

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y MINAS

**“METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE PROPIEDADES
TERMO FÍSICAS DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS”**



T E S I S

TODOS LO ILUMINAN

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

CARLOS EDUARDO QUIJADA GONZÁLEZ

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

I.I.- Introducción.....	1
I.II.- Objetivo General	4
I.III.- Objetivos Particulares	4
I.IV.- Justificación	4
I.V.- Antecedentes	7
I.VI.- Metodología	10

CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

II.I.- Revisión Bibliográfica	12
-------------------------------------	----

CAPÍTULO III: MODELO TEORICO EN QUE SE BASA EL FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO DE MEDICIÓN

III.I.- Mecanismos de transferencia de calor	18
III.II.- Conducción	19
III.III.- Convección	20
III.IV.- Radiación.....	22
III.V.- Propiedades termo físicas de los materiales	27
III.VI.- Variables de medición.....	30
III.VII.- Estado transitorio y estado estable	31
III.VIII.- Modelo de transferencia de calor en muros constructivos huecos o macizos.....	34

CAPÍTULO IV: DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO PARA LA MEDICIÓN

IV.I.- Descripción general del sistema (TR-01)	35
IV.II.- Descripción del gabinete de pruebas TR-01	36

IV.III.- Porta muestras	38
IV.IV.- Sensores de medición	40
IV.V.- Descripción de equipos	41
IV.VI.- Funcionamiento	44
CAPÍTULO V: METODOLOGÍA DE MEDICIÓN	
V.I.- Descripción de la muestra.....	45
V.II.- Diseño de morteros.....	46
V.III.- Fabricación de la muestra (secado, colocación dentro de gabinete)	50
V.IV.- Puesta en marcha	52
CAPÍTULO VI: RESULTADOS Y ANÁLISIS	
VI.I.- Recolección de datos, elaboración de gráficas y resultados	56
VI.II.- Cálculo de R en muros.....	68
CONCLUSIONES.....	71
BIBLIOGRAFÍA	73
ANEXOS.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1	Representación esquemática de la Ley de Fourier.	19
Figura 3.2	Transferencia de calor por convección.	21
Figura 3.3	Transferencia de calor por radiación.	22
Figura 3.4	Esquema representativo del factor de vista.	25
Figura 3.5	Analogía entre resistencia eléctrica y resistencia térmica.	28

Figura 3.6	Flujo de calor a través de un muro.	32
Figura 4.1	Descripción general del sistema TR01.	36
Figura 4.2	Vista isométrica del gabinete de prueba.	38
Figura 4.3	Porta muestras para muro escala real.	39
Figura 4.4	Sensores de medición termopar tipo K.	41
Figura 4.5	Sistema recirculador y enfriador (Chiller).	42
Figura 4.6	Resistencias eléctricas conectadas en paralelo.	42
Figura 4.7	Fuente de poder.	43
Figura 4.8	Adquisidor de datos.	43
Figura 4.9	Monitoreo de datos en tiempo real.	44
Figura 5.1	Base de madera rellena de poliuretano expandido.	50
Figura 5.2	Primera hilada con pegamento.	51
Figura 5.3	Levantamiento del muro de ladrillo perfectamente plomeado.	51
Figura 5.4	Ubicación de termopares en superficie fría.	53
Figura 5.5	Ubicación de termopares en superficie caliente.	54
Figura 5.6	Ejemplo de estabilización y uniformidad del sistema.	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Ecuaciones de transferencia de calor.	26
Tabla 3.2	Conductividades térmicas de algunos materiales a temperatura ambiente.	29
Tabla 5.1	Pruebas mecánicas de ladrillo.	47
Tabla 5.2	Prueba de absorción de ladrillo.	48
Tabla 5.3	Análisis granulométrico de la arena.	49
Tabla 6.1	Resultados de medición de triplay de madera.	57

Tabla 6.2	Resultados de medición de hoja de tablaroca.	60
Tabla 6.3	Resultados de medición de placa de poliestireno.	63
Tabla 6.4	Resultados de medición del muro de mampostería.	66
Tabla 6.5	Cálculo de la resistencia térmica.	68
Tabla 6.6	Comparación de conductividad térmica.	69

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 6.1	Estado transitorio de la corrida 1 de madera.	58
Gráfica 6.2	Estado transitorio de la corrida 2 de madera.	58
Gráfica 6.3	Estado estable de la corrida 3 de madera.	59
Gráfica 6.4	Estado transitorio de la corrida 1 de tablaroca.	61
Gráfica 6.5	Estado transitorio de la corrida 2 de tablaroca.	61
Gráfica 6.6	Estado estable de la corrida 3 de tablaroca.	62
Gráfica 6.7	Estado estable de la corrida 1 de poliestireno.	64
Gráfica 6.8	Estado estable de la corrida 2 de poliestireno.	64
Gráfica 6.9	Estado transitorio de la corrida 3 de poliestireno.	65
Gráfica 6.10	Estado transitorio de la corrida 1 del muro de mampostería.	67
Gráfica 6.11	Estado estable de la corrida 1 del muro de mampostería.	67

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

I.I. – Introducción.

Debido a que existe una gran tendencia al agotamiento de recursos energéticos no renovables en nuestro planeta, en México existen diversos organismos, como FIDE (Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica) y CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía), que han tratado de implementar y llevar a cabo la norma oficial mexicana NOM-008-ENER-2001, de Eficiencia Energética en Edificaciones, Envolvente de Edificios no Residenciales, para el ahorro de energía en edificaciones, y también la NOM-020-ENER-2011 para edificios residenciales. Varias de estas estrategias han sido aplicadas en México, pero no han sido tan eficaces como para hacer que se utilicen los materiales aislantes adecuados en la construcción de edificios.

Con relación a la omisión de la utilización correcta de materiales aislantes, existe un alto consumo de energía eléctrica en zonas con climas extremos debido a que se quiere mantener la edificación dentro de la zona de confort. En regiones extremadamente cálidas se presentan temperaturas muy altas en verano y bajas

en invierno, el cual hace que la edificación sufra grandes variaciones en la temperatura, en la cual la mayoría de ellas no están protegidas para adaptarse a las condiciones climáticas locales. Puesto a que nuestra región está en una zona de alta radiación solar, se presenta aumento en la temperatura interior de las edificaciones, debido a la baja resistencia térmica de los materiales con que éstas se construyen.

Actualmente, en el ámbito de la edificación, existen algunas variables para el estudio de la respuesta térmica entre el edificio y el medio ambiente, como son principalmente, el clima y el tipo de material empleado para la construcción de muros y techos. Para el estudio de la evaluación térmica de materiales en muros constructivos en edificaciones se requiere tomar en cuenta el material empleado y el entorno climático en el cual se encuentra desplantado. Con esta información se procede al estudio del comportamiento térmico de materiales de construcción.

En las edificaciones de menos de tres niveles, la mayor parte de transferencia de calor en una edificación se da por el techo, sin embargo, los muros también contribuyen de manera importante al calentamiento interior. Cabe mencionar que los techos que tradicionalmente eran a base de concreto armado en la mayoría de las construcciones, se han modificado a sistemas aligerados de vigueta y bovedilla de poliestireno expandido, principalmente. En cambio los muros sin acondicionar no han tenido variaciones durante décadas. La mayoría de los muros construidos en viviendas son a base de materiales de arcilla recocida o bloque de concreto vibroprensado cuyas propiedades aislantes no son suficientes cuando están en

contacto con el exterior. Es por ello que los materiales con que se construye una vivienda tiene una gran importancia para su desempeño térmico.

Existen estudios teóricos y experimentales acerca de estas propiedades en muros de edificaciones, obteniendo sus propiedades termo físicas. En un estudio teórico para ladrillos de terracota huecos se muestra que la resistencia térmica disminuye con respecto al aumento de los diferenciales de temperatura (Vasile et al., 1998). En un estudio experimental para un muro de bloques de concreto hueco se estimó la resistencia térmica del material a una temperatura ambiente de 48°C en verano (Borbón et al., 2009).

Con el conocimiento de las propiedades térmicas se pueden establecer criterios adecuados para el uso de materiales de construcción en función del clima, por lo que los estudios de estas propiedades ofrecerían opciones de mejor aplicación. En este trabajo se describirá la metodología de medición de variables que permitan calcular la resistencia térmica de sistemas constructivos de muros a escala real.

El proyecto se desarrollará en base a un dispositivo existente en el Laboratorio de Análisis Térmico de Materiales dentro del Laboratorio Experimental de Ingeniería Civil como un producto del proyecto de investigación "Desarrollo de una Metodología para estimar eficiencia energética en viviendas en base al desempeño térmico de sistemas constructivos" CONACYT 2011-1, bajo la dirección de la Dra. Ana Cecilia Borbón Almada como responsable técnico.

I.II. – Objetivo General.

Elaboración de una metodología para la medición de variables que permitan calcular las principales propiedades termo físicas de sistemas constructivos, mediante un dispositivo semiautomático de medición.

I.III. – Objetivos Particulares

- Descripción del dispositivo de medición para el cálculo de la conductividad y resistencia térmica de materiales de construcción.
- Elaboración y descripción de la muestra a escala real tipo muro.
- Medición de la muestra en el gabinete de pruebas con el cálculo de gráficas y resultados de conductividad térmica.
- Elaboración de guía metodológica para la utilización del aparato de medición semi automatizado.

I.IV. – Justificación.

La mayoría de las viviendas de interés social, en México, son construidas en base a componentes constructivos, cuyo comportamiento térmico como materiales aislantes no es el adecuado; esto se debe principalmente a que el poder adquisitivo de los usuarios de vivienda social, no permite tener acceso a mejores viviendas donde se refleja el diseño y la calidad de los materiales.

En la construcción de obra civil uno de los componentes constructivos más comunes son las mamposterías a base de bloques de concreto hueco y tabiques, que no han demostrado tener un comportamiento térmico adecuado al medio ambiente. Estos utilizan tanto elementos prefabricados como los elaborados en el sitio para conformar una o más unidades.

Este tipo de materiales o más correctamente dicho, “componentes constructivos”, como los bloques y ladrillos, son ampliamente utilizado en la vivienda social, ya que es un material económico que permite construir en tiempo y costo, dando la posibilidad de ofrecer viviendas accesibles pero que carecen de las características térmicas que debe tener la envolvente constructiva.

La calidad de la mampostería está sujeta a especificaciones de normas y reglamentos particulares, según sea el caso. Las normas que se utilizan son la ASTM (American Society for Testing and Materials) y las NMX (Normas Mexicanas), principalmente. En ellas se definen conceptos, especificaciones y procedimientos que se deben cumplir en cada uno de los materiales que conforman una mampostería como el elemento o pieza que se fabrica con ellos.

Es por ello, que para la obtención de una buena calidad en la construcción se debe de tener una buena comunicación y entendimiento entre el dueño, el arquitecto, el ingeniero y el contratista, siendo la supervisión la actividad que finalmente determine la calidad alcanzada por lo que es importante que la persona que realice esta actividad sea competente y honesta.

Un aspecto relevante en el tema de la vivienda es que va en crecimiento, proyectándose construir miles de ellas al año para solventar la necesidad de vivienda de la población; esto indica que el uso es generalizado y grandes volúmenes de estos componentes sigue en aumento, y es importante tomar en cuenta el efecto que esto puede causar en términos de diseño ambiental.

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, se construyen aproximadamente un total de 750,000 casas al año en todo el país (2010). Por lo tanto, se espera que esta cifra vaya en aumento y es por ello que se deben realizar más estudios sobre la eficiencia térmica de los materiales en las viviendas de interés social.

Debido a que en las ciudades que se encuentran en región de clima extremadamente cálido, se llega a altas temperaturas durante la mayor parte del año, con la mayoría de los días soleados, se debe construir la vivienda con materiales que respondan a las necesidades básicas del ser humano, desde el punto de vista de confort térmico humano. Debido a que se llega a altas temperaturas en verano, se recurre al enfriamiento artificial lo cual genera altos consumos de energía eléctrica, trayendo como consecuencia el deterioro del medio ambiente debido a que existen más emisiones de CO₂, además de afectar a la economía familiar.

La falta de estudios en el medio de la construcción en México, sobre la respuesta térmica de los materiales en viviendas, hace que sea difícil la aplicación para diferentes ciudades con climas similares, puesto que existen diferencias que hay

que tomar en cuenta de una región a otra, por lo tanto no es lo mismo tomar en cuenta la forma de construcción de la zona sur del país, donde el clima es más húmedo, con respecto a la de nuestra región.

Esto refleja la necesidad de adquirir o desarrollar dispositivos de medición para conocer el comportamiento térmico de componentes y sistemas constructivos, que nos arrojen información del sitio de interés.

Existen pocos estudios en materiales constructivos en nuestro país, sin embargo se pueden citar algunos como: "Modelación y simulación de la transferencia de calor en muros de bloque de concreto hueco" (Borbón, 2010), que es una base teórica para el desarrollo de este trabajo.

Por lo antes expuesto, existe una necesidad de realizar estudios experimentales para conocer el comportamiento de este tipo de materiales y proponer un mejoramiento en ellos. En el presente trabajo se pretende describir la metodología para realizar una medición de variables que permitan desarrollar el análisis del comportamiento térmico de sistemas constructivos.

I.V.- Antecedentes.

En el ámbito de la edificación existe una gran variedad de componentes sólidos para la construcción, en el cual, los bloques y ladrillos ocupan una gran tendencia a su utilización por ser un material barato y de fácil colocación, sin embargo se han detectado que son componentes con baja resistencia térmica.

Con el constante aumento de la población en México, existe una demanda mayor de casas-habitación, por lo que se han incrementado la construcción de viviendas en nuestro entorno y el uso de estos componentes.

Existen trabajos acerca de la medición de propiedades térmicas en edificios con diferentes materiales en distintas partes del mundo. Internacionalmente se han desarrollado metodologías para la evaluación térmica de materiales, como la medición de la envolvente de un edificio con un sistema prefabricado (Ossama, 1996), donde se determina la resistencia térmica del material envolvente por medio de flujo de calor y diferencia de temperatura, basados en la norma ASTM-C177. En otro caso, se han monitoreado variables como la temperatura del aire y la humedad relativa al interior de las viviendas de regiones de clima cálido (Gallegos y Romero, 1996) en el cual se han encontrado que sin utilización de equipos de climatización los valores están muy lejos de la zona de confort térmico humano.

Existen antecedentes de estudios experimentales en México acerca de la medición del comportamiento térmico en muros de bloques de concreto (Borbón, 2010) en donde se presenta un diseño y construcción de un dispositivo de pruebas para obtener la resistencia térmica de un muro de bloques de concreto hueco reproduciendo las condiciones de operación para edificaciones ubicadas en clima cálido seco y se determina la resistencia térmica en forma experimental y numérica.

Los estudios descritos con anterioridad son presentados de manera general, sin embargo, para llevar a cabo este trabajo de tesis se aplicarán condiciones de operación a muros elaborados con diferentes materiales sometiéndolos a diferenciales de temperatura para determinar su comportamiento térmico.

Se propone para la presente metodología de investigación, enfocarse en el estudio del ambiente térmico para el interior de una vivienda en condiciones no tan favorables, como es el caso del verano, donde se pueden obtener resultados que pueden servir para imponer un uso adecuado de los materiales de construcción en climas con altas temperaturas. Cabe mencionar que la metodología propuesta se plantea para cualquier clima.

Es importante la realización de este tipo de metodologías, puesto que existen pocos trabajos acerca del tema y es necesario conocer las propiedades termo físicas de los materiales de construcción por todo lo que se ha discutido.

En el presente trabajo se miden tres materiales ligeros de uso común en la construcción: madera, tablaroca y foamular, debido al fácil manejo de las muestras. Además de la realizar la medición del muro de mampostería a escala real.

I.VI.- Metodología.

El presente trabajo se desarrolla con la siguiente metodología:

1. Revisión bibliográfica: En este primer caso se hace una recopilación y estudio previo sobre otros trabajos de investigación a través del mundo lo más parecido al desarrollado en este caso.
2. Descripción general del dispositivo (TR-01): El dispositivo de medición cuenta con un sistema de placas intercambiadoras de calor, resistencias eléctricas, fuentes de poder y equipo de accionamiento semi automatizado.
3. Funcionamiento general: Para este caso se describe con una serie de pasos a seguir para poner en marcha y obtener el correcto funcionamiento del dispositivo de medición.
4. Descripción de la muestra: Se realiza una breve descripción de la muestra a medir, teniendo muy en cuenta las medidas establecidas para este sistema de medición y los diferentes materiales prefabricados o contruidos para el análisis.
5. Fabricación de la muestra: En el caso de ser una muestra fabricada en el lugar de trabajo se procede a la construcción de esta, teniendo en cuenta las normas mencionadas en este trabajo para la elaboración de morteros; en caso de que sean muestras prefabricas se procede al acondicionamiento del material para el dispositivo.
6. Medición de la muestra: Colocación de la muestra dentro del gabinete de pruebas, siguiendo con el accionamiento del sistema de cierre automático,

fijando las temperaturas con el encendido de la fuente de poder y chillers para la placa caliente y fría respectivamente, encendiendo el adquisidor de datos y software para el inicio de la corrida.

