

---

CONSTRUCCIÓN DE UN CALORÍMETRO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA DE VIDRIOS Y MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN EN PARAGUAY.

**Gricelda Catalina Britez Gaona (1); Rosa Alexandra Amarilla Ramírez (2)**

**(1) Ingeniería Electromecánica, Facultad de Ingeniería-UNA**  
[gbritezgaona25@gmail.com](mailto:gbritezgaona25@gmail.com)

**(2) Ingeniería Electromecánica, Facultad de Ingeniería-UNA**  
[rosamarilla88@gmail.com](mailto:rosamarilla88@gmail.com)

<b>PALABRAS CLAVE</b>	<b>RESUMEN</b>
Calorímetro Transmitancia Térmica Método de la Placa Caliente Guardada	Se presenta el proceso de construcción de un calorímetro por el método de la placa caliente guardada para el Laboratorio de la FIUNA de acuerdo a la norma ASTM C-177. La calibración del calorímetro se realiza a partir de un cuerpo de prueba hecho de poliestireno expandido del cual se determinó su conductividad térmica en el Laboratorio de Medios Porosos y Propiedades Termofísicas del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Santa Catarina-Brasil, basado en la norma técnica ASTM C-518 "Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus". Una vez que el calorímetro se encuentra calibrado se procede a las mediciones utilizando cinco muestras diferentes y a partir del análisis de errores se obtienen las propiedades térmicas de las mismas. Posteriormente a través de la utilización del software Cypetherm loads se realiza la simulación utilizando los mismos materiales de las muestras, obteniéndose de esa manera las propiedades térmicas de las mismas y analizando los errores relativos entre el valor obtenido con el calorímetro y el valor obtenido con el software de simulación. Los resultados demuestran que el calorímetro funciona

---

correctamente y que el método que hemos desarrollado y utilizado para la determinación de la transmitancia térmica es válido y los resultados son aplicables en el campo de la ingeniería.

---

**KEYWORDS**

Technical evaluation  
Energy efficiency  
Optimization proposal

**ABSTRACT**

The process of construction of a calorimeter is presented by the hot plate method for the FIUNA Laboratory according to the ASTM C-177 standard. The calorimeter calibration is carried out from a test body made of expanded polystyrene whose thermal conductivity was determined in the Laboratory of Porous Medium and Thermophysical Properties of the Department of Mechanical Engineering of the Federal University of Santa Catarina-Brazil, based on ASTM C-518 technical standard or "Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus". Once the calorimeter is calibrated, measurements are carried out using five different samples and the thermal properties of the same are obtained from the error analysis. Subsequently, through the use of the Cypetherm loads software, the simulation is carried out using the same materials as the samples, thus obtaining their thermal properties and analyzing the relative errors between the value obtained with the calorimeter and the value obtained with the simulation software. The results show that the calorimeter works correctly and that the method that we have developed and used for the determination of thermal transmittance is valid and the results are applicable in the field of engineering.

---

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

La eficiencia energética es una de las principales metas del desarrollo sustentable. Dentro de las variables que permiten obtener ahorro energético y mejor confort térmico en los edificios, se encuentra la aislación térmica

En estado estacionario la propiedad que define la capacidad aislante de un material es la conductividad térmica. Sin embargo, en muchos casos, puede que no sea posible establecer parámetros como el espesor o la temperatura promedio de la superficie de la muestra. En estos casos, en lugar de determinar la conductividad térmica, se determina la conductancia térmica o transmitancia térmica.

En este trabajo se pretende construir el calorímetro para medir los valores de transmitancia térmica de distintos materiales de construcción existentes en nuestro medio donde se refleje el comportamiento real del material basado en nuestro sistema climático y que permitirá la estimación más precisa de energía y costos involucrados en la selección de uno u otro material.

Para determinar el comportamiento de los distintos materiales y elementos sometidos a una diferencia de temperatura es imprescindible el conocimiento de algunas propiedades físicas como pueden ser: la conductividad térmica, la difusividad térmica, la transmitancia térmica, etc. Conocer la transmitancia térmica nos permitirá elegir el material más apto según las necesidades y aplicaciones basadas en nuestro clima.

Para materiales aislantes el principal método utilizado para la medición de la conductividad térmica es el método de la placa caliente guardada. Es empleado preferencialmente para muestras planas, solidas, homogéneas y libres de humedad. Es un método simple basado en la transferencia de calor entre dos placas a temperaturas diferentes, donde el material a ser medido es colocado entre ellas.

### **1.1. Objetivos**

#### **1.1.1. Objetivo general**

- Construir un calorímetro para la determinación de la transmitancia térmica de vidrios y materiales utilizados en techos en Paraguay.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Describir el proceso de construcción del calorímetro por el método de la placa caliente guardada.
- Calibrar el prototipo mediante la determinación del error con referencia a la probeta patrón.
- Realizar mediciones de la transmitancia de los distintos materiales de construcción mediante el uso del calorímetro de placa caliente guardada construida.
- Analizar los datos obtenidos en las mediciones y calcular las propiedades térmicas para cada material.
- Utilizar un método estadístico para calcular la transmitancia térmica a partir de los datos de flujo de calor y temperatura.

