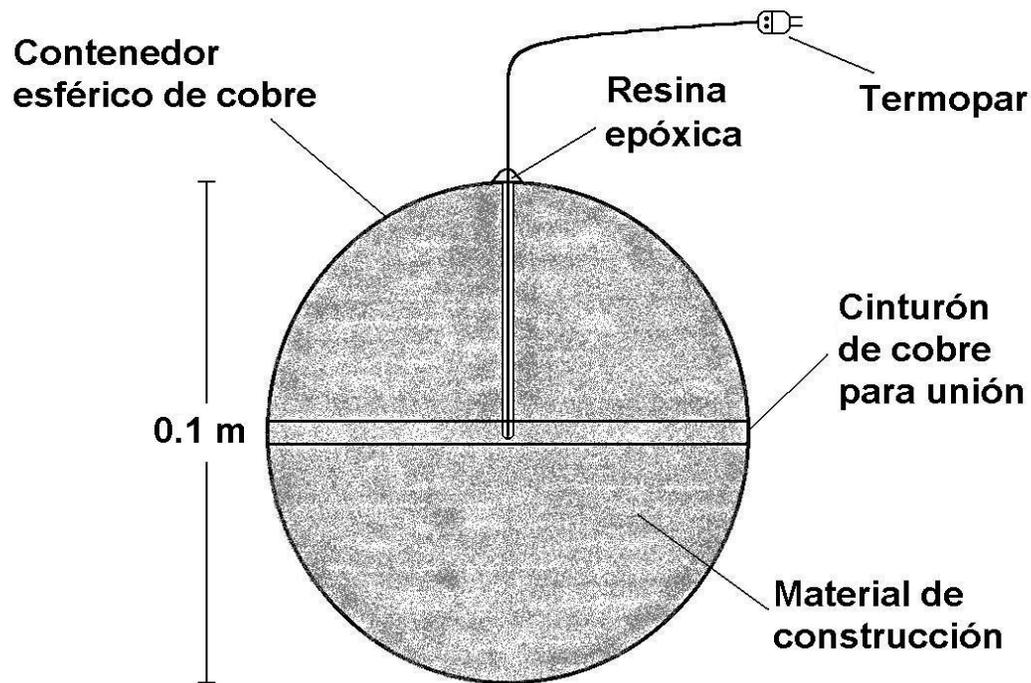


Figura 11. Cascarón esférico de cobre de 0.1 m de diámetro, relleno del material de construcción a evaluar.

Para el tepetate y el adobe se partió de un bloque de 0.45 x 0.2 x 0.25 m y 0.395 x 0.2 x 0.095 m, respectivamente, por lo que sí fue posible obtener una esfera completa para cada material. A dichas esferas les fueron colocadas las semiesferas huecas de cobre, las que posteriormente fueron selladas de manera similar al de la esfera de ladrillo rojo (se soldó una tira de cobre que unió ambas semiesferas de cobre); se aplica también una capa de polvo para optimar el contacto entre la esfera de tepetate y adobe, con sus respectivos cascarones semiesféricos de cobre.

Por último, para el concreto se rellenaron los cascarones de cobre con una mezcla de cemento, arena y grava con una proporción en volumen de 2:3:5 respectivamente, lo cual dio como resultado un concreto cuya resistencia a la compresión fue igual a 200 kg/cm^2 , similar al usado para la fabricación de techos de edificaciones.

El recipiente esférico se sumergió en el baño María “caliente” (a 50°C) hasta que alcanzó el equilibrio térmico con éste. Ello se verificó con la lectura de temperatura que indicó el termopar colocado dentro la esfera. La ilustración de esta etapa del procedimiento se presenta en la Figura 12. La temperatura del baño se logró mantener constante gracias a que el calentador estaba adaptado a un circuito regulador de corriente, además que se colocó un termopar (tipo K) dentro del baño María para monitorear que su temperatura se mantuviera constante.

Posteriormente, el recipiente esférico fue cambiado al baño María “frío”, el cual se encontraba a una temperatura de 40°C (Figura 13). Dicho baño María contaba con un sistema de burbujeo por aire, por medio del cual se aseguraba una mezcla intensiva del agua así como una tasa de transferencia de calor grande desde la superficie del recipiente esférico al agua; ello ayudó a asegurar el enfriamiento en régimen regular. Se colocó también un termopar tipo K para monitorear la temperatura del medio (agua) dentro del baño María “frío”.

A partir del momento en que se introdujo el recipiente esférico dentro del baño María “frío”, se iniciaron las lecturas de temperatura en el recipiente, así como de la temperatura del agua en el baño María, cada 2 minutos [Almanza R. y coautores, 1989]. Los valores medidos para las variables T_m (temperatura del material en el recipiente esférico) y T_b (temperatura del baño María “frío”) se representaron en una gráfica $\ln(T_m - T_b)$ vs tiempo; la parte lineal de dichas curvas constituye la etapa de régimen regular dentro del fenómeno de enfriamiento, y el valor absoluto de la pendiente de dicha parte lineal es igual al valor de la *razón de enfriamiento en régimen regular* m_∞ . Con los anteriores valores, y al aplicar la ecuación 8, se obtuvo la difusividad térmica de cada material.

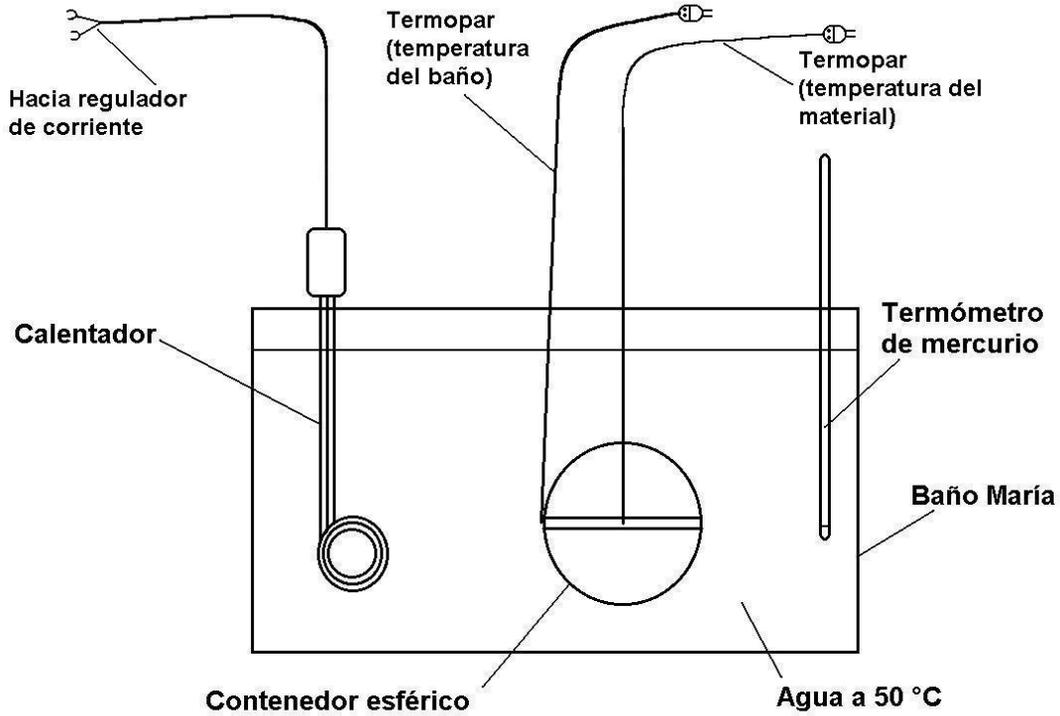


Figura 12. Baño María "caliente" a 50°C, con el recipiente esférico relleno del material a evaluar.

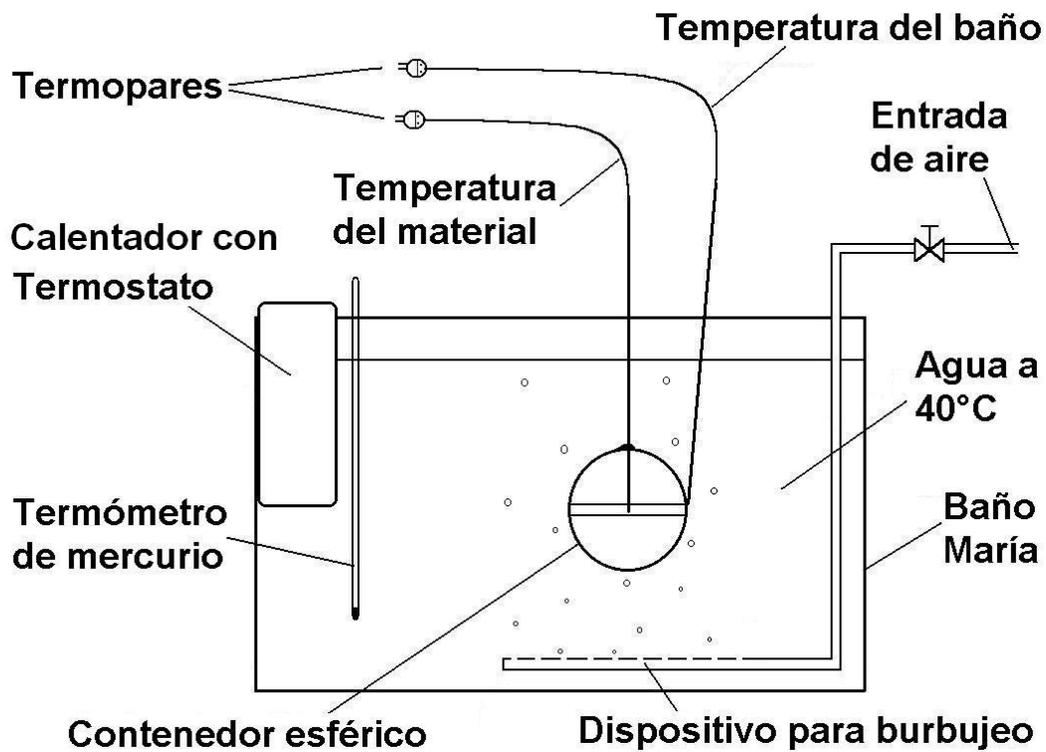


Figura 13. Baño María "frio" a 40°C, con el recipiente esférico relleno del material a evaluar y el sistema de burbujeo por aire.

3.2 Coeficientes de transferencia de calor por convección

3.2.1 Prototipo de pruebas para estimar coeficientes de convección

Para medir el coeficiente de transferencia de calor por convección presente en las paredes de una edificación, se construyó un prototipo para pruebas experimentales, mediante el cual se estimaron los coeficientes de muros de prueba hechos con base en los materiales de construcción más comunes en nuestro país. Dicho prototipo estaba constituido básicamente de un calentador, una caja contenedora aislante (cavidad), así como una base para montar los muros de prueba (Figura 14).

El calentador se formó con tres resistencias para mufla de 1500 Watts cada una, montadas sobre una estructura de soleras de acero y conectadas en un circuito en paralelo. Sobre las tres resistencias se colocó una placa rectangular de cobre de 0.3x0.4 m y calibre 24, con el fin de uniformar la distribución del calor que fluye hacia el muro de prueba.

La caja contenedora consistió en una caja de aluminio con paredes de 4×10^{-4} m de espesor, aislada térmicamente mediante una capa de fibra cerámica y una de unisol de 0.02 y 0.05 m de espesor, respectivamente. La base para montar los muros de prueba se formó con soleras de acero. La caja contenedora tenía dimensiones exteriores de 0.6 x 0.7 x 0.2 m, e interiores de 0.46 x 0.56 x 0.15 m.

Se fabricaron muros de prueba a partir de bloques de ladrillo rojo, tepetate, y adobe respectivamente, los cuales fueron pegados con una mezcla de cemento, arena y cal; además de un muro de prueba de concreto con resistencia a la compresión de 200 kg/cm^2 como el usado para los techos, y cuya composición ya fue descrita en la sección anterior. Sus dimensiones fueron 0.46 x 0.56 m; el espesor de los muros de ladrillo rojo y tepetate fue de 0.06 m, mientras que el de adobe se tuvo que fabricar de 0.08 m debido a su fragilidad.

En las Figuras 15 y 16 se presentan fotografías del prototipo de pruebas experimentales y algunos muros de prueba respectivamente.

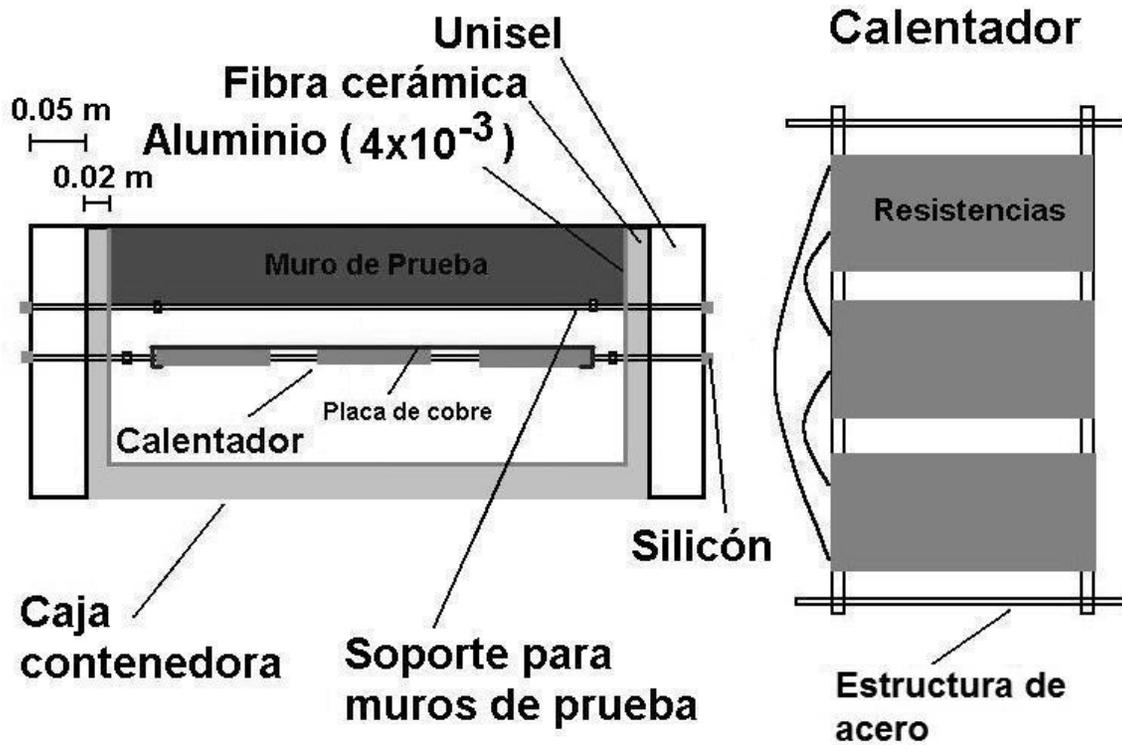


Figura 14. Prototipo de pruebas experimentales para la estimación de coeficientes de transferencia de calor por convección de diferentes materiales de construcción.



Figura 15. Fotografías del prototipo para pruebas experimentales para determinar coeficientes de transferencia de calor por convección.

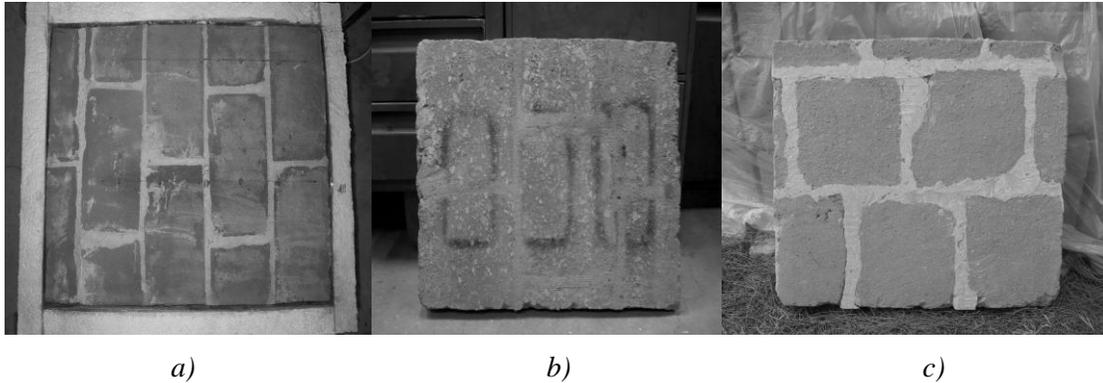


Figura 16. Muros de prueba de a) Ladrillo rojo, b) Tepalcates y c) adobe.

Adicionalmente, se construyó un sistema de adquisición de datos para la recolección y procesamiento de la información de temperaturas obtenida durante los experimentos. Para ello se contó con el apoyo del Ing. Lauro Santiago Cruz, del Área de Instrumentación del Instituto de Ingeniería-UNAM.

Se fabricaron sensores de temperatura por medio de semiconductores LM35AH, los cuales fueron colocados dentro de tubos de plástico de 5×10^{-3} m de diámetro interior. Los huecos fueron rellenos con silicón transparente, con lo que se les protegió durante la etapa de calibración de los mismos. En total fueron 16 sensores conectados a una tarjeta de adquisición de datos AT-MIO-16E-IO Multi I/O de National Instruments.

3.2.2 Túnel de viento del Instituto de Ingeniería-UNAM

Las mediciones experimentales necesarias para estimar los coeficientes de transferencia de calor por convección fueron llevadas a cabo en el Túnel de Viento del Instituto de Ingeniería-UNAM.

El Túnel de Viento es del tipo de circuito cerrado y cuenta con una sección de pruebas rectangular de 1.70 x 1.13 x 0.77 m, cuya ventana de acceso y observación es de 1.07 x 0.70 m, y un motor con potencia de 75 HP. Además, fue necesario calibrar el intervalo de velocidades que se logra dentro de la sección de pruebas, con la respectiva frecuencia del rotor.

Un esquema general del circuito del Túnel de Viento se muestra en la Figura 17. La Figura 18 muestra una vista exterior del Túnel de Viento, en donde se puede apreciar también la sección de pruebas.

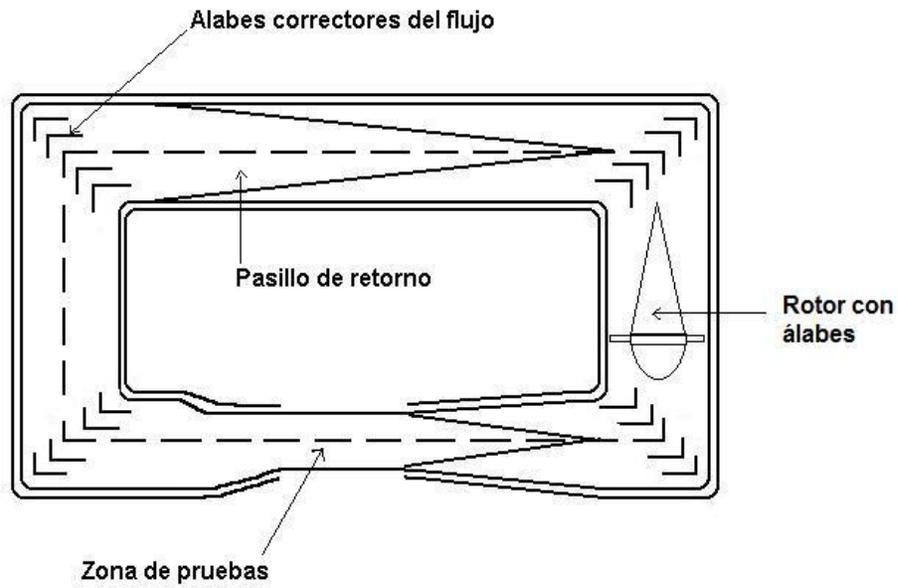


Figura 17. Túnel de Viento del tipo de circuito cerrado y retorno simple, propiedad del Instituto de Ingeniería-UNAM.