7. Resultados de la medición: Aquí es donde se procede a la captura de los datos en hojas de Excel, en el cual se realiza la gráfica correspondiente que muestra el estado estable de la medición, además de obtener los resultados de cada uno de los sensores de medición, calculando un promedio de la placa fría y caliente, y calcular así la conductividad y resistencia térmica.
8. Guía de utilización: Se realiza una metodología paso a paso para poder realizar una prueba en este dispositivo de medición, además del funcionamiento de cada uno de los equipos que lo conforman.
9. Conclusiones: Se dan los resultados y experiencias obtenidas en este trabajo de tesis para este tipo de muestras examinadas.

CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

II.1.- Revisión bibliográfica.

El problema que existe con la transferencia de calor en sistemas constructivos se ha tratado con anticipación por algunos autores, donde se presentan resultados de estudios teóricos y experimentales sobre su comportamiento térmico. La resistencia térmica es una de las principales variables para determinar la eficiencia térmica de los sistemas constructivos.

En la revista epistemus de la Universidad de Sonora se publicó un estudio realizado acerca del comportamiento térmico de una vivienda de interés social en clima cálido seco y su relación con el confort (Borbón et. Al, 2012) en la cual se toma una vivienda de interés social deshabitada de la zona norte de la ciudad, con un sistema constructivo a base de muros de bloque de concreto hueco y cubierta de vigueta y bovedilla, donde se describe el comportamiento térmico al interior de la vivienda; tomando temperaturas horarias promedio mensuales durante 3 meses con equipos automáticos de adquisición de datos, donde se realiza un análisis de los resultados de la medición para establecer las superficies de mayor

calentamiento para cada orientación, obteniendo como conclusión que se necesita bajar más de 12°C en las horas más cálidas del día para asegurar las condiciones de la zona de confort térmico.

Por otra parte, se encuentra un estudio de la conductividad térmica de un concreto con agregados de puzolana (Arvizu J., Córdova J. F., 2011) donde se estudia el comportamiento de un concreto fabricado a base de agregados de puzolana natural y cemento portland CPC 30R, diseñando la mezcla para cumplir con la resistencia mínima descrita por la norma mexicana de la construcción, evaluando la conductividad térmica y la resistencia mecánica de un concreto a base de agregados de puzolana natural sin aditivos.

Otro trabajo de investigación sobre estimación experimental de conductividad térmica en materiales de construcción (Gallegos et. Al 1997) se habla acerca del cálculo de la conductividad térmica en dos especímenes cilíndricos, uno de yeso y otro de concreto, sobre el cual se colocaron una serie de termopares en distintos puntos de la base cilíndrica; además de colocarle un suministro de energía con resistencias eléctricas y colocando cada uno de los termopares al adquisidor de datos instalado en una computadora, almacenando información cada 60 segundos y obteniendo gráficas de las temperaturas de cada termopar. Se concluye que con la estimación de la conductividad térmica de estos materiales, a través del diseño experimental, se pueda llevar a cabo una evaluación eficiente de otro tipo de materiales de construcción, puesto que la conductividad térmica del yeso y del

concreto fue similar a los rangos establecidos en el libro transferencia de calor de Cengel, 2004.

En otro caso particular se realiza un estudio sobre la concepción y construcción de un dispositivo para medir la conductividad térmica de materiales para edificaciones (Casas V., Ríos T., 1996) en el cual se realiza la construcción de un dispositivo para la medición de la conductividad térmica mediante un sistema el cual fue desarrollado por ellos, tomando como recipiente para la medición una lata cilíndrica de aceite monogrado para motores a gasolina, montando los sensores de medición y la resistencia eléctrica dentro de este, conectados a un amperímetro y voltímetro para conocer su amperaje y voltaje en el sistema, además de a un regulador de voltaje para evitar la oscilación en el amperímetro y voltímetro, creando un dispositivo en el cual se colocan las muestras realizadas para proceder al cálculo de la conductividad térmica de estos materiales.

Existe un trabajo de investigación de “Diseño y construcción de un sistema experimental para la determinación de la resistencia térmica de bloque de concreto” (Piña, 2007) en el cual se realizaron varias pruebas a un bloque de concreto hueco, una de ellas utilizando dos placas de aluminio, otra con los orificios del bloque relleno de arena y la otra con los orificios rellenos de poliestireno expandido. Todas estas pruebas realizadas con distinto diferencial de temperatura. El gabinete con el cual se realizaron las pruebas cuenta con 2” de poliestireno para mantener completamente aislado el sistema, una base de madera de pino de ¼” que sirve de base además de su baja conductividad

térmica, láminas de aluminio para eliminar al máximo la transferencia de calor por radiación y una tapadera que tiene la función de presionar los especímenes con las placas de aluminio y garantizar un buen contacto entre los termopares y los especímenes. Se concluyó que la resistencia más baja la presentó el bloque hueco y la más alta la del bloque relleno de poliestireno expandido (aislante térmico).

En el trabajo de tesis sobre “Diseño y construcción de un medidor de difusividad térmica para materiales de construcción” (Rascón, 1999) se muestran los resultados obtenidos con un gabinete de pruebas hecho de diferentes materiales de construcción, como yeso, ladrillo común, concreto de 150 y 200 kg/cm², mortero, cemento, tabla roca, termocel y mosaico, entre otros; en los cuales se obtiene la difusividad térmica de estos materiales a partir del cálculo mediante el gabinete de pruebas y su adquisidor de datos, colocando termopares en diferentes puntos del espécimen de prueba, regulando la temperatura con un circuito eléctrico formado de un reóstato, dos multímetros y una resistencia eléctrica la cual convierte la energía eléctrica en calor. Se puede concluir de este trabajo que los valores obtenidos utilizando este aparato de medición, para los materiales de construcción descritos anteriormente, son muy aproximados al rango de valores en el cual se manejó en la bibliografía. Por tanto, se puede inducir que con el trabajo realizado con este medidor se pudo realizar una base de datos sobre los materiales de construcción más utilizados en la región de Hermosillo, Sonora.

Debido a que nuestra región se encuentra en una zona climatológica seca y extremosa, es necesario buscar alternativas para mantener en una zona de confort la edificación como lo es aire artificial. Hoy en día contamos con el manual de la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc) (ASHRAE, 2001) que es más utilizado en Estados Unidos de América, pero en México es bastante utilizado puesto que tiene un gran contenido de características sobre propiedades termo físicas de los diferentes materiales con que se construye a lo largo de toda la región de los Estados Unidos de América. La Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, de Eficiencia Energética en Edificaciones, Envolverte de Edificios no Residenciales, además de la NOM-020-ENER-2011, de Eficiencia Energética en Edificaciones, Envolverte de Edificios Residenciales es un ejemplo en el cual se aprecia el avance en la evaluación térmica en edificaciones en nuestro país.

Se cuenta con la ayuda de una norma mexicana (NMX-C-460-ONNCCE) en la cual se establece los valores de la resistencia térmica total "R" que se aplica a las viviendas para mejorar las condiciones de habitabilidad y disminuir la demanda de energía utilizada para acondicionar térmicamente su interior.

En base a la información encontrada se puede decir que existen algunos dispositivos de medición elaborados por investigadores mexicanos para medir propiedades térmicas de materiales constructivos.

El método de medición que se describe en este trabajo está basado en un prototipo anterior, "Evaluación térmica de muros de bloque para vivienda" (Borbón,

2010), con un funcionamiento similar, solo que con una tecnología menos avanzada.

La diferencia entre el prototipo anterior y el TR-01 que se describe en este trabajo estriba en que el sistema de medición del TR-01 es semiautomático, con sistemas de cierre hermético que permiten sellar completamente la muestra para evitar pérdidas al medio circundante y lograr que ésta se estabilice en menos tiempo consiguiendo la transferencia de calor en estado estable unidireccional para tomar las mediciones y realizar los cálculos correspondientes.

La revisión bibliográfica encontrada muestra que existen pocos proyectos de investigación realizados en donde se construyen dispositivos de medición de propiedades térmicas de materiales, esto se debe a la dificultad de obtener financiamiento pues resultan ser actividades caras de financiar. Por lo tanto se encuentran más estudios teóricos y de simulación. Es recomendable siempre corroborar las simulaciones con mediciones.

CAPÍTULO III: MODELO TEÓRICO EN QUE SE BASA EL FUNCIONAMIENTO DEL DISPOSITIVO DE MEDICIÓN.

III.1.- Mecanismos de transferencia de calor.

De acuerdo con la ciencia de la termodinámica, la energía es una propiedad que no se puede determinar directamente; solo a través de sus efectos, como lo es el valor de la temperatura de un sistema bajo consideración.

El calor es energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura. La transferencia de calor es la energía liberada de un sistema a otro con menor temperatura, debido únicamente a la diferencia de temperaturas (Cengel, 2004).

Es por ello que en los muros existe una gran transferencia de calor debido a los cambios extremos de temperatura que se presentan en nuestra región.

Los mecanismos físicos de transferencia de energía son complejos, usualmente se acepta clasificarlos en conducción, convección y radiación.

III.II.- Conducción.

El fenómeno de transferencia de calor por conducción es un proceso de propagación de energía en un medio sólido, líquido o gaseoso, mediante comunicación molecular directa o entre cuerpos a distintas temperaturas. La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de la interacción entre esas partículas.

Los primeros adelantos acerca de la conducción de calor se deben en gran parte a los esfuerzos del matemático francés Fourier (1882) que propuso la ley que hoy se conoce como ley de conducción de calor de Fourier o segunda ley de la termodinámica y su expresión define la conductividad térmica λ .

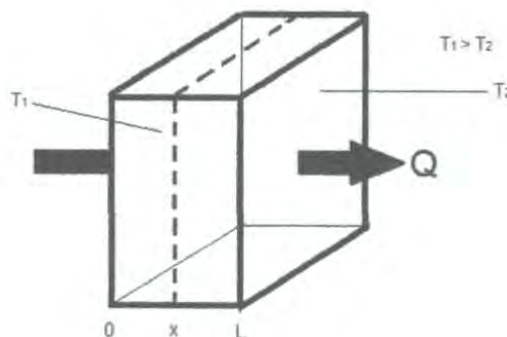


Figura 3.1: Representación esquemática de la Ley de Fourier.

Donde:

Δx = Espesor (m).

ΔT = Diferencial de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

λ = Conductividad térmica (constante de proporcionalidad, $\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$).

Q = Flujo de calor por conducción (W).

A = Área de transferencia de calor (m^2).

Ecuación:

$$\frac{Q}{A} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \therefore Q = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad 3.1$$

Mediante esta ecuación se puede determinar la transferencia de calor por conducción en un sistema, siempre y cuando la conductividad térmica y el gradiente de temperatura sean conocidos.

III.III.- Convección.

El fenómeno de transferencia de calor por convección es un proceso de transferencia de energía que se lleva a cabo entre una superficie sólida y un fluido (líquido o gas), relacionado íntimamente con su movimiento. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección.

Para calcular el flujo de calor disipado por el sistema en términos de diferencial de temperatura entre la superficie y el flujo, se usa:

$$Q = h_c A (T_s - T_\infty) = h A \Delta T \quad 3.2$$

Donde:

h_c = Coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2\text{°C}$).

A = Área de transferencia de calor (m^2).

T_s = Temperatura de la superficie ($^{\circ}C$).

T_{∞} = Temperatura del fluido ($^{\circ}C$).

Q = Flujo de calor (W).

Donde a esta ecuación se le conoce como la Ley de Enfriamiento de Newton. El fenómeno de transferencia de calor por convección se clasifica en convección forzada y convección libre. El primer caso, el fluido se hace pasar sobre el sistema mediante la acción de algún agente externo, por ejemplo un ventilador. En el segundo caso, resulta como una consecuencia de los gradientes en densidad que esta experimenta, al estar en contacto con una superficie a mayor temperatura, un ejemplo sería el radiador en el sistema de enfriamiento de un motor de automóvil.

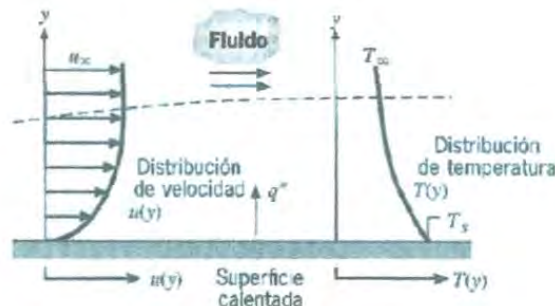


Figura 3.2: Transferencia de calor por convección.

III.IV.- Radiación.

La radiación es la energía emitida por la materia en la forma de ondas electromagnéticas. Cualquier cuerpo con una temperatura mayor del cero absoluto emite radiación térmica, siendo la radiación dependiente de la temperatura absoluta del cuerpo y de sus características superficiales.

Sin importar la forma de la materia, la radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas cuantitativas.

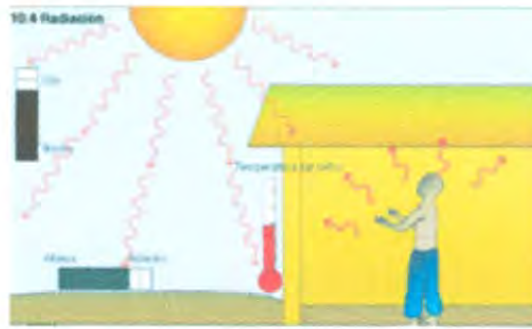


Figura 3.3: Transferencia de calor por radiación.

Un cuerpo negro es aquel que emite energía radiante de su superficie a una razón proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia. Es decir:

$$Q = \sigma T^4 \quad 3.3$$

Donde σ es una constante que adquiere un valor igual a $5.667 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$, se conoce como la constante de Stefan-Boltzmann.

Un cuerpo real no satisface las características de un cuerpo negro, dado que emite una menor cantidad de radiación que este, denominado cuerpo gris, de donde se conoce la ley de Stefan-Boltzmann:

$$Q = \varepsilon\sigma T^4 \text{ (Ley de Stefan-Boltzmann)} \quad 3.4$$

Donde:

ε = Emitancia de la superficie gris y es numéricamente igual al cociente de la emisión de radiación de un cuerpo gris, con respecto a la de uno negro.

Q= Energía radiante, W/m^2 .

σ = Constante de Stefan Boltzmann – $5.6697 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$.

T= Temperatura absoluta en K.

La radiación térmica es energía emitida por materia que se encuentra a una temperatura finita y puede presentarse en superficies sólidas, en líquidos o gases. Independientemente del estado de agregación de la materia, la emisión puede atribuirse a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. La radiación que es emitida por una superficie, se origina de la energía térmica de la materia; a la rapidez que es liberada la energía, por unidad de área (W/m^2) se le llama potencia emisiva de la superficie.

Donde ε es una propiedad de la superficie menor que la unidad, denominada emisividad. La emisividad depende del color y el acabado superficial del material y es numéricamente igual al cociente de la emisión de radiación de un cuerpo gris, con respecto a la un cuerpo negro.

$$\varepsilon = \frac{E_g}{E_b} \quad 3.7$$

Sustituyendo la potencia emisiva del cuerpo gris por Q/A y despejando Q :

$$Q = \sigma \varepsilon A T_s^4 \quad 3.8$$

Para calcular el intercambio neto de calor entre dos cuerpos, se calcula la fracción de la radiación emitida por un cuerpo "1" y que es interceptada por un cuerpo "2"; denominado *factor de vista* o *forma* F_{12} o F_{21} , Como lo indica la figura 3.4.

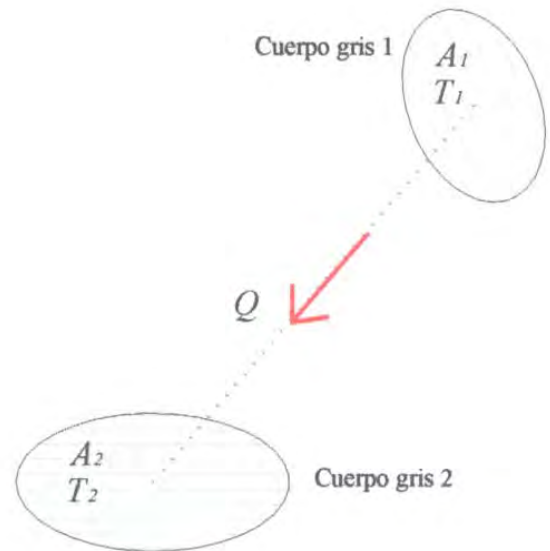


Figura 3.4 Esquema representativo del factor de vista.

