



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



"Estudio experimental para la determinación de coeficientes de difusión de calor y masa en muros de vivienda"

TESIS

para obtener el grado de

Maestro en Ciencias en Ingeniería

Presenta:

Ing. Francisco David Ruiz Priego

Director:

Dra. Karla María Aguilar Castro

Cunduacán, Tabasco, México.

Diciembre de 2017



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura

DIRECCIÓN

OFICIO DAIA/DIR/2753/2017
FECHA: 04 de Diciembre 2017
ASUNTO: Autorización de impresión definitiva

C. ING. FRANCISCO DAVID RUIZ PRIEGO

PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
PRESENTE.

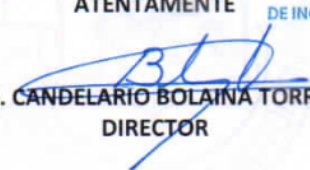
En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis, para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería en el cual ha sido la Dra. Karla María Aguilar Castro Directora de Tesis denominado:

"ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE CALOR Y MASA EN MUROS DE VIVIENDA"

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE


DR. CANDELARIO BOLAINA TORRES
DIRECTOR

UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



C.c.p. Archivo

DR'CBT/Dr.JBF/apl***



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura**

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Cunduacán, Tabasco, a 01 de Diciembre de 2017

MEM/MCI/022/2017

PARA: DR. CANDELARIO BOLAINA TORRES
DIRECTOR DE LA DAIA
DE: COMISIÓN SINODAL
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN TESIS DE MAESTRIA

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

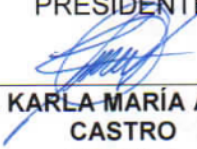
**"ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES
DE DIFUSIÓN DE CALOR Y MASA EN MUROS DE VIVIENDA"**

Desarrollado por el C. **ING. FRANCISCO DAVID RUIZ PRIEGO** de la **Maestría en Ciencias en Ingeniería**, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN SINODAL


**DR. JOSÉ GUADALUPE FABIÁN
RIVERA TREJO**
PRESIDENTE


DR. EDGAR VICENTE MACÍAS MELO
SECRETARIO


**DRA. KARLA MARÍA AGUILAR
CASTRO**
VOCAL 1


DRA. EBELIA DEL ÁNGEL MERAZ
VOCAL 2


**DR. IVÁN ALEJANDRO HERNÁNDEZ
PÉREZ**
VOCAL 3

c.c.p. Archivo

CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente la tesis de grado denominada "**Estudio experimental para la determinación de coeficientes de difusión de calor y masa en muros de vivienda**", de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Cunduacán, Tabasco, a los 06 días del mes de diciembre del año 2017.

AUTORIZO

ING. FRANCISCO DAVID RUIZ PRIEGO

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo recibido para el desarrollo de este trabajo de tesis.

A la División Académica de Ingeniería y Arquitectura Unidad Chontalpa de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por la oportunidad de realizar mis estudios de formación profesional y por las facilidades para el desarrollo de este trabajo de tesis.

A todos los miembros de mi comité revisor, Dr. José G. Fabián Rivera Trejo, Dr. Edgar Vicente Macías Melo, Dra. Ebelia del Ángel Meraz, Dr. Iván Alejandro Hernández Pérez y Dra. Karla María Aguilar Castro por todos los comentarios, correcciones y sugerencias que sin duda ayudaron a enriquecer este trabajo de tesis.

A mis amigos del Posgrado en Maestría en Ciencias de la Ingeniería y a los chicos del taller de Forja y soldadura, por todo su apoyo brindado en estos dos años de trabajo.

¡Gracias!

DEDICATORIAS

En primer lugar a Dios por la oportunidad de estar aquí y ahora.

A mis padres y hermana por todo el amor y apoyo brindado.

A mi abue por todo lo que compartimos.

A la familia por todos los ánimos y consejos dados.

A mis amigos por motivarme a superarme.

¡Gracias!

Resumen

La transferencia de calor es un proceso físico existente debido a la diferencia de temperaturas en un cuerpo, que se ve afectada por la presencia en el mismo cuerpo de transferencia de masa. Los edificios y sus componentes como muros, techos y ventanas se ven expuestos a los mecanismos de transporte de calor al presentar un gradiente de temperatura entre el interior del mismo y el exterior. En este estudio, la transferencia de calor se analizó bajo parámetros de laboratorio en régimen de estado estable, en el cual, se consideró la incidencia de migración de masa. Para ello, se construyó, instrumentó y calibró una Cámara de Ambiente Controlado (CAC) para someter la muestra de estudio a condiciones de laboratorio controladas y obtener resultados válidos en experimentos bajo condiciones de estado estable. La muestra de estudio fue un muro de mampostería de $1.10 \text{ m} \times 1.10 \text{ m}$ y 8.5 cm de espesor. Las pruebas se realizaron bajo condiciones climáticas controladas, estableciendo un potencial de calor y masa dentro del ambiente. Como resultados, se obtuvo un valor máximo de U y CM para la muestra de muro de $4.29 \text{ W/m}^2\text{°C}$ y $0.1181 \text{ g/sm}^2\%\text{HR}$. El resultado de U se encuentra dentro de lo obtenido de forma teórica para una muestra con propiedades similares, mientras que el valor de CM no ha podido compararse debido a que no se han reportado valores para una muestra similar. El valor obtenido del CM de la muestra de muro indica que en 1 hora podría tenerse una infiltración de hasta 425.16 g de agua, lo cual, con el paso del tiempo podría saturar el aire interior de una habitación ocasionando problemas de salud por el crecimiento de hongos y moho, contribuyendo al dis-confort higrotérmico. Por lo cual, se ve la importancia de continuar en el estudio de la transferencia de calor y masa, con el fin de encontrar configuraciones de materiales que permitan reducir estos coeficientes, lo cual podría realizarse entre otras posibilidades, adicionando al muro capas de otros materiales que mejoren su desempeño higrotérmico.

ABSTRACT

Heat transfer is an existing physical process due to the temperature difference in a body, which is affected by the presence of mass transfer in the same body. Building components such as walls, roofs and windows are exposed to the mechanisms of heat transfer because they present a temperature gradient between the interior and the outdoors. In this study, heat transfer of a building wall was analyzed in a steady state under laboratory conditions, in which the incidence of mass migration was considered. For this, a Controlled Environment Chamber (CEC) was constructed, instrumented and calibrated to subject the study sample to controlled laboratory conditions and to obtain valid results in experiments under steady state conditions. The study sample was a masonry wall of $1.10\text{ m} \times 1.10\text{ m}$ and 8.5 cm thick. The tests were conducted under controlled climatic conditions, establishing a potential of heat and mass in the indoor environment. As results, maximum values for U and CM of $4.29\text{ W/m}^2\text{°C}$ and $0.1181\text{ g/sm}^2\%\text{HR}$ were obtained for the wall sample. The result of U is within the theoretically obtained value for a sample with similar properties, while the CM value could not be compared because no values for a similar sample have been reported. The CM of the wall sample indicates that in 1 hour an infiltration of up to 425.16 g of water could be achieved, which, over time could saturate the indoor air of a room causing health problems due to the growth of fungi and mold, contributing to hygrothermal dis-comfort. Therefore, it is important to continue studying heat and mass transfer through building walls, in order to find material configurations that can reduce these coefficients, which could be done among other possibilities, adding to the wall layers of other materials that improve their hygrometer performance.

Índice

	Pág.
Lista de Figuras.	iii
Lista de Tablas.	v
Nomenclatura.	vi
CAPÍTULO 1. Introducción	
1.1. Generalidades.....	2
1.2. Confort en edificios.....	7
1.3. Propiedades térmicas y de difusión de masa.....	9
1.4. Objetivo general.....	11
1.4.1. Objetivos específicos.....	12
1.5. Alcance.....	13
1.6. Estructura de la tesis.....	13
1.7 Referencias bibliográficas.....	14
CAPÍTULO 2. Fundamentos Teóricos y Metodología	
2.1. Transferencia de calor.....	18
2.1.1. Conducción.....	19
2.1.2. Convección.....	20
2.1.3. Radiación.....	22
2.1.4. Transferencia de calor total a través de un muro.....	23
2.1.5. Conductividad térmica.....	25
2.1.6. Resistencia térmica.....	26
2.1.7. Coeficiente global de transferencia de calor.....	26
2.2. Transferencia de masa.....	27
2.2.1. Analogía entre la transferencia de calor y de masa.....	29
2.3. Normatividad empleada en la implementación de la CAC.....	32
2.4. Modelo físico.....	35
2.5. Modelo matemático.....	36
2.5.1. Transferencia de calor.....	36
2.5.2. Transferencia de masa.....	37
2.5.3. Transferencia de calor y de masa en conjunto.....	38
2.6. Referencias bibliográficas.....	39

CAPÍTULO 3. Construcción e instrumentación

3.1 Diseño y construcción de la CAC.....	41
3.1.1 Envolvente de las cámaras.....	42
3.1.2 Ubicación de los dispositivos e instrumentos.....	46
3.1.3 Placas con resistencia eléctrica.....	50
3.1.4 CAC construida e instrumentada.....	52
3.2 Construcción de una muestra de mampostería.....	54
3.2.1 Base de soporte y marco de soporte y aislante.....	54
3.2.2 Construcción de la muestra.....	56
3.3 Procedimiento experimental.....	57

CAPÍTULO 4. Resultados y Discusión

4.1 Calibración.....	62
4.2 Resultados en muestra de mampostería.....	64
4.2.1 Prueba de transferencia de calor.....	65
4.2.2 Prueba de transferencia de masa sin transferencia de calor.....	67
4.2.3 Prueba de transferencia de calor y de masa en conjunto.....	68
4.3 Referencias bibliográficas.....	70

CAPÍTULO 5. Conclusiones.....	71
--------------------------------------	-----------

Lista de Figuras

Figura	Descripción	Pág.
2.1.	Esquema de transferencia de calor por conducción.	20
2.2.	Esquema de transferencia de calor por convección.	21
2.3.	Esquema de transferencia de calor por radiación.	22
2.4.	Esquema de transferencia de calor en muro simple.	23
2.5.	Esquema de difusión de masa.	30
2.6.	Esquema de hot box de acuerdo a las recomendaciones ASTM.	32
2.7.	Modelo físico con condiciones de frontera.	35
3.1.	Diseño propuesto de la CAC, incluyendo muestra.	42
3.2.	Placas de aluminio ensambladas y placas de aislante colocadas.	43
3.3.	Proceso de elaboración de los transductores de flujo de calor, (a) discretización de la placa, (b) implementación de termopilas, (c) elaboración del termopar y (d) soldadura.	44
3.4.	Placas de acrílico instrumentadas con transductores de flujo de calor.	45
3.5.	Muestra, envoltorio de acrílico y envoltorio de poliestireno extruido y aluminio.	46
3.6.	Ubicación de los dispositivos dentro de la Cámara 1, (a) diseño y (b) fotografía al interior de la cámara.	47
3.7.	Ubicación de los dispositivos en la Cámara 2, (a) diseño y (b) fotografía del interior de la cámara.	48
3.8.	Placa deflectora implementada en ambas cámaras, (a) diseño y (b) fotografía.	49
3.9.	(a) Multímetro y cable de constantán para determinar resistividad y (b) fuente de corriente directa.	51
3.10.	Placas con resistencia con cableado colocado.	51
3.11.	Fotografía infrarroja de una placa de resistencia.	52

3.12.	Esquema de CAC durante una prueba experimental.	53
3.13.	Marco del porta muestra con el muro.	55
3.14.	Muestra de muro de mampostería, (a) base de acero con capa de mortero para colocar mamposterías y (b) muestra de muro.	56
3.15.	Configuración de programa Agilent.	58
3.16.	Diagrama general para la realización de las pruebas experimentales, para determinar U, CM y U-CM en conjunto.	60
4.1.	Flujos de calor por las paredes de la Cámara 1 y flujo de calor a través de la muestra.	62
4.2.	Comportamiento del flujo de calor de referencia contra flujo de calor ajustado.	63
4.3.	Coeficiente global de transferencia de calor de muestra de referencia.	64
4.4.	Temperaturas en las cámaras para la prueba del muro.	65
4.5.	Diferencias de temperatura para el flujo de calor por la muestra.	66

Lista de Tablas

Tabla	Descripción	Pág.
3.1.	Materiales de la envolvente de aislamiento.	43
3.2.	Resumen del número de termopilas en la CAC.	45
3.3.	Resumen de la configuración de canales de medición.	57
3.4.	Aspectos a considerar para la realización de las pruebas experimentales.	59
4.1.	Pruebas de transferencia de calor sin transferencia de masa	66
4.2.	Pruebas experimentales de transferencia de masa.	67
4.3.	Resultados de transferencia de masa reduciendo la transferencia de calor.	67
4.4.	Pruebas experimentales de calor y masa en conjunto.	68
4.5.	Pruebas de transferencia combinada.	69

NOMENCLATURA

Variables	Descripción	Unidades
A	Área de la muestra	m^2
CM	Coeficiente global de transferencia de masa	$g/sm^2 \%HR$
D	Coeficiente de difusión de masa	m^2/h
DT	Diferencia de temperatura	$^{\circ}C$
DHR	Diferencia de humedad relativa	$\%$
EI	Cambio de Temperatura en el tiempo	$^{\circ}C$
H_r	Humedad relativa	$\%$
h_v	Entalpía de evaporación	kJ/kg
h	Coeficiente convectivo de transferencia de calor	$W/m^2^{\circ}C$
k_m	Coeficiente convectivo de transferencia de masa	$g/sm^2 \%HR$
L	Espesor de la muestra	m
$\dot{m}$	Flujo de masa (humedad)	kg/s
q	Flujo de calor	W
q''	Flujo de calor por unidad de área	W/m^2
r	Calor latente de evaporación	kJ/kg
R	Resistencia térmica	$m^2^{\circ}C/ W$
t	Tiempo	s
T	Temperatura	$^{\circ}C$
U	Coeficiente global de transferencia de calor	$W/m^2^{\circ}C$
ΔHR	Gradiente de humedad relativa	$\%HR$
ΔT	Gradiente de temperatura	$^{\circ}C$
Δt	Intervalo de tiempo	s

Símbolo

λ	Conductividad térmica	W/m°C
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W/m ² K ⁴
ρ	Densidad	kg/m ³
ε	Emisividad térmica	Adimensional

Subíndice

<i>amb</i>	Ambiente exterior
<i>C</i>	Calibrado
<i>C₁</i>	Flujo de calor total Cámara 1
<i>C₂</i>	Flujo de calor total Cámara 2
<i>d</i>	Deshumidificado
<i>ext</i>	Exterior
<i>M</i>	Muestra
<i>MR</i>	Muestra de referencia
<i>n</i>	Pared instrumentada n
<i>R</i>	Resistencia
<i>ref</i>	Muestra de referencia
<i>V</i>	Ventilador
<i>A</i>	Pared superior
<i>B</i>	Pared inferior
<i>D</i>	Pared de lado derecho
<i>I</i>	Pared de lado izquierdo
<i>int</i>	Interior
<i>F</i>	Pared del fondo

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presentan los antecedentes y la revisión bibliográfica del marco referencial del estudio de la transferencia de calor y masa, así como los objetivos, los alcances del trabajo y una descripción general de la estructura de la tesis.

1.1 Generalidades

Durante los últimos años, el uso de materiales en la construcción de edificaciones y recintos con el propósito de adecuar el ambiente a las necesidades diversificando los diseños, ha desencadenado la búsqueda y el estudio de nuevos materiales. Sin embargo, las propiedades de los materiales deben ser óptimas para las aplicaciones, reduciendo costos en materia prima y en consumo de energía eléctrica ya que de acuerdo al informe de las Naciones Unidas para el año 2035, la demanda de energía eléctrica tendrá un incremento del 70% [1].

La mayoría de aparatos y dispositivos usados cotidianamente funcionan con energía eléctrica, desde dispositivos para el hogar hasta aplicaciones industriales. Uno de los sectores con el mayor consumo de energía eléctrica es el de la construcción, en el cual se estima aproximadamente un 40% del consumo mundial [2]. Sin embargo, para reducir el uso de estos sistemas es importante realizar una adecuada selección de materiales para mejorar el confort en el interior de edificaciones. Pero esto no solo se limita a mejorar condiciones de confort, sino también para generar ambientes adecuados de trabajo para equipos donde no es necesario la intervención humana.