## CAPÍTULO 2.

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Fundamentos de transferencia de calor.

##### 2.1.1. Transferencia de Calor

Siempre que exista un gradiente de temperatura en el interior de un sistema, o que dos sistemas a diferentes temperaturas fueran colocados en contacto, habrá una

transferencia de energía. El proceso por el cual la energía es transportada se conoce como Transferencia de Calor.

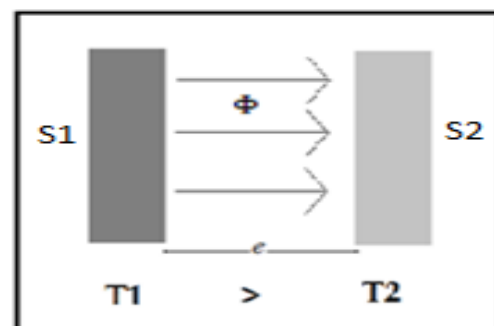
##### 2.1.2 Flujo de calor

Es el cociente entre la cantidad de calor que pasa de un sistema a otro y el tiempo requerido (se lo puede expresar como la densidad temporal de la energía). Su símbolo es  $\Phi$  y su unidad es W (Watt).

#### 2.2. Tipos de transferencia de calor

##### 2.2.1 Conducción

Si se analiza dos placas a diferentes temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , y cuyos espesores sean mínimos con respecto al resto de sus dimensiones, se produce un flujo de calor del plano de mayor temperatura hacia el de menor como se indica en la figura.



**Figura 2.1:** Forma de transferencia de calor. **Fuente:** Elaboración propia.

Este flujo es proporcional a la diferencia de temperaturas ( $T_1 - T_2$ ), a la conductividad del material ( $\lambda$ ) e inversamente proporcional al espesor ( $e$ ) del material atravesado por el flujo. El estudio de la conducción de calor se debe realizar en "régimen estacionario".

Para el caso citado la expresión del flujo es:

$$\Phi_k = \frac{(T_1 - T_2) \lambda}{e} \quad [W] \quad [2.2]$$

Dónde:

$\Phi_k$ : Flujo de calor transmitido por conducción por unidad de tiempo [W]

$T_1$ : Temperatura del cuerpo de mayor temperatura [ $^{\circ}K$ ]

$T_2$ : Temperatura del cuerpo de menor temperatura [ $^{\circ}K$ ]

$\lambda$ : Conductividad térmica del material [W/(m.  $^{\circ}K$ )]

$e$ : Espesor del cuerpo [m]

### 2.2.2 Convección

La convección es producida a través de un fluido (líquido o gaseoso) que transporta el calor entre zonas de diferentes temperaturas. El movimiento es a nivel macroscópico, donde se produce el movimiento de volúmenes relativamente grandes de fluido. La convección puede ser natural o forzada. En la convección

natural el movimiento del fluido es debido a causas naturales, es decir por una diferencia de densidades debida al gradiente de temperatura. Mientras que en la convección forzada es producida por medios externos ventiladores o bombas.

El flujo de calor transmitido se modela matemáticamente mediante la Ley de Enfriamiento de Newton:

$$\Phi_c = \bar{h}_c A \Delta T$$

Siendo:

$\Phi_c$  = flujo transmitido por unidad de tiempo por convección [W]

$\bar{h}_c$  = Coeficiente medio de transmisión de calor por convección [W/m<sup>2</sup>]

$A$  = Área de transmisión de calor [m<sup>2</sup>]

$\Delta T = (T_s - T)$  = Diferencia de temperatura entre la temperatura de la superficie y la temperatura del fluido [ $^{\circ}K$ ]

### 2.2.3. Radiación

Es la transferencia de calor en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), emitida por los cuerpos debido a su temperatura. La energía transmitida de esta forma es llamada calor radiante. no necesita un medio de transmisión y puede ocurrir en el vacío sin que se atenúe. La transferencia de calor por radiación es la más rápida.

Consideremos dos superficies 1 y 2 con las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  respectivamente, siendo  $T_1 > T_2$ . El flujo de calor recibido por la superficie 2 es proporcional a la diferencia de temperaturas ( $T_1 - T_2$ ), al coeficiente  $\alpha_r$  y a  $f$ . De esta manera se obtiene la siguiente expresión:

$$\Phi_r: (T_1 - T_2) \cdot \alpha_r \cdot f_1 \quad [\text{W}]$$

Siendo:

$\Phi_r$ : Calor transmitido por radiación [W]

$\alpha_r$ : Coeficiente de radiación expresado en  $[\text{W} / (\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})]$  y su valor es función de las emisividades de las dos superficies enfrentadas.

$f_1$ : Factor de forma correspondiente a la superficie 1.

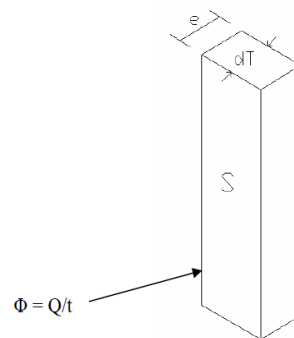
La radiación es la transferencia de energía medida por ondas electromagnéticas, emanadas por cuerpos calientes y absorbidos por cuerpos fríos.