Sustituyendo las propiedades de cada material en la ecuación 3.8, el flujo de calor neto es:

$$\Delta Q = \sigma(\varepsilon_1 A_1 F_{12} T_1^4 - \varepsilon_2 A_2 F_{21} T_2^4) \quad 3.9$$

El emisor ideal denominado cuerpo negro, emite radiación térmica de acuerdo con la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$e_b = \sigma T_s^4 \quad 3.5$$

Donde:

e_b = Potencia emisiva del cuerpo negro (W/m^2)

T_s = Es la temperatura absoluta de la superficie ($^{\circ} K$)

σ = Es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.667 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)

De esta Ley se deduce que la superficie de todo cuerpo negro emite radiación, si es que se encuentra a una temperatura diferente del cero absoluto, independientemente de las condiciones ambientales. Dado que un cuerpo real emite una menor cantidad de radiación que un cuerpo negro, se define la emisividad (ε) de un cuerpo y entonces la *potencia emisiva* de un cuerpo gris es igual a:

$$E_g = \sigma \varepsilon T_s^4 \quad 3.6$$

Un caso especial es el flujo de calor entre dos placas paralelas muy grandes de área A , emisividad ε y factor de vista F .

$$\Delta Q = \sigma \varepsilon A F (T_1^4 - T_2^4) \quad 3.10$$

Haciendo algunas simplificaciones la ecuación anterior puede expresarse como:

$$\Delta Q = -h_r A (T_1 - T_2) \quad 3.11$$

Donde h_r es el coeficiente radiativo y se determina de acuerdo con la expresión:

$$h_r = \sigma \varepsilon A F (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) \quad 3.12$$

Resumen de modos de transferencia de calor:

Mecanismo de transferencia de calor	Descripción	Modelo
Conducción	Transporte de calor por movimiento molecular	$Q = -kAr \frac{\Delta T}{x}$
Convección	Por movimiento molecular más transferencia de energía por movimiento global.	$Q = hAr\Delta T$
Radiación	Transferencia de calor por ondas electromagnéticas.	$Q = \varepsilon\sigma T^4$

Tabla 3.2: Ecuaciones de transferencia de calor.

Para el caso de este estudio solo se considera transferencia de calor por conducción en una dirección.

III.V.- Propiedades termo físicas de los materiales.

Para el estudio de los materiales de construcción siempre se debe de tener en cuenta varios factores que no cambian debido a que tienen propiedades intangibles, como son la resistencia térmica y la 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 moléculas adyacentes o a sustancias con las que no está en contacto. En el Sistema Internacional de Unidades la conductividad térmica se mide en $W/(K \cdot m)$ (equivalente a $J/(s \cdot K \cdot m)$ o $W/m^{\circ}C$). Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor de calor y cuando el valor es bajo quiere decir que es un mal conductor de calor o que es un buen aislante.

La resistividad térmica es el inverso de la conductividad y es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de oponerse al paso del calor, sin embargo la resistencia térmica de un material, se puede decir que es la capacidad del material de oponerse al flujo de calor expresada por unidad de área y un espesor específico y conocida la conductividad térmica y el espesor del material la resistencia térmica es:

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

3.13

Cuando un material es más resistente al flujo de calor quiere decir que este tipo de muestra es un material que cuenta con un alto grado a resistir cambios de temperatura. Entre más alto sea el resultado de la resistencia térmica quiere decir que este tipo de material es un buen aislante puesto que se opone al paso de transferencia de calor.

Para el cálculo del flujo de calor q se realiza una analogía con la corriente eléctrica emitida por una fuente de poder, entre la resistencia eléctrica y la resistencia térmica de la siguiente manera:

$$i = \frac{V}{R_e} \iff q = \frac{\Delta T}{R_t}$$

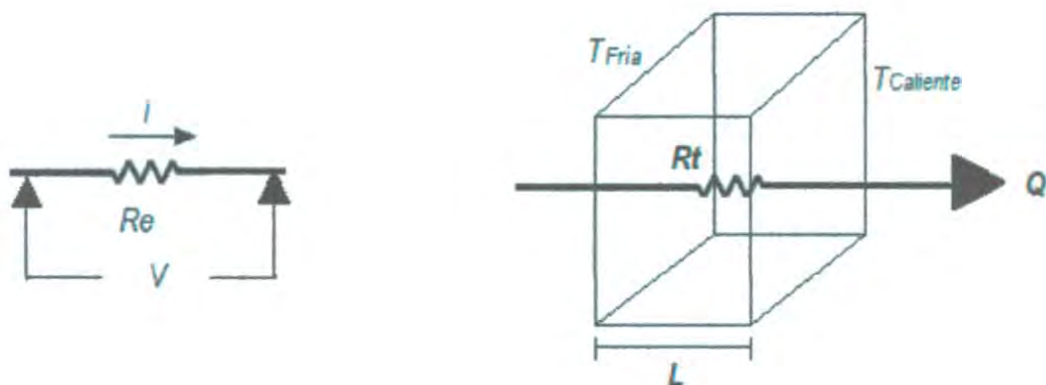


Figura 3.5: Analogía entre resistencia eléctrica y resistencia térmica.

Material	k, W/m.°C
Diamante	2 300
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80.2
Mercurio (l)	8.54
Vidrio	0.78
Ladrillo	0.72
Agua (l)	0.613
Piel humana	0.37
Madera (roble)	0.17
Hielo (g)	0.152
Caucho suave	0.13
Fibra de vidrio	0.043
Aire	0.026
Uretano, espuma rígida	0.026

Tabla 3.1: Conductividades térmicas de algunos materiales a temperatura ambiente

(Cengel Y., 2007).

III.VI.- Variables de medición.

Para comprender un poco mejor las variables de medición es fundamental describir un poco cada una de éstas. En el caso del voltaje, se define como la diferencia de potencial a lo largo de un conductor cuando una corriente de un amperio utiliza un vatio de potencia. La unidad utilizada en el Sistema Internacional es V.

Por otra parte, el amperaje es una unidad de intensidad de la corriente eléctrica del Sistema Internacional (A) que equivale a la intensidad de una corriente eléctrica constante que, al fluir por dos conductos paralelos de longitud infinita situados en el vacío y separados entre sí un metro, produce una fuerza de 2×10^{-7} newton por metro.

En el caso de la superficie, se puede decir que es la magnitud que expresa la extensión de un cuerpo en dos dimensiones, largo y ancho. La unidad utilizada en el Sistema Internacional para este caso es el metro cuadrado (m^2).

Por último, para la temperatura se deduce que es una magnitud física que refleja la cantidad de calor, ya sea de un cuerpo, de un objeto o del ambiente. Dicha magnitud está vinculada a la noción de frío (menor temperatura) y caliente (mayor temperatura).

Tomando en cuenta las variables de medición descritas, voltaje y amperaje, que se proporciona a la fuente de poder para calentar la placa por medio de las resistencias eléctricas, y que posteriormente calientan la muestra, se mide una

tercera variable que es la temperatura de superficie de la muestra por medio de un sistema de termopares integrado al dispositivo.

III.VII.- Estado transitorio y estado estable.

En general, la temperatura de un cuerpo varía con el tiempo así como con la posición. En el estado transitorio se considera la variación de la temperatura con el tiempo así como con la posición, mientras que en el estado estable la temperatura de un cuerpo en cualquier punto no cambia con el paso del tiempo.

Para el caso del estado transitorio en una medición de un material en el gabinete TR-01, se puede observar notoriamente en la gráfica que es la parte cuando el sistema empieza a correr desde la temperatura ambiente que toman los termopares, hasta que el sistema empieza a tomar la misma temperatura con respecto al tiempo; generalmente siempre se reconoce con una curva.

Por otra parte, para reconocer el estado estable en una medición, ésta es fácil de ubicarse puesto que se nota que los termopares toman la misma temperatura con respecto al tiempo y no hay cambio alguno; en la gráfica se observa con una línea recta. Es ahí cuando se dice que el sistema está listo para calcular su resistencia térmica.

En el presente trabajo se hará uso de la Ley de Fourier para el cálculo de flujos de calor (W) y de la Resistencia Térmica de elementos Constructivos homogéneos, utilizando los valores de voltaje y amperaje de la fuente de poder para el cálculo de la R .

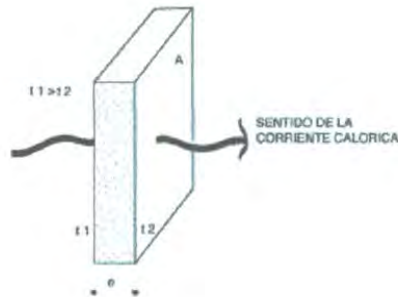


Figura 3.6: Flujo de calor a través de un muro.

Para el cálculo de la variable q en este caso se procede a la siguiente ecuación:

$$q = \frac{V * I}{A} \quad 3.14$$

Donde:

V = Voltaje de la fuente (V).

I = Intensidad de la fuente (A).

A = Área del espécimen de prueba (m^2).

Expresado en W/m^2 .

Para el cálculo de la conductividad térmica se utiliza la siguiente expresión:

$$\lambda = q * \frac{e}{\Delta T} \quad 3.15$$

Donde:

q= Flujo de calor (W/m²)

e= Espesor (m)

ΔT= Diferencial de temperatura (°C)

Cuando se desconoce la conductividad térmica de los materiales y se requiere estimar la resistencia térmica de forma experimental como es el caso del presente trabajo, la resistencia térmica se estima con la siguiente expresión:

$$R = \frac{\Delta T}{q} \quad 3.16$$

Donde:

ΔT= Diferencial de temperatura entre las placas (°C)

q= Flujo de calor (W/m²).

Donde el diferencial de temperatura ΔT se obtiene mediante la diferencia de temperatura promedio entre la superficie fría y la superficie caliente respectivamente cuando la muestra se encuentre en estado permanente.

III.VIII.- Modelo de transferencia de calor en muros constructivos huecos o macizos.

Para el cálculo de la resistencia térmica del material en un muro de construcción se utiliza la siguiente formula:

$$R = \frac{\Delta T_{muro}}{q} \quad 3.17$$

Donde:

ΔT_{muro} = Diferencia de temperatura promedio de las superficies del muro (°C).

q = Flujo de calor (W/m^2).

Para el presente trabajo solo se utilizará el concepto de conducción debido a que la muestra está conformada solo de material macizo y este material no cuenta con cavidades como en el caso del bloque de concreto hueco, que para ello se utilizaría el concepto de convección y radiación, ya que en este caso se presentan los 3 mecanismos acoplados.

Para la obtención de la Resistencia Térmica de manera experimental, que es el objetivo principal de este trabajo, se obtiene " ΔT_{muro} ", restando los valores de las temperaturas de las superficies medidas en los lados exteriores del muro, cuando alcanza el estado estable, y " q " se obtiene multiplicando el voltaje por el amperaje de la fuente de poder que calienta el muro.

CAPÍTULO IV: DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO PARA LA MEDICIÓN

IV.II.- Descripción general del sistema (TR-01).

Con base en la norma ASTM – C177, anteriormente descrita, se ha desarrollado un dispositivo de medición para la obtención de variables que permitan calcular la resistencia térmica de sistemas constructivos tipo muros (elementos verticales opacos), como se aprecia en la figura 4.1.

El sistema general de medición de resistencia térmica consta de las siguientes partes:

- Gabinete de pruebas.
- Fuente de poder (unidad de calentamiento).
- Placas intercambiadoras de calor TEMP PLATE (sistema de enfriamiento).
- Chillers (sistema recirculatorios de agua para el enfriamiento de las placas).
- Adquisidor de datos y termopares.

- Computadora (acoplada al adquisidor de datos).
- Equipo electro neumático semiautomático para el movimiento de las placas.

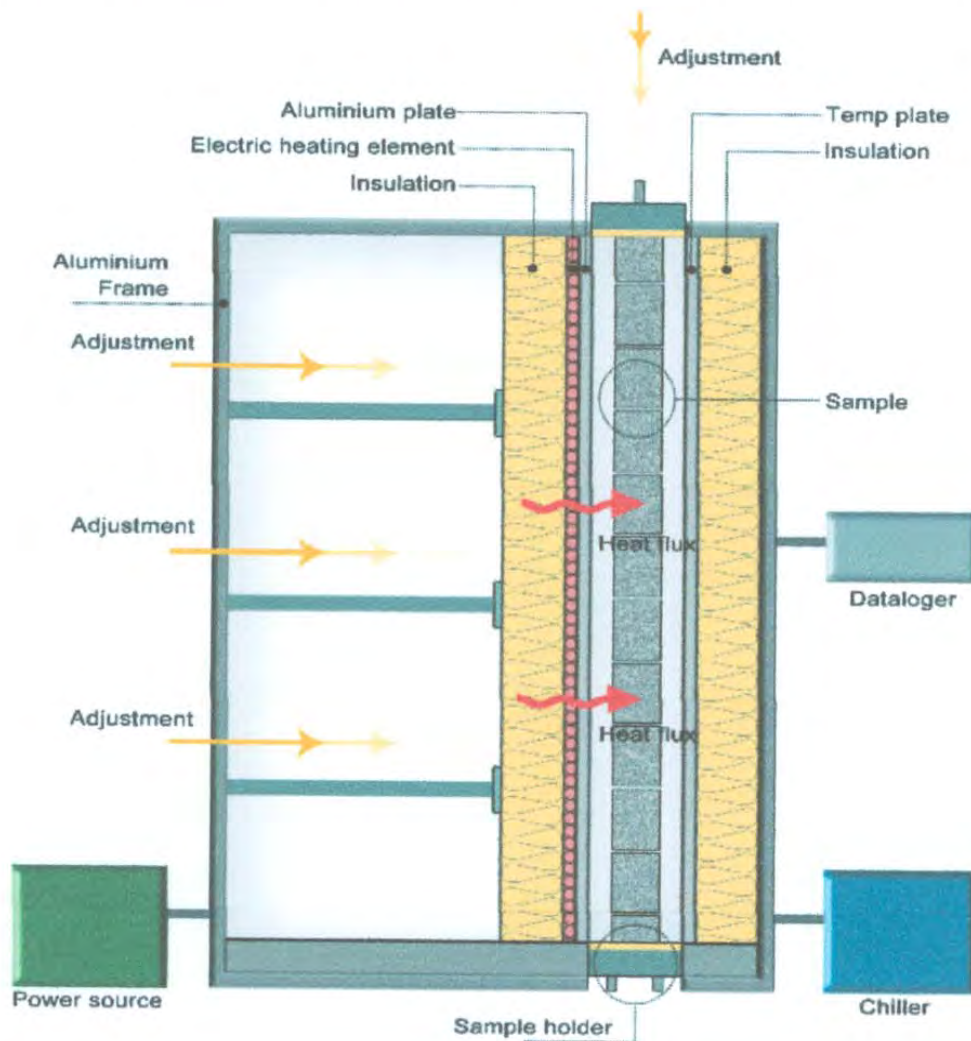


Figura 4.1: Descripción general del sistema TR01 (Borbón, 2013).

IV.II.- Descripción del gabinete de pruebas TR-01.

Se le nombra gabinete de prueba al dispositivo en donde se coloca el espécimen para su estudio. Los termopares, las placas con las resistencias eléctricas y las placas intercambiadoras de calor forman dos unidades, una de calentamiento y otra de enfriamiento, que son los lados de la muestra tipo muro a evaluar.

En su interior, se encuentran dos placas a base de aluminio, ajustables y moldeables a los desperfectos de construcción del espécimen, una en la cual se encuentran resistencias eléctricas conectadas en paralelo a una fuente de poder, y la otra cuenta con cuatro placas a base de acero inoxidable en la cual circula agua mediante chillers. Estas placas de aluminio son ajustables y moldeables debido a que cuentan con un sistema de resortes y pistones que hacen que las placas se ajusten al espécimen, asegurando también una presión uniforme verticalmente de contacto.

En la parte inferior del gabinete se cuenta con una base movable horizontalmente la cual recibirá el espécimen de prueba y podrá ser transportada para mantener contacto uniforme entre las placas. La parte de la base donde descansa el muro también se encuentra aislada. La parte superior se encuentra cerrada por una estructura de cierre automático, por lo cual se encuentra en total aislamiento del ambiente exterior.

El gabinete se encuentra totalmente aislado mediante fibra de vidrio y poliestireno de varios espesores, manteniéndolo sellado.

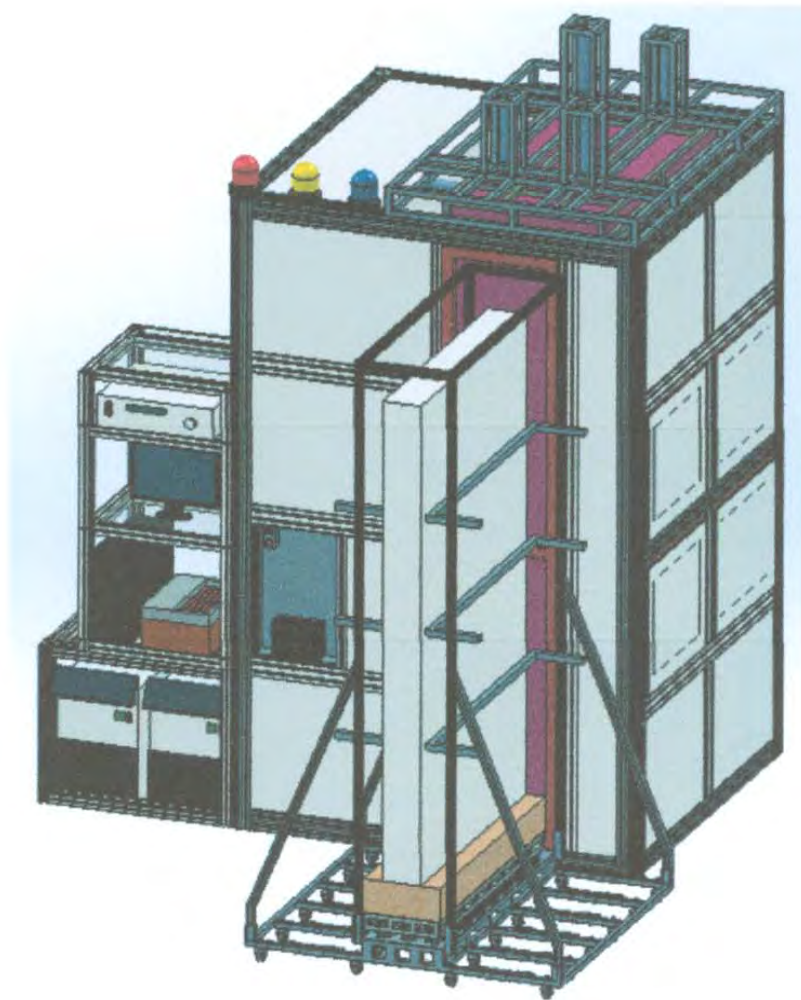


Figura 4.2: Vista isométrica del gabinete de prueba.