El comportamiento frente a la humedad que presentan los materiales de construcción tiene un impacto directo en los edificios. Este efecto es más notorio en climas cálido húmedo, donde la humedad afecta la energética del edificio, la salubridad de sus espacios y la durabilidad e integridad de sus cerramientos. Por lo cual, para lograr condiciones adecuadas de confort en los espacios interiores definidos y delimitados por los cerramientos de los edificios, se requiere del

establecimiento de un adecuado equilibrio higroscópico en dichos espacios. En dicho equilibrio higroscópico, el comportamiento y las prestaciones higroscópicas de los materiales empleados en los cerramientos juegan un papel fundamental. Si bien para la mayoría de los materiales de construcción es habitual conocer sus propiedades térmicas, tradicionalmente la caracterización de sus propiedades higroscópicas y su comportamiento frente a la humedad ha sido menos investigada. Esto, entre otros aspectos, se debe a la diferencia entre el desarrollo de la teoría matemática que formula el flujo de calor frente al menor desarrollo de la formulación matemática de la teoría que explica el flujo de humedad en medios porosos, y a la dificultad de establecer métodos y técnicas de ensayo que permitan cuantificar los coeficientes de transporte difusivo y capilar de la humedad a través de la estructura porosa de los materiales de construcción.

Las propiedades de transporte de humedad influyen significativamente en la aplicación, la durabilidad, y en particular el comportamiento estructural de los materiales de construcción. Las investigaciones de este tipo de comportamiento o bien se realizan de manera experimental o mediante simulación numérica [3-9].

Las soluciones teóricas se resumen en analíticas y numéricas, donde de esta última podemos resaltar los métodos numéricos los cuales son útiles para resolver las ecuaciones de transferencia de calor y masa aplicadas en modelos físicos donde las no linealidades, geometrías complejas y condiciones de frontera complicadas no pueden ser manejadas mediante soluciones analíticas exactas [10]. Por lo que las soluciones numéricas se convierten en una poderosa herramienta para resolver las ecuaciones diferenciales parciales.

Entre las técnicas para obtener los coeficientes de calor y masa están las experimentales que emplean muestras representativas para la medición; en el caso de la difusión de calor se conoce la técnica de hilo caliente y técnica de pulso láser para conocer la conductividad térmica de los materiales [11]; para el caso de la difusión de masa se ha empleado la tomografía de rayos x para obtener imágenes 3D de muestras de cemento con agua para conocer el comportamiento de las muestras a partir del coeficiente de difusión de masa [12], y la solución de modelos teóricos propuestos.

El comportamiento de la difusión de humedad es importante en ambos casos y se puede derivar para los diferentes rangos de contenido de humedad de la difusión del vapor, de la absorción de agua, y de experimentos de secado. El experimento de absorción de agua proporciona información acerca de las propiedades de transporte del material para el agua líquida. El experimento de difusión de vapor proporciona información acerca de las propiedades de transporte de humedad del material en el rango de humedad higroscópica, principalmente comprende vapor de transporte. Mientras que el experimento de secado proporciona información acerca de las propiedades de transporte de líquido y vapor [7].

Por su parte, Scheffler y Plagge (2010) [7], presentan una introducción de las diferentes dependencias del proceso de secado, en la cual presentan y discuten los datos reportados sobre investigaciones experimentales y numéricas. Sobre esta base, definen un nuevo coeficiente de secado para materiales de construcción. Este coeficiente se discute en última instancia con respecto a su significado, así como su contenido de información adicional en comparación con

otros coeficientes de transporte de humedad. Carmeliet *et al.*, 2007 [13] presenta un modelo de difusividad de humedad paramétrica para describir la difusividad no lineal de materiales de construcción porosos, para esto se obtuvo una curva de secado y se midió la permeabilidad de vapor de la muestra para tres procesos de transporte de humedad: carga higroscópica, secado isotérmico y absorción por capilaridad. Los trabajos reportados indican que el estudio de la difusividad de humedad es un parámetro importante ya que es un coeficiente que se requiere para diversas aplicaciones, tanto como dato de entrada en simulaciones como para trabajos experimentales. Por lo cual, la determinación de este coeficiente como función de diferentes condiciones climáticas, como ocurre durante el proceso de secado o únicamente bajo condiciones de temperatura, velocidad de aire y humedad relativa cambiante, a las que se expone el material de construcción, lo hace flexible para ser empleado en diversas aplicaciones y cálculos.

El comportamiento de la difusión de humedad en los materiales de construcción es bastante complejo ya que como se ha mencionado ² depende de diferentes factores y condiciones, esta es la razón por la que aún no existe un solo número para el coeficiente de difusión de humedad que sea aplicable a cualquier condición.

Por lo que, es importante proponer una metodología para determinar un modelo empírico para la determinación del coeficiente de humedad para materiales de construcción ² bajo condiciones de clima cálido húmedo. Los coeficientes obtenidos podrían utilizarse para modelado en procesos de secado u otros procesos, o

simplemente como parámetros para la selección de materiales de construcción para su uso en viviendas y combatir la humedad en los edificios, buscando condiciones de confort y salud para sus ocupantes. Además, esta metodología podría ser aplicada bajo otras condiciones climáticas para obtener coeficientes de difusión de húmeda con mayor alcance. Para este propósito, como primera etapa, en este proyecto se desarrolló ² un dispositivo experimental de una Cámara de Ambiente Controlado (CAC) que permite determinar los coeficientes globales de transferencia de calor y masa bajo diferentes condiciones ambientales. La CAC fue calibrada utilizando una muestra de referencia y se evaluó una muestra de muro considerando cuatro diferentes condiciones ambientales: 1) transferencia de calor sin transferencia de masa, 2) transferencia de masa sin transferencia de calor, 3) transferencia de calor y transferencia de masa en el mismo sentido, y 4) transferencia de calor y transferencia de masa en sentidos opuestos.

1.2 Confort en edificios

Las propiedades térmicas y de difusión de masa de los materiales deben garantizar el confort higrotérmico al interior del edificio, lo cual depende de la temperatura y humedad relativa del aire. El confort higrotérmico, es el estado en el cual no se requiere la intervención de nuestro sistema termorregulador para que el cuerpo se sienta a como en una habitación, es decir, confort. En el caso de la temperatura del aire al interior de un ambiente en un edificio o infraestructura, se establece una temperatura entre 13°C y 27°C , dependiendo de la zona climática que rodee al edificio. Mientras que, en el caso de humedad relativa, esta deberá encontrarse entre valores del 20 al 40% [14].

Para lograr condiciones de confort, existen dos formas: métodos activos o métodos pasivos. Los métodos activos o de acondicionamiento de aire son procesos en el tratamiento del aire que controla el ambiente interior de un edificio, consisten en máquinas que regulan la temperatura del aire aumentándola o disminuyéndola, y controlan el porcentaje de humedad presente en el aire. Estos sistemas se llaman activos debido a que consumen energía eléctrica para proveer al ambiente de las características higrotérmicas deseadas. Los métodos activos de acondicionamiento pueden suponer hasta un consumo del 40% de la energía total de un país o territorio [1]. Las formas pasivas por otro lado, no requieren del uso de energéticos para garantizar el bienestar y confort de los ocupantes del edificio. Las formas pasivas dependen enteramente de la geometría y diseño del edificio y de las propiedades térmicas de los materiales utilizados para la construcción del mismo. Por lo cual, determinar las propiedades higrotérmicas de

los materiales de construcción de un edificio es fundamental para diseñar estructuras eficientes higrotérmicamente, por lo cual, esto supondrá un bajo consumo de energéticos para obtener los valores de confort necesarios [15].

Dependiendo del tipo de clima, los materiales de construcción pueden contribuir a la ganancia o pérdida de calor. En regiones de clima cálido húmedo como la zona del estado de Tabasco, es importante que los edificios minimicen las ganancias de calor. Las ganancias o pérdidas de calor ocurren a través de las diferentes formas de transferencia de calor, el cual es un fenómeno que se presenta de tres diferentes formas: radiación, conducción y convección. Los edificios se componen principalmente de superficies envolventes como techos, pisos y paredes, los cuales son conocidos como superficies de interfase y que interaccionan con alguna o varias de las formas de transferencias de calor citadas anteriormente. La transferencia de calor en dichas superficies se debe principalmente a las diversas magnitudes de las variables de propagación de calor, como por ejemplo temperatura exterior, humedad del aire y velocidad del aire; y a las propiedades térmicas de los materiales con los que se constituye la superficie, entre ellos: densidad, conductividad térmica y calor específico [16].

1.3 Propiedades térmicas y de difusión de masa

Los materiales de construcción cuentan con propiedades térmicas y de difusión de masa específica, sin embargo, cuando los materiales se combinan con otros materiales con propiedades diferentes, no es posible conocer las magnitudes de los materiales compuestos por diferentes materiales, por lo cual es necesario determinar experimentalmente dichas propiedades.

La zona del estado de Tabasco se caracteriza por tener un clima cálido húmedo, con valores extremos mínimos y máximos de 18.5°C y 37°C en promedio respectivamente, presentándose una humedad relativa superior al 60% [17]. Por lo cual, el estudio del comportamiento de los coeficientes de difusión de calor y masa de los materiales de construcción es de interés, con el fin de obtener los valores más representativos que caractericen los inmuebles construidos en la región. El conocer dichos valores es importante para realizar un diseño adecuado de los inmuebles que se desarrollan para satisfacer las necesidades de la población, y garantizar el confort higrotérmico reduciendo el uso de sistemas activos de acondicionamiento de ambientes interiores. Entre los factores que debe poseer una estructura para ser considerada con buen diseño, es que esta misma evite un consumo excesivo de energía para mantener un ambiente interior apto para sus usuarios. Éste consumo de energía depende del medio ambiente en el que se encuentre el inmueble y de las propiedades higrotérmicas de los materiales empleados en la construcción de dicha estructura. En una edificación las paredes ocupan el mayor porcentaje de la envolvente del edificio, por lo cual, el estudio de

las ganancias de calor y masa a través de ellas puede repercutir significativamente en las condiciones del ambiente interior del edificio.

A continuación, se presentan los resultados reportados por diversos autores de estudios relacionados con análisis de la transferencia de calor y masa con metodologías para la obtención de propiedades de los materiales mediante mediciones experimentales y soluciones teóricas. Reif-Acherman (2014) [11], presenta una investigación que abarca desde los primeros estudios que se realizaron hasta las últimas técnicas empleadas para el estudio de la transferencia de calor; comenzando con los estudios que realizó Jean Baptiste Fourier en 1822, al exponer una teoría matemática de la conducción de calor y realizando una de las primeras validaciones de su teoría al obtener la conductividad térmica del hierro. Por su parte, Zhang *et al.*, (2012) [12], estudiaron el vínculo entre el coeficiente de difusión y la micro-estructura en materiales a base de cemento Portland, ya que juega un rol importante en la durabilidad del diseño y el valor de los materiales. Empleando micro-tomografía de rayos X computarizada obtuvieron imágenes 3D de la muestra de cemento con agua estudiada y se aplicó el método del elemento finito para simular la difusión del agua pesada. Los valores se compararon y son consistentes con resultados presentados en investigaciones experimentales.

Si bien en la literatura existente, es posible encontrar datos de coeficientes de difusión de calor y masa para algunos materiales de construcción individuales (yeso, blocks, ladrillos, entre otros), es necesario determinar sus coeficientes de

difusión de calor y masa cuando estos materiales se emplean en conjunto, ya que sus propiedades en conjunto no equivalen a la suma de las propiedades independientes. Por lo cual, se requiere conocer sus coeficientes de difusión de calor y masa en la configuración utilizada en la construcción de edificios, con el fin de reducir la incertidumbre en el cálculo de la transferencia de calor y masa permitiendo así, seleccionar los materiales adecuados para minimizar el uso de sistemas activos de climatización.

1.4 Objetivo general

Desarrollar un dispositivo experimental de Cámara de Ambiente Controlado (CAC) para determinar los coeficientes globales de transferencia de calor y masa bajo diferentes condiciones ambientales de muestras de muros simples y compuestos, considerando la norma ASTM 1363 [23].

1.4.1 Objetivos particulares

- Seleccionar la muestra de referencia para la calibración y la muestra de muro a evaluar, esto último considerando los materiales de construcción de viviendas más comunes en Tabasco.
- Instrumentar la CAC para determinar las pérdidas y ganancias de calor a través de su capa envolvente y determinar los coeficientes globales de transferencia de calor y masa.
- Obtener los coeficientes globales de transferencia de calor y masa de una muestra de un muro de mampostería bajo cuatro diferentes condiciones ambientales: 1) transferencia de calor sin transferencia de masa, 2) transferencia de masa sin transferencia de calor, 3) transferencia de calor y transferencia de masa en el mismo sentido, y 4) transferencia de calor y transferencia de masa en sentidos opuestos.
- Analizar los coeficientes de transferencia de calor y masa obtenidos para la muestra de estudio bajo las cuatro condiciones ambientales probadas.

1.5 Alcances

- Las temperaturas ambiente mínima y máxima al interior de las cámaras son de 15 y 50°C, respectivamente.
- La humedad relativa al interior de cada cámara puede variarse de 60% a 80%.
- Las muestras de estudio deben tener un máximo de 1.10 m × 1.10 m de superficie y espesor mínimo de 5 cm y un máximo de 20 cm.

1.6 Estructura de la tesis

La estructura del trabajo de investigación comprenderá de cuatro capítulos que se distribuirán de la siguiente manera:

Capítulo 1: Presentación de los antecedentes, la revisión bibliográfica sobre los métodos teóricos y experimentales para el estudio de la transferencia de calor y masa, así como, los objetivos y alcances.

Capítulo 2: Presentación de los fundamentos teóricos de la transferencia de calor y masa, las ecuaciones gobernantes en estado permanente unidimensional.

Capítulo 3: Presentación de la construcción e instrumentación de la CAC y la metodología para el desarrollo de las pruebas experimentales.

Capítulo 4: Presentación de los resultados obtenidos y comparación de las diferentes condiciones de prueba para la muestra de estudio.

Capítulo 5: Se presentan las conclusiones del trabajo de tesis.

1.7 Referencias bibliográficas

- [1] Alan Abela, Lorna Hamilton. (2016). Study on Energy Use by Air Conditioning: Final Report. 2016, de bre.uk.
URL: <https://www.bre.co.uk/filelibrary/pdf/projects/aircon-energy-use/StudyOnEnergyUseByAirConditioningFinalReport.pdf>.
- [2] Hong Kong Government. (2016). Hong Kong Energy Statistics 2016 Annual Report. 2017, de Industrial Production Statistics Section, Census and Statistics Department.
URL: <http://www.statistics.gov.hk/pub/B11000022016AN16B0100.pdf>.
- [3] Litavcova E., Korjenic A., Korjenic S., Pavlus M., Sarhadov I., Seman J., Bednar T. (2014). Diffusion of moisture into building materials: A model of moisture transport. *Energy and Buildings*, 68: 558-561.
- [4] Arnold J.C., Alston S.M., Korkees F. (2013). An assessment of methods to determine the directional moisture diffusion coefficients of composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 55: 120-128.
- [5] Chemkhi S., Khalfaoui K., Zagrouba F. (2013). Modelling of saturated porous media drying: Heat and mass transfer coupled with the material mechanical behavior, *International Journal of Chemical Engineering and Applied Sciences*, 3(1): 1-6.
- [6] Boulaoued I., Mhimid A. (2012). Determination of the Diffusion Coefficient of New Insulators Composed of Vegetable Fiber, *Thermal Science*, 16 (4): 987-995.
- [7] Scheffler G. A., Plagge R. (2010). Introduction of a Drying Coefficient for Building Materials, *Buildings XI*, ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers).