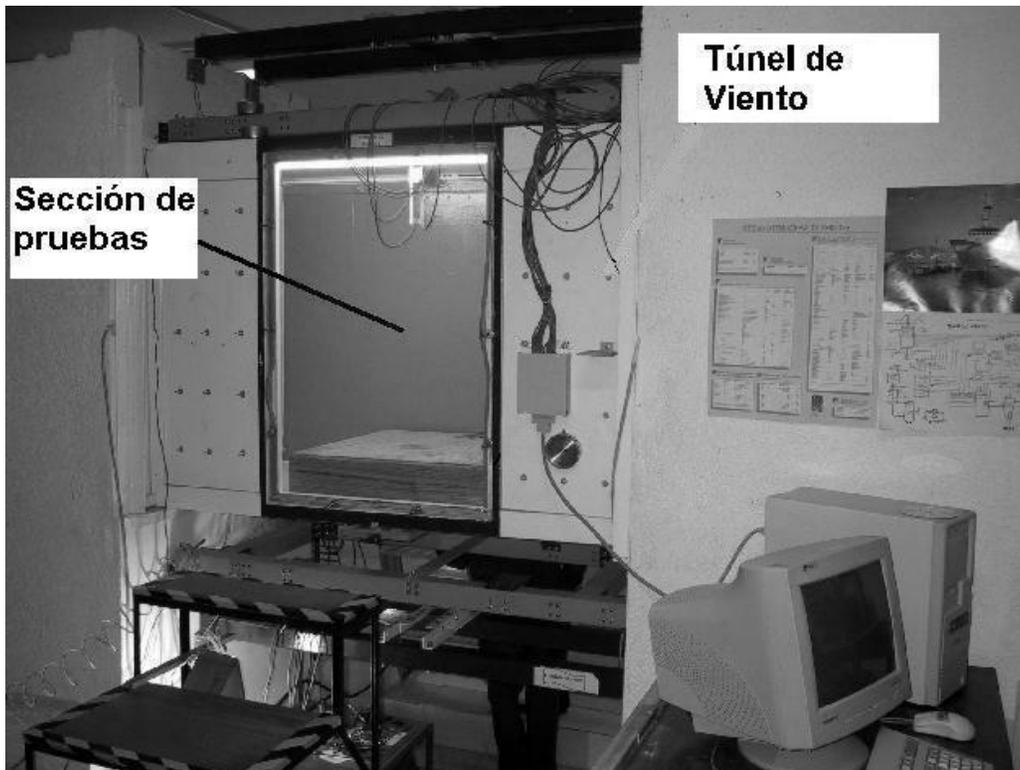


Figura 18. Vista exterior del Túnel de Viento del Instituto de Ingeniería-UNAM, así como del sistema de adquisición de datos.

Según datos publicados [Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1976], la velocidad media del viento en la mayor parte de las ciudades de México no supera los 5 m/s. La Tabla 3 muestra datos de velocidad y frecuencia del viento para cinco importantes localidades del país: Cd. de México (Aeropuerto Internacional Benito Juárez), Guadalajara, Monterrey, León y Puebla. Dicha tabla presenta los promedios anuales de velocidad y frecuencia de viento en cada una de las direcciones, el porcentaje anual de calmas (sin viento), el promedio anual de velocidad para todas las direcciones y los máximos valores de velocidad y frecuencia.

Tabla 3. Promedio anual de velocidad (m/s) y frecuencia (%) de viento en cada una de las direcciones, porcentaje anual de calmas, promedio anual de velocidad y máximos valores de velocidad y frecuencia; para la Cd. de México, Guadalajara, Monterrey, León y Puebla.

Localidad		N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	% Calmas	Prom.	Máx.
Cd. de México	f	4.6	56.3	3.4	17.5	5.3	6.2	0.3	4.1	2.3	1.7	56.3
	v	1.4	2.5	0.5	2.8	2.2	3.0	0.3	1.3			
Guadalajara Jal.	f	7.4	14.6	13.7	6.6	7.2	8.3	13.2	11.0	18.0	3.3	14.6
	v	2.8	2.9	3.1	3.2	3.3	3.5	4.1	3.7			
Monterrey N. L.	f	5.7	13.7	26.3	15.4	4.8	1.1	1.6	3.5	27.9	3.7	26.3
	v	4.4	4.1	3.9	4.2	3.7	2.0	2.8	4.6			
León, Gto.	f	3.4	4.8	5.8	8.6	21.7	12.1	9.3	2.6	31.8	2.1	21.7
	v	1.9	2.5	1.9	2.0	2.1	2.6	2.2	1.9			
Puebla, Pue.	f	2.2	3.9	6.1	17.3	46.1	13.8	2.6	3.2	4.9	1.4	46.1
	v	1.3	1.2	1.4	1.5	1.7	1.5	1.1	1.2			

No obstante, en algunas localidades del país como Chihuahua, Manzanillo, Salina Cruz, Tampico y Veracruz, el viento alcanza valores promedio cerca de los 9 m/s para algunas direcciones. Para mayor detalle, la Tabla 4 presenta también datos de viento para las ciudades mencionadas. Para el puerto de Veracruz, en algunas temporadas del año, como los meses de febrero y abril, se presentan promedios mensuales de velocidad del viento de hasta 11 m/s [Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1976]. Una situación extrema se presenta en la localidad de Juchitán, Oaxaca, una pequeña ciudad al sureste de la República Mexicana, en donde los vientos alcanzan altas velocidades, razón por la que actualmente se desarrollan varios proyectos eólicos ahí, específicamente en la comunidad llamada La Ventosa. La Tabla 5 muestra valores promedio y máximos diarios de velocidad de viento, para dicha localidad durante el mes de agosto. El promedio mensual fue de 7.68 m/s, con un 60% del tiempo presentándose velocidades de viento mayores que 5 m/s.

Tabla 4. Promedio anual de velocidad (m/s) y frecuencia (%) de viento en cada una de las direcciones, porcentaje anual de calmas, promedio anual de velocidad y máximos valores de velocidad y frecuencia; para Chihuahua, Manzanillo, Salina Cruz, Tampico y Veracruz.

Localidad		N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	% Calmas	Prom.	Máx.
Chihuahua, Chi.	f	7.3	26.1	13.3	9.8	6.0	15.1	4.7	1.8	15.9		26.1
	v	2.6	2.9	3.0	3.6	3.6	5.7	5.0	3.0		3.7	5.7
Manzanillo, Col.	f	0.2	0.3	1.2	7.7	8.0	3.0	41.2	36.6	1.9		41.2
	v	0.9	1.0	3.5	4.5	4.3	2.4	5.4	6.6		3.6	6.6
Salina Cruz, Oax.	f	59.5	0.3	0.1	1.5	31.2	0.3	0.0	0.0	7.2		59.5
	v	6.8	0.7	0.1	1.4	3.2	0.4	0.0	0.0		1.6	6.8
Tampico, Tam.	f	13.4	14.3	47.9	5.0	2.2	0.6	2.9	1.5	12.3		47.9
	v	7.3	4.1	4.1	3.5	1.6	1.0	1.9	1.4		3.1	7.3
Veracruz, Ver.	f	30.0	29.3	24.3	8.3	0.4	0.2	0.3	6.5	0.7		30.0
	v	8.8	5.5	6.3	6.5	2.4	0.6	1.2	6.9		4.8	8.8

Tabla 5. Valores promedio y máximos diarios de velocidad del viento (m/s) para La Venta, Oaxaca, durante el mes de agosto.

Día	v	V _{máx}	V _{máx}	Día	v	V _{máx}	V _{máx}
1	13.3	17.1	21.8	17	11.3	16.0	21.1
2	12.8	15.5	20.7	18	12.2	15.2	20.3
3	10.4	16.1	20.7	19	3.4	7.5	9.6
4	12.0	15.0	19.2	20	1.7	9.4	13.0
5	13.6	16.5	21.5	21	8.2	14.3	19.5
6	14.0	16.9	22.2	22	3.8	10.2	13.0
7	13.1	16.9	21.5	23	1.3	4.6	7.7
8	12.1	15.3	19.5	24	3.1	6.9	10.0
9	13.0	16.2	20.7	25	5.4	9.2	12.3
10	12.5	14.9	19.9	26	4.8	9.6	12.3
11	12.0	15.5	19.5	27	2.9	5.6	7.3
12	8.2	13.9	18.0	28	3.0	6.1	8.4
13	2.9	7.6	10.7	29	3.2	6.7	10.7
14	3.1	8.3	10.4	30	2.7	6.2	11.5
15	5.3	11.9	15.3	31	1.8	4.7	6.1
16	10.9	15.7	19.9				

A pesar de que los datos de la Tabla 5 contrastan con los presentados para las otras localidades, esta es una localidad excepcional. En virtud de lo anterior, se llevaron a cabo las mediciones de coeficientes de transferencia de calor por convección, se consideraron velocidades de viento de 2, 4, 6, 8 y 10 m/s; pues dentro de ese intervalo de velocidades se encuentran incluidos la gran mayoría de vientos que se presentan en las principales localidades del país a lo largo del año, además que también se logran cubrir los valores extremos de algunas ciudades.

3.2.3 Estimación de coeficientes de convección

Una base rectangular de madera (0.75 x 0.75 y 0.2 m de altura) fue colocada dentro de la zona de pruebas del Túnel de Viento, y sobre ella, fue montado el prototipo para pruebas experimentales, junto con el muro de pruebas de ladrillo rojo. Para monitorear las temperaturas del muro y de la corriente de aire que generaría el túnel de viento, fue necesario llevar a cabo algunas adecuaciones y fabricar un mecanismo que facilitó el montaje del sistema de sensores, así como su respectivo desplazamiento a diferentes alturas sobre la superficie del muro de pruebas. La Figura 19 muestra dicho mecanismo, el cual consistió básicamente de un tornillo sin fin (Figura 19a), montado sobre una base de aluminio acoplada a un riel de acero, por medio del cual se logró un desplazamiento del sistema en dirección horizontal (paralela al muro de pruebas). En los extremos de la base de aluminio fueron colocados dos soleras de acero, en donde se instaló el sistema de sensores, que consistió en un par de barras de lucita, entre las cuales se tenían sujetos los sensores, separados 0.08 m entre cada uno de ellos (Figura 19b).

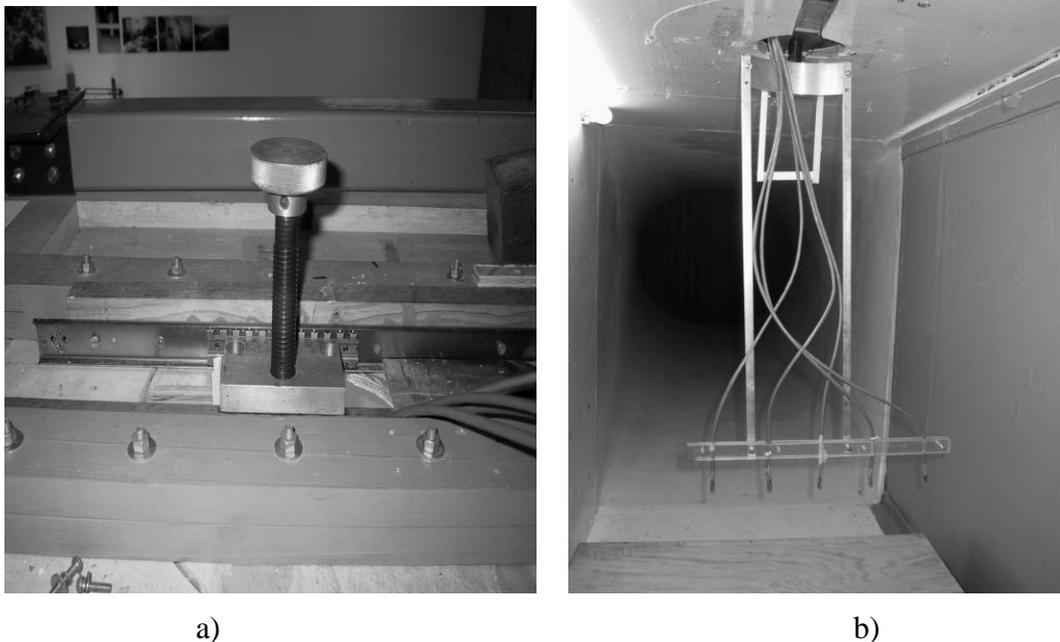


Figura 19. Mecanismo para el montaje del sistema de sensores y su respectivo desplazamiento a diferentes alturas sobre el nivel del muro de pruebas.

Una vez construido el mecanismo descrito anteriormente, se montó dentro de la sección de pruebas del Túnel de Viento, sujetándose del techo de dicha sección, de manera que el sistema de sensores coincidió con la superficie del muro de pruebas (ver Figura 20). El tornillo sin fin sirvió para desplazar el sistema de sensores en dirección vertical (perpendicular) con respecto a la superficie del muro de pruebas.

El prototipo para pruebas experimentales se instaló dentro de la sección de pruebas del Túnel de Viento (Figura 21) de manera que la longitud más corta del muro (0.46 m) quedara paralela a la dirección de flujo de la corriente de aire. El sistema de sensores se colocó a 0.23 m, del inicio de la longitud del muro con respecto a la dirección del flujo de aire.

Se practicaron pequeños orificios de 2 mm de profundidad y aproximadamente del mismo diámetro que los sensores, en aquellos puntos sobre la superficie del muro en donde se colocaban inicialmente dichos sensores para medir la temperatura de pared del muro, con la finalidad de evitar que fueran afectados (“enfriados”) por la corriente de aire, cuando se midiera la temperatura de pared.

Para iniciar la determinación de coeficientes de transferencia de calor por convección para el muro de ladrillo rojo en posición horizontal y un flujo de aire paralelo a su superficie, primero se conectó el calentador del prototipo y se reguló el calentamiento por medio de la corriente del circuito eléctrico hasta alrededor de 7 A. Después de un intervalo de 1 hora, la superficie del muro alcanzó una temperatura alrededor de 60-70 °C. Posteriormente se encendió el rotor del Túnel de Viento para pasar una corriente de aire paralela a la superficie del muro de prueba, a una velocidad medida con un anemómetro de hilo caliente marca EXTECH, modelo 407123. La temperatura del muro de prueba disminuía en diferente medida, según la velocidad del aire en cada prueba.

Una vez que las lecturas de temperatura arrojadas por el sistema de adquisición se estabilizaron (la etapa transitoria variaba desde 330 hasta 1820 segundos, según el tipo de material, la velocidad del aire y la posición del muro), el sistema de sensores se desplazó verticalmente en intervalos regulares de 1.5 mm por encima de la superficie del muro de prueba, hasta lograr medir la temperatura del flujo libre de aire (que se presenta a la distancia del muro en donde las lecturas de temperatura ya no disminuyeron), y para cada uno de los desplazamientos, se esperó también a la estabilización de las lecturas.

Para estimar el coeficiente de transferencia de calor por convección se aplicó la ecuación (14), y se obtuvo el valor de la temperatura de pared para el muro de prueba, así como la temperatura del flujo libre de aire, las cuales resultaron del promedio de cinco diferentes lecturas tomadas por el sistema de sensores.

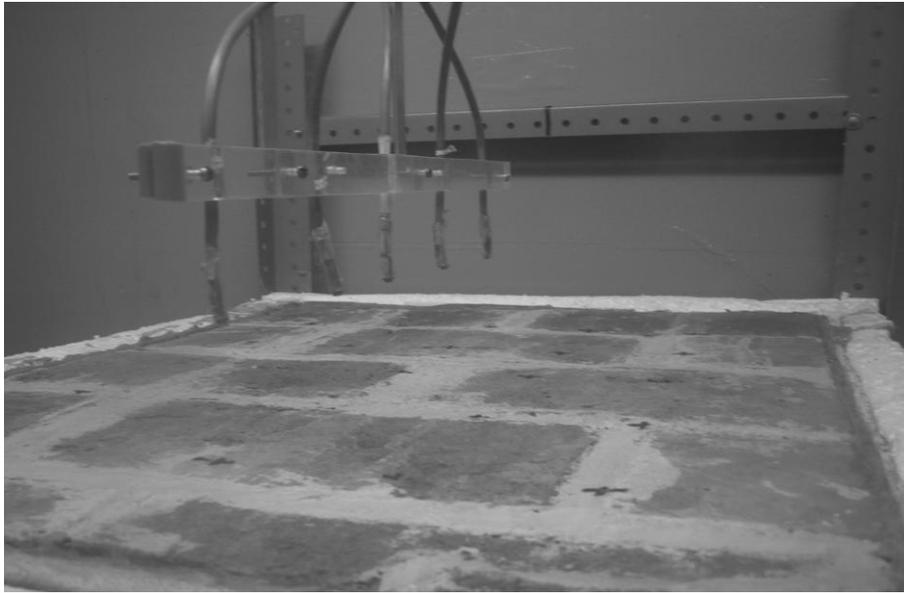


Figura 20. Sistema de sensores dispuestos sobre la superficie del muro de pruebas de ladrillo rojo.



Figura 21. Vista del prototipo de pruebas con el muro de ladrillo rojo, dentro de la sección de pruebas del Túnel de Viento.

Capítulo 4

RESULTADO DE PROPIEDADES TÉRMICAS

4.1 Densidad y calor específico

Los resultados obtenidos para la densidad de los materiales mencionados en el capítulo anterior, calculados mediante el método de desplazamiento de agua, aparecen en la Tabla 6. Se incluye además el peso volumétrico, que resulta de dividir el peso de la muestra entre su volumen.

Tabla 6. Valores de densidad y peso volumétrico, obtenidos para muestras de ladrillo rojo, tepetate, adobe, tabicón y concreto.

Material	Densidad ρ (kg/m ³)	Peso volumétrico (N/m ³)
Ladrillo Rojo	1595.12	15648.12
Tepetate	1023.47	10040.24
Adobe	1309.09	12842.17
Tabicón	1307.50	12826.57
Concreto	2161.29	21202.25

Las Tablas 7, 8, 9, 10 y 11 presentan mediciones típicas para ladrillo rojo, tepetate, adobe, tabicón y concreto respectivamente; cuando se utiliza el método de mezclas para la estimación del calor específico, descrito en el capítulo anterior.

Tabla 7. Valores de temperatura y masa medidos para la estimación del calor específico de una muestra esférica de ladrillo rojo, por el método de mezclas.

	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Masa (kg)
Agua	22.3	23.1	1.5
Esfera	42.0	24.0	Material 0.268
			Cascarón 0.052

Tabla 8. Valores de temperatura y masa medidos para la estimación del calor específico de una muestra esférica de tepetate, por el método de mezclas.

	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Masa (kg)
Agua	22.4	23.5	1.5
Esfera	42.6	24.7	Material 0.202 Cascarón 0.052

Tabla 9. Valores de temperatura y masa medidos para la estimación del calor específico de una muestra esférica de adobe, por el método de mezclas.

	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Masa (kg)
Agua	22.8	24.0	1.3
Esfera	40.3	28.7	Material 0.491 Cascarón 0.16

Tabla 10. Valores de temperatura y masa medidos para la estimación del calor específico de una muestra esférica de tabicón, por el método de mezclas.

	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Masa (kg)
Agua	17.9	19.2	1.5
Esfera	40.1	20.3	Material 0.241 Cascarón 0.052

Tabla 11. Valores de temperatura y masa medidos para la estimación del calor específico de una muestra esférica de concreto, por el método de mezclas.

	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Masa (kg)	
Agua	16.8	18.5	1.5	
Esfera	39.2	18.3	Material	0.288
			Cascarón	0.052

Al sustituir los datos anteriores en la ecuación 37 y al considerar un valor de 4181 y 480 J/kg°C para el calor específico del agua y el acero inoxidable (del cual está hecho el cascarón esférico) respectivamente, se obtuvo el calor específico para cada uno de los materiales analizados (Tabla 12).

Tabla 12. Valores de calor específico c, estimados experimentalmente para muestras de ladrillo rojo, tepetate, adobe, tabicón y concreto.

Material	Calor específico c (J/kg°C)
Ladrillo Rojo	1073.80
Tepetate	2017.11
Adobe	1149.94
Tabicón	1748.74
Concreto	1862.16

4.2 Difusividad térmica

En las Tablas 13, 14, 15, 16 y 17 se presentan valores típicos medidos para las variables T_m (temperatura del material en el recipiente esférico) y T_b (temperatura del baño María “frío”), durante un experimento de enfriamiento en régimen regular, de un recipiente metálico esférico de 10 cm de diámetro, relleno de ladrillo rojo, tepetate, adobe, tabicón y concreto respectivamente.