IV.III. – Porta muestras.

A) Para el caso de muestras de mamposterías.

La muestra se construye sobre una base rodante de 1.40 m de ancho por 1.20 m de largo por 2.70 m de alto con 30 ruedas para deslizarse libremente sobre el suelo; la base deslizante en la cual está apoyada la muestra descansa sobre 56 ruedas la cual hacen que se pueda introducir al sistema de medición a base de placas verticales.

Además, el porta muestras cuenta con un sistema de amortiguadores en la pared vertical los cuales hacen que el muro se mantenga en su posición y no tenga movimientos verticales bruscos, evitando así el posible derrumbe de la muestra. También cuenta con barras laterales separadas cada 0.5 m. para evitar el movimiento al momento de la fabricación.



Figura 4.3: Porta muestras para muro escala real.

B) Para el caso de muestras de materiales prefabricados (sin porta muestras).

Para la obtención de la muestra de este tipo de materiales, primeramente se tiene que contar con la hoja comprada en su presentación de fábrica, que normalmente son de 1.20 x 2.40 mts. Se tiene que realizar un corte de altura, puesto que en el

gabinete se coloca, para este tipo de muestras, a una altura de 2 metros, respetando el ancho de 1.20 metros.

Posteriormente, se coloca en el interior del gabinete, presionándola con el accionamiento de los pistones, asegurándose de que la muestra haga un contacto uniforme con la placa fría y la placa caliente. Una vez corroborado lo anterior, se prosigue al aislamiento en la parte superior e inferior con placa de poliestireno para asegurar que la muestra se encuentra protegida de cualquier corriente de aire del exterior que pueda modificar la medición.

IV.IV.- Sensores de medición.

Un termopar es un dispositivo de estado sólido que se utiliza para convertir la energía en voltaje. Consta de dos metales diferentes convergentes en una junta.

Los termopares comerciales se designan por letras (T, E, J, K, R) que identifican los materiales que contienen; se especifican generalmente por su sensibilidad o coeficiente térmico.

En este trabajo, para la medición de temperatura se utilizaron termopares tipo K hechos de una aleación de hierro-cromo de calibre 24.

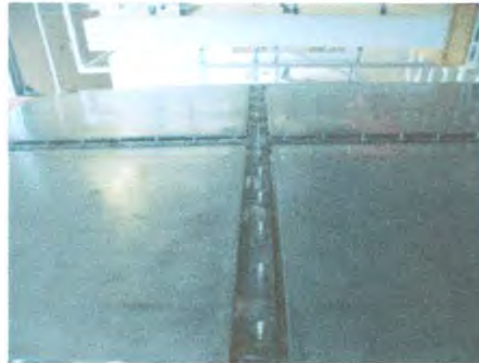


Figura 4.4: Sensores de medición termopar tipo K.

IV.V.- Descripción de equipos.

Para la parte fría se utilizan dos equipos enfriadores (chillers), con un rango de operación de entre 0 y 50°C, con un porcentaje de incertidumbre de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, como el que se muestra en la figura 4.5. Éstos van conectados a los temp plate, que son placas de acero inoxidable de doble pared hueco por donde circula el agua a la temperatura de la prueba y permite que las placas se enfríen.



Figura 4.5: Sistema recirculador y enfriador (Chiller).

Por la parte caliente se encuentran montadas una serie de resistencias eléctricas marca Watlow con una resistencia máxima de 1200 Watts. En total se encuentran 12 resistencias en paralelo colocadas por la parte trasera de la placa caliente y llegan a levantar hasta 100°C , como se muestra en la figura 4.6.



Figura 4.6: Resistencias eléctricas conectadas en paralelo.

Para suministrar energía a las resistencias eléctricas, se cuenta con una fuente de poder 6030A system power supply marca Agilent Technologies, con una potencia máxima de 1000 Watts, como se puede ver en la figura 4.7.

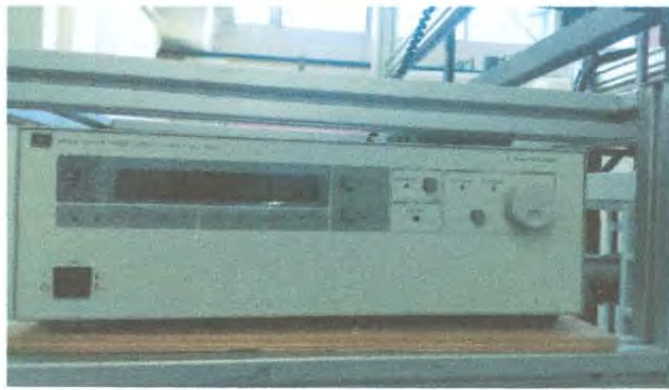


Figura 4.7: Fuente de poder.

Se cuenta con un adquisidor de datos marca Campbell Scientific con 4 tarjetas CR-723T Analog Input Card con RTD de catorce canales cada una, como se aprecia en la figura 4.8. Los rangos estándar de temperatura para este equipo son de -25°C a $+50^{\circ}\text{C}$. Este equipo utiliza el software Logger Net 3.3.1, que permite el monitoreo de sistema en tiempo real, como se muestra en la figura 4.9.



Figura 4.8: Adquisidor de datos.

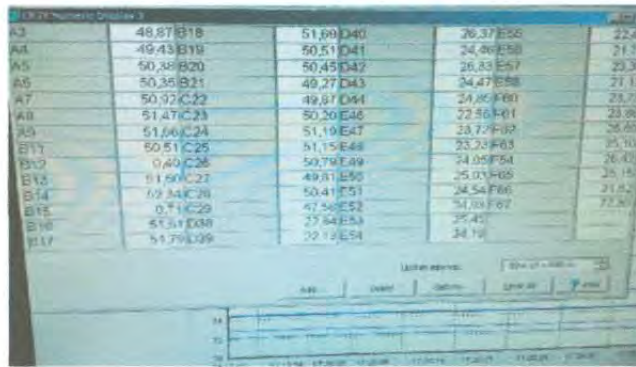


Figura 4.9: Monitoreo de datos en tiempo real.

IV.VI.- Funcionamiento.

Para poner en funcionamiento el gabinete, y ya que se encuentre la muestra dentro de él, se procede con el accionamiento del sistema, manteniendo la muestra con una presión uniforme con los pistones y estando en funcionamiento la placa fría y caliente. Los sensores de medición toman temperaturas de acuerdo a la programación del software del adquisidor de datos y se almacenan en archivos.dat para después obtenerlos en hojas de excel; al término de la medición se recolectan los datos y se procede al análisis de dichos resultados. Se obtienen gráficas donde se puede observar la estabilidad en las temperaturas y con esto se calcula la conductividad y resistencia térmica de dicho material.

Cabe destacar que este sistema se encuentra sellado al medio ambiente exterior.

CAPÍTULO V: METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

Las variables de medición para calcular la resistencia térmica se determina en base a las mediciones de temperatura promedio de las superficies de ambos lados de la muestra tanto en la parte fría como en la parte caliente, así también como el amperaje y voltaje que suministra la fuente de poder para cada corrida.

V.1.- Descripción de la muestra.

Existen diferentes casos para la conformación de la muestra, puede ser de mampostería o de cualquier otro material, enjarrado de emplaste de yeso o mortero por uno o por ambos lados, pero para este caso se habla sobre la muestra de un muro de ladrillo asentado con mortero y emplaste de cemento arena por un lado (exterior) y yeso por el otro (interior).

Las dimensiones del muro son de 1.20 m de base por 2.10 m de altura, y está elaborado a base de mampostería, en este caso ladrillo de 7 x 14 x 28 cm. Se toma la altura de 2.10 m puesto que es el caso que más se asemeja a la realidad de las viviendas, ya que a esta medida es donde se coloca la cadena de

cerramiento generalmente, y una base de 1.20 m. por ser una medida estándar para la medición.

Las dimensiones del ladrillo que componen el muro de mampostería son de medidas nominales de 7 x 14 x 28 cms.

V.II.- Diseño de morteros.

Para la fabricación de la muestra se realizó una caracterización de los materiales a utilizar, como el ladrillo en el cual se obtuvieron pesos y medidas promedio con el cual se realizaron pruebas de resistencia a la compresión y prueba de absorción.

El mortero es una mezcla de conglomerantes inorgánicos, áridos y agua que sirven para pegar elementos de construcción como el ladrillo en este caso. El mortero se realizó llevando un estricto y cuidadoso proceso de elaboración para cumplir con las especificaciones técnicas y la proporción deseada, llevando a cabo un buen proceso de construcción.

La proporción de mortero para la junta es de 1 cemento – $\frac{1}{4}$ cal – 4 arena, en la cual se hizo una granulometría de la arena para sacar exactamente los pesos requeridos de cada malla. La proporción de mortero para el enjarre es de 1 $\frac{3}{4}$ arena - 1 cal – 5 litros de cemento, en la cual se cribó arena para mantener el módulo de finura necesario por este tipo de muestra.

El mortero de yeso se realizó con el mismo estricto proceso de elaboración y colocación que con el mortero de enjarre, la única diferencia es que en este tipo de mortero no existe una proporción específica para el proceso de su elaboración.

Para conocer un comportamiento promedio de los ladrillos utilizados en el muro, se realizó un análisis de 5 ladrillos tomados de manera aleatoria y se caracterizó el material de la siguiente manera:



**INFORME DE RESULTADOS
PARA LADRILLO**

LABORATORIO EXPERIMENTAL DEL DEPARTAMENTO
DE INGENIERIA CIVIL Y MINAS

Página: 1 de 1
Fecha: 08/03/13
Revisión: 00

NOMBRE DEL CLIENTE: <u>PROYECTO DE INVESTIGACIÓN-DR. ANA C. BARRÓN ALBAIDA</u>					No. DE INFORME: <u>831</u>			
DIRECCIÓN: <u>UNIVERSIDAD DE SONORA-DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y MINAS</u>								
ESPECIMEN	L (cm)	H (cm)	A (cm)	CARGA DE COMPRESIÓN (kg)	F _c (kg/cm ²)		Módulo de elasticidad	DEBILIDAD (%)
					PROYECTO	REAL		
P1	13.87	27.53	381.8	29052	NMX-C-404	76.08	10.43	N.A.
P2	13.73	27.1	372.1	33760	NMX-C-404	90.73	8.88	N.A.
P3	13.9	26.9	373.9	35160	NMX-C-404	94.03	9.52	N.A.
P4	13.9	27.2	378.1	34620	NMX-C-404	91.57	9.99	N.A.
P5	13.53	27.4	370.7	34580	NMX-C-404	93.28	10.1	N.A.
PROMEDIO	13.79	27.22	376.4	33434	NMX-C-404	89	9.78	N.A.

Método utilizado: NMX-C-050-ONNCE-2004, NMX-C-050-ONNCE-2004, NMX-C-037-ONNCE-2005, NMX-C-404-ONNCE-2006
Se prohíbe la reproducción parcial o total de este informe sin autorización por escrito del laboratorio
Este informe sólo afecta a los elementos sujetos a su ensayo

OBSERVACIONES: El lote cumple con los requerimientos de norma a resistencia a compresión (como elemento estructural), así como con la absorción.

REALIZÓ:

JESÚS AISPURO
Técnico de Laboratorio

AUTORIZÓ:

Dr. ISRAEL MIRANDA PASOS
Responsable de Área

UNI-FO-CO-33

Tabla 5.1: Pruebas mecánicas del ladrillo.

Según la NMX-C-404-onnce, las medidas de los ladrillos tomados cumplen con el mínimo especificado de 5cm x 10cm x 19cm, además de cumplir con la carga a compresión del establecido de 60 kg/cm².

Ladrillo	Peso seco (Kg)	Peso húmedo (Kg)	Absorción (%)	Absorción prom (%)
1	0.23	0.254	10.43	9.78
2	3.83	4.17	8.88	
3	3.94	4.315	9.52	
4	3.964	4.36	9.99	
5	3.91	4.305	10.10	

Tabla 5.2: Prueba de absorción de ladrillo.

En cuanto al porcentaje de absorción, éstos también cumplen con el máximo permitido, ya que todos dan por debajo del 21% establecido en la NMX-C-404-000. Por lo tanto, se puede deducir que los ladrillos utilizados para la fabricación del muro cumplen con todos los requisitos establecidos.

Con respecto a la granulometría realizada para la mezcla de mortero de pegado, se realizó un análisis granulométrico de 10 kg de material para comprobar y corroborar que el material que se utilizaría fuera el correcto, por lo cual se presenta el siguiente formato:



ARENA PARA CONCRETO

Características del material	Material limpio bien graduado libre de finos		
Procedencia	Banco de Materiales "Cribadora Castillo" Blvd A. Quiroga y Blvd Luis Donaldo Colosio		
Para usarse en	Elaboración de mezclas de mortero		
Solicitada por	Responsable del Proyecto		
Ensaye No.	Expediente No.		
Fecha de recibo	Fecha de informe		
Peso volumétrico suelto:	Kg/m ³	Densidad:	
Peso volumétrico varillado:	kg/m ³	% Absorción:	
Peso de Muestra: 10 Kg	Modulo de Finura: 2.76	% W:	

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Malla	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Entero	% Retenido Acumulado
No. 4	0.30	3	3	3
No. 8	1.20	12	12	15
No. 16	1.50	15	15	30
No. 30	2.50	25	25	55
No. 50	2.30	23	23	78
No. 100	1.70	17	17	95
No. 200	0.50	5	5	100
Charola	0.00	0	0	100
Sumas	10.00	100	100	476

OBSERVACIONES: El porcentaje de retenido de la arena es perfecto por lo que corresponde a una arena bien graduada.

REALIZO:

AUTORIZO:

Técnico de Laboratorio

Jefe de Laboratorio

Tabla 5.3: Análisis granulométrico de la arena.

Se puede observar dentro de la tabla 5.3, que el porcentaje retenido de la arena es perfecto, por lo que corresponde a una arena bien graduada, por lo tanto es aceptable su uso para la mezcla de mortero; además de contar con un módulo de finura dentro del rango aceptable para el agregado fino de 2.50 a 3.00, siendo éste de 2.76.

V.III. – Fabricación de la Muestra.

A) Para el caso de muestras de mamposterías.

Este sistema constructivo está elaborado a base de ladrillo 7 x 14 x 28 cm, con juntas de mortero de 1.5 cm de espesor y 2.5 cm de separación entre ladrillos con una proporción de 1 – ¼ - 4. Además, está enjarrado con mortero por el lado exterior de 2 cm de espesor con una proporción de 1 ¾ - 1 – 5 lts, y aplanado de yeso por la parte interior, caras laterales y cara superior con un espesor de 2 cm.

El muro se encuentra descansando sobre una base de madera de 1.25 x 0.36 x 0.15 metros que se encuentra relleno de material aislante con espuma de poliuretano expandido marca “surtek” dejándolo secar 24 horas para su completo secado y mantener aislado el muro por la parte inferior, ya que la prueba se realiza en condiciones de frontera tipo adiabático.



Figura 5.1: Base de madera rellena de poliuretano expandido.

La primera hilada de ladrillo sobre la madera fue pegado con un adhesivo especial para montaje marca “strongstik”, con características especiales para pegar el ladrillo con la madera. El espesor que se llevó en promedio para esta hilada fue de

1.5 cm de espesor y 2.5 cm de separación entre ladrillos. Se dejó secar 48 horas y después se utilizó la mezcla de mortero descrita.



Figura 5.2: Primera hilada con pegamento.

El muro se levantó cuidando la plomada vertical de tal manera que se asegure un muro perfectamente plomeado por todos sus lados para agilizar el proceso de medición.



Figura 5.3: Levantamiento del muro de ladrillo perfectamente plomeado.

B) Para el caso de muestras de materiales prefabricados.

En el caso de materiales prefabricados no es necesario realizar ningún tipo de diseño de mezclas, lo único que se tiene que realizar es el ajuste para que cumpla con las medidas especificadas en este tipo de muestras, que es de 1.20 x 2.0 metros, asegurándose que se coloque el aislante en la parte inferior de la muestra.

V.IV.- Puesta en marcha.

Una vez finalizada la construcción del muro de prueba, se debe esperar a que este seque completamente, puede ser un secado natural con tiempo a la exposición del aire o aplicar calor para su secado. De acuerdo a la bibliografía consultada se considera un promedio de 3 meses para que un muro constructivo de este tipo esté completamente seco o en su defecto implementar técnicas de secado adicionales. Una vez seco, se procede a la introducción de dicho sistema constructivo en el gabinete de pruebas para la obtención de los primeros resultados.