- [8] Nicolai B. (2012). Convective heat and mass transfer modelling at air-porous material interfaces: Overview of existing methods and relevance. *Chemical Engineering Science*, 74, 49 - 58.
- [9] Janssen, H., Blocken B., Carmeliet J. (2007). Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(5-6):1128-40.
- [10] Özisik M. N. (1992). Analytic solution to the conjugate heat transfer problem of flow past a heated block. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35, 1519-1525.
- [11] Reif-Acherman S.. (2014). Early and current experimental methods for determining thermal conductivities of metals. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77, 542-546.
- [12] Zhang Y. (2012). Assessing the moisture buffering performance of hygroscopic material by using experimental method. *Building and Environment*, 48, 27-34.
- [13] Carmeliet J., Janssen H., Derluyn H. (2007) An improved moisture diffusivity model for porous building materials, *Proceedings of 12th Symposium for Building Physics. Symposium for Building Physics*, Edition: 12, Location: Dresden, Germany date: 29-3-2007.
- [14] Díaz V. S. (2005). *Acondicionamiento Térmico de Edificios*. Buenos Aires: Nobuko.
- [15] Chen Z. Q., Shi M. H. (2005). Study of heat and moisture migration properties in porous building materials, *Applied Thermal Engineering* 25(2005) 61-71.
- [16] Bouache T., Ginestet S. (2013). Identification of thermal characteristics of a building, *Energy Procedia* 42(2013) 280-288.
- [17] Comisión Nacional del Agua. (2016). Normales Climatológicas Tabasco. 2016, de conagua.gob.mx URL: <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=tab>

- [18] ASTM C1363-11, Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Capítulo 2

Fundamento teórico y modelo matemático

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos de la transferencia de calor y masa, una analogía entre ambos fenómenos de transporte, así como, las leyes que rigen cada fenómeno. Por otra parte, se presenta la metodología para el análisis de transferencia de calor y masa a través del muro.

2.1 Transferencia de calor

La transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos diferentes. Siempre que exista una diferencia de temperatura, la energía se transfiere de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. De acuerdo con los conceptos de la termodinámica básica, la energía que se transfiere como resultado de una diferencia de temperatura es el calor. Las leyes de la termodinámica tratan de la transferencia de energía, pero sólo se aplican a sistemas que están en equilibrio, es decir, pueden utilizarse para predecir la cantidad de energía requerida para modificar un sistema de un estado de equilibrio a otro, pero no sirven para predecir la rapidez (tiempo) con que pueden producirse estos cambios. Por lo tanto, la transferencia de calor, complementa los principios termodinámicos, proporcionando métodos de análisis que permitan predecir esta velocidad de transferencia térmica.

Conocer los fundamentos de la transmisión del calor permitirá determinar las pérdidas o ganancias que se producen en el sistema de interés. Entre el interior y el exterior de un sistema existe una diferencia de temperatura y humedad. El interior del sistema tenderá a ceder o absorber calor según su temperatura interior sea menor o mayor que la exterior. De acuerdo con el segundo principio de la termodinámica enunciado por Clausius, el calor fluye espontáneamente, siempre de una fuente de mayor temperatura a una de menor temperatura, hasta que las mismas, se igualan. Existe por lo tanto un flujo de calor desde los puntos de mayor a los de menor temperatura, según sea la temperatura interior respecto a la exterior diremos que tenemos pérdidas o ganancias de calor en el local. Para ello distinguiremos tres formas físicas claramente definidas que son: convección, conducción y radiación.

2.1.1 Conducción

La conducción, es el único mecanismo de transmisión de calor posible en los medios sólidos opacos, cuando en estos cuerpos existe un gradiente de temperatura. El calor se trasmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura, debido al movimiento cinético o el impacto directo de las moléculas como en el caso de los fluidos en reposo o por el arrastre de los electrones como sucede en los metales. La conducción, es la transmisión del calor por conducción que se produce de molécula a molécula en el interior del cuerpo, en el sentido decreciente de las temperaturas, sin producirse ningún desplazamiento molecular. Hay materiales que conducen el calor a mayor velocidad, dependiendo de la conductividad de cada material. Por ejemplo los metales son mucho más conductivos que los materiales que se usan comúnmente en la construcción. La transmisión del calor por conducción puede establecerse a través de un coeficiente k de conductibilidad térmica, que es un coeficiente determinado para cada elemento en particular. Si se supone un muro plana de constitución homogénea la cual es atravesada por una cantidad de calor constante en el tiempo (régimen estacionario), que mantiene en forma invariable los valores de temperaturas superficiales T_1 y T_2 , y suponemos que todo el calor la atraviesa sin que ésta de por sí absorba calor. El flujo de calor por conducción unidimensional en x (q_x''), puede expresarse mediante la Ecuación (1) [1],

$$q_x'' = \lambda \frac{T_1 - T_2}{L} = \lambda \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

Donde:

q_x'' es el flujo de calor por conducción, λ es el coeficiente de conductividad térmica, ΔT es el diferencial de temperatura en el cuerpo y L es la longitud del cuerpo.

¹ Se admite para los fines prácticos que λ es constante, de manera que la temperatura del muro varía linealmente en dirección del flujo de calor, a la relación $(T_1 - T_2)$ se la denomina gradiente térmico. A la inversa del coeficiente de

conductibilidad térmica $1/\lambda$ se lo denomina resistencia a la conductibilidad térmica.

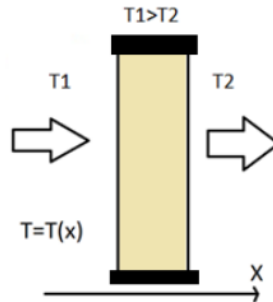


Figura 2.1. Esquema de transferencia de calor por conducción.

2.1.2 Convección

La convección, es el paso del calor de un punto a otro dentro de la masa de un fluido, transportada por el movimiento de las moléculas del mismo, movimiento que se debe a las variaciones de densidad del fluido que recibe una cantidad de calor [2]. Como se muestra en la Figura 2.2, si se considera un muro que está caliente, y que una de sus caras está al exterior y el aire se encuentra a una temperatura más baja, existe en el contacto entre el cuerpo y el fluido una película laminar. El espesor de la película laminar no está bien definido y varía con el grado de turbulencia del fluido adyacente, en este caso con la velocidad y dirección del aire. Por otra parte, el muro emite calor por radiación, por lo que el cálculo preciso de la transmisión de calor por convección es muy complejo. Por ello, se utilizan coeficientes empíricos avalados por la experiencia, que comprenden el efecto conjunto de convección y radiación, denominado coeficiente superficial pelicular o de paso de calor α . Se puede decir que la cantidad de calor que se transmite (q'') está dada por la Ecuación (2). Donde h es el coeficiente de transferencia de calor y $(T_s - T_\alpha)$ es la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido.

$$q'' = h(T_s - T_\alpha) \quad (2)$$

Donde: q'' es el flujo de calor convectivo, h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura de la superficie del cuerpo y T_α es la temperatura del fluido que rodea al cuerpo.

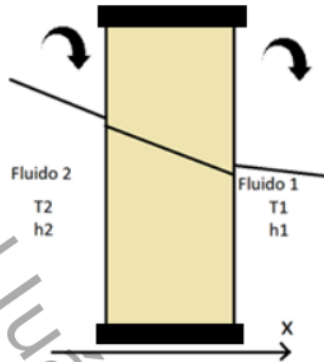


Figura 2.2. Esquema de transferencia de calor por convección.

Existen dos tipos de convección:

a) **Convección libre o natural**, ocurre cuando la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que da lugar a fuerzas ascensionales, el fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna fuerza motriz exterior.

b) **Convección forzada**, tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido con una velocidad, sobre una superficie que se encuentra a una temperatura T_s mayor o menor que la del fluido T_α , como la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural, se transfiere por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura.

El coeficiente de transferencia de calor por convección forzada depende en general, de la densidad, viscosidad, de la velocidad del fluido, de las propiedades térmicas del fluido como son temperatura y de la capacidad calorífica específica.

2.1.3 Radiación

La radiación, es la forma de transmisión de calor se produce de un cuerpo a otro sin que exista un contacto directo con el otro cuerpo en forma de energía radiante, ver Figura 2.3. La transferencia se realiza igual que la radiación de la luz en forma de ondas electromagnéticas, sin la necesidad de fluido alguno, es decir, sin el contacto molecular como en los casos anteriores. Un cuerpo caliente transforma parte de su contenido de calor en energía de radiación, emitiéndola en formas de ondas en todas las direcciones en sentido radial, ondas que son absorbidas por otros cuerpos, las cuales se manifiestan en forma de calor sensible. La cantidad de calor irradiado por un cuerpo a otro puede expresarse mediante la Ecuación (3) [2].

$$q_r'' = \varepsilon \sigma (T_{s2}^4 - T_{s1}^4) \quad (3)$$

Donde: ε es la emisividad, que es la propiedad de la superficie numéricamente igual al cociente de la emisión de radiación del cuerpo en estudio con respecto a la de uno negro, adquiere valores entre 0 y 1 y constituye una medida para evaluar cuan efectivamente emite radiación un cuerpo real con respecto a uno negro; σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($1.3806488(13) \times 10^{-23}$ J/K); T_{s1} es la temperatura de la superficie 1 y T_{s2} es la temperatura de la superficie 2, ambas temperaturas en K.

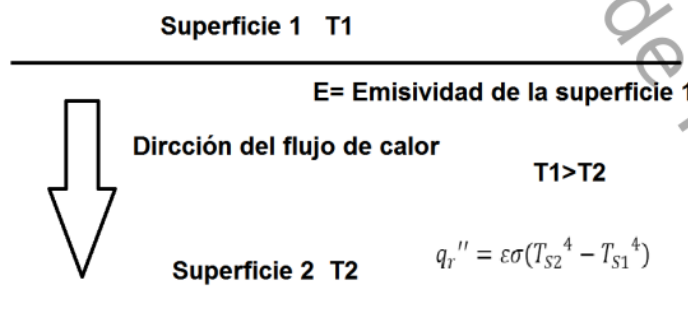


Figura 2.3. Esquema de transferencia de calor por radiación.

2.1.4 Transferencia total de calor a través de un muro

Si consideramos el muro de la Figura 2.4, donde en una de sus caras se encuentra a una temperatura del aire mayor que la otra, se origina un flujo de calor desde la cara más caliente hacia la más fría, donde intervienen las tres formas de transmisión de calor enunciadas precedentemente, conducción, convección y radiación. [3]

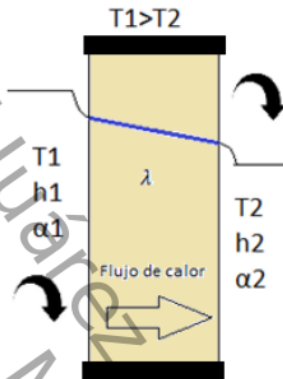


Figura 2.4. Esquema de transferencia de calor en muro simple.

Si analiza el proceso de transmisión de calor podemos determinar que éste se realiza en tres etapas, con base en las diferentes formas de transmisión de calor:

1º ETAPA: transmisión de calor desde el aire interior a la cara interna del muro. La transferencia se realiza por convección a través de la capa del aire de contacto y por radiación de los elementos más calientes hacia el muro considerado.

2º ETAPA: transmisión de calor a través del cuerpo por conducción.

3º ETAPA: transmisión de calor desde el interior, del muro hacia el aire exterior. La transferencia se realiza por convección a través de la capa del aire de contacto y por radiación del muro considerada hacia los cuerpos más fríos que se encuentran en el exterior del muro considerado.

Condiciones de frontera de primera clase

Las cumplen los nodos con potencial conocido; son fronteras de primera clase en transferencia de calor, las superficies con temperatura conocida; en flujo de fluidos con potencial y en flujos en medios porosos, lo son las superficies impermeables [4].

$$T(0, t) = T_{cte} \quad (5)$$

4

Condiciones de frontera de segunda clase

Las cumplen los nodos en los cuales se conoce el gradiente del potencial, como por ejemplo, superficies con flujo de calor conocido en transferencia de calor; secciones transversales donde se conoce la velocidad media, en flujo de fluidos con potencial, y en flujos en medios porosos. Un caso especial se tiene cuando el gradiente del potencial es cero: superficies adiabáticas en transferencia de calor.

- a) Flujo finito de calor

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q'' \quad (6)$$

- b) Superficie adiabática o aislada

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

4

Condiciones de frontera de tercera clase

Esta condición la cumplen los nodos en los cuales se conoce la relación del potencial con su gradiente. Es el caso de superficies convectivas en transferencia de calor; secciones transversales donde se conocen tanto la velocidad media como la presión, en flujos con potencial y flujos en medios porosos.

- c) Condición de convección superficial

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h(T_{\alpha} - T_{sup}) \quad (8)$$

2.1.5 Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. En otras palabras la conductividad térmica es también la capacidad de una sustancia de transferir la energía cinética de sus moléculas a otras adyacentes o a sustancias con las que está en contacto. La conductividad térmica es una magnitud intensiva. Cuanto mayor sea su conductividad térmica, un material será mejor conductor del calor. Cuanto menor sea, el material será más aislante [5].

Una conductividad térmica de 1 Watt por metro y Kelvin indica un joule de energía atraviesa el cuerpo por conducción térmica:

- en 1 segundo,
- por una superficie de 1 m^2 ,
- por un grosor de 1 m ,
- cuando la diferencia de temperatura entre las dos caras es de 1 K .

Es un mecanismo molecular de transferencia de calor que ocurre por la excitación de las moléculas. Se presenta en todos los estados de la materia pero predomina en los sólidos.

$$\lambda = \frac{\dot{q}}{|\nabla T|} \quad (9)$$

Donde: λ es la conductividad térmica del material, $\dot{q}$ es el flujo de calor en el material, y $|\nabla T|$ es el gradiente de temperatura.

2.1.6 Resistencia térmica

La resistencia térmica de un material representa la capacidad del material de oponerse al flujo del calor. En el caso de materiales homogéneos es la razón entre el espesor y la conductividad térmica del material; en materiales no homogéneos la resistencia es el inverso de la conductancia térmica. La resistencia al paso del calor de un elemento discreto formado por una capa de material homogéneo y caras paralelas separadas un espesor e , de acuerdo a la Ecuación (8).

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (10)$$

Donde: R es la resistencia térmica, e es el espesor del material y λ es la conductividad térmica del material.

La resistencia térmica de un elemento formado por varias capas, cada uno de ellas de material homogéneo, es igual a la suma de las resistencias de cada una de las capas:

$$R_{Total} = \sum_{i=1}^n R_i \quad (11)$$

2.1.7 Coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia U , es la medida del calor que fluye por unidad de tiempo y superficie, transferido a través de un sistema constructivo, formado por una o más capas de material, de caras plano paralelas, cuando hay un gradiente térmico de 1°C (1 K) de temperatura entre los dos ambientes que éste separa. Su valor incluye las resistencias térmicas superficiales de las caras del elemento envolvente, es decir, refleja la capacidad de transmitir calor de un elemento constructivo en su posición real en el edificio. Cuanto menor sea el valor U , menor será el paso de energía entre ambas caras, y por tanto mejor las capacidades aislantes del elemento constructivo.

Se emplea para expresar la capacidad aislante de un elemento constructivo particular formado por una o más capas de materiales. Desde un punto de vista físico es la cantidad de energía que fluye, en la unidad de tiempo, a través de una unidad de superficie del elemento, cuando hay un gradiente térmico unidad.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum R + \frac{1}{h_{ext}}} \quad (12)$$

Donde: U es el coeficiente global de transferencia de calor, R es la resistencias de cada elemento, h_{int} es el coeficiente convectivo interior y h_{ext} es el coeficiente convectivo exterior.

2.2 Transferencia de masa

La transferencia de masa requiere la presencia de una fuerza impulsora generada por dos regiones con concentraciones de masa diferentes, en el caso de esta investigación, se refiere a zonas con humedades relativas diferentes, donde se presenta un transporte de vapor de agua desde una región de alta concentración hacia una de concentración menor [6].

3 Si se define la cantidad de un producto por unidad de volumen como la concentración del mismo, puede decirse que el flujo de un producto siempre se presenta en la dirección de la concentración decreciente; es decir, desde la región de alta concentración hacia la de baja.