Tabla 13. Valores típicos de T_m (temperatura del material) y T_b (temperatura del baño María), durante el proceso de enfriamiento en régimen regular de una muestra de ladrillo rojo.

t (seg)	T_m (°C)	T_b (°C)	$T_m - T_b$	$\ln(T_m - T_b)$
0	50.2	40.2	10	2.30258509
120	50	40.2	9.8	2.28238239
240	48.9	40.2	8.7	2.16332303
360	47.4	40.2	7.2	1.97408103
480	45.9	40.2	5.7	1.74046617
600	44.8	40.3	4.5	1.5040774
720	43.7	40.3	3.4	1.22377543
840	43	40.3	2.7	0.99325177
960	42.4	40.3	2.1	0.74193734
1080	41.9	40.3	1.6	0.47000363
1200	41.6	40.3	1.3	0.26236426
1320	41.3	40.3	1	0
1440	41	40.3	0.7	-0.35667494
1560	40.8	40.3	0.5	-0.69314718
1680	40.7	40.3	0.4	-0.91629073
1800	40.6	40.3	0.3	-1.2039728
1920	40.5	40.3	0.2	-1.60943791
2040	40.4	40.3	0.1	-2.30258509

Tabla 14. Valores típicos de T_m (temperatura del material) y T_b (temperatura del baño María), durante el proceso de enfriamiento en régimen regular de una muestra de tepetate.

t (seg)	T_m (°C)	T_b (°C)	$T_m - T_b$	$\ln(T_m - T_b)$
0	50.6	40.4	10.2	2.32238772
120	50	40.4	9.6	2.2617631
240	49.6	40.4	9.2	2.21920348
360	49	40.4	8.6	2.1517622
480	48.1	40.3	7.8	2.05412373
600	47.2	40.3	6.9	1.93152141
720	46.2	40.3	5.9	1.77495235
840	45.3	40.3	5	1.60943791
960	44.7	40.3	4.4	1.48160454
1080	44	40.3	3.7	1.30833282
1200	43.5	40.3	3.2	1.16315081
1320	43	40.3	2.7	0.99325177
1440	42.4	40.3	2.1	0.74193734
1560	42	40.3	1.7	0.53062825
1680	41.6	40.3	1.3	0.26236426
1800	41.4	40.3	1.1	0.09531018
1920	41.2	40.3	0.9	-0.10536052
2040	41.1	40.3	0.8	-0.22314355

Tabla 15. Valores típicos de T_m (temperatura del material) y T_b (temperatura del baño María), durante el proceso de enfriamiento en régimen regular de una muestra de adobe.

t (seg)	T_m (°C)	T_b (°C)	$T_m - T_b$	$\ln(T_m - T_b)$
0	50	39.9	10.1	2.31253542
120	49.9	39.8	10.1	2.31253542
240	49.8	39.9	9.9	2.29253476
360	49.1	39.9	9.2	2.21920348
480	48.1	40	8.1	2.09186406
600	47	40	7	1.94591015
720	46	40	6	1.79175947
840	45.1	40	5.1	1.62924054
960	44.2	39.9	4.3	1.45861502
1080	43.5	39.9	3.6	1.28093385
1200	42.9	39.9	3	1.09861229
1320	42.4	40	2.4	0.87546874
1440	42	40	2	0.69314718
1560	41.6	40	1.6	0.47000363
1680	41.3	40	1.3	0.26236426
1800	41.1	40	1.1	0.09531018
1920	40.9	40	0.9	-0.10536052
2040	40.7	40	0.7	-0.35667494

Tabla 16. Valores típicos de T_m (temperatura del material) y T_b (temperatura del baño María), durante el proceso de enfriamiento en régimen regular de una muestra de tabicón.

t (seg.)	T_m (°C)	T_b (°C)	$T_m - T_b$	$\ln(T_m - T_b)$
0	50	40.3	9.7	2.27212589
120	49.3	40.3	9	2.19722458
240	49	40.5	8.5	2.14006616
360	48.2	40.4	7.8	2.05412373
480	47.2	40.4	6.8	1.91692261
600	46.2	40.4	5.8	1.75785792
720	45.2	40.3	4.9	1.58923521
840	44.5	40.4	4.1	1.41098697
960	43.7	40.4	3.3	1.19392247
1080	43.2	40.5	2.7	0.99325177
1200	42.8	40.3	2.5	0.91629073
1320	42.2	40.4	1.8	0.58778666
1440	42.1	40.4	1.7	0.53062825
1560	41.7	40.3	1.4	0.33647224
1680	41.5	40.5	1	0
1800	41.3	40.3	1	0
1920	41.1	40.3	0.8	-0.22314355
2040	40.9	40.4	0.5	-0.69314718

Tabla 17. Valores típicos de T_m (temperatura del material) y T_b (temperatura del baño María), durante el proceso de enfriamiento en régimen regular de una muestra de concreto.

t (seg.)	T_m (°C)	T_b (°C)	$T_m - T_b$	$\ln(T_m - T_b)$
0	50.3	41.3	9	2.19722458
120	49.8	41.1	8.7	2.16332303
240	49.4	40.9	8.5	2.14006616
360	48.5	40.8	7.7	2.04122033
480	47.3	40.9	6.4	1.85629799
600	46.2	41	5.2	1.64865863
720	45.1	40.8	4.3	1.45861502
840	44.2	40.7	3.5	1.25276297
960	43.5	40.7	2.8	1.02961942
1080	42.9	40.7	2.2	0.78845736
1200	42.4	40.6	1.8	0.58778666
1320	42	40.5	1.5	0.40546511
1440	41.7	40.5	1.2	0.18232156
1560	41.4	40.4	1	0
1680	41.2	40.5	0.7	-0.35667494
1800	41	40.7	0.3	-1.2039728
1920	40.8	40.7	0.1	-2.30258509
2040	40.7	40.6	0.1	-2.30258509

Los valores de $\ln (T_m - T_b)$, obtenidos para el ladrillo rojo, tepetate, adobe, tabicón y concreto se graficaron contra el tiempo y se presentan en las Figuras 22, 23, 24, 25 y 26 respectivamente. La parte lineal de dichas curvas representa la etapa de régimen regular dentro del fenómeno de enfriamiento, y el valor absoluto de la pendiente de dicha parte lineal es igual al valor de la razón de enfriamiento en régimen regular m_α .

Mediante regresión lineal se obtuvo, para el ladrillo rojo $m_\alpha = 2.10 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, para el tepetate $m_\alpha = 1.24 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, para el adobe $m_\alpha = 1.51 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, para el tabicón $m_\alpha = 1.61 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ y para el concreto $m_\alpha = 1.88 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Según la ecuación 9, el factor de medida y forma para el recipiente esférico (0.1 m. de diámetro) fue igual a $K = 2.53 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.

Debido a que la razón de enfriamiento, para los materiales evaluados, fue obtenida a partir de la aplicación de una regresión lineal sobre una serie de pares experimentales ($\ln (T_m - T_b)$, t), entonces su desviación estándar σ (incertidumbre) se calculó a partir de la aplicación de las ecuaciones 26 y 27

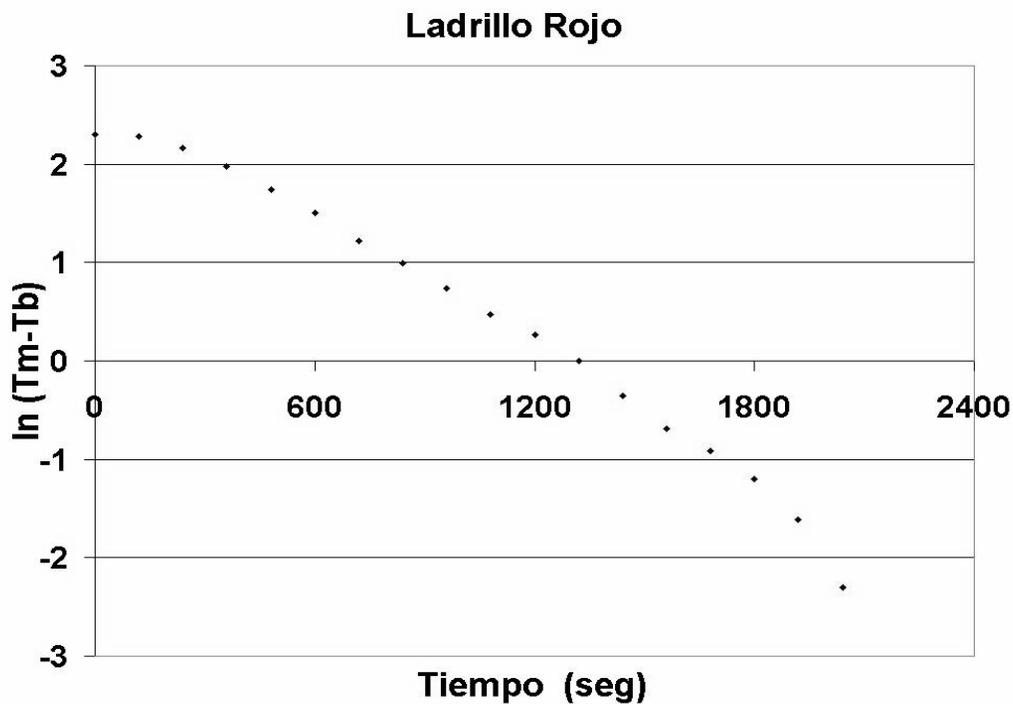


Figura 22. Gráfica de enfriamiento en régimen regular para un recipiente esférico relleno de ladrillo rojo a 50°C , dentro de un baño María a 40°C .

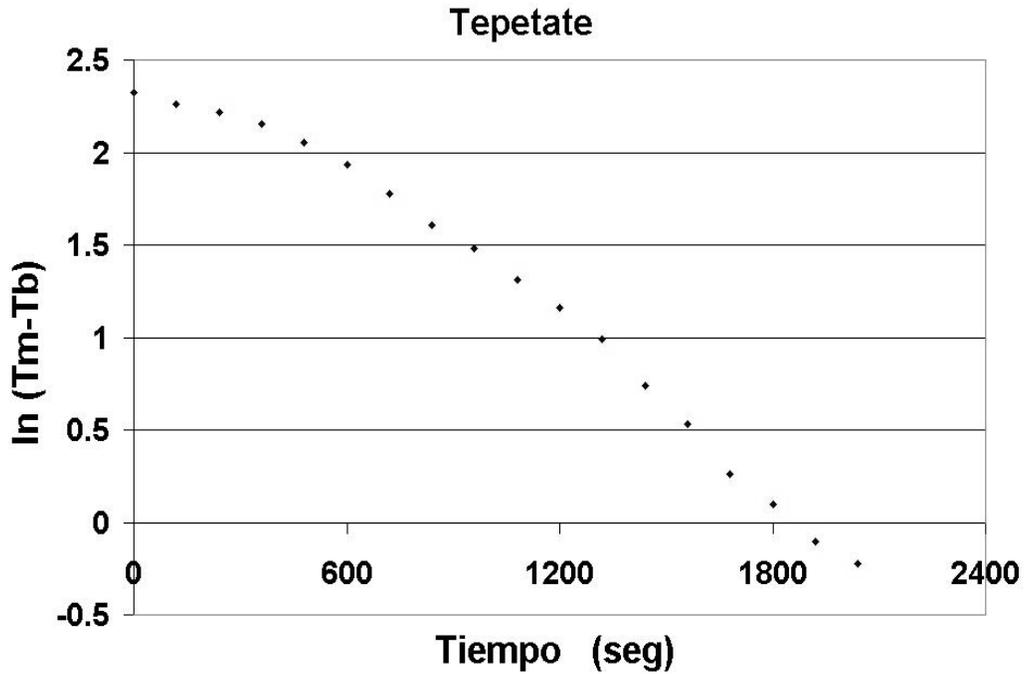


Figura 23. Gráfica de enfriamiento en régimen regular para un recipiente esférico relleno de tepetate a 50°C, dentro de un baño María a 40°C.

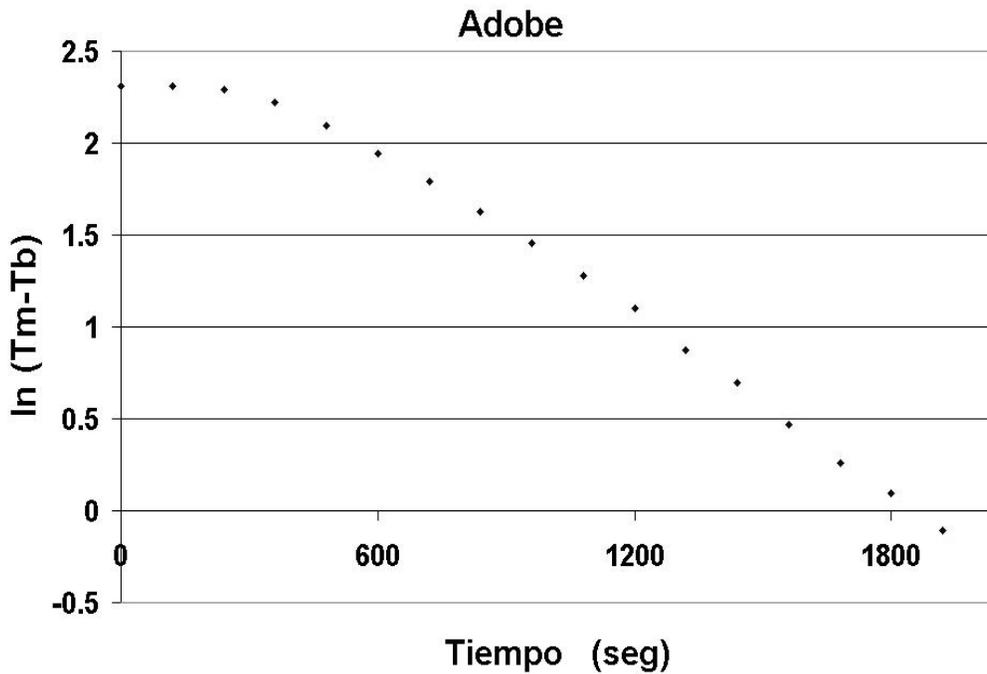


Figura 24. Gráfica de enfriamiento en régimen regular para un recipiente esférico relleno de adobe a 50°C, dentro de un baño María a 40°C.

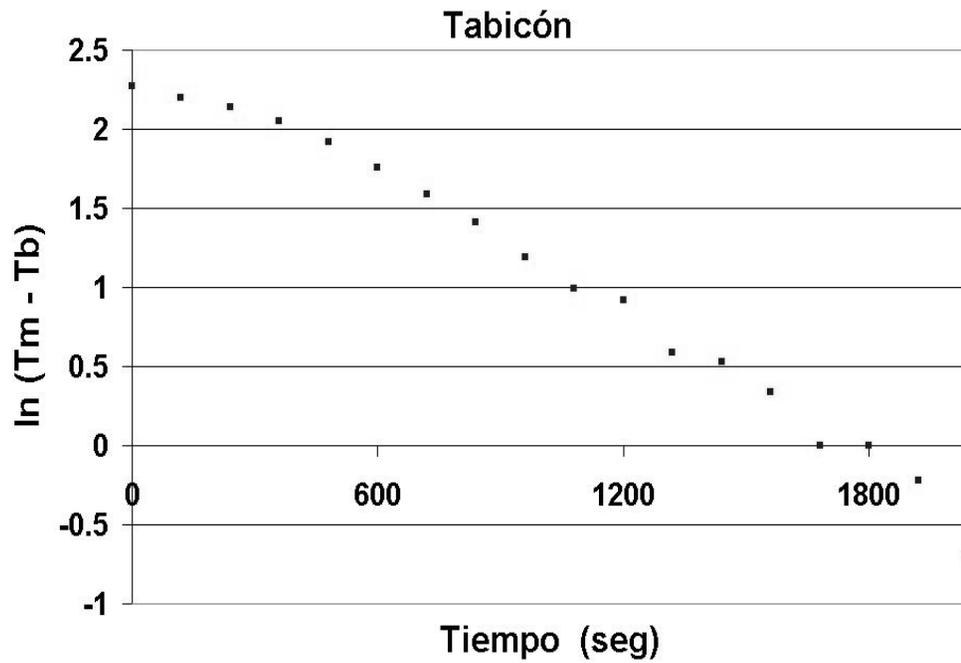


Figura 25. Gráfica de enfriamiento en régimen regular para un recipiente esférico relleno de tabicón a 50°C, dentro de un baño María a 40°C.

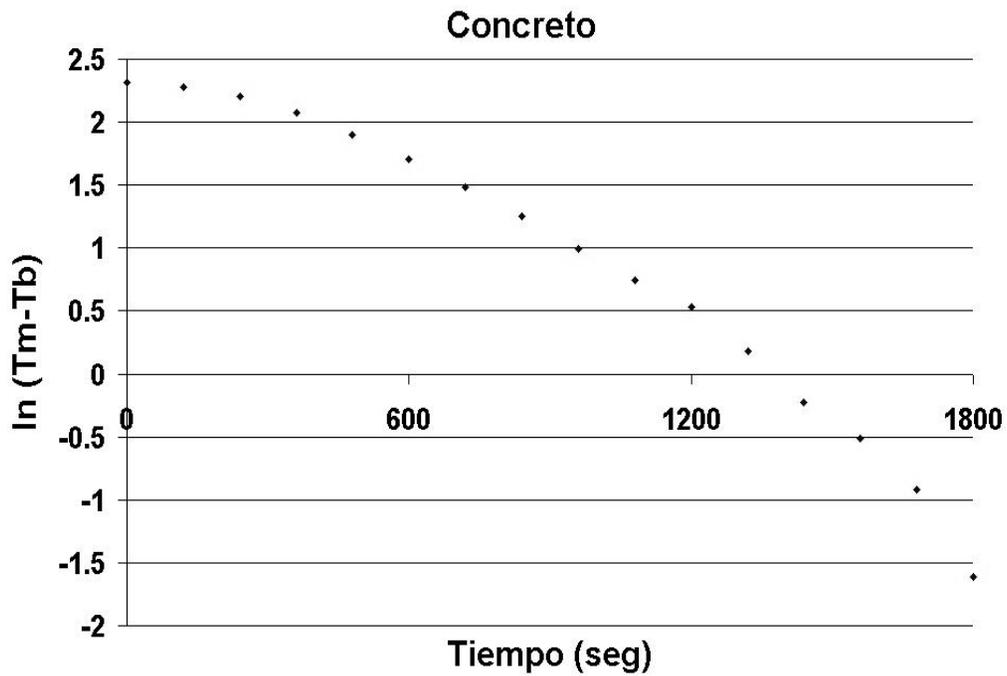


Figura 26. Gráfica de enfriamiento en régimen regular para un recipiente esférico relleno de concreto a 50°C, dentro de un baño María a 40°C.

Con los valores anteriores, y al aplicar la ecuación 8, se calcula la difusividad térmica de cada material, cuyos resultados se muestran en la Tabla 18. En la Figura 27 (a y b) se muestran imágenes del sistema de burbujeo y la esfera dentro del baño María “frío”.

Tabla 18. Valores de difusividad térmica para las muestras de ladrillo rojo, tepetate, adobe, tabicón y concreto.