Las figuras 5.4 y 5.5 detallan la ubicación de los sensores que se utilizan para la medición en la placa fría y caliente respectivamente. Se encuentran 28 termopares en la placa fría y 26 termopares en la placa caliente, sumando 54 termopares en total conectados al adquisidor de datos CR7, operado por el programa Loggernet 3.3.1.

Como se puede observar en la figura 5.4 y 5.5 las ubicaciones de los termopares se encuentran etiquetados, de tal manera que se controla la terminal donde estos están censando en el datalogger CR7. La distancia entre cada sensor de medición

es de 10 cm, y en la parte del centro se encuentran colocados, en la superficie fría, otros dos termopares en el sentido horizontal a 5 cm; mientras que en la superficie caliente se encuentran dos sensores en el sentido vertical y horizontal también a cada 5 cm.

Una vez con la muestra debidamente colocada dentro del gabinete, que éste se haya cerrado completamente, se accionan los mecanismos de encendido de chillers, la fuente de poder, el adquisidor de datos y se inicia con la medición.

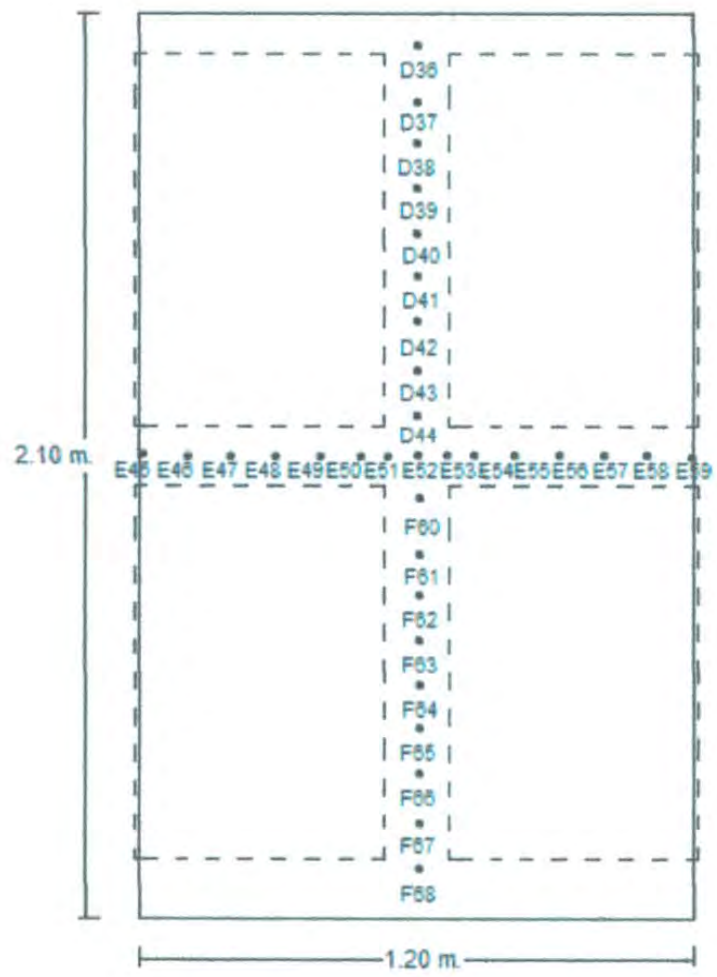


Figura 5.4: Ubicación de termopares en superficie fría.

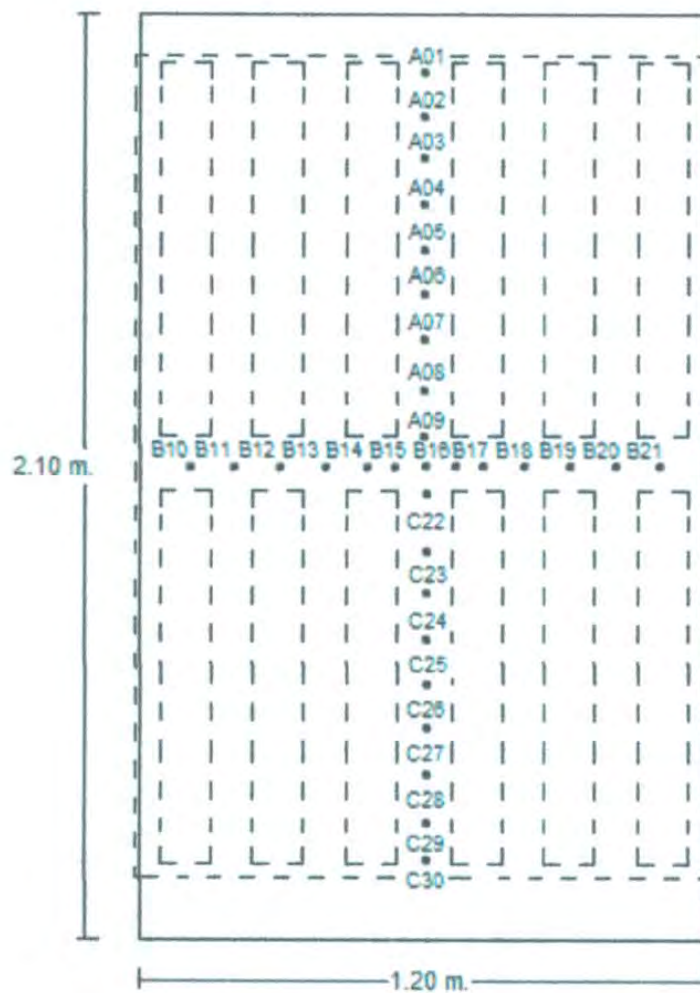


Figura 5.5: Ubicación de termopares en superficie caliente.

Se espera a que el sistema se estabilice. Esto sucede cuando las mediciones tanto de la parte fría como de la parte caliente no varíen y muestren gráficas con pendiente cero. Como se muestra en la gráfica 5.6.

Otro aspecto importante para la medición es que las temperaturas de cada lado de la placa fría y caliente se encuentren con la menor desviación posible de los valores de las temperaturas en el muro; aspecto que también se verifica en la gráfica 5.6.

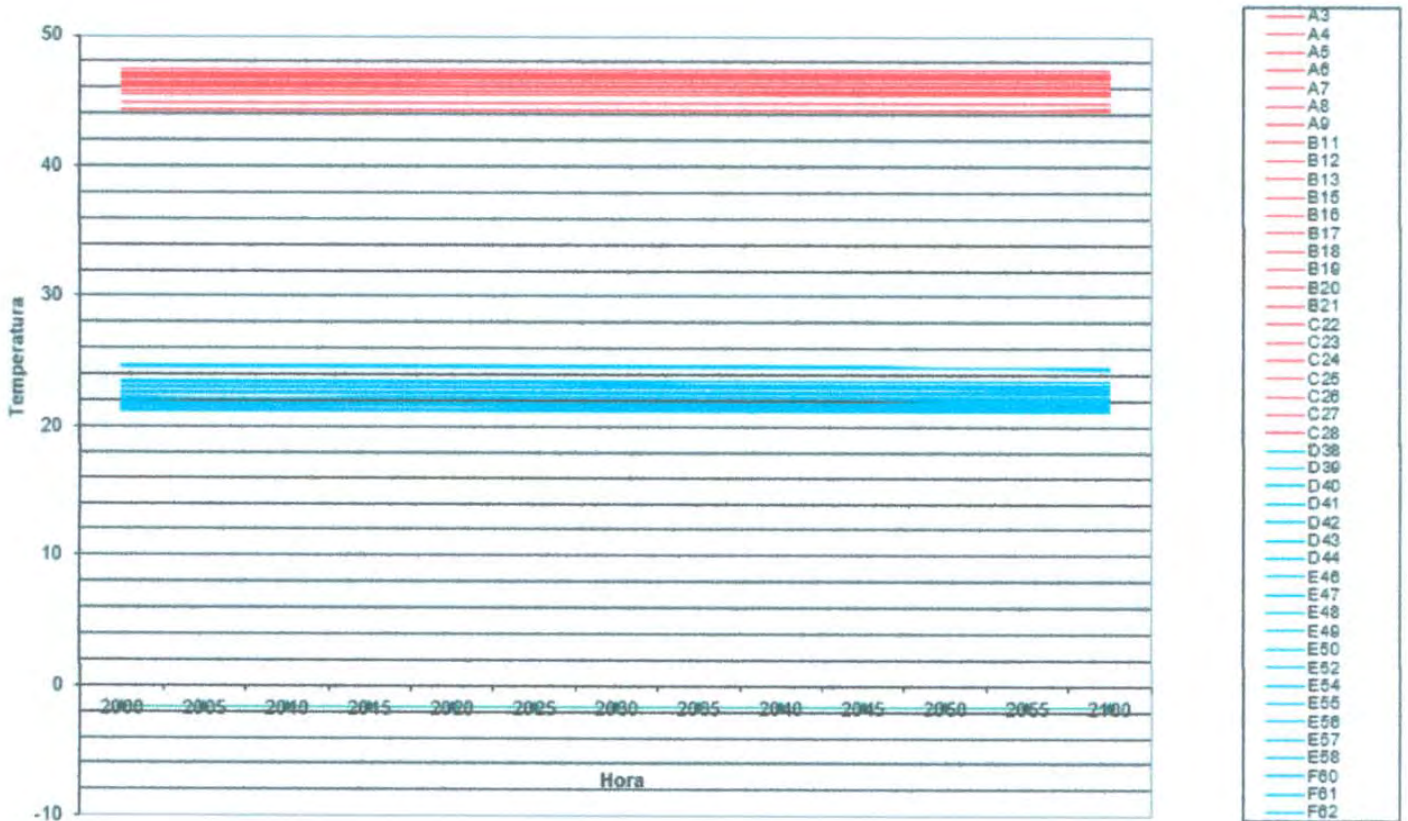


Figura 5.6: Ejemplo de estabilización y uniformidad del sistema.

CAPÍTULO VI: RESULTADOS Y ANÁLISIS

VI.I. – Recolección de datos, elaboración de gráficas y resultados.

Para realizar una medición en el TR-01, lo primero que se debe de tomar en cuenta son las características del material a evaluar, para así comprobar que se tuvo una medición con éxito.

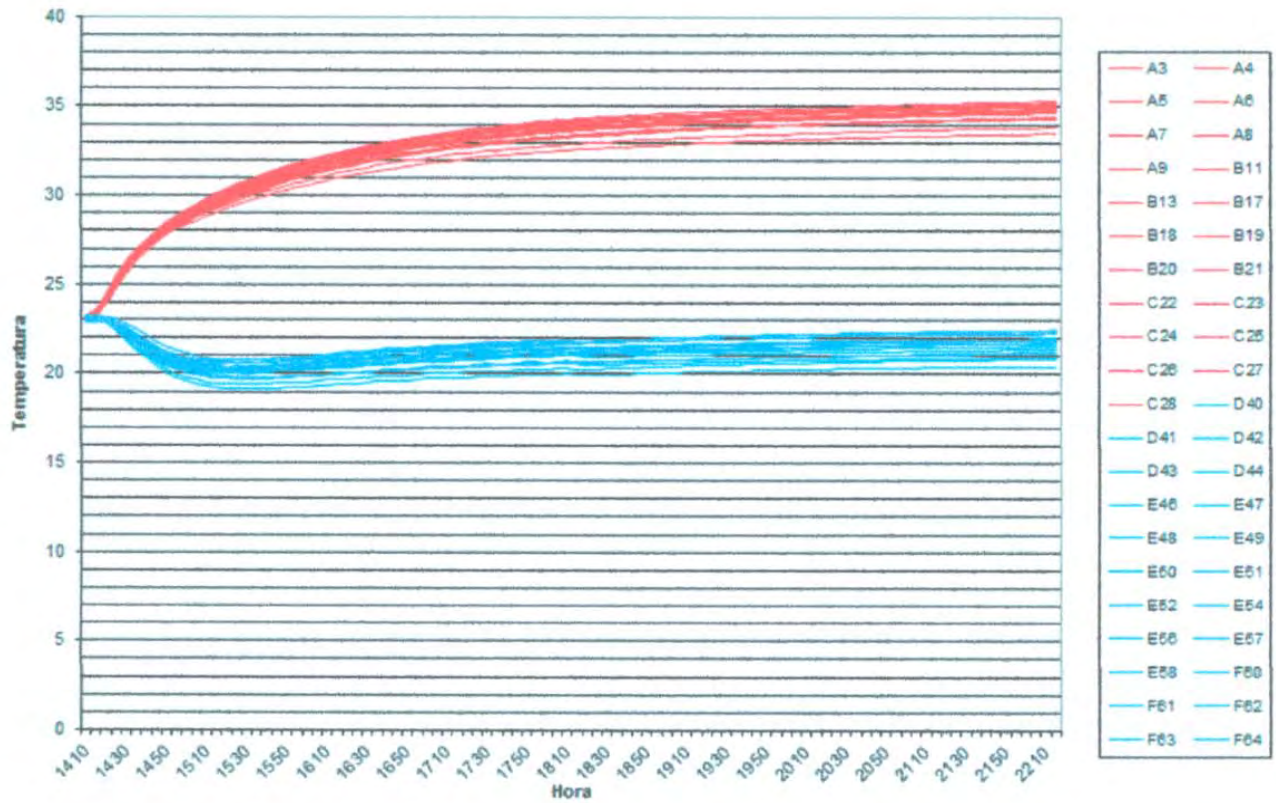
Por lo tanto, en este caso se realizaron mediciones piloto antes de comenzar a medir muros compuestos con una conductividad térmica desconocida, puesto que éste cambia con respecto a los materiales utilizados. Una de las pruebas piloto hechas se realizó con el material de triplay de madera de ½" de espesor, con unas dimensiones de 1.2m de ancho x 2.0m de altura. En la corrida 1 se colocó la fuente de poder en 10 A y 22.9 V, mientras que los chillers se colocaron a 15 °C, dando una temperatura promedio en la superficie fría de 22.04 °C y en la superficie caliente de 34.63 °C con un diferencial de temperatura de 12.59 °C. En la corrida 2 se colocó la fuente de poder en 13 A y 29.8 V, mientras que los chillers se colocaron a 15 °C, dando una temperatura promedio en la placa superficie de 22.31 °C y en la superficie caliente de 42.65 °C con un diferencial de temperatura

de 20.35 °C. En la corrida 3 se colocó la fuente de poder a 15 A y 34.5 V, mientras que los chillers se colocaron a 5 °C, dando una temperatura promedio en la superficie fría de 22.57 °C y en la superficie caliente de 46.08 °C con un diferencial de temperatura de 23.51 °C. A continuación se pueden observar los siguientes resultados a diferentes temperaturas:

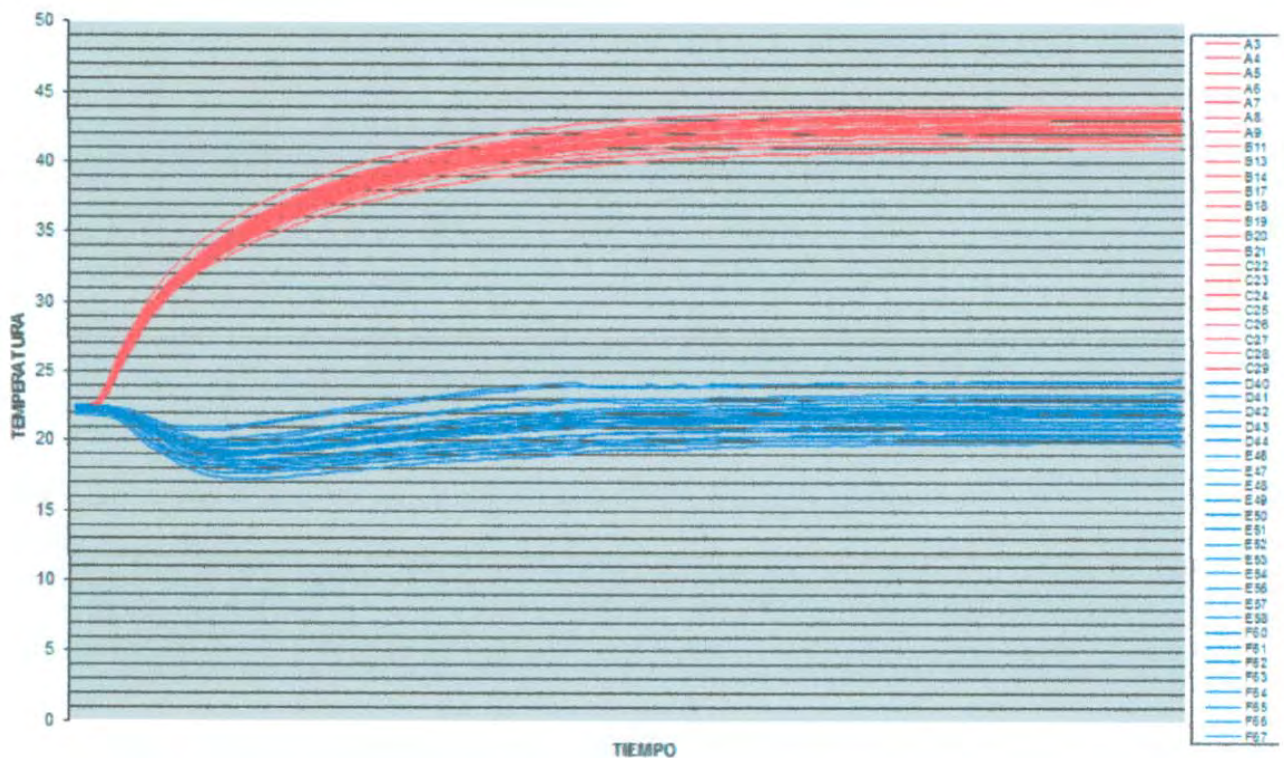
Corrida	T _{prom. fría} (°C)	T _{prom. caliente} (°C)	ΔT_{muro} (°C)	Área (m ²)	v (V)	I (A)	q (W/m ²)	λ (W/m °C)
1	22.04	34.63	12.59	2.4	22.9	10	95.417	0.096
2	22.31	42.65	20.35	2.4	29.8	13	161.417	0.100
3	22.57	46.08	23.51	2.4	34.5	15	215.625	0.116

Tabla 6.1: Resultados de medición de triplay de madera.