La migración de humedad a través de un muro se considera a temperatura constante, la transferencia de masa se realiza en forma gaseosa a través de los poros existentes en la matriz sólida del material, ya sea por capilaridad, por flujo molecular y por difusión superficial. Éste fenómeno es provocado por el gradiente de concentración de humedad, esto quiere decir, que la masa se transmitirá de regiones de mayor humedad a zonas de menor humedad. El flujo de masa (F), es

directamente proporcional al producto del coeficiente de difusión de masa y al gradiente de humedad, lo cual se representa en la Ecuación (11). Donde cada elemento de la igualdad indica la variación de concentración de masa con respecto a cada eje de dirección de sistema coordenado cartesiano.

$$J = -D \frac{\Delta HR}{\Delta x} \quad (13)$$

Donde: J es el flujo de masa, D es el coeficiente de difusión de masa, ∇HR es el gradiente de humedad relativa (concentración de masa) y ∇x es el gradiente del espesor.

Es importante involucrar la migración de masa, o en éste caso de estudio de humedad relativa en el aire debido a que la transferencia de calor no es independiente de ésta. Lo anterior, debido a que a mayores gradientes de humedad relativa, mayor será la transferencia de calor entre los ambientes externos e interno.

Las moléculas que existen en una mezcla gaseosa chocan continuamente entre sí y el proceso de difusión es fuertemente influido por estas colisiones. La colisión de moléculas semejantes tiene poca consecuencia, ya que son idénticas y no hay diferencia respecto a cuál de ellas cruza cierto plano. Sin embargo, la de moléculas diferentes influye sobre la razón de la difusión, puesto que moléculas diferentes pueden tener masas distintas y, por consiguiente, cantidades de movimiento diferentes; en consecuencia, las moléculas más pesadas dominan el proceso de difusión. Los coeficientes de difusión y, por ende, la razón de difusión de los gases depende intensamente de la temperatura, ya que ésta es una medida de la velocidad promedio de las moléculas del gas. Por lo tanto, la razón de difusión es más alta a temperaturas más elevadas.

2.2.1 Analogía entre transferencia de masa y de calor

La fuerza impulsora para la transferencia de calor es la diferencia de temperatura. Como contraste, la fuerza impulsora para la transferencia de masa es la diferencia de concentración. Puede verse la temperatura como una medida de la “concentración de calor”. Por lo tanto, tanto el calor como la masa se transfieren de las regiones más concentradas hacia las menos concentradas. Si no hay diferencia de temperatura entre dos regiones, entonces no existe transferencia de calor. De modo semejante, si no existe diferencia entre las concentraciones de una especie en regiones diferentes de un medio, no habrá transferencia de masa.

El calor se transfiere por conducción, convección y radiación. Sin embargo, la masa se transfiere sólo por conducción o difusión, y convección, y no existe algún mecanismo análogo a la radiación.

La razón de difusión de masa, de una especie química A en un medio en estado estacionario, en una dirección, es proporcional al gradiente de concentración de masa en esa dirección y se expresa mediante la ley de Fick de la difusión.

La convección de masa es el mecanismo de transferencia de masa entre una superficie y un fluido en movimiento en el que intervienen tanto la difusión de masa como el movimiento de la masa de fluido. El movimiento del fluido mejora también en forma considerable la transferencia de masa, al quitar el fluido con alta concentración cercano a la superficie y reemplazarlo por el de la concentración más baja que se encuentra más alejado.

Condiciones de frontera en transferencia de masa

Existen dos tipos comunes de condiciones de frontera:

- 1) La concentración especificada de la especie, la cual corresponde a la temperatura especificada y,
- 2) El flujo especificado de la especie, el cual corresponde al flujo especificado de calor.

A pesar de su aparente semejanza, existe una diferencia importante entre la temperatura y la concentración: necesariamente, la primera es una función continua, pero, en general, la concentración no lo es. Por ejemplo, las temperaturas del muro y del aire en la superficie de este muro siempre son las mismas. Por lo tanto, al especificar una condición de frontera, no basta con especificar el lugar, además es necesario especificar el lado de la frontera.

Difusión estacionaria de masa a través de un muro plano

Un problema práctico de transferencia de masa comprenden la difusión de una especie a través de un medio limitado por planos paralelos, en la que no se tienen reacciones químicas homogéneas, en condiciones unidimensionales estacionarias. Considérese un muro plano sólido (medio B) de área A, espesor L y densidad ρ , ver Figura 2.5. El muro está sujeto en ambos lados a concentraciones diferentes de una especie A, a la cual es permeable. Las superficies fronteras, en $x=0$ y $x=L$, están localizadas dentro del sólido adyacente a las interfases y las fracciones de masa de A en esas superficies se mantienen en w_{A1} y w_{A2} , respectivamente, en todo momento. La fracción de masa de la especie A en el muro varía sólo en la dirección x y puede expresarse como w_{Ax} .

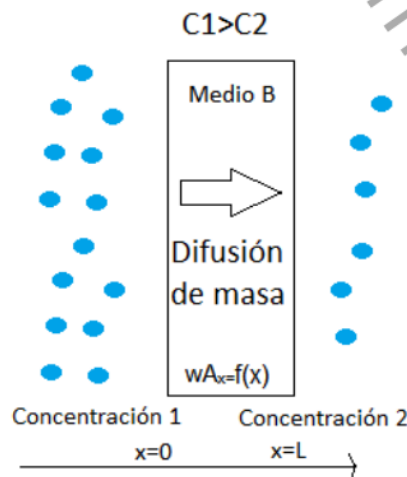


Figura 2.5. Esquema de difusión de masa.

Por lo tanto, en este caso, la transferencia de masa a través del muro puede modelarse como estacionaria y unidimensional. Después, se determina la razón de la difusión de masa de la especie A, a través del muro.

La concentración de la especie A en cualquier punto no cambia con el tiempo, puesto que la operación es estacionaria, y no hay producción ni destrucción de la especie A, ya que no están ocurriendo reacciones químicas en el medio.

Entonces, el principio de conservación de la masa para la especie A puede expresarse como: el gasto de masa de la especie A ($\dot{m}_{dif,A}$), a través del muro y en cualquier sección transversal.

$$\dot{m}_{dif,A} = J_A A = cte \quad (14)$$

Entonces la ley de Fick de la difusión se expresa como:

$$J_A = \frac{\dot{m}_{dif,A}}{A} = -\rho D_{AB} \frac{dw_A}{dx} = cte \quad (15)$$

Por lo tanto, se concluye que la razón de la difusión de masa a través de un muro plano es proporcional a la densidad promedio, al área del muro y a la diferencia de concentración de uno a otro lado del muro, pero es inversamente proporcional al espesor de esta última.

2.3 Normatividad para la implementación de CAC (*hot box*).

La norma ASTM 1363 sugiere los principios para la construcción y operación de una cámara de ambiente controlado, conocida también como *hot box*, la cual se muestra en la Figura 2.6.

El método estándar de prueba para determinar el desempeño térmico de materiales de construcción y componentes de envolventes de edificio por medio del aparato *hot box* establece los principios para el diseño de un aparato tipo *hot box* y los requerimientos mínimos para determinar el desempeño térmico en estado permanente de componentes de edificación cuando están expuestos a condiciones controladas de laboratorio. También, se emplea para medir el desempeño térmico de un material de construcción en condiciones de prueba estandarizadas. Puede emplearse para muestras grandes homogéneas y no homogéneas. Es posible aplicar el proceso a las estructuras de edificaciones o a los componentes que forman parte de materiales de construcción de los que sea posible construir una muestra representativa que quepa dentro de la *hot box*.

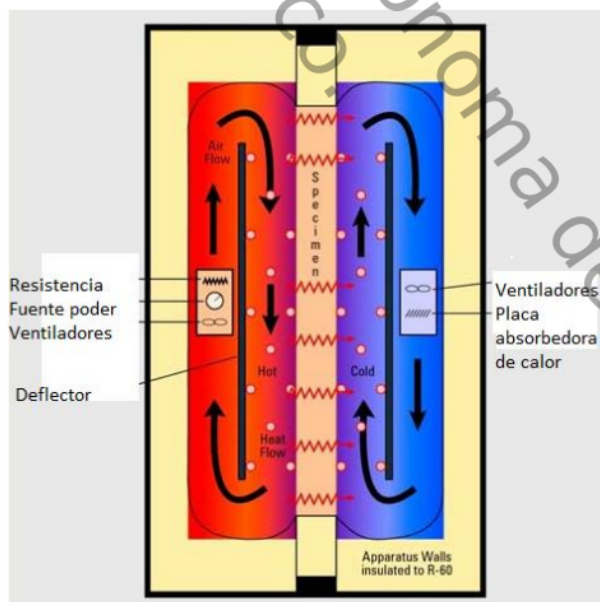


Figura 2.6. Esquema de hot box de acuerdo a las recomendaciones ASTM.

La operación de una *hot box* requiere un número significativo de mediciones fundamentales como temperaturas, áreas y la energía. El equipo que realiza estas mediciones requiere una calibración que asegure que los datos tengan la incertidumbre deseada. Si el aparato *hot box* se ha diseñado, construido y operado de manera ideal, no es necesario realizar otra calibración o ajuste. Como tal, la *hot box* se considera un método primario y la incertidumbre del resultado es analizada por evaluación directa de las incertidumbres de medición de los componentes de instrumentación usada en la toma de mediciones.

En una prueba ideal con *hot box* de un material homogéneo no hay diferencia de temperatura entre cualquiera de las dos caras calientes o frías de la muestra para conducir un flujo de calor por los bordes. Además, no habría diferencias de temperatura que conducirían calor a través de las fronteras de los muros de la cámara de medición. Sin embargo, no es posible mantener un equilibrio perfecto entre la guarda y la cámara de medición, por lo tanto algunas correcciones son necesarias para caracterizar exactamente todas las trayectorias de los flujos de calor de la cámara de medición. Para ganar esta confianza final en el resultado de la prueba, es necesario evaluar el resultado total del aparato realizando mediciones en las muestras de referencia de las que se conocen los valores de transferencia de calor y comparar esos resultados a los valores previstos.

Las muestras de referencia comparativa son paneles homogéneos cuyas propiedades térmicas son uniformes y fiables. Estos paneles, o las secciones representativas de los paneles, son muestras en las cuales se ha determinado su desempeño térmico en otros dispositivos para tal fin.

Realizando este proceso de evaluación comparativa, el operador de la *hot box* puede desarrollar las ecuaciones adicionales que predicen la magnitud de las correcciones al calor neto que atraviesa la muestra con el fin de determinar las pérdidas de calor por la envolvente y bordes de la *hot box*. Esta comparación proporciona el conocimiento necesario para que cualquier flujo de calor no deseado se pueda cuantificar con la menor incertidumbre para ser un factor de

menor importancia en la incertidumbre total al momento de determinar los parámetros de interés.

Para asegurar un nivel aceptable de incertidumbre en el resultado, las personas que aplican este método de prueba deben poseer un conocimiento de los requerimientos de las mediciones térmicas, del desarrollo de la prueba y del uso práctico de la teoría de transferencia de calor referente a materiales y sistemas de aislamiento térmico.

De acuerdo a esta norma, en el diseño de la Hot box se debe considerar lo principalmente los siguientes aspectos:

- ✓ Las condiciones exteriores naturales,
 - ✓ La temperatura de confort al interior,
 - ✓ Los materiales de construcción usados para construir las muestras bajo prueba serán acondicionados en caso de ser necesario, basado sobre sus propiedades materiales y su variabilidad potencial.
 - ✓ Los parámetros de acondicionamiento serán elegidos para reflejar exactamente el uso previsto de las muestras bajo prueba.
 - ✓ Se permite la operación bajo condiciones de convección natural o forzada en las superficies de la muestra.
 - ✓ La dirección del movimiento del flujo de aire bajo condiciones de convección forzada será perpendicular o paralela a la superficie.
 - ✓ El dispositivo debe mantener una diferencia de temperaturas constante deseada a través de la muestra bajo prueba en un periodo de tiempo.
 - ✓ El dispositivo debe permitir cuantificar flujo de calor neto y las temperaturas.
- El flujo de calor Q , no puede ser medido directamente. Para determinar el calor neto que atraviesa la muestra bajo prueba, una cámara de medición de cinco-caras se coloca con su lado abierto contra una cara de la muestra bajo prueba.

2.4 Modelo físico

Considérese un muro aislado en sus extremos superior e inferior, como se muestra en la Figura 2.7. Las otras dos caras del muro se encuentran a temperaturas diferentes. La temperatura exterior varía de forma sinusoidal y la temperatura en la parte interior permanece constante. Las fronteras en ambos lados de la muestra son convectivas y las fronteras restantes son adiabáticas.

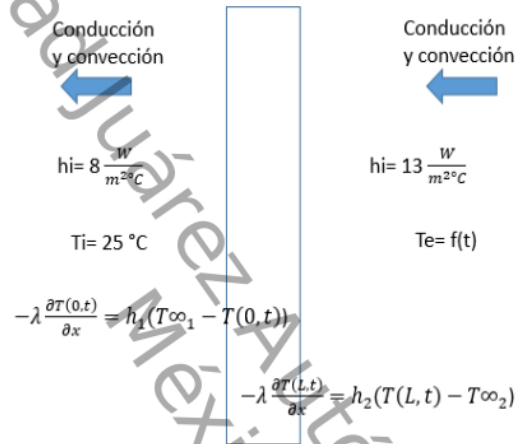


Figura 2.7. Modelo físico con condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera que se presentan son en ambos lados de Tercera Clase, o de convección. En la Figura 2.7, se presentan las condiciones de frontera a ambos lados del muro. Para la transferencia de calor unidimensional en la dirección x , en una placa de espesor L , las condiciones de frontera sobre ambas superficies se pueden expresar como:

$$-\lambda \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = h_1(T_{\infty_1} - T(0,t)) \quad (16)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = h_2(T(L,t) - T_{\infty_2}) \quad (17)$$

Donde: h es el coeficiente convectivo operante en cada superficie expuesta y T_{∞} es la temperatura ambiente a cada lado del muro.

2.5 Modelo matemático.

Los modelos matemáticos presentados a continuación explican las secuencias de cálculo empleadas para determinar los coeficientes globales de transferencia de calor y de transferencia masa respectivamente, esto bajo los tres sistemas de prueba:

- a) Transferencia de calor.
- b) Transferencia de masa.
- c) Transferencia de calor y masa combinadas.

2.5.1 Transferencia de calor

Con base en la información proporcionada por la normatividad ASTM 1363, se deducen las ecuaciones que gobernarán y regirán el modelo físico. Estas ecuaciones tienen sustento en las leyes que definen los mecanismos de transferencia de calor y masa.

La Ecuación (18) representa el flujo de calor causado por la convección y la conducción a través de un muro al presentarse un gradiente de temperatura.

$$q_M = U_M A (T_1 - T_2) \quad (18)$$

La Ecuación (19) representa un balance de energía en la dirección del flujo de calor, esto quiere decir que se consideran las generaciones de calor en el lado caliente de la hot box y las salidas de calor a través de la envolvente en el lado frío, este balance se realiza sin considerar ganancias o pérdidas de energía.

$$q_M + q_V = \sum_{i=1}^{n=5} q_{\text{placas de acrílico}} + q_M \quad (19)$$

En la Ecuación (20) se considera la ganancia o pérdida de energía (incertidumbre) presente en el proceso del experimento.

$$q_M = q_R + q_V - q_C \quad (20)$$

Donde, q_{C1} es el flujo de calor a través de las paredes de acrílico instrumentadas con transductores de flujo de calor, calibradas mediante el polinomio de ajuste el cual involucra las variaciones de energía interna al interior de la cámara y un ajuste estadístico.