	Ladrillo rojo	Tepetate	Adobe	Tabicón	Concreto
Difusividad térmica α (m²/s)	5.31×10^{-7}	3.14×10^{-7}	3.82×10^{-7}	4.07×10^{-7}	4.76×10^{-7}

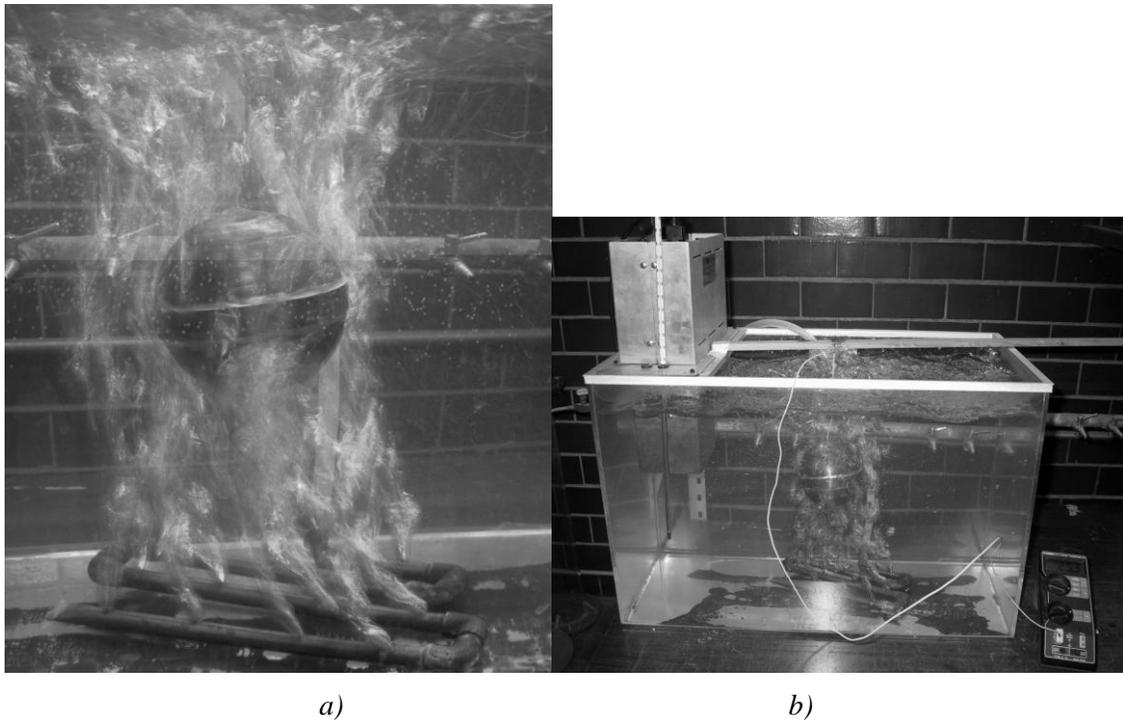


Figura 27. Sistema de burbujeo y esfera contenedora dentro del baño María “frío” durante un experimento para estimar la difusividad térmica de materiales de construcción.

4.3 Conductividad térmica

Conocidos los datos de densidad, calor específico y difusividad térmica de cada uno de los materiales, contenidos en las Tablas 6, 12 y 18 respectivamente, y al sustituirlos en la ecuación 33, se obtuvieron los valores de conductividad térmica (Tabla 19).

Una vez que se estimaron todas las variables y propiedades térmicas, se realizó el cálculo de las incertidumbres para cada una de ellas. Ya que la ecuación 34 define la densidad ρ de los materiales, la incertidumbre relativa de la densidad se calculó a partir de las incertidumbres relativas en las mediciones de masa y volumen al aplicar la ecuación 23. Al considerar que el calor específico c de los materiales evaluados se obtuvo por medio de la ecuación 37, su incertidumbre relativa fue estimada mediante las ecuaciones 23 y 24, en donde se consideraron las incertidumbres relativas de las mediciones de temperatura T y masa m para cada elemento (agua, equivalente en agua del calorímetro, cascarón metálico y material). Para el factor de forma K (ecuación 9) su incertidumbre relativa se obtuvo mediante las ecuaciones 24 y 25, al usar la incertidumbre relativa del radio r del contenedor esférico.

Ya que la razón de enfriamiento m_α es igual a la pendiente de una curva de enfriamiento con signo contrario, su incertidumbre absoluta, como ya se mencionó anteriormente, se calculó al aplicar las ecuaciones 26 y 27, con los datos de tiempo t y $\ln(T_m - T_b)$. En el cálculo de la difusividad térmica α se usó la ecuación 8, por lo que su incertidumbre relativa se estimó mediante la ecuación 23, con las incertidumbres relativas del factor de forma K y de la razón de enfriamiento m_α . Por último, la incertidumbre relativa de los datos de conductividad térmica k se calculó mediante la ecuación 23, a partir de las incertidumbres relativas de la densidad ρ , calor específico c y difusividad térmica α .

Es importante señalar que para todas las incertidumbres relativas calculadas, se hizo también el cálculo de su respectiva incertidumbre absoluta, mediante la ecuación 22. Los resultados aparecen en la Tabla 19.

Tabla 19. Propiedades térmicas evaluadas para diferentes materiales de construcción (Valores Promedio - VP), con sus respectivas incertidumbres absoluta (IA) y relativa (IR).

Material		Densidad ρ (kg/m ³)	Calor específico c (J/kg°C)	Factor de forma K (m ²)	Razón de enfriamiento m_α (s ⁻¹)	Difusividad térmica α (m ² /s)	Conductividad térmica k (W/m°C)
Ladrillo rojo	V. P.	1595.12	1073.80	2.53x10 ⁻⁴	2.10x10 ⁻³	5.31x10 ⁻⁷	0.910
	I. A.	13.04	164.87	2.53x10 ⁻⁷	6.21x10 ⁻⁵	1.63x10 ⁻⁸	0.175
	I. R.	0.81	15.35	0.1	2.95	3.07	19.24
Tepetate	V. P.	1023.47	2017.11	2.53x10 ⁻⁴	1.24x10 ⁻³	3.14x10 ⁻⁷	0.648
	I. A.	9.98	233.91	2.53x10 ⁻⁷	2.26x10 ⁻⁵	6.06x10 ⁻⁹	0.094
	I. R.	0.97	11.59	0.1	1.84	1.93	14.50
Adobe	V. P.	1306.66	1149.94	2.53x10 ⁻⁴	1.51x10 ⁻³	3.82x10 ⁻⁷	0.573
	I. A.	11.12	129.24	2.53x10 ⁻⁷	4.16x10 ⁻⁵	1.09x10 ⁻⁸	0.086
	I. R.	0.85	11.23	0.1	2.77	2.86	14.95
Tabicón	V. P.	1307.50	1748.74	2.53x10 ⁻⁴	1.61x10 ⁻³	4.07x10 ⁻⁷	0.931
	I. A.	14.31	178.44	2.53x10 ⁻⁷	5.23x10 ⁻⁵	1.37x10 ⁻⁸	0.136
	I. R.	1.09	10.2	0.1	3.27	3.36	14.66
Concreto	V. P.	2161.29	1862.16	2.53x10 ⁻⁴	1.88x10 ⁻³	4.76x10 ⁻⁷	1.917
	I. A.	14.92	145.70	2.53x10 ⁻⁷	3.69x10 ⁻⁵	9.84x10 ⁻⁹	0.203
	I. R.	0.69	7.82	0.1	1.94	2.07	10.58

La Tabla 20 muestra los valores de densidad, calor específico y conductividad térmica obtenidos para el ladrillo rojo, tepetate, adobe, tabicón y concreto (Propios); además, se realizó la comparación con datos publicados en diferentes fuentes bibliográficas tales como: la norma mexicana NOM-008-ENER-2001 (NOM), el manual Fundamentals de ASHRAE (ASHRAE) y la norma española NBE-CT-79 (NBE).

Tabla 20. Propiedades térmicas de materiales de construcción obtenidas experimentalmente (Propios) y aquellas mencionadas en bibliografía nacional e internacional.

Material		Densidad ρ (kg/m³)	Calor específico c (J/kg°C)	Difusividad térmica α (m²/s)	Conductividad térmica k (W/m°C)
	Propios	1595.12 ± 13.04	1073.80 ± 164.87	5.31x10 ⁻⁷ ± 1.63x10 ⁻⁸	0.910 ± 0.175
Ladrillo	NOM	2000	-	-	0.872-0.698
rojo	ASHRAE	1600	-	-	0.61-0.74
	NBE	1800	1330	3.6x10 ⁻⁷	0.87
	Propios	1023.47 ± 9.98	2017.11 ± 233.91	3.14x10 ⁻⁷ ± 6.06x10 ⁻⁹	0.648 ± 0.094
Tepetate	NOM	-	-	-	1.047-0.93
	Propios	1306.66 ± 11.12	1149.94 ± 129.24	3.82x10 ⁻⁷ ± 1.09x10 ⁻⁸	0.573 ± 0.086
Adobe	NOM	-	-	-	0.93-0.582
	NBE	1600	920	6.5x10 ⁻⁷	0.95
Tabicón	Propios	1309.09 ± 14.31	1748.74 ± 178.44	4.07x10 ⁻⁷ ± 1.37x10 ⁻⁸	0.931 ± 0.136
	Propios	2161.29 ± 14.92	1862.16 ± 145.70	4.76x10 ⁻⁷ ± 9.84x10 ⁻⁹	1.917 ± 0.203
Concreto	NOM	2200	-	-	1.28
	ASHRAE	2240	0.8-1	-	1.3-2.6
	NBE	2400	805	8.4x10 ⁻⁷	1.63

4.4 Coeficientes de transferencia de calor por convección

En la Figura 28 se muestran las curvas de temperatura medidas dentro de un baño María, durante la etapa de calibración del sistema de sensores usado para medir temperaturas de pared y de flujo libre de aire.

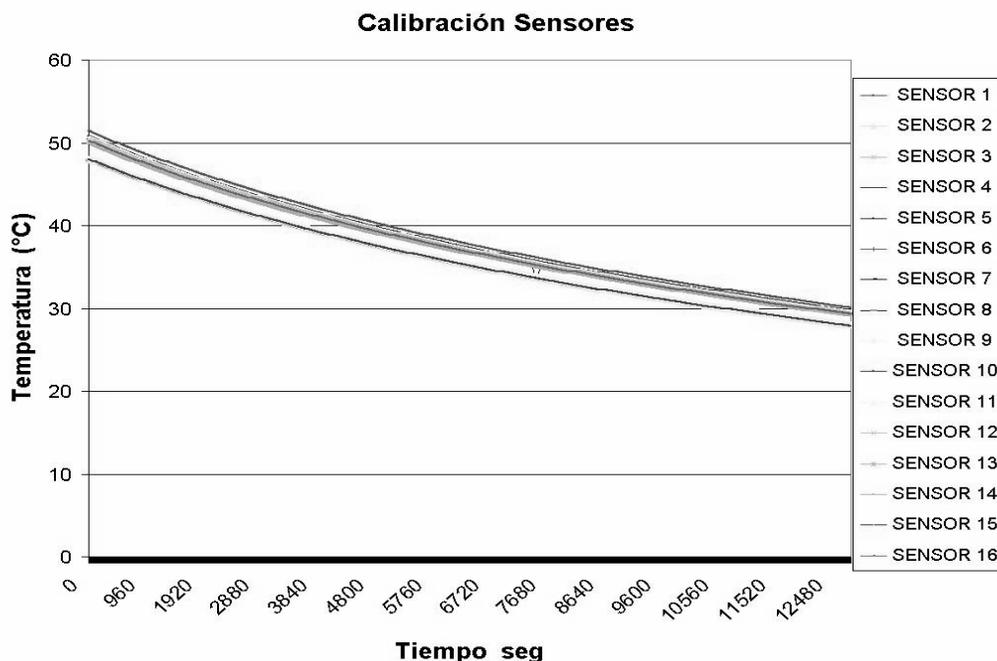
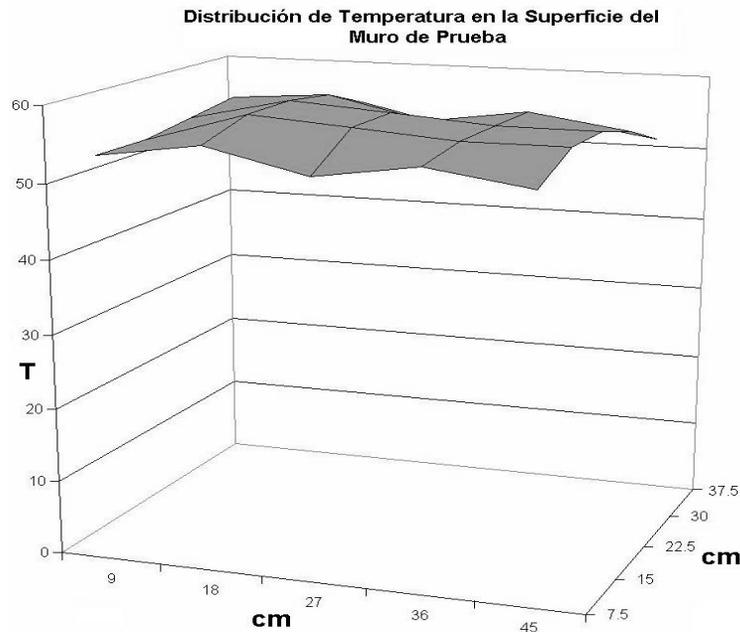


Figura 28. Curva de temperaturas para los sensores fabricados, durante etapa de calibración dentro de un Baño María.

En dicha figura se puede apreciar que, si bien las lecturas no coincidían completamente en la totalidad de los sensores, sólo se registraba una variación que se mantenía a lo largo del intervalo de temperaturas medido (50-30 °C) de entre 1 y 3 °C; de manera que solamente se tuvieron que ajustar las mediciones de temperatura, con el software desarrollado para la adquisición de los datos, para lograr coincidencia.

En la Figura 29, se presenta la distribución de temperatura sobre la superficie de un muro de prueba de ladrillo rojo, para una sesión de calentamiento después de 1 hora, con 8 A de corriente alterna en las resistencias del calentador y sin someterse a corriente de aire alguna.



*Figura 29.
Distribución de
temperaturas en los
muros de prueba
montados sobre el
prototipo
experimental.*

Posteriormente se midieron las temperaturas del aire a diferentes alturas sobre la superficie del muro de pruebas con el fin de estimar las temperaturas de pared y de la corriente o flujo libre de aire. Tal y como se apuntó anteriormente, se efectuaron cinco repeticiones de dichas mediciones, para cada una de las velocidades de viento establecidas. El perfil de temperatura del aire para el muro de ladrillo rojo con un flujo paralelo a una velocidad de 8 m/s se muestra en la gráfica de la Figura 30.

La Figura 30 muestra que el mayor decremento en la temperatura del aire se registró en los primeros 4.5 mm (0.0045m), disminución de 12°C; mientras que de 4.5 a 57 mm (0.0045-0.057m) se alcanza la temperatura de flujo libre de aire y solamente se registró una caída en la temperatura de poco más de 2°C. Dicho comportamiento se observó en todos los muros, para velocidades del aire entre 6, 8 y 10 m/s.

Así la ecuación 16 indica que $Pr = 0.708$, por lo que la ecuación 18 aplicada para el cálculo del espesor de la capa límite hidrodinámica, a partir de una distancia de 0.23 m desde el borde inicial del muro, se obtiene un resultado de 0.0037 m. Al sustituir en la ecuación 19, el espesor de la capa límite térmica fue igual a 0.0041 m. Al comparar con el resultado experimental, el principal decremento se presenta en los primeros 0.0045 m, indicativo de una discrepancia de 9%, fácilmente explicable por dos factores: la rugosidad de la superficie del muro y el error asociado en la medición de la distancia vertical del sistema de sensores a la superficie del muro.

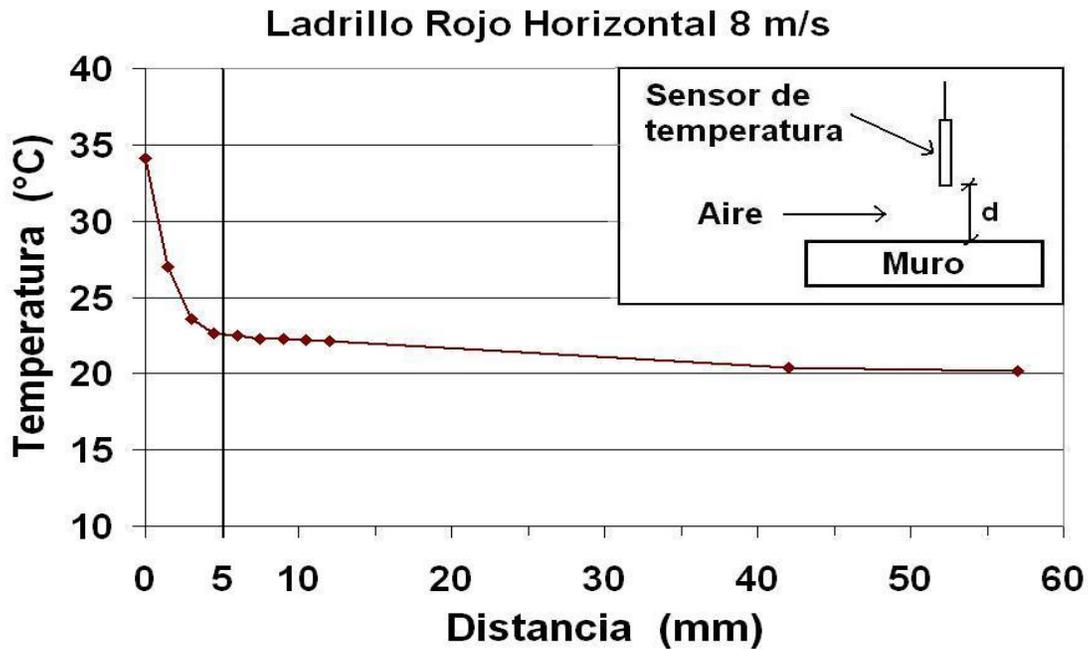


Figura 30. Perfil de temperatura para un muro horizontal de ladrillo rojo, con un flujo de aire paralelo a una velocidad de 8 m/s.

No obstante, para velocidades del aire entre 2 y 4 m/s, la capa límite varió según el tipo de material, presentándose la situación extrema de no poder medir con certeza su espesor para el muro de concreto horizontal, con flujo de aire a 2 m/s, ya que después de recorrer el máximo desplazamiento vertical del sistema de sensores sobre la superficie del muro de prueba, aún se presentaba una ligera tendencia decreciente en las mediciones de temperatura. Por lo anterior, no fue posible medir de forma confiable la temperatura de flujo libre del aire. Tal situación se ilustra en la Figura 31, en donde se presenta el perfil de temperatura para un muro de concreto colocado en forma horizontal dentro de la sección de pruebas del túnel de viento, y dentro de un flujo de aire a 4 m/s, paralelo a la superficie del muro.

Dicho comportamiento se puede explicar con el contenido de humedad que poseen los muros de prueba. Para aquellos muros cuyo material de construcción es poroso, tales como el ladrillo rojo o el adobe, una gran parte del agua que contienen se evaporó durante la etapa de calentamiento de 1 hora, por lo que en el momento de realizar las mediciones del perfil de temperaturas, no se presentan distorsiones significativas. Sin embargo, para el muro de concreto, cuya porosidad es menor que la de los otros materiales de construcción, la evaporación de humedad fue mucho más lenta. Por consiguiente, para altas velocidades de viento el vapor de agua que aún emanaba de la superficie del muro, no influía sobremanera en las mediciones de los sensores, pero para bajas velocidades, la corriente de aire no fue capaz de arrastrar con la misma rapidez el vapor de agua, por lo que se distorsionaron bastante las lecturas de temperatura de aire medidas por los sensores.

Lo anterior se incrementó por el alto valor de conductividad térmica que tiene el concreto, respecto de los otros materiales de construcción (el doble y para algunos hasta más del

triple) ya que ello aumenta la cantidad de calor que sale del muro hacia las partículas de aire que se encuentran adyacentes a él, por lo que el aire más cercano a la superficie del muro aumenta rápidamente su temperatura, por lo que su densidad y número de Reynolds Re disminuyen y su viscosidad cinemática aumenta, que provoca un aumento en el número de Prandtl y de los espesores de las capas límite hidrodinámica y térmica. Lo anterior, conjugado con la baja velocidad de los agentes portadores de calor (el aire) da como resultado que dichos portadores de calor absorban más calor durante su tiempo de recorrido junto a la superficie del muro, y por lo tanto aumente aún más su temperatura por este hecho. Por ello, la ecuación (20) no se utilizó como un método alternativo para evaluar los coeficientes de transferencia de calor por convección de los muros de prueba, ya que los espesores de capa límite térmica que se podrían haber estimado gráficamente, de los perfiles de temperatura para cada material, a las diferentes velocidades de viento, están distorsionados por el vapor de agua que sale de la superficie de los muros de prueba.