Como se puede observar, para cada ΔT_{muro} se obtuvo un valor de flujo de calor que crece a medida que las diferencia de temperatura van aumentando. Para los valores de resistencia térmica, se puede observar que estos no se comportan de la misma manera, lo que se puede decir que éste varía dependiendo de cada muestra, puesto que es difícil poder obtener un mismo resultado en todas las corridas debido a las irregularidades con que cuenta el material.



Gráfica 6.1: Estado transitorio de la corrida 1 de madera.



Gráfica 6.2: Estado transitorio de la corrida 2 de madera.

23.75 °C y en la superficie caliente de 42.76 °C, con un diferencial de temperatura de 19.02 °C.

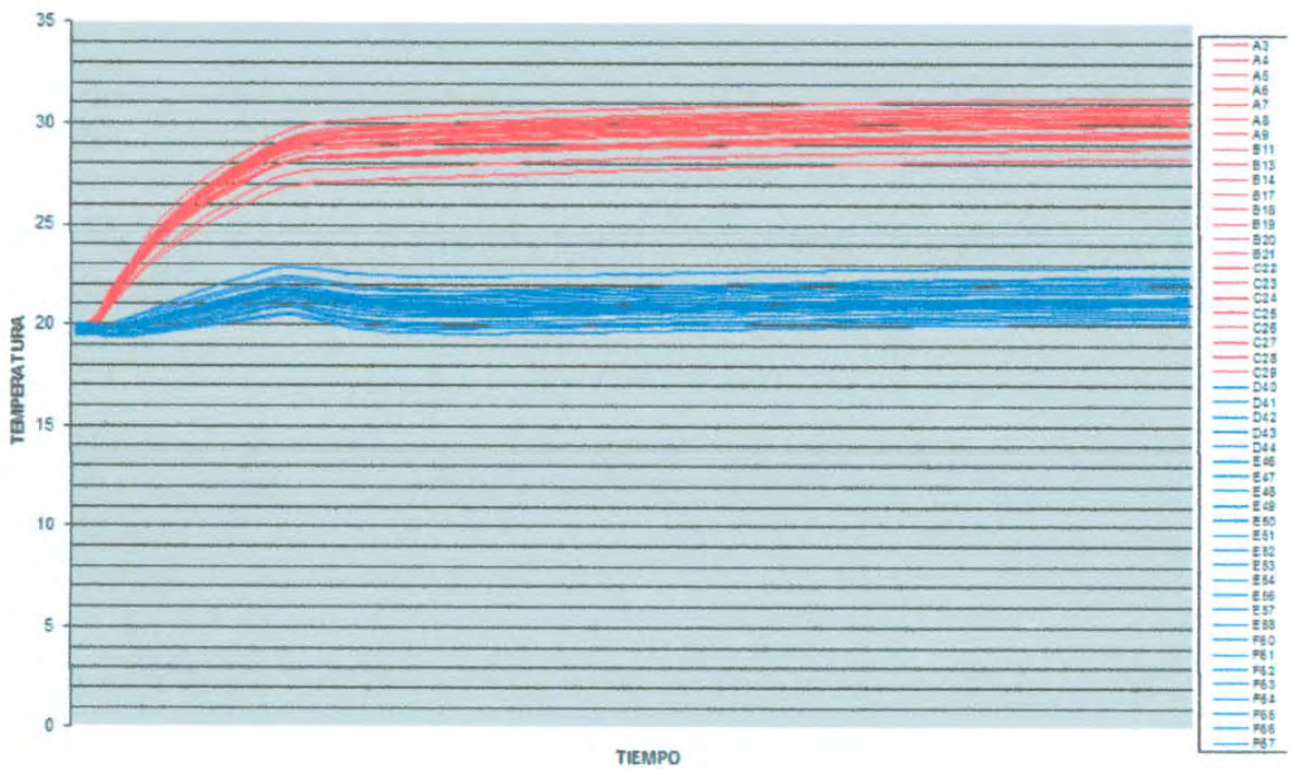
A continuación se adjuntan los resultados en la siguiente tabla:

Corrida	T _{prom. fría} (°C)	T _{prom. caliente} (°C)	ΔT _{muro} (°C)	Área (m ²)	v (V)	I (A)	q (W/m ²)	λ (W/m °C)
1	21.27	30.18	8.91	2.4	22.9	10	95.417	0.135
2	24.50	40.32	15.82	2.4	29.9	13	161.958	0.129
3	23.75	42.76	19.02	2.4	34.5	15	215.625	0.143

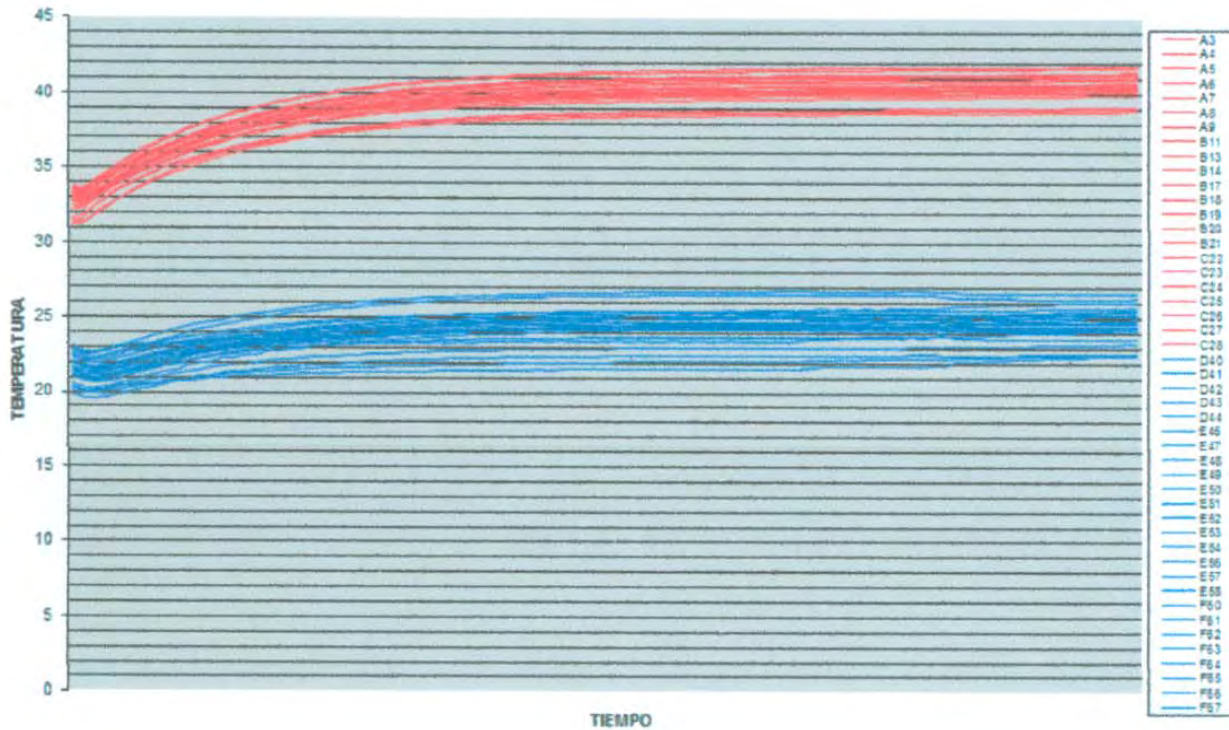
Tabla 6.2: Resultados de medición de hoja de tablaroca.

Dado los resultados de las mediciones anteriores de la hoja de tablaroca, se puede observar que para un ΔT_{muro} distinto, éste no va aumentando su conductividad constantemente, sino que simplemente todas las mediciones salen distintas debido a que siempre existen errores en las mediciones, por falla de algún termopar o mal aislamiento del sistema, pero de ello se obtiene un promedio y se compara con la resistencia térmica expuesta en la ficha técnica, cumpliendo la obtenida con la establecida.

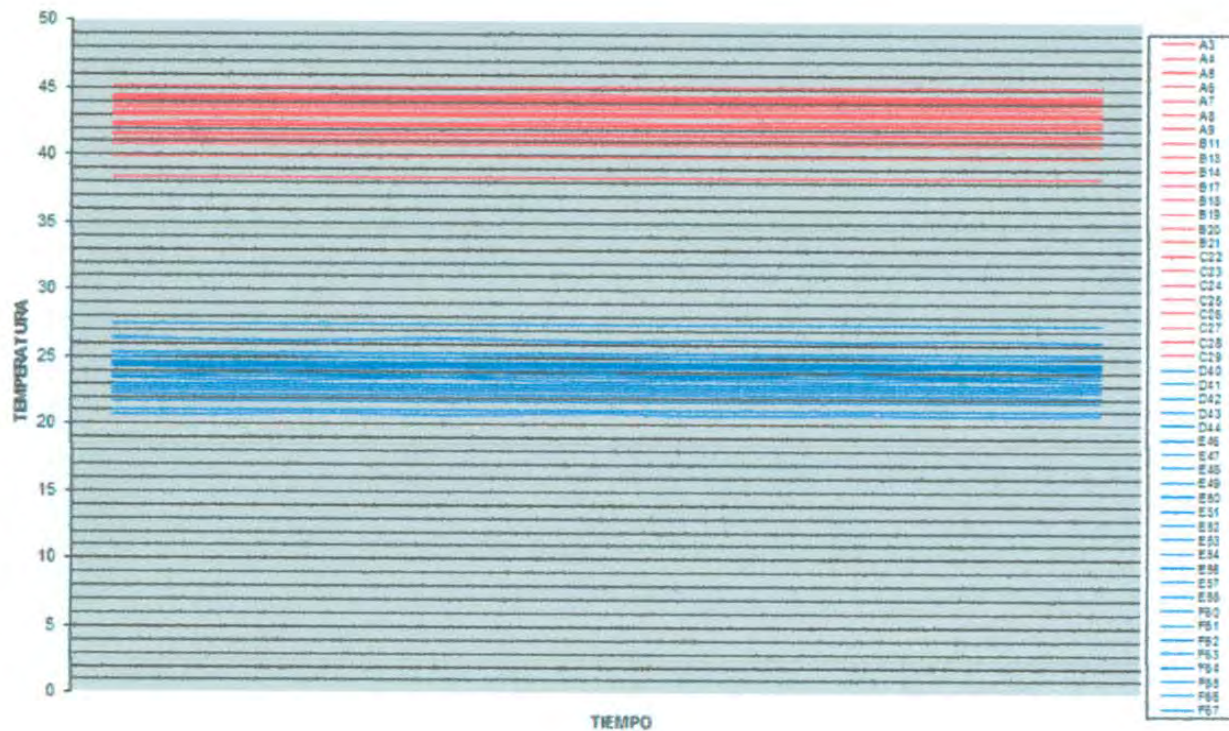
Para demostrar que las corridas realizadas y los cálculos se hicieron de manera correcta, se adjuntan las siguientes gráficas en las cuales se puede observar de manera notoria el estado estable del sistema durante la prueba.



Gráfica 6.4: Estado transitorio de la corrida 1 de tablaroca.



Gráfica 6.5: Estado transitorio de la corrida 2 de tablaroca.



Gráfica 6.6: Estado estable de la corrida 3 de tablaroca.

Se cuenta además con el análisis de otro material aislante, tipo placa de poliestireno de 1" de espesor, en el cual se realizaron 3 corridas a distinto diferencial de temperatura, en la cual para la corrida 1 la fuente de poder se colocó en 5 A y 11.5 V, mientras que los chillers se colocaron a 5 °C, obteniendo una temperatura promedio en la superficie fría de 9.79 °C y en la superficie caliente de 25.59 °C, con un diferencial de temperatura de 15.81 °C. En la corrida 2 se colocó la fuente de poder en 6 A y 13.85 V, mientras que los chillers se colocaron a 12 °C, obteniendo un promedio de temperatura en la superficie fría de 15.17 °C y en la superficie caliente de 35.26 °C, con un diferencial de temperatura de 20.09 °C. En la corrida 3 se colocó la fuente de poder en 7 A y 16.15 V, mientras que los chillers se colocaron a 15 °C, obteniendo una temperatura promedio en la

superficie fría de 19.32 °C y en la superficie caliente de 43.80 °C, con un diferencial de temperatura de 24.48 °C.

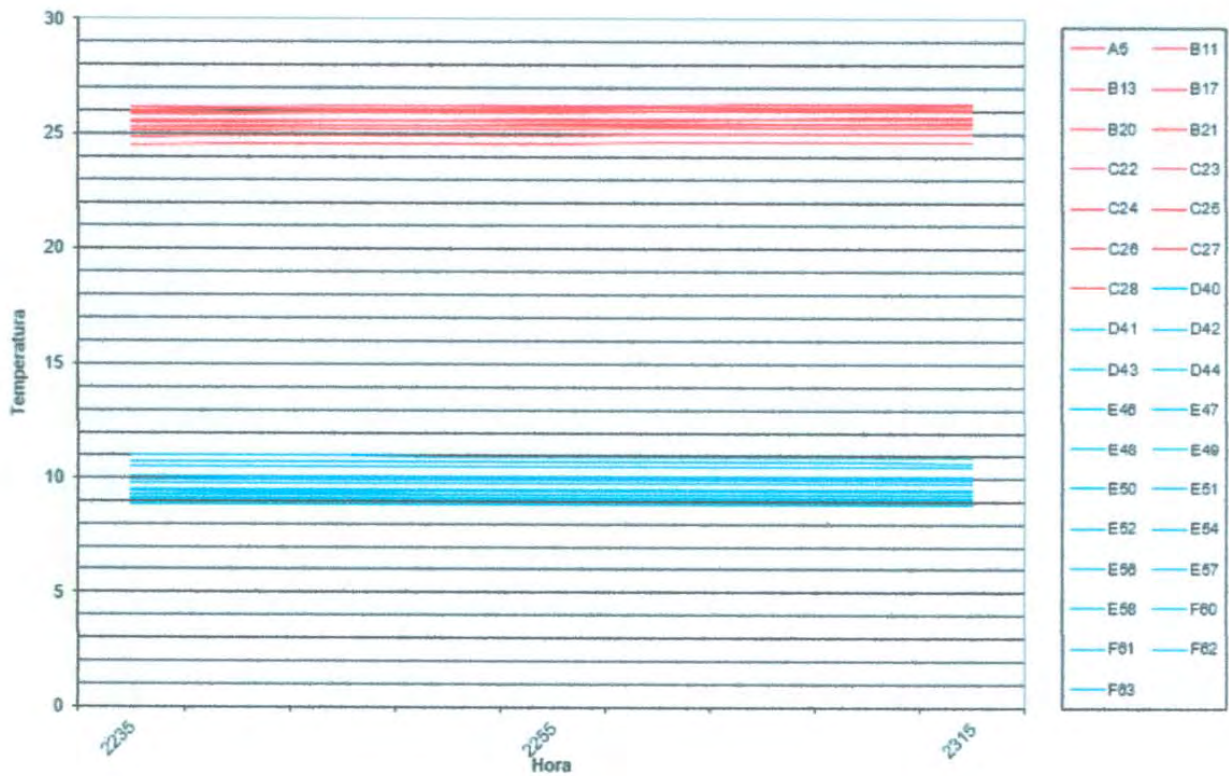
A continuación se adjuntan los resultados en la siguiente tabla:

Corrida	T _{prom. fría} (°C)	T _{prom. caliente} (°C)	ΔT _{muro} (°C)	Área (m ²)	v (V)	I (A)	q (W/m ²)	λ (W/m °C)
1	9.79	25.59	15.81	2.58	11.5	5	22.287	0.035
2	15.17	35.26	20.09	2.58	13.85	6	32.209	0.040
3	19.32	43.80	24.48	2.58	16.15	7	43.818	0.045