En la Ecuación (21) se presenta finalmente la energía que atraviesa el muro de muestra como función de las demás variables del experimento.

$$U_M A (T1 - T2) = q_M + q_V - q_C \quad (21)$$

2.5.2 Transferencia de masa

La transferencia de masa se determina mediante una secuencia de cálculo que parte desde el conocimiento de la cantidad de masa de agua evaporada durante el proceso experimental, para esto se debe medir en una balanza la cantidad de agua colocada inicialmente en el experimento ($m_o=1000$ gr) y la masa final (m_f), posterior a detener el experimento y abrir las cámaras del dispositivo de medición. Mediante la Ecuación (22) se determina la tasa de evaporación de agua, la cual es un flujo másico y se considera como la masa transferida a través de la muestra.

$$\dot{m} = \frac{m_f - m_o}{t} \quad (22)$$

Con dicho valor del flujo de masa, es posible calcular el Coeficiente Global de Transferencia de Masa (CM), el cual, se expresa mediante la Ecuación (23). Donde ΔHR es el gradiente de humedades relativas a ambos lados de la cámara.

$$CM * A * \Delta HR = \dot{m} \quad (23)$$

Finalmente, se despeja en la Ecuación (24) el CM de la ecuación y es posible obtener su magnitud.

$$CM = \frac{\dot{m}}{A * \Delta HR} \quad (24)$$

2.5.3 Transferencia de calor y masa en conjunto

Debido a que se presenta en este proceso otra manifestación de transformación de energía al momento de existir un cambio de fase líquida hacia fase sólida, esta energía suministrada por la resistencia eléctrica se considera una pérdida en la potencia de entrada al sistema, por lo tanto, la potencia suministrada a la CAC se expresa de manera modificada en la Ecuación (25).

$$q_R - q_C = q_{Neto} \quad (25)$$

Debido a que se presenta un cambio de fase líquida a fase sólida presenta un consumo de energía durante este proceso, dicho consumo de energía viene establecido por la entalpía de vaporización del agua, la Ecuación (26) expresa la energía empleada en el cambio de fase por unidad de tiempo. La entalpía de vaporización del agua se considera como, $h = 2438 \frac{kJ}{kg}$.

$$q_C = \dot{m}h \quad (26)$$

A partir de estos cambios, el resto del proceso para la obtención del U sigue la misma secuencia de cálculo que en el proceso de transferencia de calor sin presencia de humedad.

2.6 Referencias bibliográficas

- [1] Cengel, Y. A., Boles, M.A. (1996). Termodinámica. New York: Mc Graw-Hill.
- [2] F. P. Incropera y D. P. De Witt. (2000). Fundamentos de Transferencia de Calor (4a Ed). México: Pearson Educación.
- [3] Santiago Díaz, V. (2005). Acondicionamiento Térmico de Edificios. Buenos Aires: Nobuko.
- [4] Kreith F. y Bohn M. S. (2002). Principios de Transferencia de Calor (6ª Ed.). Madrid: Thomson.
- [5] Chapman A.J. (1990). Transmisión de calor (3ª Edición), Madrid: Editorial Librería Editorial Bellisco.
- [6] Lobo, R. (2007). Principios de transferencia de masa. México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Capítulo 3

Construcción e instrumentación de la CAC

En este capítulo se presentan los trabajos realizados para construir e instrumentar el prototipo de la CAC, así como los procedimientos para realizar las pruebas experimentales.

3.1 Diseño y construcción de la CAC

La CAC fue diseñada para proveer dos espacios aislados (Cámara 1 y Cámara 2) donde las condiciones ambientales interiores pueden ser controladas de forma independiente de acuerdo con las necesidades del experimento. Lo anterior, con el propósito de proporcionar una temperatura del aire, humedad y velocidad uniforme sobre cada lado de la superficie de una muestra ubicada entre ambas cámaras. Además, debe permitir cuantificar las pérdidas o ganancias de calor a través de su envolvente, con el fin de estimar el flujo de calor que pasa a través de la muestra conociendo la incertidumbre de medición. La Cámara 1 permitirá simular condiciones de ambiente exterior, mientras que la Cámara 2 permitirá simular condiciones de ambiente interior de una vivienda, con el fin de reproducir las condiciones de operación de un muro de vivienda en condiciones lo más acercado a la realidad.

El primer paso para el diseño de la CAC fue identificar qué instrumentos y dispositivos serán necesarios implementar en cada cámara para lograr controlar las condiciones ambientales al interior, como son: sensores de temperatura, humedad, deshumidificadores, sistema de enfriamiento, sistema de calentamiento, transductores de flujo de calor, sistema de movimiento del fluido e intercambiador de calor y accesorios necesarios dentro de cada lado del aparato.

El diseño de la CAC fue propuesto por Jiménez, (2015) [1], quien propuso tres configuraciones diferentes para seleccionar la configuración más adecuada que permitiera obtener condiciones homogéneas de temperatura y velocidad de aire sobre la superficie de la muestra, además de considerar otros aspectos como: tipos de materiales, ubicación de los instrumentos de medición y tamaño de la CAC. El diseño obtenido por Jiménez, (2015) permite evaluar muestras de hasta 1 m^2 y la configuración seleccionada como la más adecuada fue una cámara rectangular. En la Figura 3.1 se presenta un esquema de la CAC diseñada, la cual constan de dos cámaras de las mismas dimensiones de $1.10 \text{ m} \times 1.10 \text{ m} \times 0.95 \text{ m}$. La muestra se ubica entre ambas cámaras sobre una base de móvil. En el

diseño se consideraron el uso de ruedas en cada cavidad y porta muestra, para facilitar el transporte y la manipulación de las cajas.

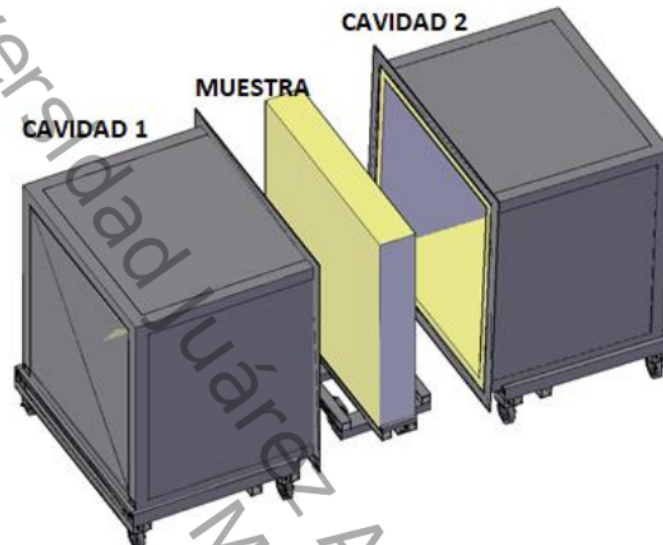


Figura 3.1. Diseño propuesto de la CAC, incluyendo muestra.

3.1.1 Envoltente de las cámaras

Para la selección del material de la envoltente de las cámaras se busca que sea posible minimizar las pérdidas y/o ganancias de calor, que la envoltente no absorba agua y que sea posible cuantificar el flujo de calor a través de ella. Para ello, se propuso una envoltente compuesta por tres capas de las cuales se conocen sus propiedades térmicas: una capa exterior de lámina de aluminio con emisividad de 0.3, una capa intermedia de poliestireno extruido (aislante) con una conductividad de $0.024 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ y una capa interior de acrílico de 3 mm de espesor. En esta última capa se implementan transductores de flujo de calor para cuantificar las ganancias o pérdidas de calor. La Tabla 3.1 resume las propiedades de las placas de las envoltentes.

Tabla 3.1. Materiales de la envolvente de aislamiento.

Material	Espesor (cm)	Conductividad térmica (W/m°C)	Permeabilidad
Aluminio	0.318	168	Impermeable
Poliestireno extruido	5.08	0.024	No se consideran
Acrílico	0.30	0.19	Impermeables

Las placas de aluminio de 1/8 pulgada (0.318 cm) se unieron con soldadura de microalambre a una estructura manufacturada con ángulos de aluminio de 3 pulgadas (7.62 cm) $\times$ 1/4 pulgada (0.635), mientras que, las placas de poliestireno extruido de 5.08 cm de espesor se unieron con pegamento blanco. Por su parte las láminas de acrílico de 3 mm de espesor se unieron con cloruro de metileno a una estructura de ángulos de acrílico, de 2.54 cm $\times$ 0.318 cm, para dar rigidez. La Figura 3.2 presenta el diseño de una de las cámaras con la capa de aluminio y poliestireno extruido.

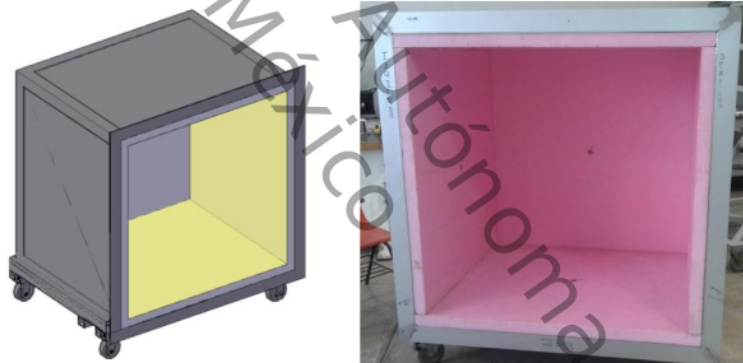


Figura 3.2. Placas de aluminio ensambladas y placas de aislante colocadas.

Debido a que no existen aislantes ideales, fue necesario cuantificar las ganancias o pérdidas de calor que el sistema pudiera experimentar a través de la envolvente. Estas ganancias o pérdida de calor, se pueden cuantificar utilizando transductores de flujo de calor. Para ello, se construyeron transductores de flujo de calor en las cinco paredes de cada cámara, las cuales, se colocaron en la capa interior de acrílico. Los transductores de flujo de calor son termopilas en serie conectadas en ambas caras de la placa, estas

termopilas fueron manufacturadas utilizando termopar tipo T. En la Figura 3.3 se presentan fotografías del proceso de elaboración de los transductores de flujo de calor. En la Tabla 3.2 se presenta un desglose del número de termopilas de las que consta cada transductor de flujo de calor de cada pared en ambas cámaras. Como se puede observar cada cámara tiene en promedio 520 puntas de termopar, esto permite cuantificar con certidumbre el flujo de calor a través de la envolvente.

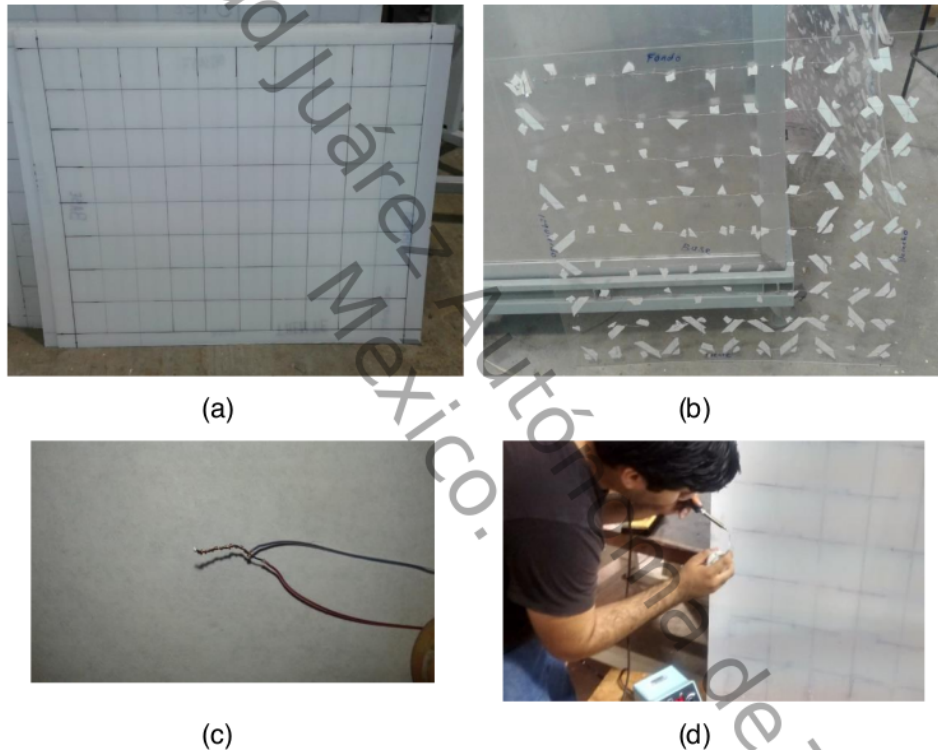


Figura 3.3. Proceso de elaboración de los transductores de flujo de calor, (a) discretización de la placa, (b) implementación de termopilas, (c) elaboración del termopar y (d) soldadura.

Tabla 3.2. Resumen del número de termopilas en la CAC.

Pared de la Cámara	Cámara 1	Cámara 2
Izquierda	99	101
Derecha	101	101
Superior	99	99
Fondo	121	121
Inferior	99	99
TOTAL	519	521

En la Figura 3.4 se muestran las placas de acrílico interiores en una de las cámaras, con los transductores de flujo de calor. Como se puede observar, cinco de las seis paredes están cubiertas por esta placa, exceptuando el área de la muestra.

Envolvente de acrílico instrumentada

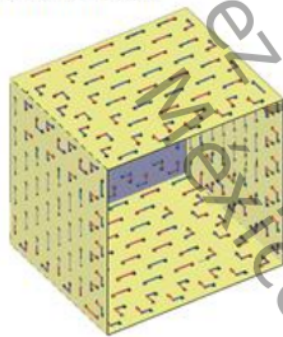


Figura 3.4. Placas de acrílico instrumentadas con transductores de flujo de calor.

En la Figura 3.5, se muestra una imagen de las componentes de la envolvente, donde se presentan los transductores de flujo de calor, la envolvente de aluminio y la posición de la muestra.

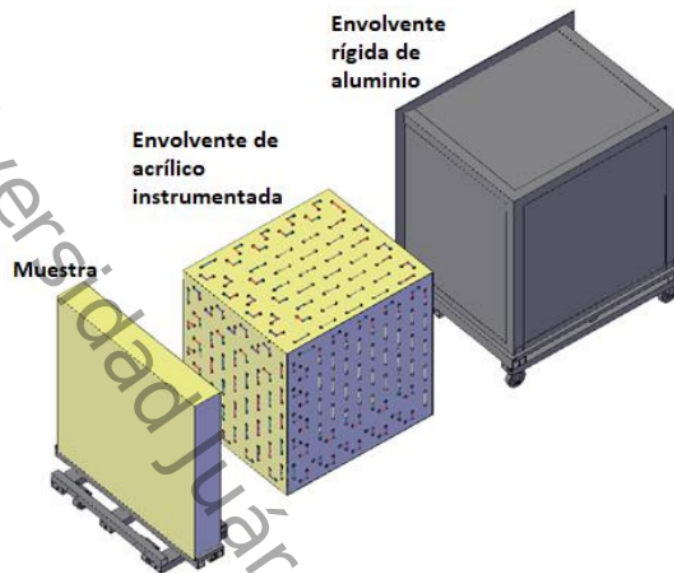


Figura 3.5. Muestra, envoltorio de acrílico y envoltorio de poliestireno extruido y aluminio.

3.1.2 Ubicación de los dispositivos e instrumentos

En la Figura 3.5 se presenta la configuración de la Cámara 1 (condiciones ambientales), donde es posible identificar los diferentes dispositivos en su interior. En el fondo está situado el ventilador cilíndrico para el movimiento del fluido, sobre él, se encuentra la resistencia eléctrica para el calentamiento del aire, mientras que en la esquina superior izquierda se ubica el deshumidificador y en la parte media derecha se encuentra el higrómetro para monitorear la humedad relativa del aire.

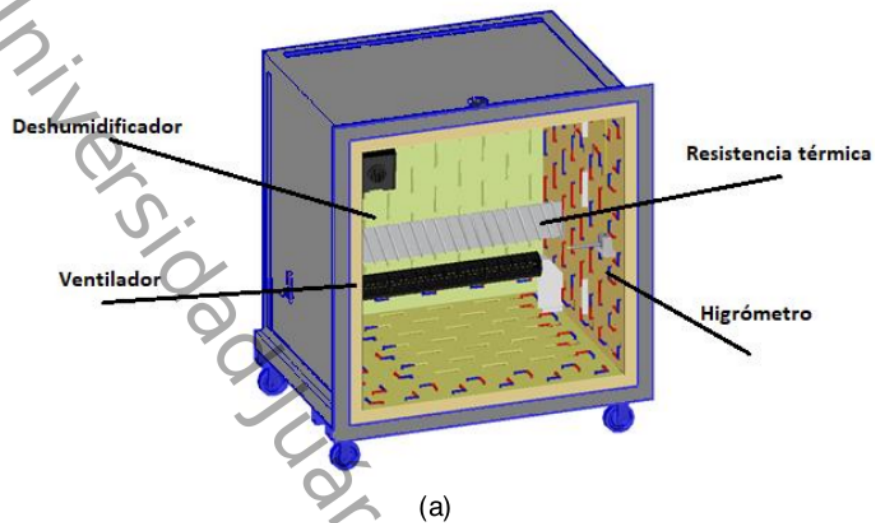


Figura 3.6. Ubicación de los dispositivos dentro de la Cámara 1, (a) diseño y (b) fotografía al interior de la cámara.