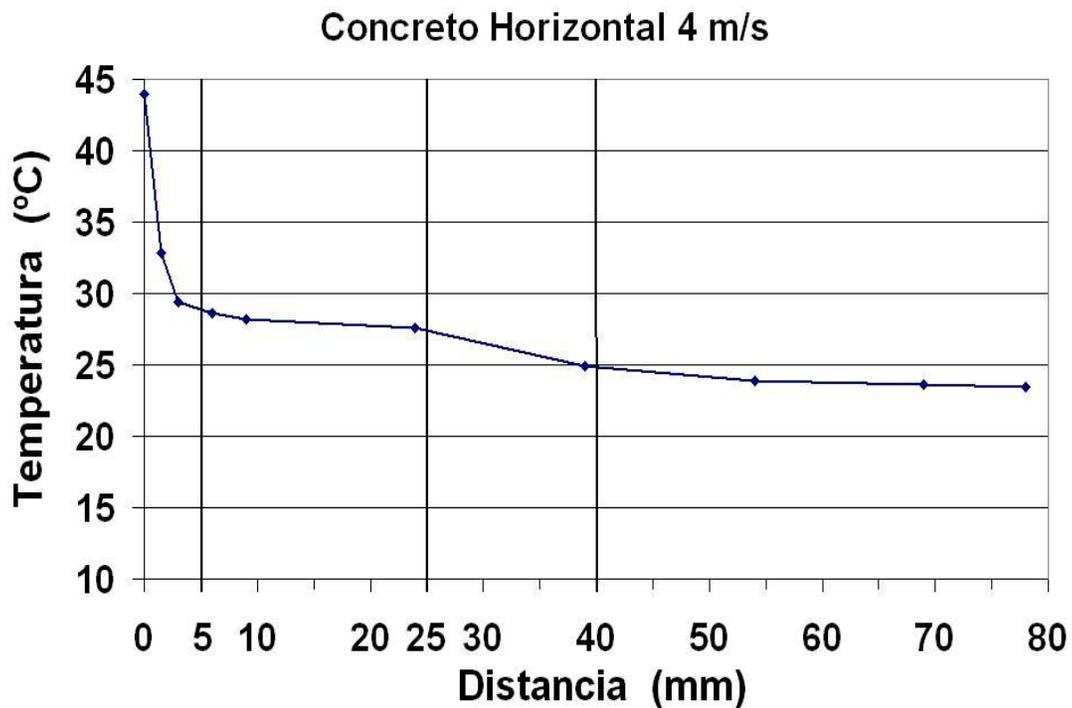


Figura 31. Perfil de temperatura para un muro horizontal de concreto, con un flujo de aire paralelo a una velocidad de 4 m/s.

Como se observa en la Figura 31, la tendencia de la curva es rápidamente decreciente en los primeros 3 mm, lo cual está en concordancia con la teoría de capa límite térmica; sin embargo, a partir de entonces y hasta llegar a 24 mm de distancia sobre la superficie del muro, la temperatura se mantiene estable en un valor arriba de la temperatura de flujo libre de aire. Esta interrupción en la caída de la temperatura se atribuye al efecto del agua evaporada que emana de la superficie del muro durante la medición de los perfiles de temperatura, lo cual mantiene caliente el aire, aunque se encuentre relativamente lejos de la

superficie del muro. Posteriormente se vuelve a presentar una caída de la temperatura, aunque ya no tan importante, entre los 25 y 39 mm. Es en esta parte del desplazamiento en donde se muestra cómo disminuye la influencia del vapor de agua sobre la temperatura del aire hasta que, después de los 39 mm, el comportamiento es prácticamente plano, es decir, se alcanza la temperatura de flujo libre de aire. Lo mismo sucede con la mayoría de los materiales, sin embargo se acentuó en bajas velocidades y alcanzó su máximo en el muro de concreto.

La corriente eléctrica suministrada al calentador del prototipo fue de 7 A con 17 V, por lo que el calor disipado por el sistema calentador fue $Q=VI=119$ W; al considerar las zonas de unión de elementos aislantes, así como de soporte de algunas piezas metálicas en el prototipo de pruebas se calcularon las pérdidas de calor durante cada velocidad de viento, con el modelo de convección para superficies planas en régimen de flujo laminar descrito por las ecuaciones 22 y 23. Las pérdidas de calor así evaluadas oscilaron entre 8.2 y 18.4% (según la velocidad del aire) para los muros colocados en forma horizontal, mientras que para muros verticales varió entre 11.6 y 25.9%.

Al aplicar la ecuación (14), y aceptar que el área de la superficie del muro de prueba en contacto con la corriente de aire era de $0.56 \times 0.46 = 0.2576$ m², y que los valores medidos de temperatura de pared, así como los de temperatura de flujo libre de aire, son el promedio de las lecturas tomadas por el sistema de sensores, se calcularon los coeficientes promedio de transferencia de calor por convección. El procedimiento anterior se llevó a cabo para muros de ladrillo rojo, tepetate y concreto en posición horizontal, así como para muros de ladrillo rojo, tepetate, adobe y concreto en posición vertical; se aceptó siempre un flujo de aire paralelo a la superficie del muro. Los resultados se encuentran en la Tabla 21. Debido a que, como se señaló anteriormente, se tomaron cinco diferentes lecturas de temperatura, en la Tabla 21 se incluye también, la desviación estándar σ para cada uno de los valores estimados del coeficiente de transferencia de calor por convección h . Es prudente mencionar que en ocasiones no fue posible llevar a cabo las mediciones por limitantes técnicas (capa límite muy gruesa como sucede con el muro de concreto para bajas velocidades del aire) o de tiempo (el Túnel de Viento tuvo una alta demanda de uso, por lo que el mantenimiento correctivo que se realizó, redujo nuestro tiempo de disponibilidad del equipo).

Al comparar estos resultados con aquellos propuestos por la norma mexicana NOM-008-ENER-2001 se observa una gran diferencia; sin embargo, los resultados aquí presentados se asemejan con algunos datos mencionados en bibliografía internacional [Sharples S. y coautores, 1998; Clear R.D. y coautores, 2003; Hagishima A. y coautores, 2003]. Ernani Sartori [2006] realiza un comparativo entre varias de las ecuaciones usadas en la actualidad para el cálculo de coeficientes de transferencia de calor por convección de superficies planas, principalmente horizontales. A partir de los principios básicos sobre la teoría de la capa límite, propone una ecuación que intenta consensuar los resultados de todas las demás. En dicho comparativo, Sartori genera valores del coeficiente de convección para velocidades del aire de 2 a 5 m/s, los cuales fluctúan, según cada una de las ecuaciones analizadas, entre 4 y 25 W/m²°C.

Tabla 21. Coeficientes promedio de transferencia de calor por convección h ($W/m^2\text{°C}$) para muros de ladrillo rojo, tepetate, adobe y concreto; con su respectiva desviación estándar σ .

Muro de prueba		Velocidad de viento (m/s)				
		2	4	6	8	10
Posición Horizontal						
Ladrillo rojo	h	17.48	19.89	28.49	28.62	31.45
	σ	2.14	2.73	5.23	5.39	6.50
Tepetate	h	14.67	24.71	25.63	31.21	37.87
	σ	1.71	1.31	0.21	1.93	1.33
Concreto	h		19.73	23.04	26.45	26.48
	σ		0.15	0.36	0.27	1.99
Posición Vertical						
Ladrillo rojo	h	19.09	29.44	36.89	49.46	
	σ	2.34	3.02	1.44	4.15	
Tepetate	h	22.74	40.88			
	σ	2.29	10.46			
Adobe	h		25.19	34.95	46.54	49.76
	σ		2.62	1.09	1.11	6.39
Concreto	h	24.92	33.36	34.21	62.83	71.98
	σ	3.22	1.67	2.94	2.10	5.59

Para establecer una relación entre las variables h y v (coeficiente de transferencia de calor por convección y velocidad de aire) los resultados anteriores se graficaron. Para un muro de ladrillo rojo horizontal la gráfica se muestra en la Figura 32, con una relación funcional de tipo exponencial $h = (12.908) v^{0.3894}$, y un coeficiente de correlación R^2 de 0.9186.

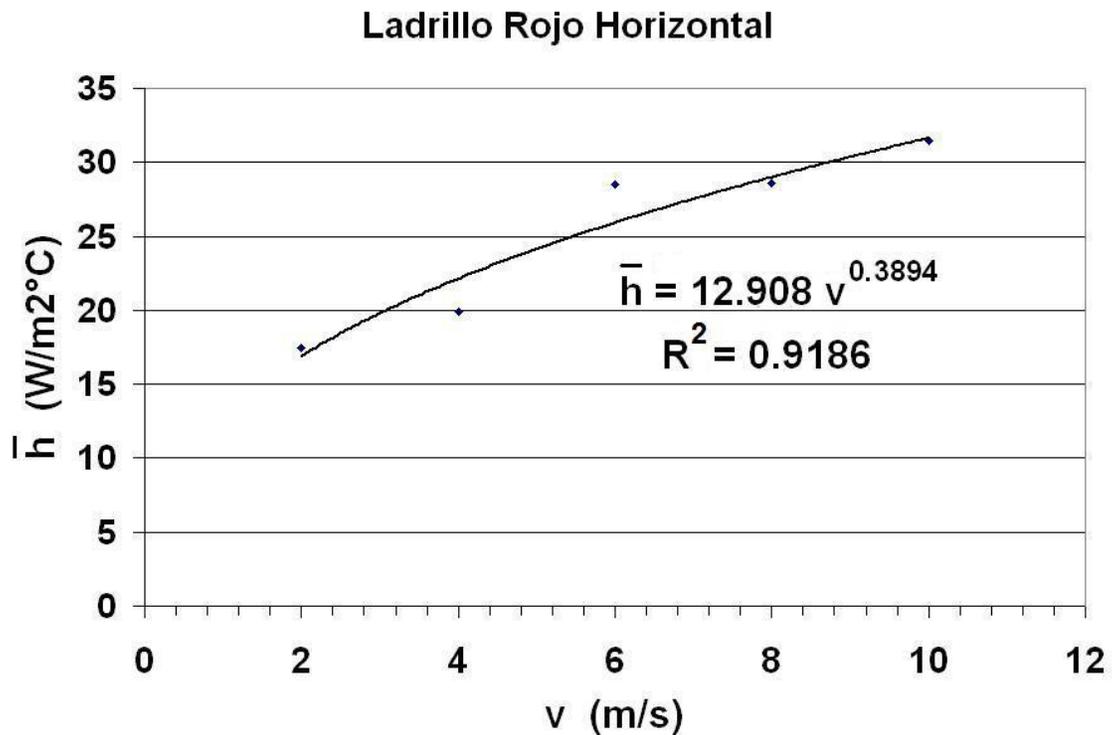


Figura 32. Gráfica del coeficiente promedio de transferencia de calor por convección \bar{h} para un muro horizontal de ladrillo rojo con un flujo de aire paralelo, contra velocidades del viento.

Una expresión de este tipo resulta poco útil para extrapolar su uso a localidades cuya altura con respecto al nivel del mar es diferente a la altura de la Cd. de México, ya que algunas propiedades fundamentales del aire en el fenómeno de la convección, como es la densidad del aire, será diferente de aquella que se presentó durante los experimentos realizados. Por lo anterior, se buscó una relación funcional entre los números adimensionales de Nusselt Nu y de Reynolds Re , obtenidos mediante las ecuaciones (15) y (17) respectivamente.

La gráfica de los números adimensionales Nu vs Re se muestra en la Figura 33. Para todos los materiales evaluados se eligió la mejor aproximación a dicha gráfica, con base a su mayor coeficiente de correlación.

La Tabla 22 presenta las ecuaciones que relacionan los números Nu y Re , obtenidas para cada muro sometido a prueba, así como su respectivo coeficiente de correlación al cuadrado (R^2).

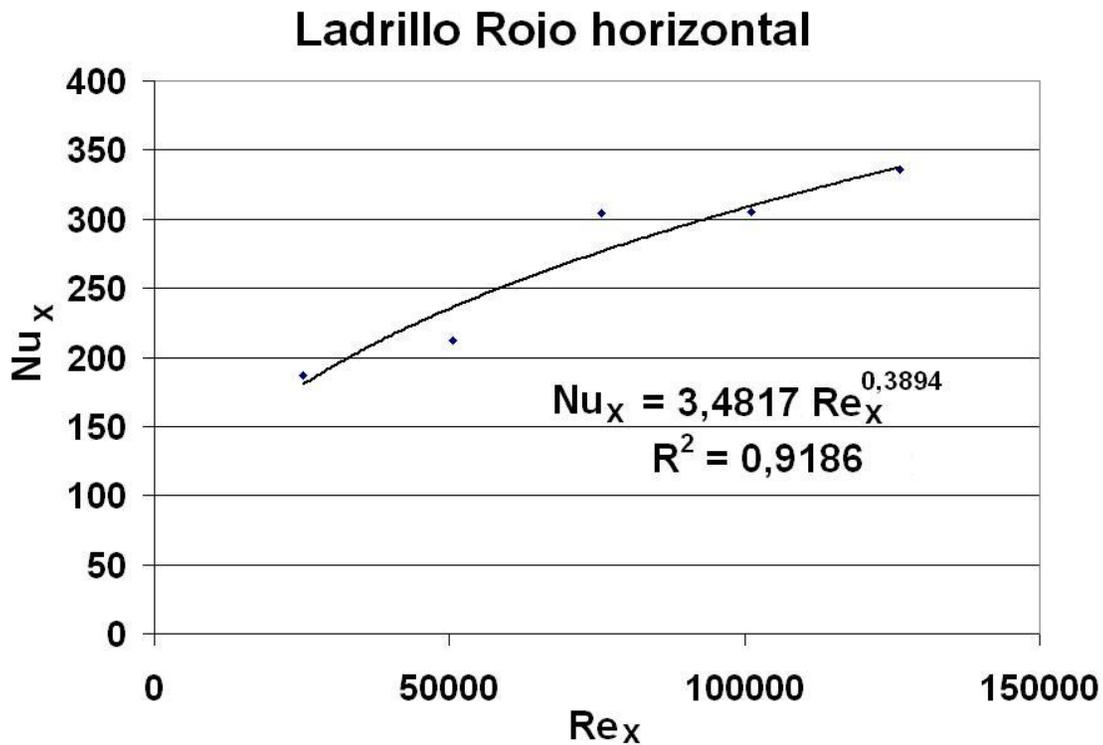


Figura 33. Gráfica de los números de semejanza Nu_x y Re_x para un muro horizontal de ladrillo rojo con un flujo de aire paralelo.

Tabla 22. Ecuaciones de relación entre Nu_x y Re_x para los diferentes muros considerados y $Pr=0.708$.

Tipo de muro		Ecuación	Coefficiente de Correlación R^2
Ladrillo Rojo	Horizontal	$Nu = (3.4817)*Re^{0.3894}$	0.9186
	Vertical	$Nu = (0.0042)*Re + 94.223$	0.9892
Tepetate Horizontal		$Nu = (0.6353)*Re^{0.5465}$	0.9576
Adobe Vertical		$Nu = (300.51)*\ln(Re) - 2988.8$	0.9807
Concreto	Horizontal	$Nu = (5.1141)*Re^{0.3444}$	0.9478
	Vertical	$Nu = (0.0052)*Re + 89.453$	0.8986

Capítulo 5

DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE FILTROS SOLARES

Para la fabricación de los filtros solares, consistentes en sustratos de vidrio cal-sosa recubiertos con una película delgada de óxido ferroso (FeO), mediante la técnica de erosión iónica con magnetrones y asistida por radiofrecuencia, fue necesario contar con diferentes equipos a través de los cuales se consiguieron las condiciones pertinentes, tales como la presión de trabajo (dentro del tanque), flujo del gas de trabajo, diferencia de potencial eléctrico necesario para formar el plasma, campo magnético para eficientar el proceso de erosión iónica, entre otros. A continuación se describen los equipos utilizados para satisfacer tales necesidades.

5.1 Descripción del equipo

Cámara de evaporación

La cámara de evaporación que se muestra en la Figura 34 consiste en un tanque fabricado de acero al carbón sin recubrimiento interno y con un volumen de 2.25m^3 . Su diámetro interno mide 1.35 m y su longitud 1.55 m. Cuenta con varias boquillas a través de las cuales se colocan los dispositivos y medidores de presión, líneas de suministro del gas de trabajo, sistema de enfriamiento de los magnetrones, etc.

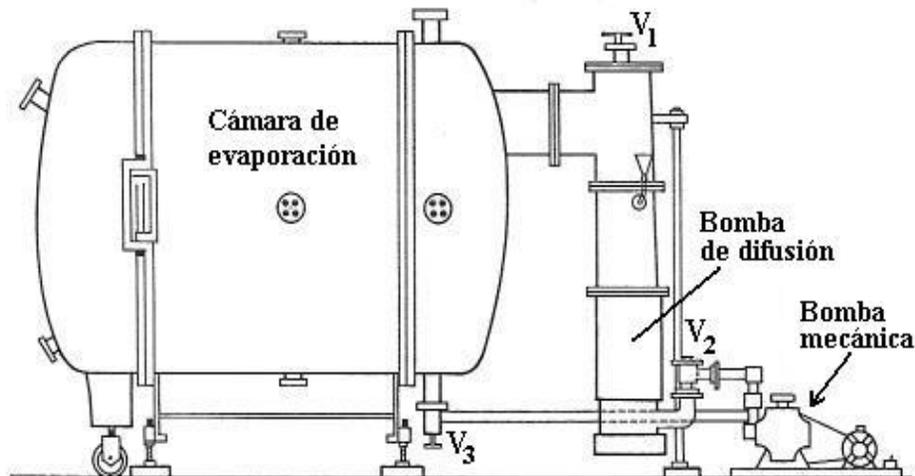


Figura 34. Diagrama de la cámara de evaporación (vista lateral); en la parte derecha se encuentran las bombas de difusión y mecánica, las cuales forman parte del sistema de bombeo.

Sistema de bombeo

La condición de vacío (muy baja presión) al interior de la cámara de evaporación se consiguió al utilizar dos bombas de diferentes tipos. Primero, se emplea una bomba mecánica para realizar la etapa preliminar, que evacuó el gas que se encuentra en el interior de la cámara a presión atmosférica, hasta llegar a una presión de 10^{-3} mbar. Posteriormente, operaba una bomba de difusión con la que se alcanzó una presión de hasta 10^{-5} mbar.

La bomba mecánica tuvo desplazamiento positivo, de tipo rotatoria, con paletas en aceite y que descarga los gases directamente hacia la atmósfera, marca Sargent Welch, modelo 1397, con capacidad de $0.5 \text{ m}^3/\text{min}$.

La bomba de difusión empleada es una bomba marca Leybold modelo DO 4001/57247, con capacidad de $4 \text{ m}^3/\text{min}$ que utiliza aceite de baja tensión superficial tipo D.G. 704.

Cátodo para descarga luminosa

Para realizar la última etapa en la limpieza de los vidrios, se empleó un cátodo en forma de aro con diámetro igual a 90 cm, fabricado a partir de una barra hueca de aluminio, el cual estaba suspendido en el interior de la cámara de evaporación, cercano al sustrato de vidrio y aislado de las paredes del tanque. Se conectaba a una fuente de alto voltaje de corriente directa capaz de alcanzar 5000 volts y 1 A. Su función era ionizar las moléculas de argón que son introducidas al interior de la cámara y formar un plasma; dichos iones bombardeaban la superficie de los vidrios, para la desorción de aquellos gases que aún después de una limpieza química previa, estaban todavía presentes.

Magnetron

Se utilizó un magnetron plano fabricado por Sierra Applied Science Inc. En la Figura 35 se ilustran sus partes principales.

El núcleo del magnetron (cátodo) es una especie de embalaje hecho de bronce por cuya superficie circula agua de enfriamiento y dentro del cual se encuentran confinados los imanes cubiertos por una resina epóxica de larga duración. Los imanes están contruidos a base de una aleación de Nd-Fe-B (Neodimio-hierro-boro). Los imanes originan un campo magnético de aproximadamente 0.03 Tesla (300 Gauss), y por su disposición dan lugar a un confinamiento del flujo de electrones en una trayectoria toroidal.

El material a erosionar fue hierro, que es un material ferromagnético; entonces al colocar un blanco de hierro en el magnetron, sobre la placa trasera de acero, éste debilitaría o distorsionaría el campo magnético de los imanes del magnetron para disminuir así la intensidad de dicho campo; por lo que el efecto de confinamiento del plasma se redujo drásticamente y, por ende, la eficiencia del proceso de sputtering. Para evitar esto, se optó por utilizar un blanco de hierro de espesor muy pequeño, de tal forma que sus propiedades ferromagnéticas no afectaran el campo magnético. El espesor usado fue el recomendado por el fabricante del magnetron, igual a 2.5 mm. Cabe señalar aquí que se utilizó un blanco de Fe de alta pureza (99.99%), producido por Plasmaterials. Las dimensiones del blanco fueron $254 \times 127 \times 2.5 \text{ mm}$.