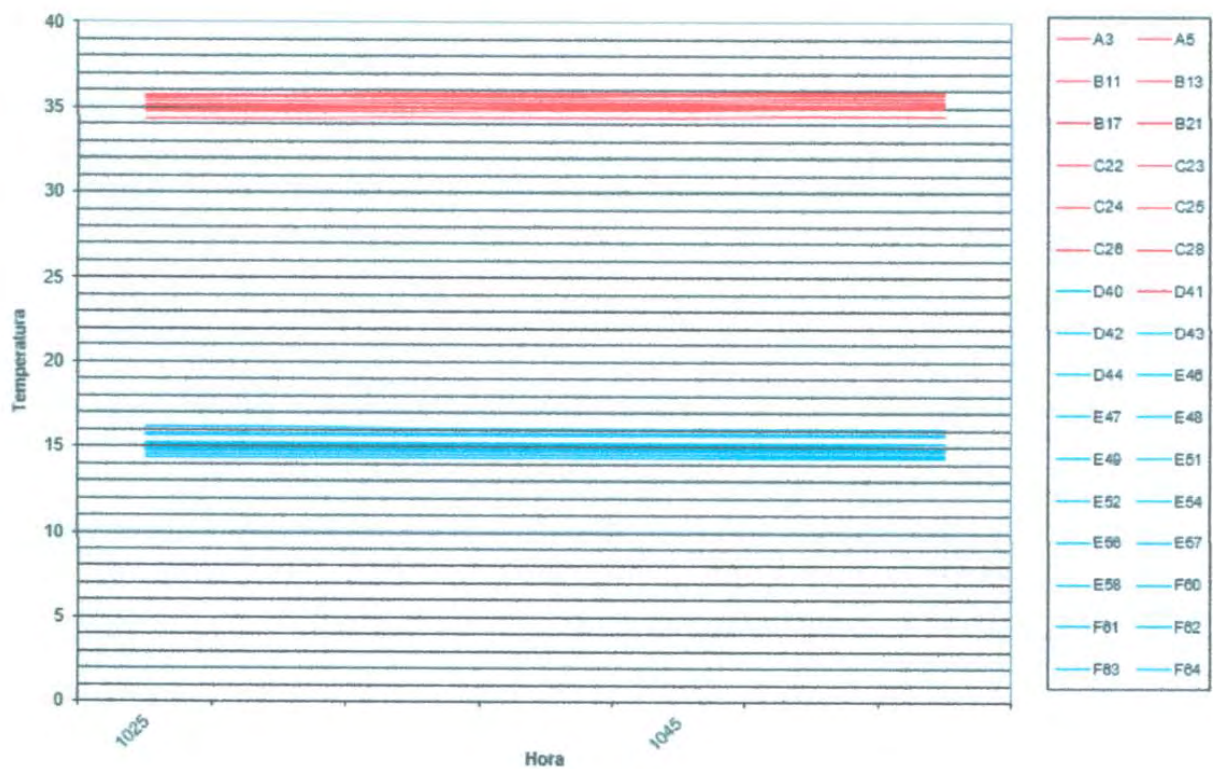
Tabla 6.3: Resultados de medición de placa de poliestireno.

Como se puede observar, para cada ΔT_{muro} se obtuvo un valor de flujo de calor que crece a medida que las diferencia de temperatura van aumentando. En el caso de la conductividad térmica calculada, se puede observar que estos resultados son congruentes aunque el valor no sea tan cercano como el de los materiales anteriores.

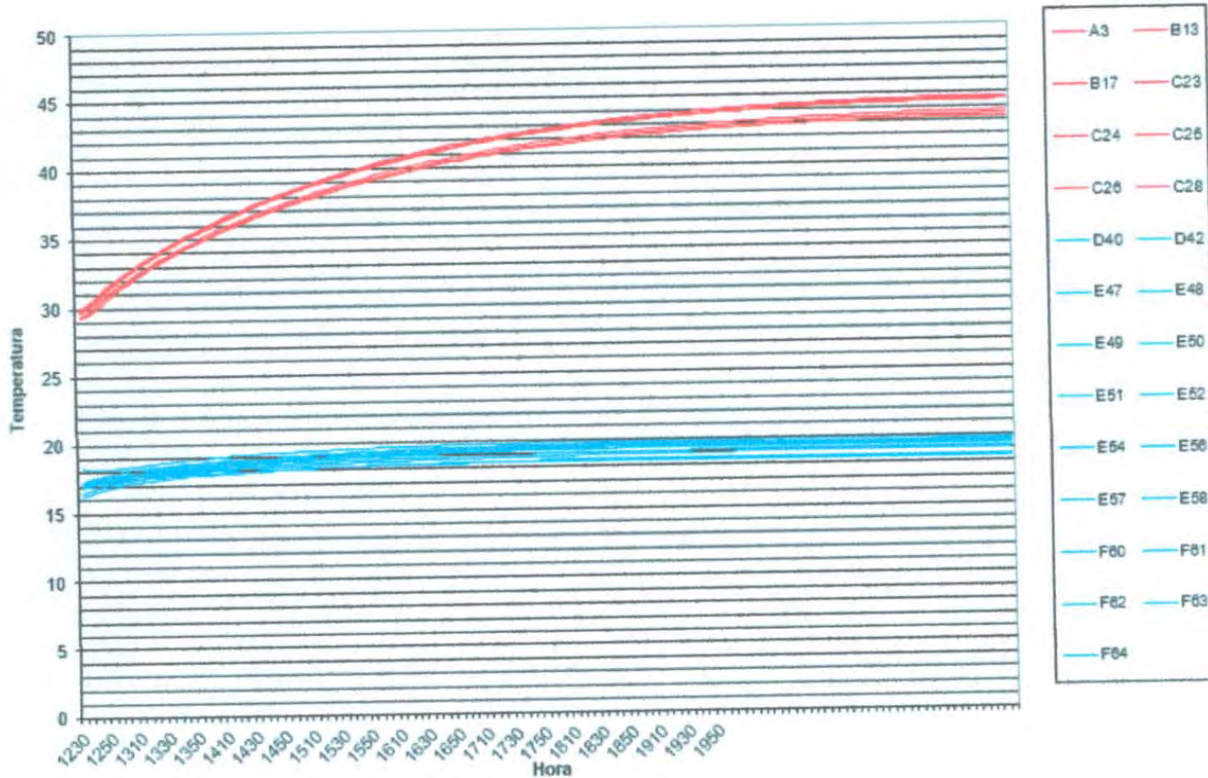
Para demostrar que los cálculos obtenidos se hicieron de manera correcta, se adjuntan las siguientes graficas en las cuales se puede observar de manera notoria el estado estable del sistema durante la prueba.



Gráfica 6.7: Estado estable de la corrida 1 de poliestireno.



Gráfica 6.8: Estado estable de la corrida 2 de poliestireno.



Gráfica 6.9: Estado transitorio de la corrida 3 de poliestireno.

Por último, se realizó el análisis del muro de mampostería descrito en el capítulo anterior, en el cual solo se alcanzó a realizar una corrida, la cual se realizó con la fuente de poder en 7 A y 16.15 V, mientras que los chillers se colocaron a 15 °C, obteniendo una temperatura promedio en la superficie fría de 19.65 °C y en la superficie caliente de 29.79 °C, con un diferencial de temperatura de 10.14 °C.

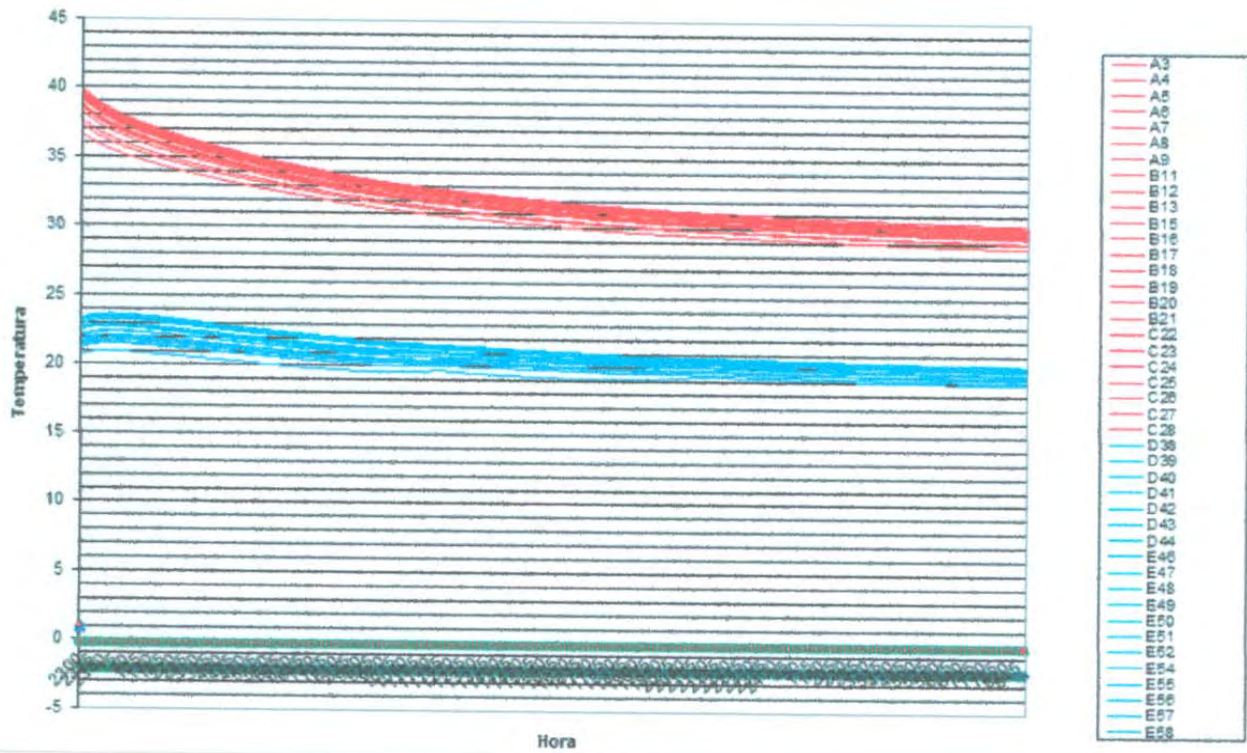
En la siguiente tabla se adjuntan los datos de la medición:

Corrida	$T_{\text{prom. fría}}$ (°C)	$T_{\text{prom. caliente}}$ (°C)	ΔT_{muro} (°C)	Área (m ²)	v (V)	I (A)	q (W/m ²)	λ (W/m °C)
1	19.65	29.79	10.14	2.59	16.15	7	43.559	0.743

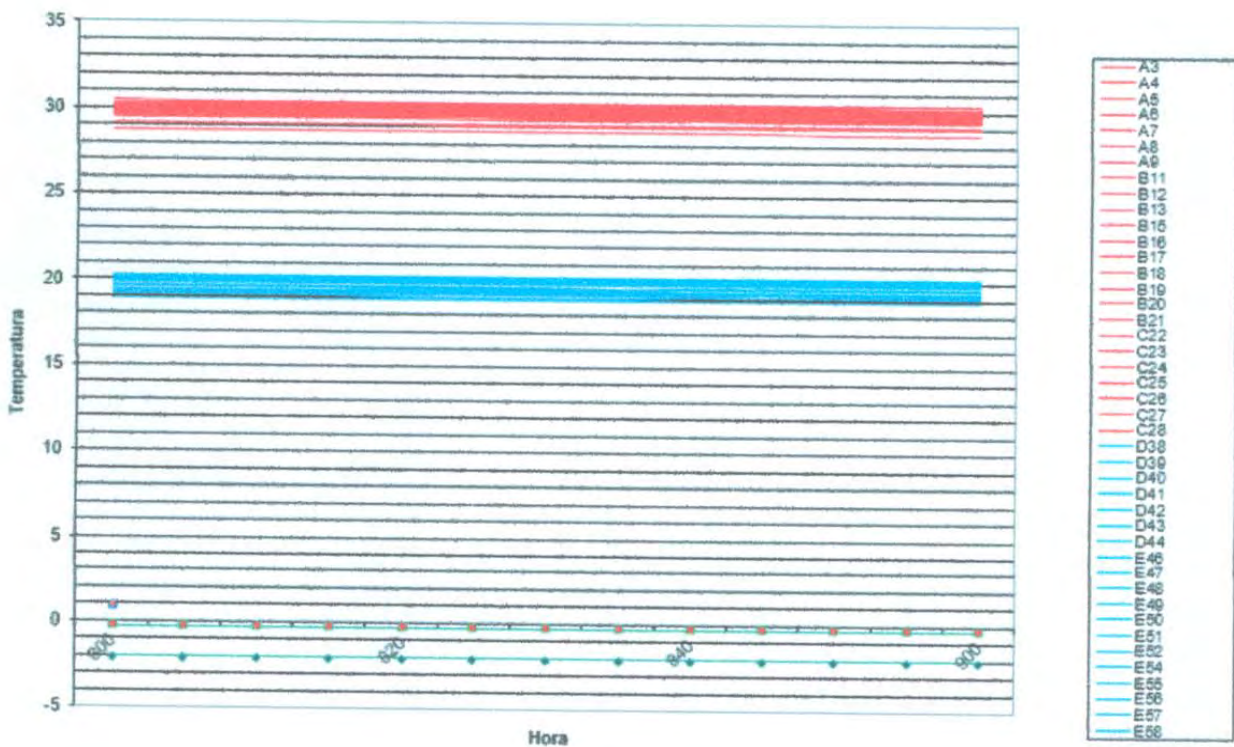
Tabla 6.4: Resultados de medición del muro de mampostería.

Como se puede observar en la tabla anterior, se realizó el cálculo para la conductividad térmica del muro de mampostería, en el cual se nota que ésta medición está dentro del valor esperado, puesto que la λ para el ladrillo es de 0.72 W/m °C, por lo cual los aplanados de mortero y de yeso con el que cuenta ayuda a este material a ser un sistema constructivo menos conductivo que si estuviera éste sin ningún tipo de enjarre.

Para demostrar que los cálculos obtenidos se hicieron de manera correcta, se adjuntan las siguientes gráficas en las cuales se puede observar de manera notoria el estado estable del sistema durante la prueba.



Gráfica 6.10: Estado transitorio de la corrida 1 del muro de mampostería.



Gráfica 6.11: Estado estable de la corrida 1 del muro de mampostería.

Una vez corroborado el estado estable de cada una de las corridas, se puede decir que en este momento la medición se ha completado y es cuando se procede al cálculo de la resistencia térmica, R.

VI.II. – Cálculo de R en muros.

A partir de estos resultados obtenidos, se procede a continuación al cálculo de la resistencia térmica del material medido mediante la siguiente ecuación:

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Donde:

e= Espesor del material (m).

λ = Conductividad térmica del material, λ en (W/m K).

Por tanto, los cálculos quedan de la siguiente manera:

Material	e (m)	λ (W/m K)	R (m ² K/W)
Madera	0.0126	0.104	0.121
Tablaroca	0.0125	0.136	0.092
Poliestireno	0.0254	0.040	0.635
Muro	0.173	0.743	0.233

Tabla 6.5: Cálculo de la resistencia térmica.

Cuando el material analizado presenta una resistencia térmica muy cercana de 1, se considera que es un material aislante o que se opone al paso de calor; por otra parte, mientras el material se acerca más a 0 quiere decir que es un material no aislante o que cede al paso de transferencia de calor.

Para validar la conductividad térmica obtenida en este dispositivo, se comparan estos resultados con los obtenidos en el medidor primario de conductividad térmica EP-500-e, los cuales se presentan a continuación:

Material	λ en TR-01 (W/m K)	λ en EP500-e (W/m K)	Error (%)
Madera	0.104	0.105	0.95
Tablaroca	0.136	0.141	3.55
Poliestireno	0.040	0.025	60.0

Tabla 6.6: Comparación de conductividad térmica.

Debido a que los resultados obtenidos entre el dispositivo de medición TR-01 y el EP500-e son muy parecidos, se pueden tomar como aceptables los resultados obtenidos en dicho dispositivo. En el caso de la placa de poliestireno no se obtuvo un resultado favorable como en el caso de la madera y la tablaroca puesto que se detectó que se necesita mantener más aislado el sistema, además de que el material evaluado es el mismo con el cual se mantienen aisladas los intercambiadores de calor, por lo tanto se requiere hacer un análisis detallado a futuro para mejorar las condiciones de medición de materiales aislantes.

En el caso del muro de mampostería, como es un sistema constructivo hecho de varios materiales, éste no pudo ser validado con el EP500-e, pero dado la cercanía de los resultados de los otros materiales, se afirma que el resultado obtenido en el TR-01 para este sistema es bueno.

CONCLUSIONES.

Del presente trabajo de investigación realizado en el departamento de Ingeniería Civil y Minas, en el área de laboratorios, investigación número 2, se trabajó arduamente para el diseño y la construcción del gabinete de pruebas TR-01, en el cual, a través de esta metodología y/o resultados obtenidos, se afirma que el dispositivo se encuentra en condiciones de ser operado y confiar en los resultados obtenidos, ya que estos se compararon con los resultados que nos arrojó el medidor de conductividad térmica “ λ -Meter-EP500e”, en donde se pueden ver resultados en el apartado de anexos sobre los materiales medidos en esta metodología.

Para el caso del estudio de materiales aislantes en el dispositivo TR-01, se puede mejorar teniendo en cuenta que se necesita un mayor control experimental para realizar la corrida.