En la Figura 3.7 se presenta la configuración de la Cámara 2 (condiciones de ambiente interior), en este caso, se presenta la ubicación del intercambiador de calor con el fin de reducir la temperatura del aire interior. El resto de dispositivos son los mismos que en la Cámara 1 ubicados en las mismas posiciones, con la única diferencia de que en la Cámara 2 se cuenta con dos placas con resistencias para el calentamiento. Lo anterior, con el fin de poder ampliar el intervalo de temperatura del aire interior.

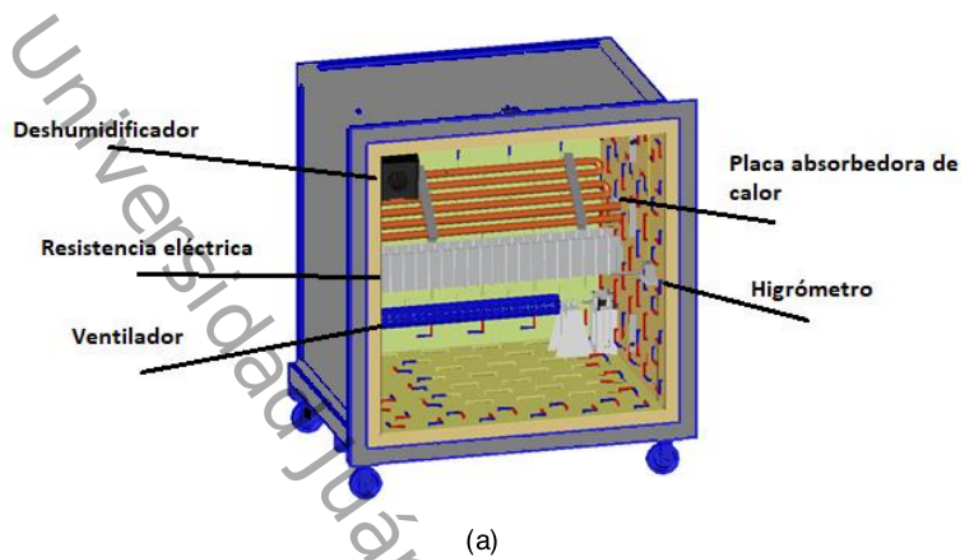


Figura 3.7. Ubicación de los dispositivos en la Cámara 2, (a) diseño y (b) fotografía del interior de la cámara.

En este experimento, se considera transferencia de calor por conducción en la envolvente y a través de la muestra, debido al diferencial de temperaturas entre las cámaras. Se considera transferencia de calor por convección natural o forzada, sobre la superficie de la muestra. La transferencia de calor por radiación no fue considerada en el estudio, debido a que las placas con resistencia eléctrica fueron

separadas de la muestra mediante una placa deflectora que evita el intercambio radiativo directo entre las placas y la muestra, como se muestra en la Figura 3.8. Además, se implementó una superficie plástica que embebe al ventilador y las resistencias, con el fin de direccionar el flujo de aire hacia las placas con resistencia para su calentamiento, ver Figura 3.7 (b).

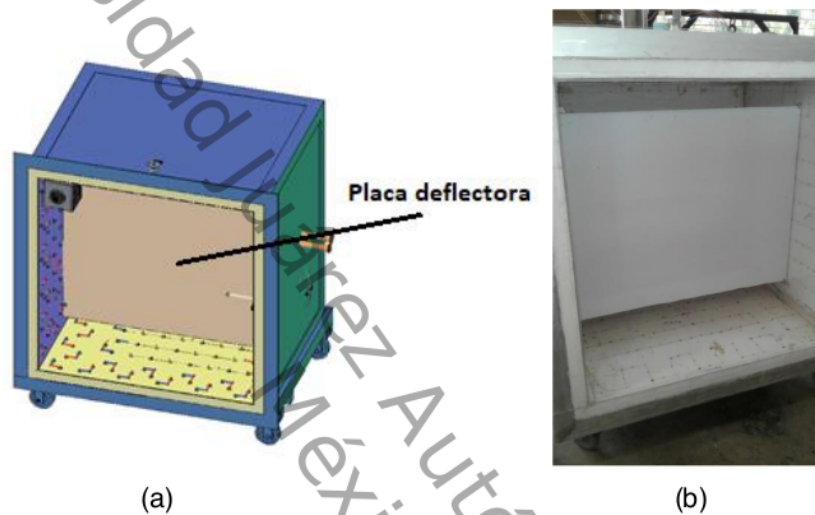


Figura 3.8. Placa deflectora implementada en ambas cámaras, (a) diseño y (b) fotografía.

3.1.3 Placas con resistencia eléctrica

Las placas con resistencia eléctrica tendrán la función de calentar el aire que circulará dentro de la cámara de ambiente controlado, y así obtener los parámetros de temperatura necesarios para simular la transferencia de calor bajo diferentes condiciones climáticas. Estas placas se construyeron con láminas de aluminio de 110 cm de largo por 15 cm de ancho y 3.175 mm de grosor (1/8 de pulgada). Posteriormente, la resistencia se implementó rodeando la placa con separación de 1.5 cm. La resistencia eléctrica utilizada es de constantán, con un grosor de 0.7 mm para el alambre y de 1 mm en conjunto con el recubrimiento. Para determinar la longitud de la resistencia eléctrica que se utilizaría para diseñar el circuito en paralelo, se determinó la resistencia unitaria del cable, para tal fin, se conectó el rollo de cable de 300 metros de largo a un multímetro y a una fuente de corriente directa, ver Figura 3.9. Para el análisis se planteó un circuito en paralelo, debido a que un circuito en serie proporcionaría una longitud de cable muy corta y no sería la suficiente para calentar la placa. La fuente suministro una potencia a través del cable, el cual hizo correr una cantidad de corriente eléctrica que fue registrada con el multímetro, la lectura obtenida fue de 794.275 Ohms de resistencia total. Con estos datos se obtuvo una resistencia lineal de 2.66 Ohms/m. Con este dato se calculó la longitud de cable necesaria para suministrar una potencia de 96 W, que es la potencia máxima proporcionada por la fuente de corriente directa que se tiene disponible para optimizar el proceso. La longitud se calculó como se muestra a continuación:

$$Resistencia\ equivalente = \frac{1}{Resist.Unitaria * Longitud} + \frac{1}{Resist.Unitaria * Longitud} \quad (27)$$

$$10.66\ \omega = \frac{1}{2.66\ \frac{\omega}{m} * L} + \frac{1}{2.66\ \frac{\omega}{m} * L}$$

$$Longitud = 8.06\ m$$

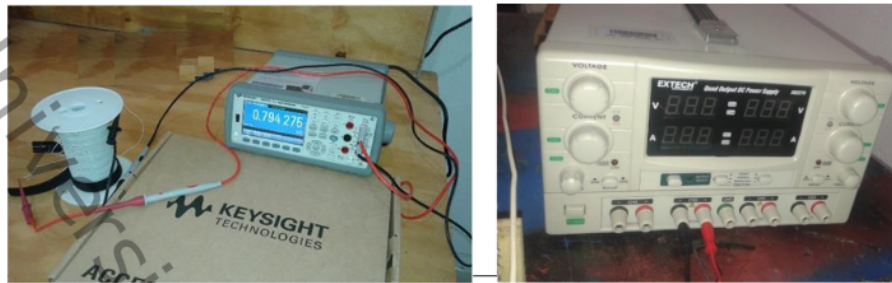


Figura 3.9. (a) Multímetro y cable de constantán para determinar resistividad y (b) fuente de corriente directa.

La colocación del cable de resistencia se realizó en forma de espiral, alternándose las secciones de cable de resistencia eléctrica, los cables fueron sujetos a la placa de aluminio con silicón y los extremos de los cables se soldaron a los cables de alimentación que se conectan a la fuente de poder. En la Figura 3.10 se presentan las tres placas terminadas, las cuales se colocaron en cada cámara utilizando soportes de alguno de acrílico, una placa en la Cámara 1 y dos placas en la Cámara 2.



Figura 3.10. Placas con resistencia con cableado colocado.

Para verificar el adecuado funcionamiento de la placa, se suministró una potencia de 96 W y se tomaron fotografías infrarrojas para estimar la máxima temperatura alcanzada. En la Figura 3.11 se presenta una imagen tomada con una cámara infrarroja marca FLIR, la cual puede estimar la temperatura de una superficie. Como puede apreciarse, algunas zonas del cable de resistencia alcanzan temperaturas cercanas a los 90 °C.

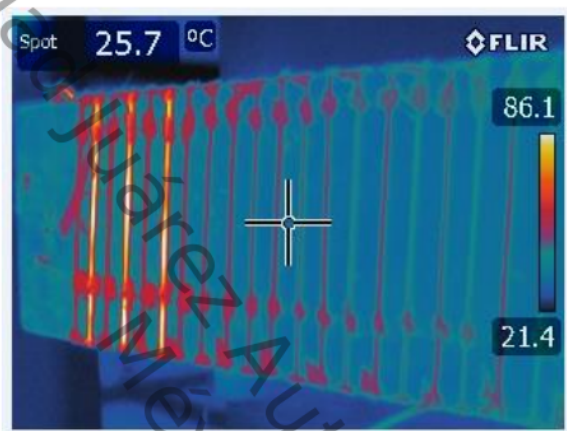


Figura 3.11. Fotografía infrarroja de una placa de resistencia.

3.1.4 CAC construida e instrumentada

En la Figura 3.12, se presenta un esquema general de la CAC completa en funcionamiento. Como se puede observar, esta consta de dos cavidades compuestas por envolventes rígidas y aislantes (Cámara 1 y Cámara 2), entre ellas se colocó una muestra de muro de mampostería que se someterá al experimento, cuyo detalle de construcción se explicará en una sección posterior. Además, de las cámaras, se puede observar que el sistema experimental consta de un dispositivo de recolección de datos (Multímetro) instalado y conectado a una computadora; del lado de la Cámara 1, se cuenta con un ventilador, del cual se aprecia la salida de cables de alimentación, y un deshumidificador, el cual se encuentra del lado opuesto, el deshumidificador de la Cámara 2 se encuentra en el mismo lado. Del lado de la Cámara 2 se cuenta con un ventilador, dos placas

de resistencia eléctrica y un intercambiador de calor, de los cuales se aprecian los cables de alimentación y el tubo de salida del intercambiador de calor conectado al sistema de enfriamiento (chiller). El chiller provee de agua fría para regular la temperatura al interior de la cámara. Las resistencias eléctricas, los higrómetros y los deshumidificadores están conectados a las fuentes de alimentación.

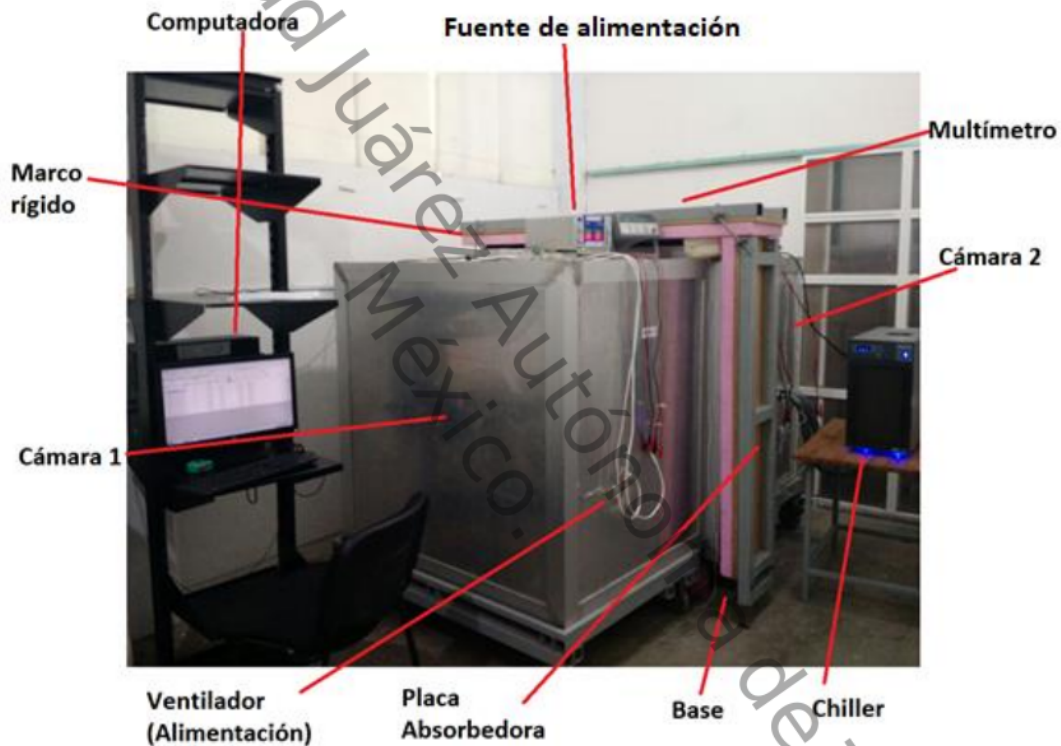


Figura 3.12. Esquema de CAC durante una prueba experimental.

3.2 Construcción de una muestra de mampostería

Para el desarrollo de la fase experimental de la investigación, se debe someter una muestra de muro de mampostería a la transferencia de calor y masa entre las dos cámaras del sistema diseñado y construido. Para la implementación de la muestra de muro, fue necesario primero construir una base de soporte que permitiera transportar la muestra y que a su vez pudiera soportar el peso de una muestra de muro de 1 m². Posteriormente, sobre la base se construye el muro.

3.2.1 Base de soporte y marco de soporte y aislante

Se requiere una base lo suficientemente resistente y estable para soportar la muestra de muro y garantizar su seguridad durante la construcción, durante los experimentos a realizar y durante su transporte. Para tan fin, se construyó una base con perfiles de acero, dotados de llantas para facilitar su movilidad. Ésta estructura se muestra en la Figura 3.13, en la cual ya se encuentra también colocada la base de mortero para colocar el muro.

Posterior a la fabricación de la base móvil para la muestra, se procedió al diseño y construcción de un marco rígido que envuelva el perímetro de la muestra de muro con el fin no solo de dar soporte a la muestra, sino también, con el fin de aislar la muestra del ambiente y propiciar una transferencia de calor unidimensional. La estructura se manufacturó en PTR de acero de 2 pulgadas (5.08 cm) y las tres paredes del marco se manufacturaron utilizando dos capas de materiales: la capa exterior con placa de madera aglomerada de 1.27 cm de espesor, y la capa interior de poliestireno extruido con un espesor de 5.08 cm. Ambas capas unidas entre sí, con pegamento para madera y en contacto directo con la muestra. Las paredes laterales se unieron al marco de la estructura con

tornillería, mientras que la pared superior consta de un sistema de fijación con espigas para fijar y ajustar la muestra, de tal forma que quede en contacto directo con las paredes del marco. Adicionalmente para evitar la transferencia de masa a través de los bordes de la muestra, se colocó un material impermeable para privilegiar la transferencia de masa unidimensional.



Figura 3.13. Marco del porta muestra con el muro.