El cuerpo o carcasa del magnetrón está fabricado de cobre OFHC. La presión máxima de trabajo es de 133 Pa (1.33 mbar), sin embargo, las mejores eficiencias de operación se dan entre 0.8 y 0.13 Pa (0.008-0.001 mbar). La presión mínima a la cual la fuente de radiofrecuencia puede formar el plasma es de 0.067 Pa (6.7×10^{-4} mbar).

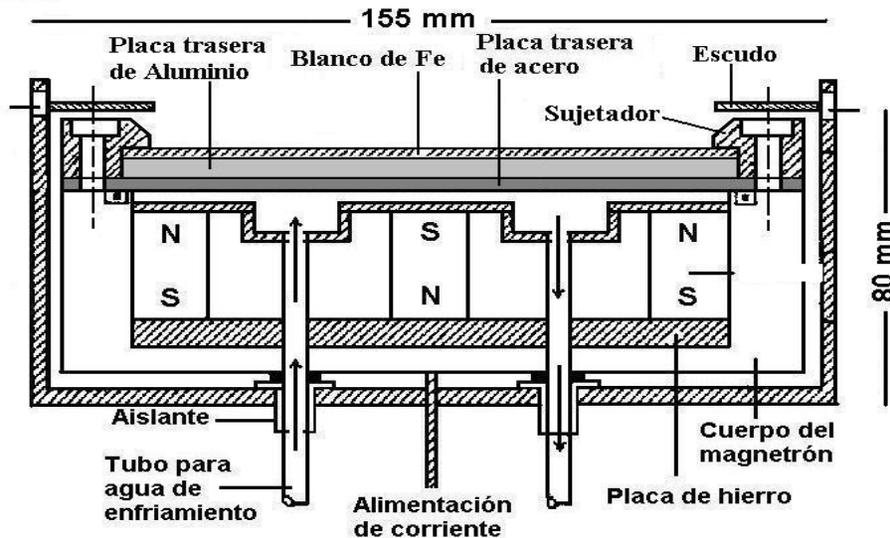


Figura 35. Diagrama del interior de los magnetrones y de la disposición del blanco de Fe.

Fuente de radiofrecuencia

Se utiliza una fuente de radiofrecuencia Advanced Energy modelo RFXII-1250. Esta puede proporcionar un máximo de 1250 W en condiciones óptimas, a 13.56 MHz de frecuencia. Trabaja a 178/242V y 18A de corriente alterna, 50/60 Hz \pm 10%. Especificaciones físicas: 17.68cm (alto) x 21.59 cm (ancho) x 48.26 cm (largo), con un peso de 16.3 kg. Adicionalmente con la fuente, se empleó un acoplador de impedancias, con capacitor de placas móviles, de la marca Advanced Energy.

Sistema de movimiento del vidrio

Con el fin de cubrir más área y con esto obtener los filtros solares de áreas relativamente grandes (300x600 mm), se empleó un mecanismo para mover el sustrato horizontalmente frente al magnetrón a distancia, a través de un motor eléctrico de 1/15 hp y 50 W marca Dayton (maniobrado a control remoto), que giraba una flecha de acero que entraba a la cámara y se encontraba acoplada en el interior con una cremallera soldada sobre el carro que transportaba al sustrato (Figura 36). El sustrato se sujetó a dos barras de hierro colocadas en los extremos del carro. Es prudente mencionar que este sistema no llevaba ningún tipo de lubricación dentro de la cámara, debido a que los vapores del lubricante afectarían las condiciones de presión y pureza del medio.

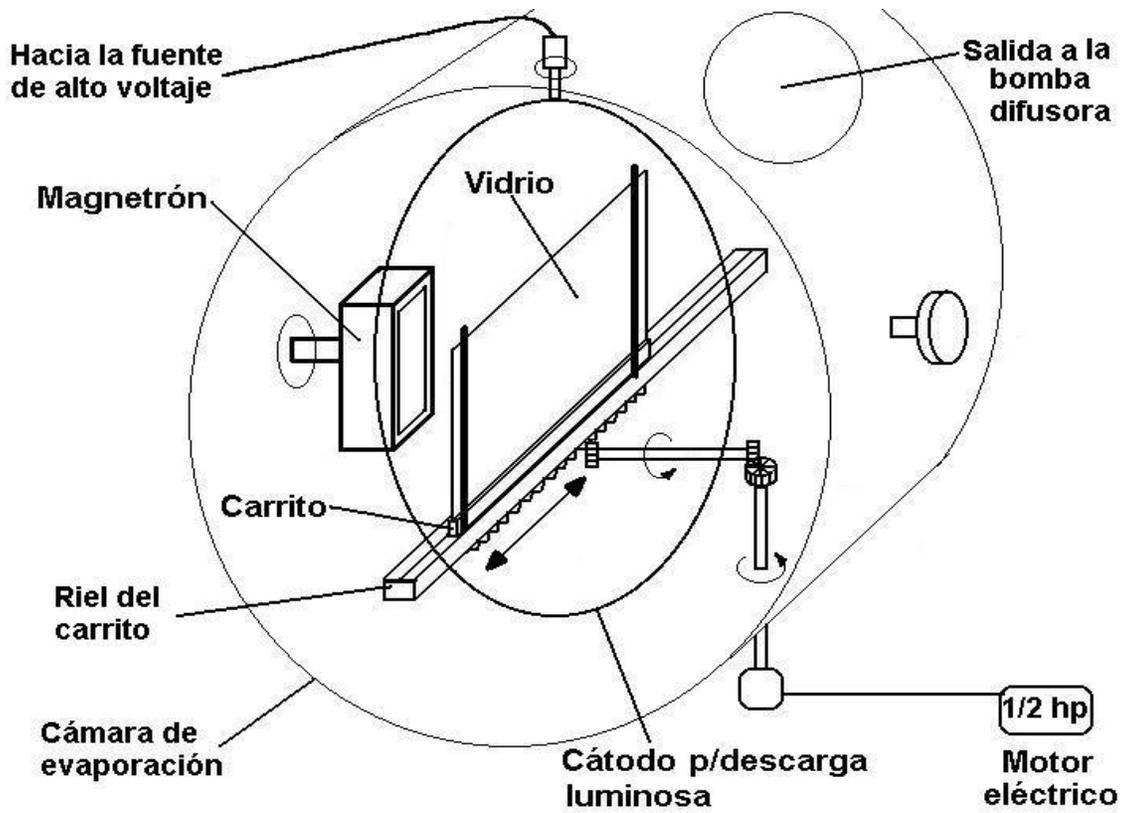


Figura 36. Diagrama del interior de la cámara de evaporación (vista lateral).

5.2 Fabricación de los filtros solares con base en hierro

5.2.1 Limpieza del sustrato

Se utilizó vidrio cal-sosa flotado para fabricar los filtros solares, ya que en su proceso de elaboración, después de pasar por varias etapas de refinamiento, el vidrio fundido es vaciado a una línea continua de estaño fundido; donde por diferencia de densidades queda sobre la superficie del estaño, lo que genera que ambas caras se encuentran en planos paralelos. La cara que está en contacto con el estaño queda impregnada con parte de este material. Por lo anterior, éste vidrio tiene su superficie más plana que el vidrio convencional, lo que facilitó el crecimiento de una película delgada más uniforme.

Con el fin de lograr una buena adherencia entre la película y el sustrato, es importante la limpieza de este último. Cuando el vidrio se encontraba fuera de la cámara, el procedimiento consistió en lavar una lámina de vidrio de 600x300x3mm con detergente comercial y esponja suave; posteriormente se enjuagó con agua corriente hasta eliminar por completo de la superficie la sensación jabonosa. El vidrio fue sumergido en una solución de mezcla crómica durante 30 minutos, por medio de la cual los óxidos y grasas presentes en la superficie del vidrio fueron convertidos en compuestos solubles. La composición de la mezcla crómica fue de: 24 g de $K_2Cr_2O_7$, 408 mL de H_2SO_4 y 144 mL de H_2O . Concluido lo anterior, el sustrato se enjuagó con agua destilada; y los vidrios se colocaron dentro de un recipiente con alcohol isopropílico. Por último, fueron secados con aire caliente a una temperatura de 90-110°C, durante 10 minutos.

Con el vidrio instalado dentro de la cámara y bajo condiciones de muy baja presión ($\sim 10^{-5}$ mbar), se recurrió al bombardeo con iones como etapa final de limpieza del sustrato. Se introdujo argón al interior del tanque hasta una presión de 7×10^{-4} mbar y con el uso del cátodo descrito en la sección anterior, al cual se le aplicó un voltaje de 3 kV a través de una fuente de corriente directa, se generó una “descarga luminosa” que provocó un bombardeo iónico de la superficie del vidrio, para lo cual se mantuvo el vidrio en reposo. La eliminación de impurezas se debió principalmente a los siguientes mecanismos [Brawn R., 1970]:

1. Calentamiento directo debido al choque de partículas cargadas.
2. Desorción de impurezas por el bombardeo continuo de electrones.
3. Desorción de impurezas como resultado del bombardeo de iones de baja energía o partículas neutras.
4. Modificación de la superficie del vidrio por el bombardeo continuo de las partículas que conforman el plasma.

5.2.2 Erosión iónica del hierro

Una vez instalado el vidrio dentro de la cámara y con el blanco montado en el magnetrón, se procedió a depositar la película de óxido ferroso (FeO).

Con una presión base de 5×10^{-5} mbar, se introdujo argón al interior del tanque hasta una presión de 1×10^{-3} mbar. Con la fuente de radiofrecuencia se le aplicó al sistema una potencia de 100 W, condiciones a las que se observó que encendía el plasma, es decir, se generaba la descarga luminosa autosostenible y por tanto el plasma necesario para la erosión iónica. Posteriormente el vidrio se movió frente al magnetrón y la potencia aplicada

al sistema se incrementó hasta 1050 W, mientras que la presión del sistema se aumentó hasta 7×10^{-3} mbar. Para esta potencia de depósito, registraron valores de polarización entre los electrodos (DC BIAS) de -140 a -145 V. El tiempo total de depósito del hierro fue de 2 horas. Para poder alcanzar dicho valor de potencia suministrada a una presión de trabajo baja (para así optimar el camino del material erosionado hacia el sustrato) y sin sobrepasar el valor límite de la polarización (-145 V); se tuvo que disminuir la distancia entre el vidrio y el blanco de 130 a 85 mm, ya que de otra manera se habría tenido que trabajar a una potencia de alrededor de 700 W (para no dañar el equipo por la alta polarización) y una presión de 7×10^{-3} mbar, durante un periodo aproximado de 4 horas. Al momento de realizar la erosión iónica, el sustrato de vidrio se mantuvo en continuo movimiento frente al magnetron, con ayuda del sistema de movimiento descrito.

La Tabla 23 presenta los valores típicos de las condiciones de operación durante la erosión iónica del blanco de hierro puro, asistida con magnetrones y radiofrecuencia.

Tabla 23. Corrida típica de las variables que intervienen durante la erosión iónica con magnetrones asistida por radiofrecuencia del blanco de hierro puro.

Presión (mbar)	Potencia (Watts)			Polarización de electrodos (V)	Tiempo (min)
	Seleccionada	Alimentada	Reflejada		
1×10^{-3}	100	101	0	-62	2
1×10^{-3}	200	201	0	-85	4
1×10^{-3}	300	302	0	-100	6
1×10^{-3}	400	402	0	-112	8
1×10^{-3}	500	502	0	-123	10
1×10^{-3}	600	602	0	-131	12
1×10^{-3}	700	703	1	-139	14
5×10^{-3}	700	703	1	-132	16
5×10^{-3}	800	803	1	-138	46
5×10^{-3}	900	904	2	-142	48
7×10^{-3}	900	903	1	-136	50 (*)
7.2×10^{-3}	1050	1055	3	-140	52
6.9×10^{-3}	1050	1058	5	-141	90
7×10^{-3}	1050	1054	3	-143	130
7.1×10^{-3}	1050	1057	4	-144	170

P_{base} : 5.3×10^{-3} mbar.

(*) El sustrato de vidrio colocado frente al magnetron.

Ya que se buscó el óxido de menor grado de oxidación del hierro, el gas de trabajo para obtener las películas fue argón (pureza mínima de 99.998%) para así minimizar la oxidación de las películas depositadas.

Como resultado del proceso, se lograron películas que presentaban una coloración verde muy tenue en los extremos, mientras que en la parte central (por la misma geometría del magnetrón corresponde a la zona en que la película tiene un mayor espesor) tenían un color anaranjado con una tendencia al café cuando los tiempos de depósito eran mayores, es decir, cuando el espesor de la película era mayor. Aquellas partículas erosionadas en los extremos del blanco y cuyas trayectorias no eran normales a la superficie de este, se desviaban menos de la zona del vidrio que estaba justo enfrente, por lo que en dicha zona (parte central del vidrio) el espesor de la película sería mayor y uniforme. Algunas de las partículas erosionadas en los extremos del blanco, cuyas trayectorias divergían notablemente de una trayectoria normal a la superficie de este, alcanzaron a depositarse en las orillas del vidrio, lo cual originó, junto con la baja eficiencia del magnetrón en el proceso de erosión iónica del hierro, que el espesor de la película formada en esta zona fuera menor que al de la zona central del vidrio.

Se observó que la zona de las orillas abarcaba una franja de aproximadamente 3 cm de ancho a lo largo de los extremos del vidrio, mientras que la zona central era toda la parte restante del vidrio, lo cual representaba el 72 % del área total del sustrato.

5.2.3 Reducción de las películas en atmósfera de H_2+N_2 .

A pesar de que se usó como gas de trabajo argón puro, las curvas de transmitancia, independientemente del tiempo de depósito (Figura 37), coincidieron con aquellas observadas en la bibliografía para el óxido férrico Fe_2O_3 [Ruzakowski P., y coautores, 1997; Özer N. y Tepehan F., 1999]; por lo cual se logró una película compuesta esencialmente de Fe_2O_3 y en mucho menor cantidad de FeO .

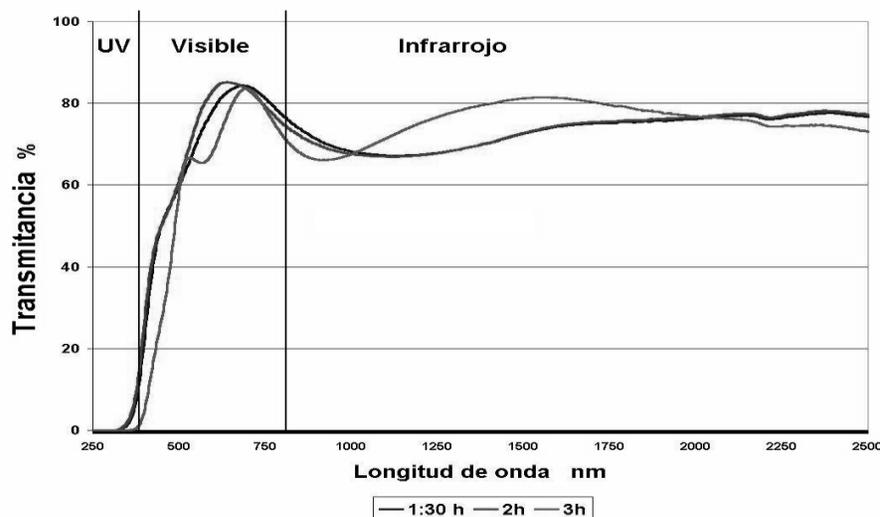


Figura 37. Transmitancia de algunas muestras de los filtros solares obtenidos por sputtering, para diferentes tiempos de depósito.

El hidrógeno actúa como un agente reductor en reacciones químicas bajo condiciones controladas de calentamiento [Nekrasov B., 1969]. Para el hierro, algunos autores informan la reducción de películas de α -Fe₂O₃ fabricadas mediante la técnica de sputtering, a películas de Fe₃O₄ (el cual es un compuesto de FeO y Fe₂O₃), en una atmósfera de hidrógeno húmedo a 300-330°C, por un periodo de 2-4 horas [Yoshii S., et al., 1982].

Se tomaron pequeñas muestras (45 x 22 mm) de los filtros fabricados, las cuales se calentaron a 400°C durante 10 minutos, en una atmósfera de H₂+N₂, cuya composición fue de 50% H₂ y 50% N₂, con el fin de reducir el contenido de óxido férrico Fe₂O₃ de las películas obtenidas, a óxido ferroso FeO. Con la presencia del N₂ en la atmósfera de reducción, el cual es un gas inerte, se controló de mejor forma la velocidad de reducción de las películas. Para ello se utilizó un horno (o mufla) con atmósfera controlada Thermolyne modelo F79300, el cual proporcionó el calentamiento en su interior a través de una resistencia eléctrica, y se alcanzó una temperatura máxima de 1100°C. El flujo de hidrógeno y nitrógeno fue controlado por medio de un sistema electrónico intermedio entre los tanques contenedores de los gases y la cámara de calentamiento del horno. La elección en la composición de la atmósfera reductora (50% H₂ y 50% N₂) se debe a que cuando se probó con composiciones donde alguno de los gases tenía mayor porcentaje, era más difícil de controlar la reducción de las películas.

Del proceso de reducción anterior, se lograron películas que presentaron una coloración verde oscuro-café. En la Figura 38 se muestra la transmitancia, reflectancia y absorbancia de una muestra después del proceso de reducción. La curva de transmitancia en el intervalo visible del espectro muestra un pico bastante interesante y conveniente para nuestros fines, que alcanzó hasta un valor de 50%, mientras que para el infrarrojo cercano disminuye manteniéndose en un valor muy cercano al 40% a lo largo de casi todo este intervalo. El valor de la reflectancia contiene un valle en el intervalo visible, que aumenta paulatinamente en el intervalo del infrarrojo cercano del espectro. Por último, la absorbancia es alta para aquellas longitudes de onda pertenecientes al intervalo ultravioleta con disminución notable en la parte visible, y aún más en el infrarrojo cercano. Este comportamiento de las curvas señala un buen funcionamiento de los filtros solares para ser utilizados en ventanas en edificaciones.

En la Figura 39 se presenta una comparación entre las propiedades ópticas de una muestra de los filtros solares antes y después del proceso de reducción. Es visible la diferencia entre las curvas ya que con el proceso de reducción en la muestra, la transmitancia disminuye y la reflectancia aumenta su valor a lo largo del intervalo del infrarrojo cercano, mientras que para las longitudes de onda correspondientes al intervalo visible del espectro, la reflectancia se mantiene casi igual a los valores iniciales y el valor de la transmitancia disminuye, pero manteniéndose el pico en dicho intervalo. Lo anterior señala la presencia de FeO en la película después del tratamiento en atmósfera reductora, ya que se asemeja a las propiedades del óxido ferroso, mencionadas anteriormente.

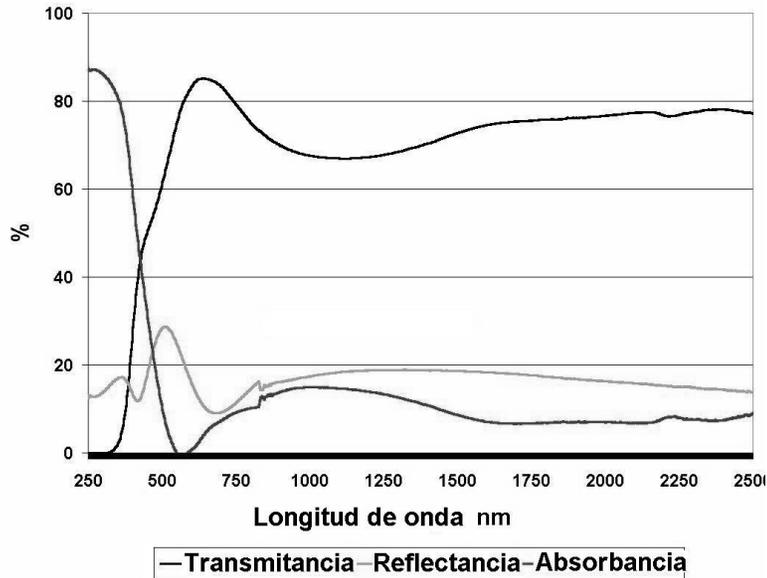


Figura 38. Transmitancia, reflectancia y absorbancia para una muestra después del calentamiento por 10 minutos a 400 °C en atmósfera reductora 50% H₂ + 50% N₂.