Por otra parte, este dispositivo cuenta con un gran potencial para caracterizar cualquier sistema constructivo complejo, por lo que se pueden realizar un sinnúmero de

corridas experimentales en un futuro y estar seguro que los resultados que se obtengan estarán en lo correcto, debido a la fiabilidad del dispositivo.

Además, si se siguen los pasos de esta metodología podrá servir para la continuación del estudio de diferentes muros de mampostería a escala real, y seguir con la investigación y/o clasificación de los materiales de construcción para el uso habitacional, y tratar de mejorar las condiciones de vida de los habitantes de cada región en específico.

BIBLIOGRAFÍA.

- Armando Piña Ortiz. 2007. Diseño y construcción de un sistema experimental para la determinación de la resistencia térmica de bloque de concreto. Universidad de Sonora, división de ingeniería, departamento de ingeniería química y metalurgia. Página 7-12, 65.
- Arvizu A. Juan y Córdova B. José F. Estudio de la conductividad térmica de un concreto con agregados de puzolana: 2, (2011).
- ASHRAE, Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Cap. 25 (2001).
- ASTM C177-97, Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurement and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot Plate Apparatus (1997).
- Borbón, A. C. 2010. Evaluación térmica de muros de bloque para vivienda. Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de ingeniería, maestría y doctorado en ciencias e ingeniería. Página 25, 30-31, 102.

- Borbón, A. C., Cabanillas, R. E., & Pérez, J. B. (2010). Modelación y simulación de la transferencia de calor en muros de bloque de concreto hueco. *Information Technological*, 21, 3, 27-38.
- Borbón, A. C., Cabanillas, R. E., & Pérez, J. B. (2010). Determinación experimental y contraste numérico de la resistencia térmica de un muro de bloques de concreto hueco. *Information Technological*, 21, 6, 163-176.
- Borbón, A. C., Pérez, J. B., Miranda, I., Cabanillas, R. E. (2012). comportamiento térmico de una vivienda de interés social en clima cálido seco y su relación con el confort. *Epistemus*, páginas 27-32.
- Borbón, A. C., Cabanillas, R. E., Álvarez, G. Design of a semiautomatic device for the measurement of the termal properties of Wall systems. 2013 ISES Solar World Congress.
- Casas F. Vladimir y Ríos S. Tamy G. (1996) Concepción y construcción de un dispositivo para medir la conductividad térmica de materiales para edificaciones. Universidad de Sonora, división de ingeniería, departamento de ingeniería civil.
- Cengel, Y. A. (2007). Transferencia de calor y masa. Tercera edición. México: McGraw Hill.
- Cengel, Y. A., & Hernán, P. J. (2004). Transferencia de calor. México: McGraw Hill.
- Fank P. Incropera, David P. DeWitt. (1999). Fundamentos de transferencia de calor, 4ª edición. Prentice Hall, México.

- Gallegos, R., Romero R. (1996). Sistemas constructivos y su comportamiento térmico en la vivienda de Mexicali, B.C., Ponencia en la XX Semana Nacional de Energía Solar, Xalapa, Veracruz.
- Gallegos R., Luna A, Bojórquez G (1997) Estimación experimental de conductividad térmica en materiales de construcción. XXI Semana Nacional de Energía Solar. Asociación Nacional de Energía Solar. Chihuahua, Chih.
- Gabriel Rascón Careaga. 1999. Diseño y construcción de un medidor de difusividad térmica para materiales de construcción. Universidad de Sonora, división de ingeniería, departamento de ingeniería química y metalurgia. Página 10-16, 93.
- Instituto Nacional de Estadística Y Geografía. México en cifras, información nacional. Viviendas en México (2010).
- NMX-C-404-ONNCCE-2005, Norma Mexicana, "Industria de la construcción – bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – Especificaciones y Métodos de Prueba", Marzo de 2006, México.
- NMX-C-460-ONNCCE-2009, Norma Mexicana, "Industria de la construcción – aislamiento térmico – valor R para las envolventes de vivienda por zona térmica para la república mexicana – especificaciones y verificación", 18 de agosto de 2009, México.
- NOM-008-ENER-2001, Norma Oficial Mexicana, Eficiencia Energética en Edificaciones, Envoltente en Edificios no Residenciales, 25 de abril segunda edición, México (2001).

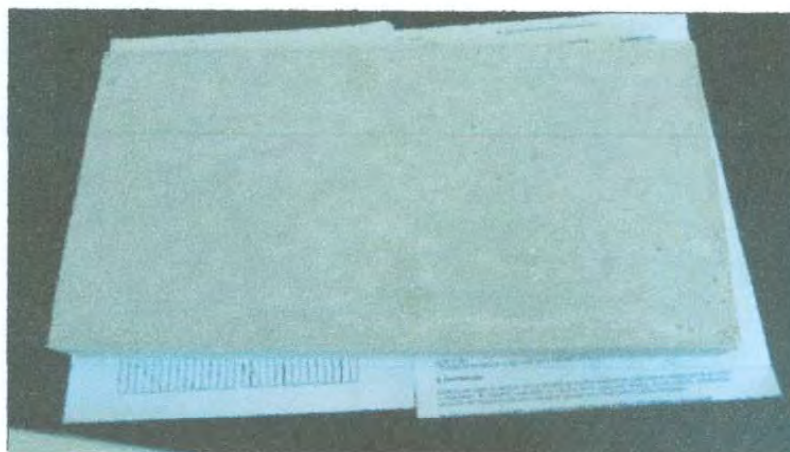
- NOM-020-ENER-2011, Norma Oficial Mexicana, Eficiencia Energética en Edificaciones, Envolvente de edificios para uso habitacional, 9 de agosto de 2011, México.
- Ossama A. Abdou, y Kris S. Murali b. The Efect of Air Cells and Mortar Joints on the Thermal Resistance of Concrete Masonry Walls, *Energy and Buildings*: 21, 111-119 (1994).
- Universidad de Sonora., Universidad de Sonora., & Universidad de Sonora. (2012). *Epistemus: ciencia, tecnología y salud*. Hermosillo, Sonora, México: Divisiones de Ingeniería, Ciencias Exactas y Naturales y Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad de Sonora. Página 27-32, 100.
- Vasile, C., S. Lorente y B. Perrin, Study of Convective Phenomena Inside Cavities Coupled with Heat and Mass Transfers Through Porous Media – Application to Vertical Hollow Bricks – A first Approach. *Energy and Buildings*: 28, 229-235 (1998).

ANEXOS

En este anexo se describe con fotografías el proceso de elaboración de los morteros utilizados para el enjarre de yeso y mortero en la muestra.



Descripción de mortero de enjarre.



Descripción de mortero de yeso.

Se anexan los reportes obtenidos por el medidor de conductividad térmica “ λ -Meter-EP500e” en el cual se comparan los resultados obtenidos de la madera y de la tablaroca para avalar que la medición realizada por el dispositivo de medición TR-01 son buenas, además de incluir reportes del poliestireno.



Medidor de conductividad térmica “ λ -Meter-EP500e”



Certificado de medición

Acta de ensayo según EN 12897 y EN 12894 punto 9



Fecha: 10/12/2013
 Certificado N°: Madera-09-12-13
 Preparación de la prueba: Lambda-Messtechnik GmbH Dresden
 Dispositivo de prueba: Aparato de medición de conductividad térmica "lambda-Meter EP500e" según EN 1946-2 de la empresa Lambda-Messtechnik GmbH Dresden
 Desarrollo de la medición: Placas de medida horizontal, parte caliente arriba

Normas: La medida del espesor se realizó según EN 823
 La medida de la conductividad térmica se llevó a cabo según ISO 8302

Verificador: Carlos Eduardo Quijada

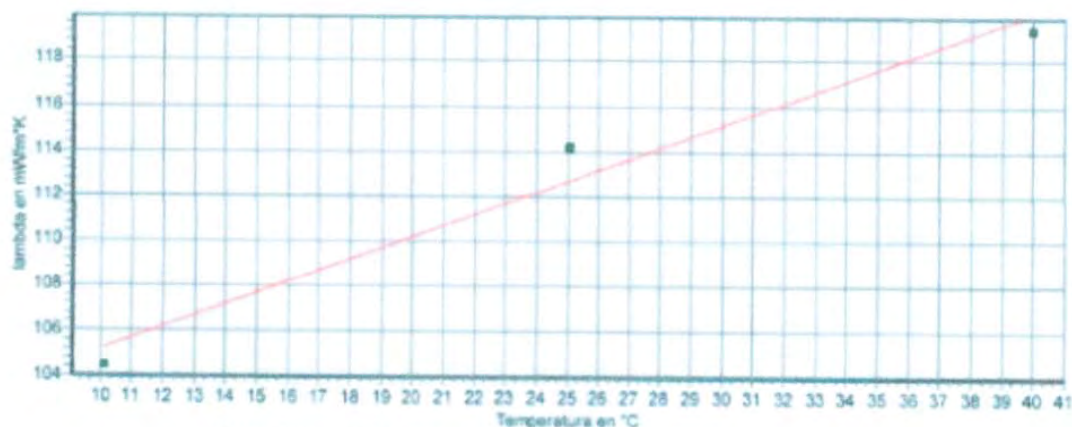
Nombre de la muestra	Madera	Dimensiones de la muestra	
Origen de la muestra	Indeterminado	Superficie	150 mm x 150 mm
Fecha de producción		Espesor	12.71 mm
Nombre del material	Madera de 1/2"	Espesor nominal	13 mm
Descripción del material	Madera	Masa de la muestra	167.3 g
		Densidad ap. de la muestra	585.5 kg/m³

Tratamiento preliminar de la

Modificación de la masa durante:
 el secado
 la medición

Humedad antes de la medición

Presión de prueba: 1000 Pa



	1ª Medición	2ª Medición	3ª Medición
Ensayo N°	09-12-13_10.1	09-12-13_25.1	09-12-13_40
Temperatura en °C	10.1	25.1	40
Dif.de temp. en K	0	0	0
lambda en mW/m²K	104.49	114.19	119.35
R en m²K/W	0.2338	0.2139	0.2047

Polynomio
 $y = f(T) = 0.4872 \cdot T + 100.21$
 EPS thickness effect 0.909 for lambda-10

Lambda-10: 105.19 mW/(m²K)
 R-10: 0.1208 m²K/W
 TC: 0.4872 mW/(m²K²)

© 2012 Lambda-Messtechnik GmbH Dresden

15/01/2014

Certificado de medición para la muestra de madera.



Certificado de medición

Acta de ensayo según EN 12667 y EN 12664 punto 9



Fecha 25/01/2014
Certificado N° Tablaroca-24-01-14
Preparación de la prueba Lambda-Messtechnik GmbH Dresden
Dispositivo de prueba Aparato de medición de conductividad térmica "lambda-Meter EP500e" según EN 1946-2 de la empresa Lambda-Messtechnik GmbH Dresden
Desarrollo de la medición Placas de medida horizontal, parte caliente arriba

Normas La medida del espesor se realizó según EN 823
 La medida de la conductividad térmica se llevó a cabo según ISO 8302
Verificador Carlos Eduardo Quijada

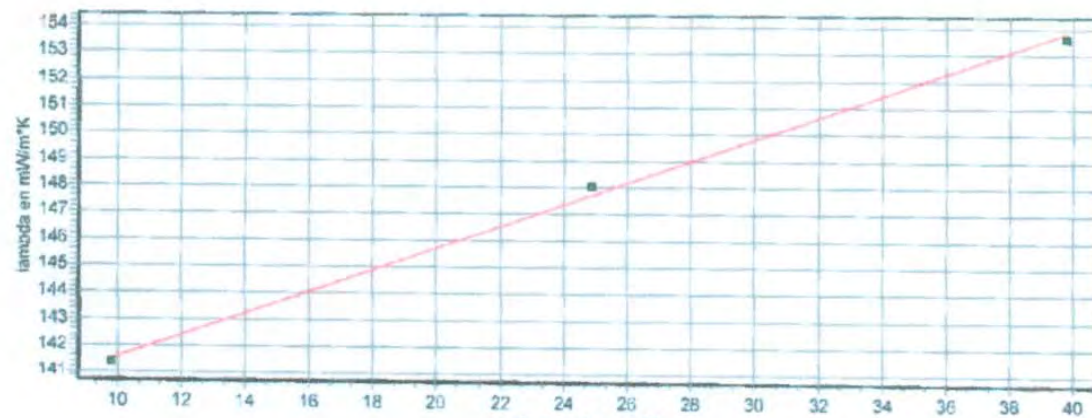
Nombre de la muestra	Tablaroca	Dimensiones de la muestra
Origen de la muestra	Indeterminado	Superficie 150 mm x 150 mm
Fecha de producción		Espesor 12.71 mm
Nombre del material	Tablaroca	Espesor nominal 13 mm
Descripción del material	Tablaroca de 1/2"	Masa de la muestra 166.8 g
		Densidad ap. de la muestra 584.6 kg/m³

Tratamiento preliminar de la

Modificación de la masa durante:
el secado
la medición

Humedad antes de la medición

Presión de prueba 1000 Pa



	1ª Medición	2ª Medición	3ª Medición
Ensayo N°	24-01-14_9.8	24-01-14_24.9	24-01-14_39.8
Temperatura en °C	9.8	24.9	39.8
Dif. de temp. en K	15	15	15
lambda en mW/m*K	141.35	148.07	153.66
R en m²K/W	0.131	0.1251	0.1205

Polinomio
 $y = f(T) = 0.4104 \cdot T + 137.50$

Lambda-10 141.61 mW/(m*K)
R-10 0.0898 m²K/W
TC 0.4104 mW/(m*K²)

© 2012 Lambda-Messtechnik GmbH Dresden

05/02/2014

firma

Certificado de medición para la muestra de tablaroca.



Certificado de medición

Acta de ensayo según EN 12667 y EN 12664 punto 9



Fecha: 28/10/2013
 Certificado N°: Foamular-25-10-13
 Preparación de la prueba: Lambda-Messtechnik GmbH Dresden
 Dispositivo de prueba: Aparato de medición de conductividad térmica "lambda-Meter EP500e" según EN 1946-2 de la empresa Lambda-Messtechnik GmbH Dresden
 Desarrollo de la medición: Placas de medida horizontal, parte caliente arriba

Normas: La medida del espesor se realizó según EN 823
 La medida de la conductividad térmica se llevó a cabo según ISO 8302

Verificador: Carlos Eduardo Quijada

Nombre de la muestra	Foamular	Dimensiones de la muestra
Origen de la muestra	Indeterminado	Superficie 500 mm x 500 mm
Fecha de producción		Espesor 25.68 mm
Nombre del material	Foamular de 1/2"	Espesor nominal 26 mm
Descripción del material	Foamular	Masa de la muestra 212 g
		Densidad ap. de la muestra 33 kg/m³

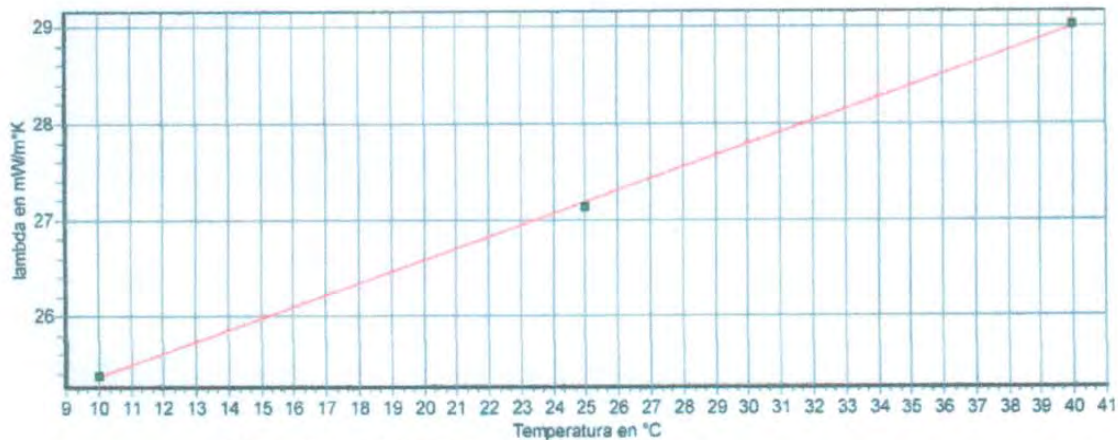
Tratamiento preliminar de la

Modificación de la masa durante:
el secado
la medición

Humedad antes de la medición

Presión de prueba 1000 Pa

Ris-T. 140051



	1ª Medición	2ª Medición	3ª Medición
Ensayo N°	25-10-13_10	25-10-13_25	25-10-13_40
Temperatura en °C	10	25	40
Dif.de temp. en K	0	0	0
lambda en mW/m*K	25.39	27.13	29.01
R en m²K/W	1.0114	0.9466	0.8852

Polynomio
 $y = f(T) = 0.1207 \cdot T + 24.16$
 EPS thickness effect 0.966 for lambda-10

Lambda-10 25.37 mW/(m*K)
 R-10 1.0122 m²K/W
 TC 0.1207 mW/(m*K²)

© 2012 Lambda-Messtechnik GmbH Dresden

15/01/2014

Certificado de medición para la muestra de poliestireno.