3.2.2 Construcción de la muestra

Para la construcción de la muestra se seleccionó un tipo de mampostería, en éste caso block macizo, con dimensiones (40cm, 20cm, 8.5cm), un peso de 12.800 kg y densidad de $1882 \frac{kg}{m^3}$. La muestra de muro tiene una forma cuadrada de 1.37 m por lado, es decir $1.87 m^2$. El área de medición para el análisis de transferencia de calor y masa es de $1.21 m^2$. En la Figura 3.14 se presenta la muestra de muro recién manufacturada, y en la Figura 3.12 se presenta la muestra de muro lista para introducirse en la CAC. Las piezas de mampostería se unieron utilizando mortero Tipo II, el cual viene especificado en las Normas Técnicas Complementaria del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, el cual tiene una composición de agregado fino de 2.25 a 3 veces la cantidad de cemento Portland suministrado a la mezcla y una cantidad de agua variable de acuerdo a la plasticidad del producto resultante, este mortero debe tener una resistencia a la compresión de $75 \frac{kg}{cm^2}$.



(a)

(b)

Figura 3.14. Muestra de muro de mampostería, (a) base de acero con capa de mortero para colocar mamposterías y (b) muestra de muro.

3.3 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental recae en un primer lugar en la programación de los canales de recolección de datos del Multímetro, y en segundo lugar en la configuración de potencias e intensidades de los dispositivos de control en cada cámara de acuerdo a las necesidades del experimento.

El arreglo de canales para la adquisición de datos se muestra en la Tabla 3.3, donde se muestra a cada canal, su fuente de información y el tipo de lectura que se realizó. Posteriormente se adjunta la Figura 3.15, donde se muestra una impresión de pantalla de la configuración del programa Agilent de recolección de datos, mientras el programa realiza mediciones.

Tabla 3.3. Resumen de la configuración de canales de medición.

Canal	Lectura	Función	Unidad
1	Pared izquierda Cámara 1	DC Voltage	Volts
2	Pared base Cámara 1	DC Voltage	Volts
3	Pared fondo Cámara 1	DC Voltage	Volts
4	Pared derecha Cámara 1	DC Voltage	Volts
5	Pared arriba Cámara 1	DC Voltage	Volts
6	TP100 Cámara 1	Temp 2-Wire RTD	°C
7	Pared derecha Cámara 2	DC Voltage	Volts
8	Pared fondo Cámara 2	DC Voltage	Volts
9	Pared arriba Cámara 2	DC Voltage	Volts
10	Pared base Cámara 2	DC Voltage	Volts
11	Pared izquierda Cámara 2	DC Voltage	Volts
12	TP100 Cámara 2	Temp 2-Wire RTD	°C
13	Temperatura ambiente	Temp (Type T)	°C
14	Higrómetro Cámara 1	DC Voltage	Volts
15	Higrómetro Cámara 1	DC Voltage	Volts
16	Circuito muestra	DC Voltage	Volts

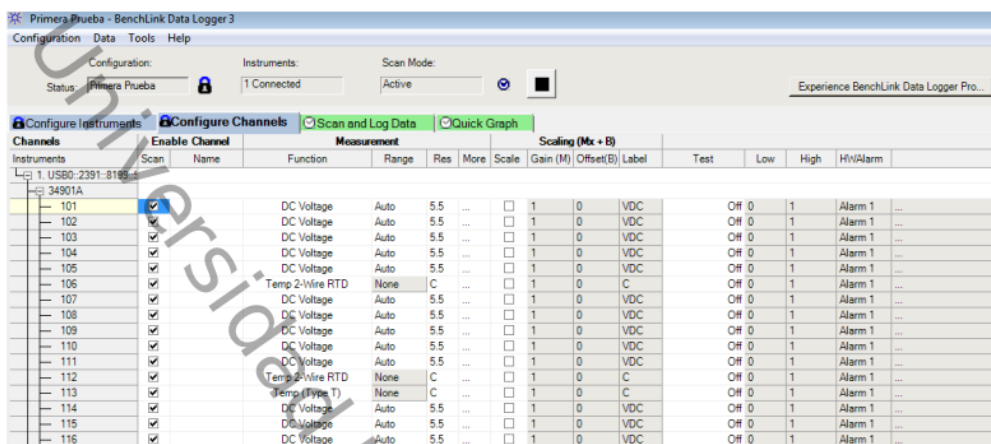


Figura 3.15. Configuración de programa Agilent.

En la Figura 3.16 se presenta un diagrama de flujo general donde se describe el procedimiento experimental para obtener el Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U) y el Coeficiente Global de Difusión de Masa (CM). El experimento experimental requiere lo siguiente:

- 1) Inicialmente se requiere comprender cuál es la prueba experimental a realizar, es decir, bajo qué condiciones de temperatura.
- 2) Una vez identificada la prueba, se debe proceder a verificar que todos los dispositivos se encuentren funcionando adecuadamente (Chiller, Resistencias, Higrómetros, Ventiladores).
- 3) Posteriormente se debe asegurar que las dos cámaras se encuentren colocadas adecuadamente, la muestra esté bien sujeta por el marco rígido y no existan espacios sin sellar entre la muestra y las cámaras 1 y 2.
- 4) Se activa la PC, el Chiller y las Resistencias.
- 5) Se activar el multímetro y el programa de adquisición de datos, verificando que los canales de lectura coincidan con la programación prevista y que todos los sensores midan correctamente.
- 6) Una vez que los equipos estén funcionando adecuadamente, y la muestra y las cámaras se encuentren en su lugar, se procederá a activar y ajustar los equipos de acuerdo a las necesidades de la prueba experimental.

- 7) La prueba transcurre hasta que el sistema alcanza el estado estable, cuando esto se alcanza el sistema continuo en operación durante 24 horas para registrar las mediciones. Transcurridas las 24 horas, el experimento se detiene y se apaga el sistema de adquisición de datos y los equipos de medición.
- 8) Finalmente se analizan los datos de acuerdo al modelo matemático presentado en el Capítulo 2 y se obtienen los resultados, los cuales serán presentados en el siguiente Capítulo.

Para la realización de las pruebas experimentales se sigue el procedimiento del diagrama de la Figura 3.16 con las consideraciones adicionales mostradas en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Aspectos a considerar para la realización de las pruebas experimentales.

Tipo de Prueba a realizar	Muestra	Observaciones adicionales
1. Calibración	Poliestireno extruido	• La muestra cuenta con transductor de flujo de calor. • Se conoce como muestra de referencia porque sus propiedades son conocidas.
2. Transferencia de calor.	Muro de block macizo	-----
3. Transferencia de masa.	Muro de block macizo	Se introduce una cantidad de agua conocida en la Cámara 1.
4. Transferencia de calor y masa en conjunto.	Muro de block macizo	Se introduce una cantidad de agua conocida en la Cámara 1.

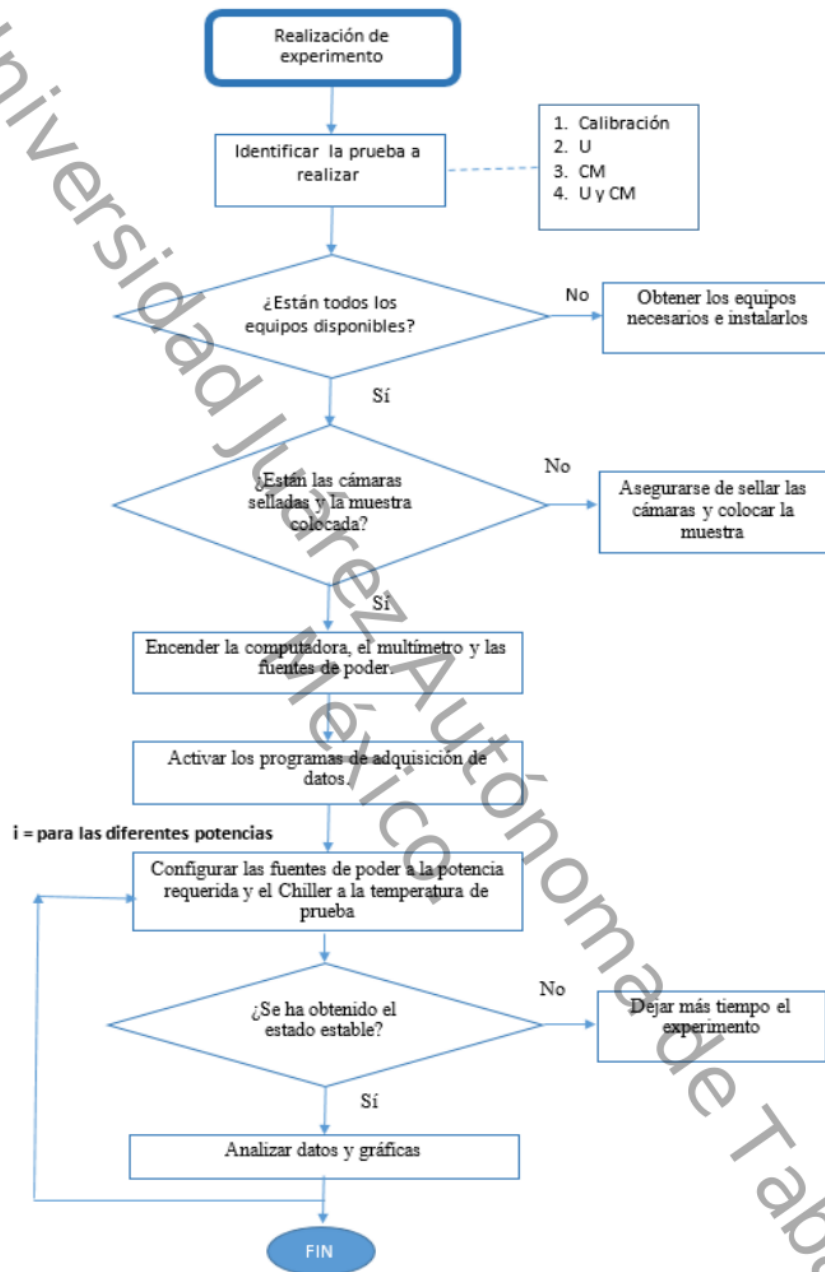


Figura 3.16. Diagrama general para la realización de las pruebas experimentales, para determinar U , CM y $U-CM$ en conjunto.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados y discusión obtenidos para el proceso de calibración de los transductores de flujo de calor de la CAC, así como para las pruebas realizadas sobre un muro de mampostería sometido a la transferencia de calor, masa y la combinación de ambas.

4.1 Calibración

El objetivo de la calibración fue ajustar las magnitudes de las ganancias o pérdidas de calor medidas mediante las placas de acrílico instrumentadas con termopares contra los flujos de calor suministradas al interior de la CAC. El ajuste es de tipo polinomial de primer grado, donde el flujo de calor suministrado es una función del flujo de calor que pasa por las paredes y los cambios de energía interna (Ec. 21).

Como puede observarse en la Figura 4.1 el mayor flujo de calor se presentó en la pared de arriba o superior (q_A), debido a que el aire caliente sube y se acumula debido a las fuerzas de flotación. Por otro lado, el flujo de calor mínimo se obtuvo en la pared de la base o inferior (q_B). Las paredes verticales, es decir, la izquierda, derecha y el fondo presentaron comportamientos similares por estar sujetas a condiciones similares. La muestra presenta la menor transferencia de calor, (q_M), respecto a las demás paredes debido a que para la calibración la muestra de referencia es un material aislante. La conductividad térmica de la muestra es de $0.027 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

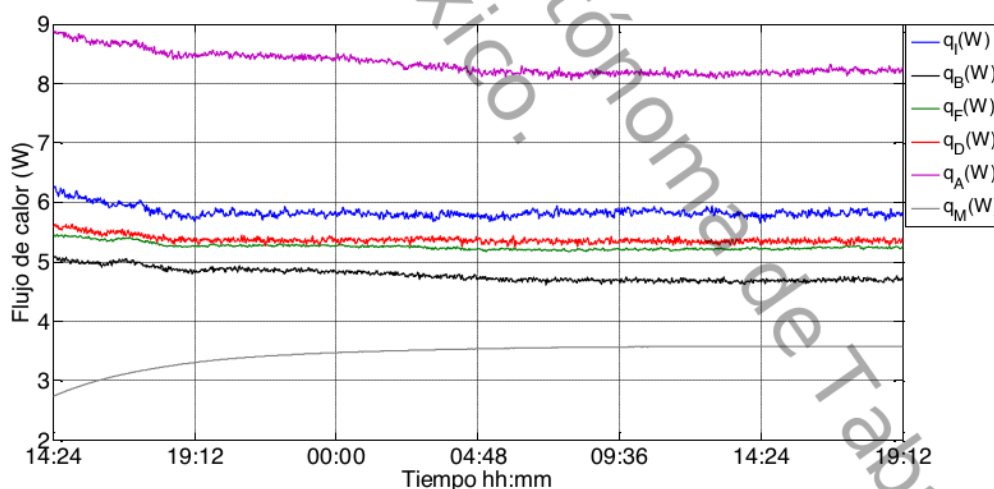


Figura 4.1. Flujos de calor por las paredes de la Cámara 1 y flujo de calor a través de la muestra.

En la Figura 4.2 se observa el flujo calor de referencia (q_{ref}), que es la diferencia entre el calor suministrado por la resistencia (q_R) y la muestra de referencia (q_{MR}), así como, la suma de los flujos de calor a través de las paredes (Σq_{C1}) y los cambios de energía interna (Δq). En el eje secundario se presenta la diferencia obtenida para el ajuste de acuerdo a la Ec. (21), donde la desviación media obtenida fue de 0.29 W con una desviación estándar de 0.35 W.

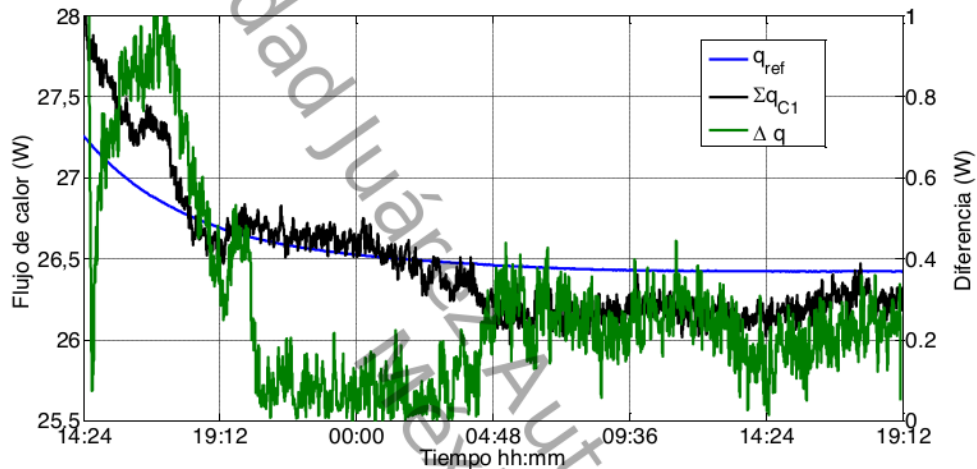


Figura 4.2. Comportamiento del flujo de calor de referencia contra flujo de calor ajustado.

En la Figura 4.3 se presenta el comportamiento del flujo de calor que pasa por la muestra de referencia, la diferencia de temperatura ambiente, así como el U . El valor de U fue en promedio de $0.425 \text{ W/m}^2\text{°C}$ con una desviación estándar de $0.001 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Con los datos obtenidos en la prueba de calibración se determinó el coeficiente convectivo-radiativo de transferencia de calor (conocido también, como el coeficiente superficial de transferencia de calor), el valor obtenido fue de $4 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Lo anterior, considerando la Ec. (12) y que el h_{int} y el h_{ext} son iguales en ambos lados de la muestra, debido a que las condiciones ambientales en la Cámara 1 y 2 son las mismas.