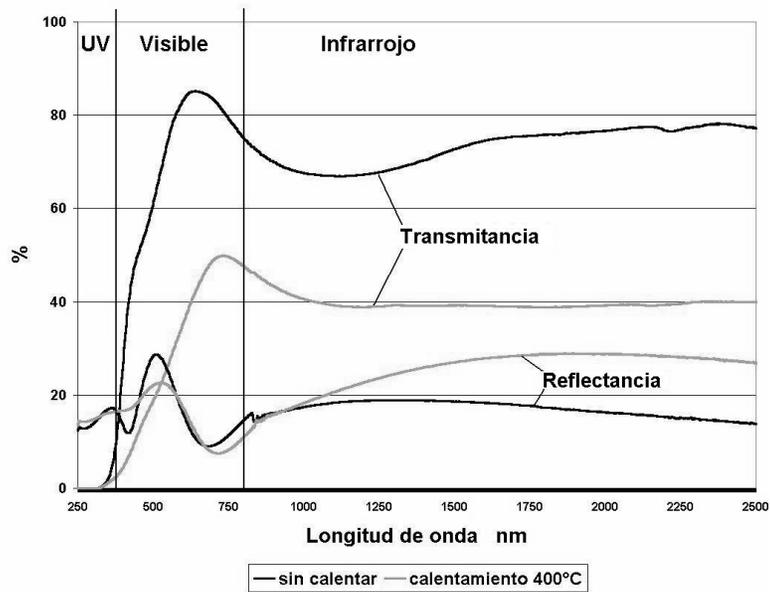


Figura 39. Transmitancia y reflectancia de una muestra antes y después del proceso de reducción por calentamiento.

Al usar el programa TRABSOL desarrollado en el Centro de Investigaciones en Energía (CIE) de la UNAM, se obtuvieron los valores promedio espectrales de transmitancia y reflectancia de los filtros solares para la región ultravioleta, visible e infrarrojo cercano del espectro.

La Tabla 24 muestra los valores obtenidos para reflectancia (R) y transmitancia (T) en los intervalos ultravioleta (UV), visible (VIS) e infrarrojo cercano (IR) del espectro de radiación solar, así como los valores totales de T y R.

Tabla 24. Valores promedio en % (integrados por zonas del espectro solar) de reflectancia y transmitancia, para los filtros solares antes y después del tratamiento térmico de reducción, además de la absorbancia deducida.

Muestra	R_{UV}	R_{VIS}	R_{IR}	T_{UV}	T_{VIS}	T_{IR}	T_{TOTAL}	R_{TOTAL}	A
Antes	15.8	18.5	16.1	6.83	68.0	72.3	65.3	17.0	17.5
Después	16.0	17.5	19.0	1.65	30.2	39.9	33.2	18.2	48.5

5.3 Análisis por RBS de los filtros solares con base en hierro

La técnica de análisis por RBS (Rutherford Back Scattering) se basa en colisiones entre núcleos atómicos. Consiste en dirigir un haz de iones hacia la superficie de la muestra, por lo que cierto número de ellos se retrodispersa después de “colisionar” con átomos de la muestra. Esta “colisión” no involucra un contacto directo entre los iones y los átomos de la muestra, sino que el intercambio de energía ocurre debido a las fuerzas coulombianas entre los núcleos atómicos. La interacción puede ser descrita en forma precisa como una colisión, según la física clásica. La medición del número y energía de los iones retrodispersados, como una función del ángulo de emisión, provee información referente a los diferentes elementos químicos constituyentes de la muestra en cuanto a su concentración, en función de la profundidad entre los primeros 0.5 a 2.0 micrómetros [Tesmer J.R. y Nastasi M., 1995]. La energía medida para las partículas retro dispersadas a un ángulo dado, depende de dos procesos: la energía que la partícula pierde mientras transita a través de la muestra, antes y después de la colisión, así como también la energía perdida durante la colisión misma. Por otro lado, el número de eventos retrodispersados para un elemento dado de la muestra, depende de dos factores: la concentración del elemento en la muestra, así como también el tamaño efectivo de su núcleo.

Con el fin de asegurar la presencia de Fe en la película de los filtros solares fabricados, se efectuó un análisis por RBS; para ello se utilizaron iones de He con una energía de 700 keV, mediante los cuales se bombardeó la muestra en la superficie sobre la que se encuentra el recubrimiento. En la Figura 40 se exponen los espectros obtenidos para dos muestras de los filtros solares fabricados. Una corresponde a una muestra antes de que se sometiera al proceso de calentamiento en atmósfera reductora, y la otra, después de dicho proceso de calentamiento (sin calentar y calentada respectivamente). Los análisis fueron realizados en el acelerador Van de Graff de 0.7 MeV del Instituto de Física de la UNAM.

En dicha figura se puede observar, al recorrer la gráfica de derecha a izquierda, un máximo ancho para la muestra sin calentar, el cual se presenta en forma de un diente relativamente bien definido, y que corresponde al hierro contenido en la película depositada. Inmediatamente después es evidente un valle y por último un ascenso rápido de la curva, que corresponde a los iones retrodispersados por el vidrio, lo cual indica que la película de óxido de hierro se encuentra en la superficie del vidrio. Para la muestra calentada, se observa el inicio del máximo en el mismo punto que para la muestra sin calentar, sólo que ahora no continúa en forma de escalón si no que disminuye paulatinamente. En la región donde se presenta el valle para la muestra sin calentar, el número de cuentas de la muestra calentada no expone una disminución tan clara, por lo que no se observa dicho valle. Las curvas vuelven a coincidir en la región donde ambas ascienden rápidamente. Este comportamiento del espectro para la muestra calentada, refleja un proceso de difusión del hierro dentro de la estructura del sustrato de vidrio, durante el proceso de calentamiento en atmósfera reductora al que fue sometido. La cantidad de hierro contenida en la muestra es la misma antes y después del proceso de calentamiento; ello se deduce de las diferencias observadas en los espectros RBS para la muestra calentada con respecto a la muestra sin calentar, ya que se aprecia que la disminución del máximo de hierro se compensa con la desaparición del valle, es decir, la disminución en las cuentas correspondientes al máximo del hierro de la película delgada, corresponden al aumento de las cuentas del hierro que se difundió en el vidrio y por el cual desaparece el valle observado para la muestra sin

calentar. El espesor medido para la película de FeO de la muestra analizada antes de calentar fue de 1200 Å.

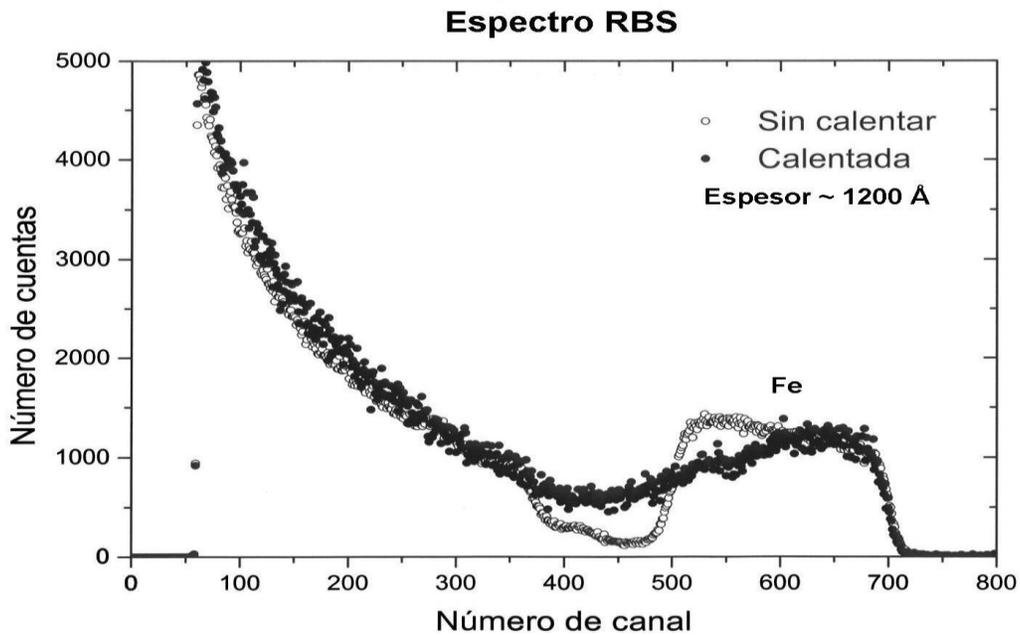


Figura 40. Espectro RBS del filtro solar obtenido por erosión iónica con base en FeO, antes y después del proceso de calentamiento en atmósfera reductora.

Por último, el coeficiente de transferencia de calor total (U) del filtro desarrollado se estimó con un medidor marca OMEGA, modelo OS-652, que consiste de un sensor de rayos infrarrojos cuya respuesta espectral abarca el intervalo de 8,000-14,000 nm. Las lecturas tomadas del medidor e interpretadas con ayuda de un nomograma, permitieron obtener el valor de U . Se obtuvo así un valor de U de $3.0 \text{ W/m}^2\text{°C}$, el cual es semejante al valor recomendado por ASHRAE de $2.78 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para vidrios con recubrimiento depositado por sputtering (doble vidrio); además está dentro del intervalo de valores mencionados por Correa G. [2002] para vidrios cal-sosa flotados recubiertos con óxidos de metales transición (al igual que el FeO) tales como el Cu_2O y VO_2 , donde se señalan coeficientes U entre 2.18 y $4.30 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Capítulo 6

IMPACTO DE RESULTADOS EN EL DISEÑO TÉRMICO DE EDIFICACIONES

5.1 Descripción de Energy-10

Para evaluar el impacto que provoca el uso de los datos experimentales de propiedades térmicas y de transferencia de calor de materiales de construcción, dentro del proceso de diseño térmico de una edificación; se llevó a cabo una simulación del comportamiento energético de una casa-habitación mediante el programa (software) Energy-10 versión 1.5 [Energy-10 Version 1.5 Guidelines Book].

La simulación permitió comparar el consumo energético de una edificación para dos condiciones diferentes: cuando dentro del proceso de diseño térmico se consideraron los datos de propiedades térmicas propuestos por la norma NOM-008-ENER-2001; y cuando se consideraron los datos experimentales obtenidos con en el presente trabajo.

El software Energy-10 realiza cálculos horarios del desempeño térmico y de iluminación de la edificación; basados en datos horarios de información climatológica de la localidad en cuestión, así como en la descripción física y características de operación de la edificación.

El software lleva a cabo una evaluación detallada de las ganancias térmicas solares a través de las ventanas, del flujo de calor en las paredes, de almacenamiento térmico en los materiales de construcción y del desempeño de los sistemas de aire acondicionado o calefacción que se consideren. Además, calcula el calor transferido en cada punto de la edificación cada 15 minutos a lo largo de un año simulado.

El análisis térmico se lleva a cabo mediante un modelo matemático de aproximación, por medio de una red térmica; y el análisis de los sistemas de acondicionamiento de aire corresponde a un estado cuasi-estable, en el cual considera tanto el calor sensible como el calor latente transferido.

Para la representación del flujo de calor a través de los elementos de la edificación por medio de la red térmica, la división de energía está balanceada exactamente en cada nodo de la red. Cada simulación está basada en la solución de ecuaciones diferenciales mediante el método del elemento finito.

Energy-10 no considera la dependencia angular de la transmitancia solar de los diferentes elementos semitransparentes que puedan constituir la envolvente de la edificación.

En un ejemplo de simulación, se consideró una edificación tipo departamento de interés social de una unidad del FOVISSSTE. Es un departamento con un área de 70 m², con techo de concreto y suelo de mosaico. La orientación es Norte a Sur, con cuatro ventanas en su cara Norte y cuatro en su cara Sur, las cuales utilizan una lámina de vidrio tipo cal-sosa de 3x10⁻³ m de espesor. El departamento se consideró habitado por 5 personas. Se contempló el uso de calefacción por resistencia eléctrica, así como también un equipo de aire acondicionado, a base de un ciclo de expansión directa.

Como se mencionó, la finalidad de realizar las simulaciones fue comparar los consumos energéticos de una edificación cuando en su diseño térmico se usan datos de propiedades térmicas recomendados por la norma mexicana, y cuando se usan los datos experimentales obtenidos. Por lo anterior, se realizó una comparación de este tipo en tres ejemplos: cuando las paredes son de ladrillo rojo, tepetate y adobe; en todas las simulaciones se consideró un techo de concreto, con las propiedades sugeridas en la norma mexicana contra las obtenidas para el concreto en nuestro trabajo.

Además, al considerar los datos térmicos de materiales de construcción obtenidos en el presente trabajo, se realizó una simulación para evaluar los ahorros energéticos en una edificación con las características descritas anteriormente, por el uso como ventanas de los filtros solares desarrollados.

Dicha simulación se llevó a cabo para dos diferentes localidades: Ciudad de México y Mexicali, B.C; se aceptó que el departamento tiene paredes de ladrillo rojo y losa de concreto.

5.2. Resultados de las simulaciones

Las Figuras 41, 42 y 43 muestran los resultados para las simulaciones realizadas sobre el comportamiento energético de una edificación situada en la Ciudad de México, cuando esta es construida con paredes de ladrillo rojo, tepetate y adobe respectivamente; se muestran los consumos energéticos de dicha edificación cuando en el proceso de simulación se consideran dos diferentes condiciones: si se usan los valores de propiedades térmicas y de transferencia de calor para los materiales de construcción sugeridos por la norma mexicana NOM-008-ENER-2001, y si se emplean los valores de las mismas propiedades obtenidos experimentalmente. Se considera un techo de concreto con las propiedades térmicas tanto experimentales como sugeridas por la norma para cada condición. Las mismas simulaciones se llevaron a cabo para otras dos localidades: Chihuahua, Chi. y Mexicali B.C.

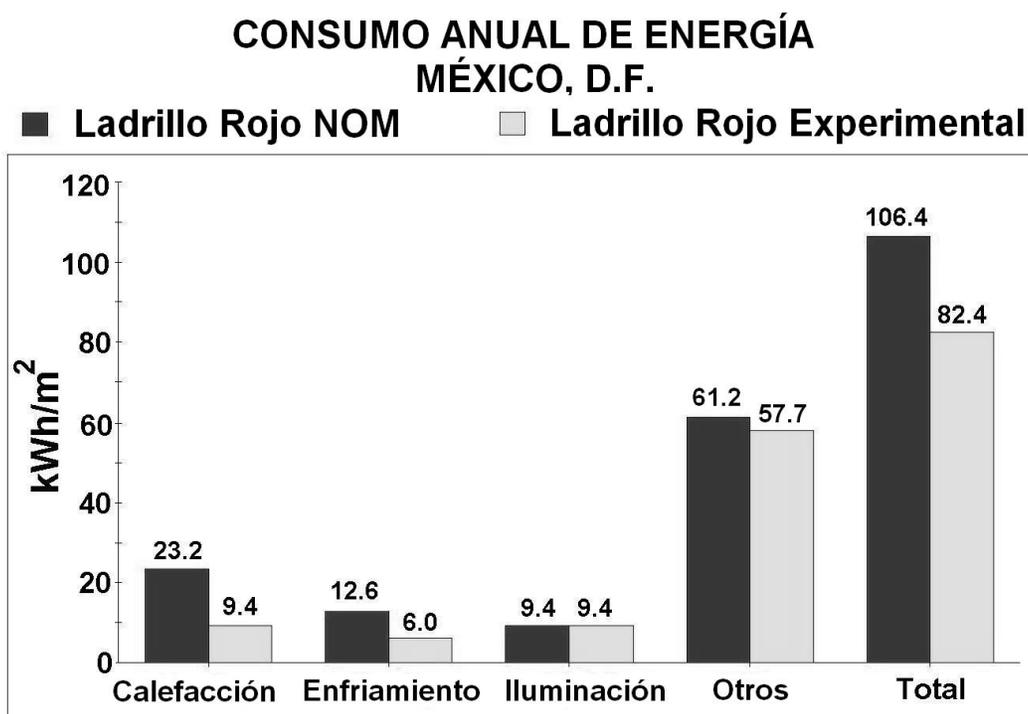


Figura 41. Consumo energético, obtenido con el programa E-10, para un departamento en la Cd. de México con paredes de ladrillo rojo, si se usan valores de propiedades térmicas sugeridos por la NOM-008-ENER-2001 y si se usan valores experimentales obtenidos de este trabajo.

CONSUMO ANUAL DE ENERGÍA MÉXICO, D.F.

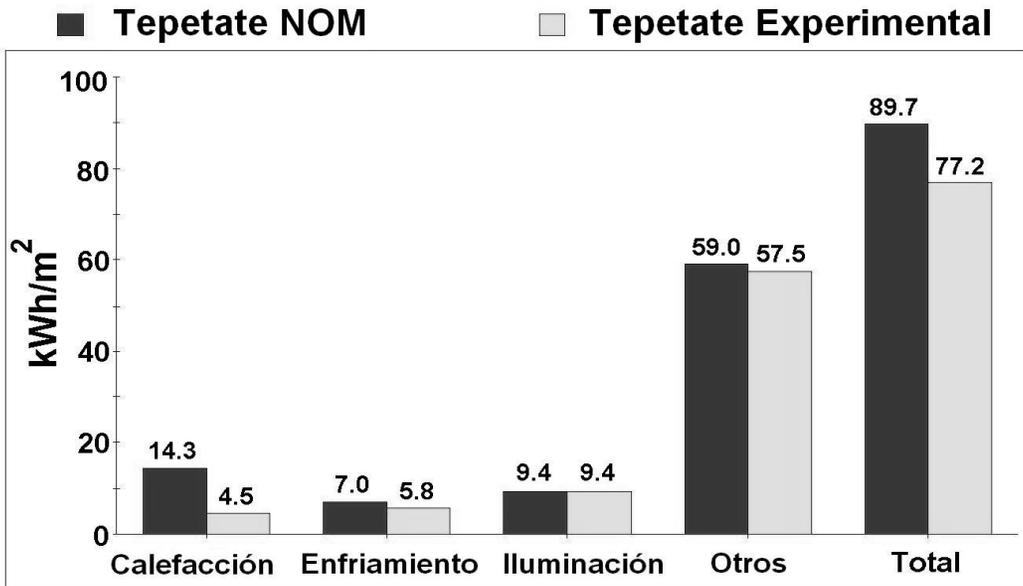


Figura 42. Consumo energético, obtenido con el programa E-10, para un departamento en la Cd. de México con paredes de tepetate, si se usan valores de propiedades térmicas sugeridos por la NOM-008-ENER-2001 y si se usan valores experimentales obtenidos de este trabajo.

CONSUMO ANUAL DE ENERGÍA MÉXICO, D.F.

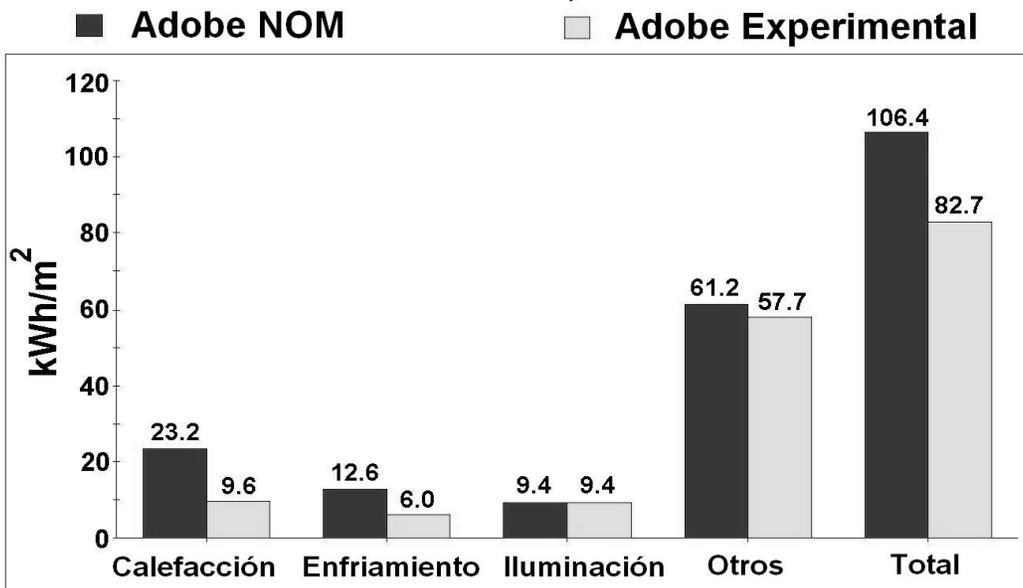


Figura 43. Consumo energético, obtenido con el programa E-10, para un departamento en la Cd. de México con paredes de adobe, si se usan valores de propiedades térmicas sugeridos por la NOM-008-ENER-2001 y si se usan valores experimentales obtenidos de este trabajo.