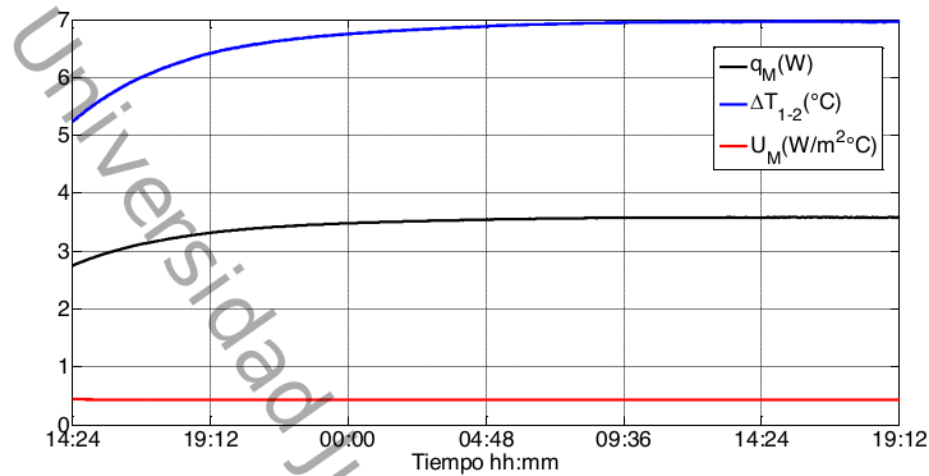


Figura 4.3. Coeficiente global de transferencia de calor de muestra de referencia.

El flujo de calor a través de las paredes de acrílico se calcula mediante el polinomio de ajuste mostrado en la Ec. (28). El primer coeficiente es debido a la diferencia entre la conductividad térmica tomada de la literatura para el acrílico y su conductividad térmica efectiva. El segundo coeficiente está relacionado con la masa térmica de la cámara.

$$q_c = 0.898 \sum_{i=1}^5 q_i + 4.016(ET) \quad (28)$$

4.2 Pruebas en la muestra de mampostería

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, las cuales se pueden dividir en tres categorías:

- Pruebas con transferencia de calor sin transferencia de masa.
- Pruebas con transferencia de masa sin transferencia de calor.
- Pruebas con transferencia de calor y con transferencia de masa (transferencia combinada).

4.2.1 Pruebas de transferencia de calor

En estas pruebas se determinó el U , para lo cual, se realizaron cuatro pruebas experimentales utilizando una muestra de muro de maspostería. Del lado de la cámara caliente (Cámara 1) se suministró una potencia de: 30.0 W (Prueba 1), 37.5 W (Prueba 2), 45.0 W (Prueba 3) y 52.5 W (Prueba 4), mientras que del lado frío (Cámara 2) se colocó el chiller a 15°C conectado al intercambiador de calor.

Cada prueba fue monitoreada y registro los datos experimentales desde el inicio hasta que la prueba alcanzó el estado estable en los valores de temperatura. En la Figura 4.4 se muestra el comportamiento de las temperaturas de las cámaras para la prueba de 30.0 W de potencia suministrada. Se puede observar que el comportamiento de ambas cámaras es muy cercano al estado estable, pues como puede apreciarse los cambios son menores a 1°C. La temperatura del ambiente en el laboratorio no se estabilizó aún con un dispositivo de aire acondicionado lo cual origina que no se alcance completamente el estado estable.

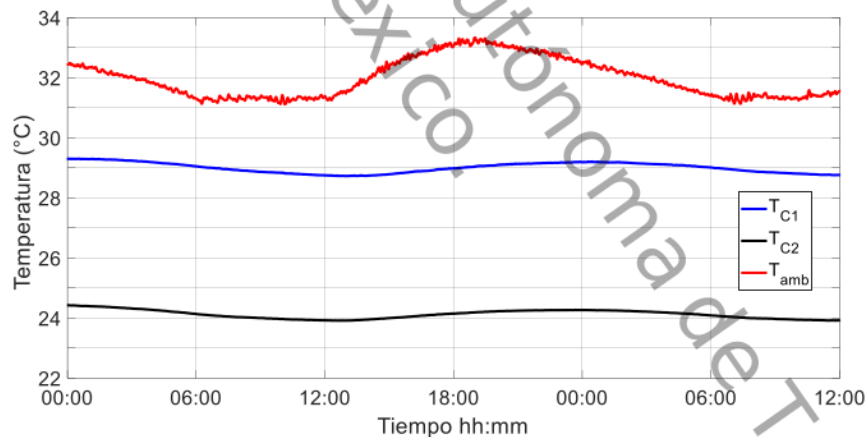


Figura 4.4. Temperaturas en las cámaras para la prueba del muro.

La Figura 4.5 muestra la relación entre la diferencia de temperaturas a ambos lados de la CAC y la magnitud del flujo de calor a través de la muestra, ambas curvas son muy similares en forma, pero se encuentran desfasadas en tiempo, esto debido a la masa térmica del muro, es decir, a la cantidad de energía

calorífica que un cuerpo puede almacenar y que éste libera cuando los gradientes de temperatura cambian.

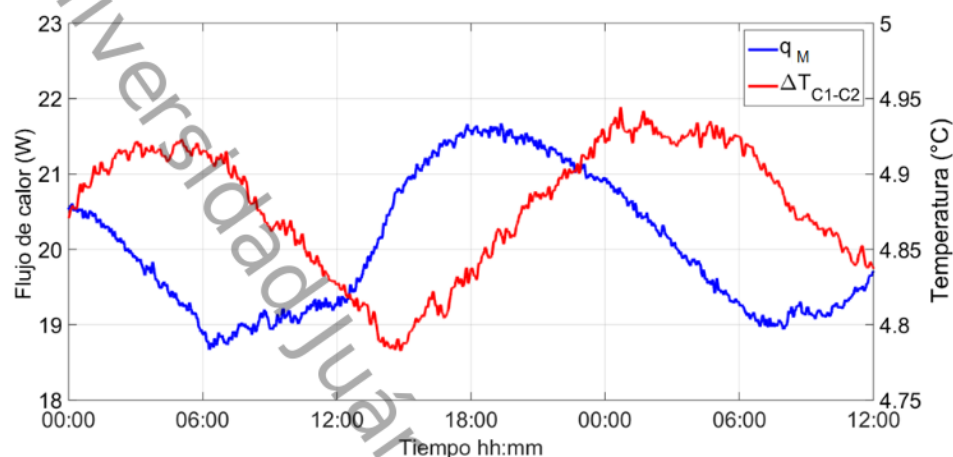


Figura 4.5. Diferencias de temperatura para el flujo de calor por la muestra.

La Tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos para las cuatro pruebas experimentales, en ella se muestra la temperatura de la Cámara 1, la diferencia de temperaturas entre ambos lados del muro, el valor de U y su desviación estándar a lo largo de la prueba, δU . En la tabla se puede observar que los valores de U oscilan desde 3.39 a 4.15 $\text{W/m}^2\text{°C}$, esto es debido a los coeficientes superficiales de transferencia de calor los cuales incrementan con la diferencia de temperatura.

Tabla 4.1. Pruebas de transferencia de calor sin transferencia de masa.

Prueba	Potencia (W)	Temperatura en la Cámara 1 (°C)	Diferencia de temperatura entre cámaras (°C)	U ($\text{W/m}^2\text{°C}$)	δU ($\text{W/m}^2\text{°C}$)
1	30.0	28.9	4.9	3.39	0.16
2	37.5	29.7	5.5	3.81	0.20
3	45.0	30.4	6.2	3.73	0.18
4	52.5	31.5	6.8	4.15	0.20

4.2.2 Pruebas de transferencia de masa sin transferencia de calor

El segundo tipo de pruebas permite cuantificar el coeficiente global de transferencia de masa estableciendo un gradiente de humedad y reduciendo el gradiente de temperatura. En la prueba se programó el chiller a 20°C con el fin de absorber el calor producido por el deshumidificador colocado en la Cámara 2. En la Tabla 4.2 se muestra un resumen de las condiciones de operación para prueba de transferencia de masa, Prueba 5. Con el fin de mantener un flujo constante de humedad se colocaron dos bandejas con medio litro de agua en la Cámara 1. En la cámara 2 el agua eliminada por el deshumidificador se recolectó y midió en una probeta, y posteriormente, se comparó con el agua evaporada de las bandejas. El agua condensada corresponde al flujo de masa total transferida a través del muro de mampostería.

Tabla 4.2. Condiciones de operación de las pruebas experimentales de transferencia de masa.

Prueba	Cámara 1		Cámara 2		
	Masa de agua	Deshumidificador	Masa de agua	Chiller	Deshumidificador
5	Si	No	No	20°C	Si

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados de la prueba de humedad, aunque se trató de reducir la diferencia de temperatura, se puede observar que solo fue posible reducirla a 1.1°C, lo cual permitió obtener un CM de 0.011 g/sm²%HR (Ec. 24).

Tabla 4.3. Resultados de transferencia de masa reduciendo la transferencia de calor.

Prueba	T1 (°C)	DT (°C)	H1 (%HR)	DH (%HR)	$\dot{m}$ (g/s)	CM (g/sm ² %HR)	δ CM (g/sm ² %HR)
5	28.4	1.1	75.35	14.65	0.00098	0.011	0.0032

4.2.3 Pruebas de transferencia de calor y masa en conjunto

Estas pruebas se realizaron para determinar el efecto que tiene la presencia de transferencia de masa sobre el proceso de transferencia de calor. En la Tabla 4.4 se muestra en orden y las características con que se realizaron las pruebas. Los valores de flujo de calor suministrado son iguales a los de las pruebas 1 a 4, con la diferencia de que en la Cámara 1 se colocaron dos bandejas con medio litro de agua y en la Cámara 2 se activó el Chiller a 15°C y se encendió el deshumidificador.

Tabla 4.4. Pruebas experimentales de calor y masa combinadas.

Prueba	Cámara 1		Cámara 2			
	Resistencia (W)	Masa de agua	Resistencia (W)	Masa de agua	Chiller (°C)	Deshumidificador
6	30.0	SI	NO	NO	15	SI
7	37.5	SI	NO	NO	15	SI
8	45.0	SI	NO	NO	15	SI
9	52.5	SI	NO	NO	15	SI

En la Tabla 4.5 se muestran los resultados para transferencia de calor y masa combinada. Como se puede observar, los valores del U incrementan en todas las pruebas conforme se incrementa la temperatura de la Cámara 1 (ver Tabla 4.4), el mismo fenómeno se puede observar para las pruebas con solo transferencia de calor, como se muestra en la Tabla 4.1. Los valores obtenidos de U presentaron una diferencia máxima promedio de 0.14 W/m²°C respecto a las pruebas con solo transferencia de calor, esto porque el paso de vapor de agua a través del muro, debido a la diferencia de concentraciones, también transporta consigo energía. Del mismo modo, los coeficientes globales de transferencia de masa presentan una tendencia hacia arriba conforme se aumenta la temperatura de la Cámara 1.

Tabla 4.5. Pruebas de transferencia combinada.

Prueba	T1 (°C)	DT (°C)	HR _{c1} (%)	DHR (%)	$\dot{m}$ (g/s)	CM (g/sm ² % HR)	δCM (g/m ² %HR)	U (W/m ² °C)	δU (W/m ² °C)
6	29.3	3.1	70.30	11.4	0.0010	0.007	0.0015	3.54	0.15
7	30.8	4.3	66.30	4.98	0.0013	0.022	0.0031	3.92	0.19
8	32.7	4.8	63.50	1.65	0.0014	0.078	0.0021	3.80	0.18
9	33.9	5.8	63.16	0.03	0.0015	0.1181	0.0024	4.29	0.16

Los valores obtenidos del U en las pruebas de solo transferencia de calor y en las pruebas de transferencia combinadas, se encuentran dentro del intervalo de los valores teóricos calculados para el block macizo unido con cemento, de acuerdo a los valores de conductividad térmica y los coeficientes convectivos reportados en la NOM-020-ENER [1]. El valor obtenido con los valores de [1] y la Ec. (12) es de 3.98 W/m²°C, lo anterior para un muro de 1.37 m × 1.37 m, considerando un 96% de block macizo, un 4% de cemento para las uniones, un h_{int} de 8.1 W/m²K y un h_{ext} de 13 W/m²K. Los valores de los coeficientes convectivos son obtenidos de acuerdo al Apéndice B de la NOM-020-ENER [1]. Como se puede notar el valor teórico obtenido para un muro similar, 3.98 W/m²°C, respecto al máximo valor obtenido para el muro de mampostería de este estudio, 4.29 W/m²°C presenta una diferencia de 0.31 W/m²°C.

Por otra parte, los valores obtenidos del CM de la muestra de muro muestran que se presenta una máxima migración de agua de 0.1181 gramos por segundo por cada m² y cada 1% de diferencia de humedad relativa. Estos resultados indican que en 24 horas del día se podría tener una migración de humedad de hasta 10.203 kg de agua. Por el momento, no ha sido posible comparar los valores obtenidos de CM con los reportados en la literatura, lo anterior debido a que en la literatura solo se reportan curvas de secado de muestras de block de concreto y otros materiales.

4.3 Referencias bibliográficas

[1] NOM-020-ENER-2011. Eficiencia energética en edificaciones.- Envoltente de edificios para uso habitacional. Diario Oficial de la Nación: 09/08/2011.
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5203931&fecha=09/08/2011

CAPÍTULO 5**Conclusiones**

- En este trabajo fue posible obtener un prototipo experimental de una CAC capaz de proporcionar la información necesaria para determinar las propiedades higrotérmicas de una muestra de muro de mampostería de block macizo de dimensiones $1.10 \text{ m} \times 1.10 \text{ m}$, con un espesor de 8.5 cm.
- La CAC desarrollada, a diferencia de los reportados en la literatura, permite cuantificar el flujo de calor a través de cada una de las paredes de su envolvente, con lo cual pueden obtenerse los coeficientes globales de transferencia de calor y masa con certidumbre.
- Los resultados obtenidos del análisis del muro de mampostería mostraron que para el análisis de transferencia de calor y masa combinada los valores del U incrementan en todas las pruebas conforme se incrementa la temperatura de la Cámara 1 con un valor máximo de $4.29 \text{ W/m}^2\text{C}$. Este mismo fenómeno se pudo observar para las pruebas con solo transferencia de calor, donde el valor máximo fue de $4.15 \text{ W/m}^2\text{C}$. El mayor valor de U se presentó en la prueba de transferencia de calor y masa combinada debido a que el paso de vapor de agua a través del muro, debido a la diferencia de concentraciones, también transporta consigo una cantidad de energía. Los valores de U obtenidos, se encuentran dentro del intervalo del valor teórico calculado con los datos de la NOM-020-ENER, con una diferencia de tan solo $0.31 \text{ W/m}^2\text{C}$.
- Respecto a la muestra de muro de mampostería, se concluye que al utilizar este muro se tendría una infiltración de humedad máxima de 0.0015 g/s para un CM de $0.1181 \text{ g/sm}^2\%\text{HR}$ y mínima de 0.0010 g/s para un CM de $0.007 \text{ g/sm}^2\%\text{HR}$, debido a que conforme incrementa la temperatura disminuye la diferencia de humedad relativa entre las cámaras. Los valores obtenidos del CM de la muestra de muro dieron como resultado un valor

máximo de 0.1181 gramos por segundo por cada m^2 y cada 1% de diferencia de humedad relativa. Esto significa que en 24 horas del día se podría tener una infiltración de humedad de hasta 10.203 kg de agua, esta cantidad de agua con el paso del tiempo podría saturar el aire interior de una habitación ocasionando problemas de salud por el crecimiento de hongos y mohos, contribuyendo al dis-confort higrotérmico. Los resultados obtenidos indican que es necesario reducir estos coeficientes, lo cual podría realizarse adicionando al muro capas de otros materiales que mejoren su desempeño higrótermico.

Estudio experimental para la determinación de coeficientes de difusión de calor y masa en muros de vivienda

ORIGINALITY REPORT

14%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	pt.scribd.com Internet	401 words — 3%
2	jcyta.cenidet.tecnm.mx Internet	390 words — 3%
3	docslide.us Internet	335 words — 3%
4	repositoriodspace.unipamplona.edu.co Internet	114 words — 1%
5	es.slideshare.net Internet	108 words — 1%
6	core.ac.uk Internet	81 words — 1%
7	www.buenastareas.com Internet	69 words — 1%
8	es.scribd.com Internet	55 words — < 1%
9	tecnol.es Internet	52 words — < 1%
10	hdl.handle.net Internet	

43 words — < 1%

11 www.academia.edu
Internet

37 words — < 1%

12 archive.org
Internet

30 words — < 1%

EXCLUDE QUOTES ON

EXCLUDE BIBLIOGRAPHY ON

EXCLUDE SOURCES

OFF

EXCLUDE MATCHES

< 20 WORDS