En la Tabla 25 se observan las diferencias porcentuales en el consumo energético según simulaciones con el programa Energy-10, al usar datos térmicos experimentales vs datos térmicos sugeridos por la norma NOM-008-ENER-2001, para paredes de ladrillo rojo y tepetate, cuando la edificación está construida en tres diferentes localidades: Ciudad de México, Chihuahua y Mexicali. Dichas diferencias porcentuales se obtuvieron de restar los consumos energéticos de los dos escenarios considerados y luego dividir el resultado entre el consumo energético para cuando se usan los valores de propiedades sugeridos por la norma mexicana. Como puede observarse, las diferencias porcentuales son positivas, es decir, cuando se usan los datos de propiedades térmicas sugeridos por la norma para el cálculo del consumo energético de la edificación, los resultados están sobredimensionados con respecto a las soluciones cuando se usan los valores experimentales obtenidos en el presente trabajo. Las diferencias porcentuales se hacen mayores o menores para una misma ciudad, en virtud de que para algunos materiales los valores de conductividad y de coeficiente de convección varían más con respecto a lo propuesto por la norma mexicana. Puede verse que el error en el diseño de térmico de una edificación, para los ejemplos analizados, aumenta cuando las condiciones climáticas del lugar son principalmente de tipo templado, mientras que decrece dicho error cuando el análisis se realiza para edificaciones localizadas en lugares con climas más extremos (calurosos durante el día y fríos por la noche). Es prudente señalar aquí que las diferencias porcentuales en el consumo energético anual de una edificación obtenido a partir de datos térmicos experimentales y cuando son considerados los recomendados por la norma vigente, no son de ninguna manera despreciables; de hecho para la simulación más conservadora se tendría una variación del 10%, bastante si se considera que muchas de las medidas mas comunes de ahorro de energía en una edificación rondan esa misma cantidad e impacto sobre el consumo; se ratifica aquí la importancia de contar con datos más apegados a la realidad durante el proceso de diseño térmico de cualquier edificación.

Tabla 25. Diferencia porcentual en el consumo energético según simulaciones en E-10, al usar datos experimentales vs datos de la norma NOM-008-ENER-2001 para diferentes localidades.

Localidad	Ladrillo Rojo	Tepetate	Adobe
Ciudad de México	22.5	13.9	23.1
Chihuahua, Chi.	10.3	14.2	12.8
Mexicali, B.C.	9.9	11.0	9.8

Adicionalmente, se llevó a cabo una simulación con el mismo tipo de departamento que el de las simulaciones anteriores, con paredes de ladrillo rojo y losa de concreto, para los cuales fueron usados los valores de propiedades térmicas obtenidos en este trabajo. En la simulación se consideraron dos alternativas: a) en las ventanas del departamento se usan vidrios cal-sosa de 3 mm de espesor y b) se usan los filtros solares con base en hierro desarrollados. Dicha simulación se llevó a cabo para dos diferentes localidades, la Ciudad

de México y Mexicali B.C. con los resultados que muestran las gráficas de las Figuras 44 y 45 respectivamente.

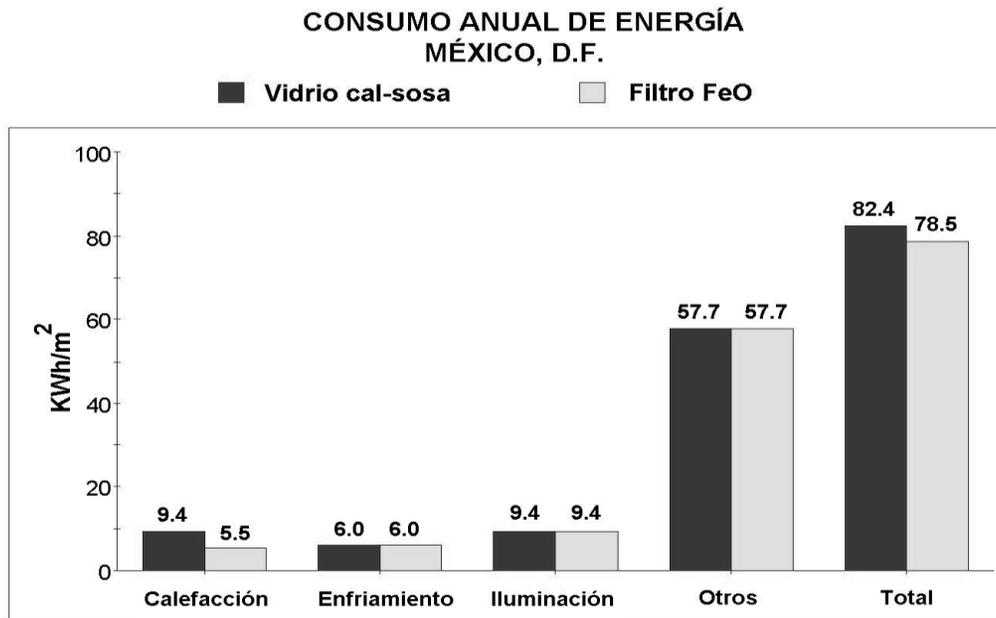


Figura 44. Consumo anual de energía para un departamento en la Ciudad de México, obtenido por medio del programa ENERGY-10.

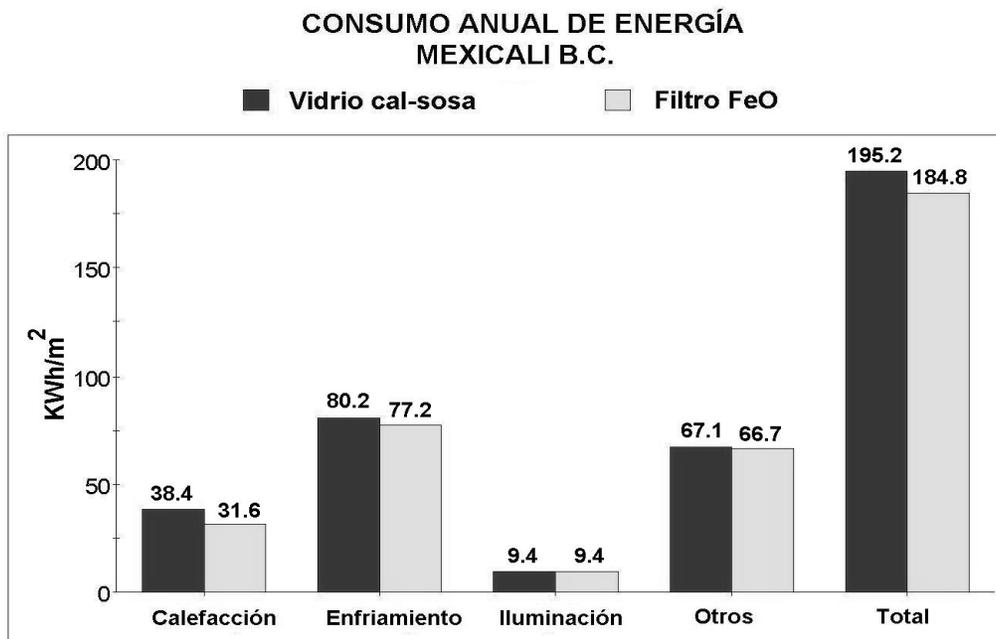


Figura 45. Consumo anual de energía para un departamento en la ciudad de Mexicali, B.C., obtenido por medio del programa ENERGY-10.

Como se aprecia, se presentan ahorros en el consumo de energía del departamento planteado para ambas localidades, del orden de 4.7% para la Ciudad de México y de 5.3% para Mexicali B.C., es decir, los filtros solares con base en hierro desarrollados funcionan ligeramente mejor en aquellos lugares en donde el clima es caluroso extremo (Mexicali) que en lugares con clima templado (Cd. de México).

Para finalizar y con la finalidad de presentar mayor información referente a los resultados comparativos, se incluyen en la Tabla 26 datos de temperatura promedio anual, máxima y mínima extrema, humedad relativa promedio anual y radiación solar global diaria promedio anual para las localidades evaluadas [Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1976].

Tabla 26. Datos de clima y radiación para tres diferentes localidades en México, seleccionadas para este estudio.

Localidad	Longitud (W) (grados)	Latitud (N) (grados)	Temperatura (°C)			Humedad relativa promedio anual (%)	Radiación solar global diaria promedio durante un año (MJ/m ²)
			Promedio anual	Máxima extrema	Mínima extrema		
Ciudad de México	99.16	19.2	15.6	33.5	0.5	58.9	17.7
Chihuahua, Chi.	106.06	28.6	18.4	47.0	-12.8	45.0	21.3
Mexicali, B.C.	115.45	32.6	22.3	49.6	-7.0	38.2	19.8

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

Con base en los resultados obtenidos de los experimentos desarrollados a lo largo del presente trabajo, se mencionan las siguientes conclusiones:

1. Se generó información relativa a propiedades físicas de varios de los más importantes materiales de construcción nacionales: ladrillo rojo, tepetate, adobe, tabicón y concreto. Dicha información es importante en virtud de su indisponibilidad en la bibliografía nacional e internacional. Las propiedades evaluadas fueron: densidad, calor específico y difusividad térmica.
2. Se genera, además, información más apegada a la realidad nacional sobre conductividad térmica del ladrillo rojo, tepetate, adobe, tabicón y concreto.
3. La metodología alterna desarrollada por Kondratyev resultó una técnica confiable para la estimación de conductividad térmica, además de sus ventajas sobre los métodos tradicionales, tales como la eliminación de pérdidas de humedad en las muestras, breves periodos de duración de las pruebas y el equipo utilizado.
4. Los valores obtenidos experimentalmente para los coeficientes de transferencia de calor por convección ($14-71 \text{ W/m}^2\text{°C}$) contrastan con aquellos propuestos por la norma mexicana NOM-008-ENER-2001 para el diseño térmico de la envolvente de edificaciones para uso no residencial ($6-13 \text{ W/m}^2\text{°C}$). En el ámbito internacional solo aparecen publicados coeficientes de convección para un intervalo de velocidades de viento de $2-5 \text{ m/s}$, los cuales se asemejan a nuestros resultados para dicho intervalo, con la ventaja de que en el presente trabajo se generaron valores de coeficientes de convección para un intervalo más amplio de velocidades de viento ($2-10 \text{ m/s}$).
5. Para la estimación de coeficientes de convección de materiales de construcción, resultó importante considerar el contenido de humedad de los muros de prueba, debido a que este influye de manera determinante en las lecturas de temperatura del aire que se encuentra cerca de la superficie de los muros y, por lo tanto, distorsiona los perfiles de temperatura medidos. Ya que no se puede determinar correctamente el espesor de la capa límite térmica, la estimación de los coeficientes de convección a partir de ella no es posible.
6. De los resultados de las simulaciones se infiere que para los ejemplos examinados, el consumo de energía proyectado para una edificación, durante el proceso de su diseño térmico, está sobredimensionado, cuando se usan valores de propiedades de materiales de construcción propuestos por la norma vigente, en comparación con el uso de los datos experimentales obtenidos en el presente trabajo. Dicha situación genera un error en el diseño de la edificación, con los consecuentes impactos económicos y ambientales.
7. Las películas delgadas con base en FeO depositadas sobre los sustratos de vidrio callosa, poseen propiedades selectivas a la radiación, lo cual permite afirmar que actúan como filtros solares. Tienen una transmitancia en el infrarrojo cercano de 39.9% y en

el intervalo visible de la radiación de 30.2%, su reflectancia es de 19% y 17.5% en los intervalos infrarrojo cercano y visible respectivamente, mientras que absorberán 48.5% de la radiación solar.

8. Cuando los filtros solares con base en FeO son utilizados en las ventanas de casas habitación, según la simulación realizada con el programa Energy-10, éstos permiten ahorros de energía, principalmente por concepto de acondicionamiento de aire (calefacción y enfriamiento).
9. Se recomienda realizar la medición de conductividades térmicas de otros materiales de construcción nacionales, con el fin de iniciar la elaboración de un manual para el diseño térmico de edificaciones con datos experimentales confiables y así complementar las normas referentes a dicha materia, que se encuentran vigentes y en proceso de elaboración.
10. Sería oportuno llevar a cabo estimaciones de coeficientes de convección para diferentes tipos de muros, con diferentes acabados, ángulos de incidencia del viento, geometrías, etc. Además, debido a que en la mayoría de las localidades del país, durante gran parte del año, difícilmente se registran vientos con velocidades mayores a 5 m/s, se recomienda realizar dichas estimaciones para un intervalo de velocidades de viento más pequeño; sin embargo tendrá que ser un estudio más detallado en cuanto a los valores de velocidad del viento que se tomen. Se propone un intervalo de velocidades de viento de 0.5 a 5 m/s, con mediciones de coeficientes de convección cada vez que se aumente la velocidad en 0.5 m/s (0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5,... m/s).
11. Se recomienda, como un trabajo inmediato posterior, el análisis teórico de la transferencia de calor y masa desde los muros hacia la corriente de aire que fluye con el fin de poder utilizar los perfiles de temperatura como una herramienta en el cálculo de los coeficientes de convección.
12. Por último, sería de provecho llevar a cabo un análisis de la convección de calor en estado transitorio, para los muros estudiados.

REFERENCIAS

- Almanza R., Martínez A. y Segura G., (1989). Study of a kaolinite clay as a liner for solar ponds, *Solar Energy*, Vol. 42, No. 5, pp. 395-403.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, (2001). *Fundamentals Handbook*, E.U.A.
- Athienitis A.K. y Santamouris M., (2002). *Thermal Analysis and Design of Passive Solar Buildings*, James & James (Science Publishers) Ltd, London, U.K.
- Baird D.C., (1995). *Experimentation: An Introduction to Measurement Theory and Experiment Design*, Third Edition, Prentice Hall, New York.
- Beausoleil-Morrison I, (2001). An Algorithm for calculating convection coefficients for internal building for the case of mixed flow in rooms, *Energy and Buildings*, 33, pp. 351-361.
- Bejan A., (2004). *Convection Heat Transfer*, Third Edition, John Wiley & Sons Inc., U.S.A.
- Benson H., (1996). *Física Universitaria Volumen 1*, Primera edición, C.E.C.S.A., México.
- Chaddock J.B. y Todorovic B. (editores), (1991). *Heat and Mass Transfer in Building Materials and Structures*, Hemisphere Publishing Corporation, E.U.A.
- Clear R.D., Gartland L. y Winkelmann F.C., (2003). An empirical correlation for the outside convective air film coefficient for horizontal roofs, *Energy and Buildings*, 35, pp. 797-811.
- Corral M., Gallegos R. y Luna A., (2004). Monitoreo experimental de sistemas constructivos para muros más usuales en la vivienda de regiones de clima cálido, *Memorias de la XXVIII Semana Nacional de Energía Solar*, ANES, Oaxaca, Oax.
- Correa G., (2002). *Fabricación de filtros solares para ahorro de energía con recubrimientos de Cu₂O-CuS y VO₂*, Tesis de Doctorado, Fac. de Ingeniería. UNAM.
- Davies M., Martin C., Watson M. y Riain C.N., (2005). The development of an accurate tool to determine convective heat transfer coefficients in real buildings, *Energy and Buildings*, 37, pp. 141-145.
- D'Hainaut L. (1978). *Cálculo de incertidumbres en las medidas*, Ed. Trillas, Primera edición en español, México.
- Diario Oficial de la Federación, (2001). Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales, 25 de abril, Segunda Sección.
- Eckert E.R.G. y Goldstein R.J., (1976). *Measurements in Heat Transfer*, Hemisphere Publishing Corporation, E.U.A.
- Ernani Sartori, (2006). Convection coefficient equations for forced air flow over flat surfaces, *Solar Energy*, Vol. 80, No. 9, pp. 1063-1071.

- Hagishima A. y Tanimoto J., (2003). Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces, *Building and Environment*, 38, pp. 873-881.
- Holman J.P., (1998). *Transferencia de Calor*, C.E.C.S.A., Primera Edición, México.
- Kiyotaka W. y Hayakawa S. (editores), (1992). *Handbook of Sputter Deposition Technology: principles, technology and applications*, Noyes Publications, New Jersey, E.U.A.
- Mijeev M.A. y Mijeeva I.M., (1979). *Fundamentos de Termo-Transferencia*, Editorial MIR, Moscú.
- Nair M.T.S. y Nair P.K., (1991). SnS-Cu_xS thin film combination: a desirable solar control coating for architectural and automobile glazings, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 24, pp. 450-453.
- Nair M.T.S., Guerrero L., Arenas O.L. y Nair P.K., (1999). Chemically deposited copper oxide thin films: structural, optical and electrical characteristics, *Applied Surface Sciences*, Vol. 150, pp. 143.
- Nashchokin V.V., (1979). *Engineering Thermodynamics and Heat Transfer*, MIR Publishers, Moscow.
- Nekrasov B., (1969). *Textbook of General Chemistry*, Cap. 4 y 14, MIR Publishers, Moscow.
- Özer N. y Tepehan F., (1999). Optical and electrochemical characteristics of sol-gel deposited iron oxide films, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 56, pp. 141-152.
- Pulker H.K., (1984). *Coatings on Glass, Thin Films Science and Technology*, Vol. 6, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Real Decreto 2.429/79, (1979). *Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79, Condiciones Térmicas de los Edificios*, Madrid, España.
- Richardson T.J., Slack J.L. y Rubin M.D., (2001). Electrochromism in copper oxide thin films, *Electrochimica Acta*, Vol. 46, pp. 2281-2284.
- Rubin M., Rottkay V. y Powles R., (1998). Window optics, *Solar Energy*, Vol. 62, No. 3, pp. 149-161.
- Ruzakowski A.P., Tabet M.F. y Urban III F.K., (1997). *Journal of Vacuum Science and Technology A*, Vol. 15, No.3, pp. 998-1006.
- Salmang H., (1962). *Fundamentos Fisico-Químicos de la Fabricación del Vidrio*, Editorial Aguilar, Madrid.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos, (1976). *Atlas del Agua de la República Mexicana*, Gobierno de la República, México.
- Sharples S. and Charlesworth P.S., (1998). Full-scale measurements of wind-induced convective heat transfer from a roof-mounted flat plate solar collector, *Solar Energy*, 62 (2), pp. 69-77.
- Soloukhin R.I. y Afgan N.H. (editores), (1985). *Measurement Techniques in Heat and Mass Transfer*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington D.C.

Stephen M.R., Cuomo J.J. y Westwood W.D. (editores), (1990). Handbook of Plasma Processing Technology. Fundamentals, etching, deposition and surface interactions, Noyes Publications, New Jersey, E.U.A.

Taylor J.R., (1997). An Introduction to Error Analysis, Second Edition, University Science Books, Sausalito, CA, E.U.A.

Tesmer J.R. y Nastasi M. (editores), (1995). Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis, MRS, Pittsburgh, E.U.A.

Yoshii S., Ishii O., Hattori S., Ishida G. y Nakagawa T., (1982). Journal of Applied Physics, Vol. 53, No. 3, pp. 2556-2560.

Direcciones de internet

<http://www.energia.gob.mx/wb2/SenerNva/iiBneAeip>

Programas

Energy-10 Version 1.5 Guidelines Book, Designing Low-Energy Buildings, Release June 2002, National Renewable Energy Laboratory, Lawrence Berkeley National Laboratory, Sustainable Buildings Industry Council, Berkeley Solar Group, US Department of Energy.