### 2.3 Propiedades termo físicas de los materiales de construcción.

De las tres formas de conducción del calor tratadas anteriormente, vamos a dedicarnos a la transferencia de calor por conducción. Para un material sólido, la conducción es función de tres parámetros característicos del medio que son: la

conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico.

La conductividad térmica es una propiedad intrínseca de los materiales y representa la capacidad del material para conducir más o menos calor, y que está determinada por la Ley de Fourier. Se puede observar en la figura que la conductividad térmica es el flujo de calor que atraviesa un material según su superficie "S", su espesor "e" y la diferencia de temperatura entre ambas caras " $\Delta T$ ".



**Figura 2.2:** Conductividad Térmica.

**Fuente:** [6].

$$\lambda: \frac{\Phi \cdot e}{(T_2 - T_1)}$$

Dónde:

$\lambda$  : Conductividad térmica del material  $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{ } ^\circ\text{K})]$

$\Phi$ : Flujo de calor unidireccional  
[W/m<sup>2</sup> ]

e: Espesor [m]

T<sub>2</sub>-T<sub>1</sub>: Diferencia de temperatura  
entre las caras opuestas [°K]

#### 2.4 Factores que alteran el valor de la conductividad térmica ( $\lambda$ )

- Densidad del material.
- Temperatura
- Humedad

#### 2.5 Humedad

La humedad en la construcción causa un sin número de incidencias que comprometen el confort de los usuarios, afectan directamente la salud de sus ocupantes y además, son causante del deterioro, rápido envejecimiento y pérdida del valor del edificio. En sus diferentes estados, líquido o vapor, se halla siempre presente en la construcción. La presencia de humedad en la envolvente edilicia modifica el comportamiento higrotérmico de la misma y favorece la aparición de procesos patológico.

#### 2.6 Transmitancia Térmica (U)

Es un coeficiente que indica la cantidad de calor que atraviesa una unidad de superficie en una unidad de tiempo de un elemento constructivo de caras planas paralelas isotérmicas cuando entre dichas caras hay un gradiente térmico unitario.

La transmitancia térmica se obtiene de la ecuación:

$$U = \frac{\Phi}{A \cdot (T_1 - T_2)}$$

Siendo:

U: Transmitancia térmica [w/m<sup>2</sup>.°K]

$\Phi$ : Flujo de calor transferido [w]

T<sub>1</sub>: temperatura a una cara del elemento [°K]

T<sub>2</sub>: temperatura en la otra cara del elemento [°K]

A: área del elemento [m<sup>2</sup>]

Cuanto menor sea el valor de U, menor será el paso de energía entre ambas caras, y por lo tanto, mejor la capacidad aislante del elemento constructivo.

Se emplea para expresar la capacidad aislante de un elemento constructivo particular. Es el inverso a la resistencia térmica.

Una vez conocida la resistencia térmica sabemos que la transmitancia es:

$$U = \frac{1}{R_T} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Siendo:

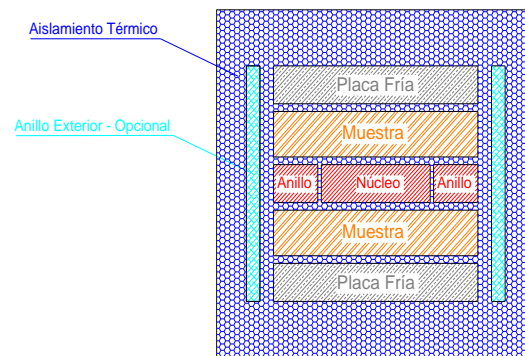
$R_T$ : Resistencia térmica total  $[\frac{m^2.K}{W}]$

### CAPÍTULO 3 CONSTRUCCIÓN DEL CALORÍMETRO

#### 3.1. Método de la Placa Caliente Guardada

El aparato de placa caliente guardada proporciona un medio para medir el flujo de calor en estado estable a través de materiales aislantes, que consiste en una unidad calentadora, compuesta por un área de medición central y concéntrica, guardas calentadas por separado, y dos placas de enfriamiento.

El principio del método es el sometimiento de las muestras a un flujo de calor de régimen estacionario de dirección unidireccional, midiéndose las temperaturas en las caras de las muestras. La placa central (placa caliente guardada o núcleo) es calentada por intermedio de una resistencia caliente alimentada por una fuente de “tensión-corriente”, la misma tiene la función de distribuir uniformemente el calor a través de la muestra.



**Figura 3.1:** Diseño de la placa Caliente Guardada simétrica.

**Fuente:** [03]

La muestra de prueba está intercalada entre estas tres unidades. La medición en este caso produce un resultado que es el promedio de las dos piezas y por lo tanto es importante que las dos piezas sean idénticas.

#### 3.2 Método utilizando transductores de flujos de calor

El método flujométrico es un método comparativo o secundario para la medición de la conductividad térmica, donde el régimen permanente es alcanzado más rápidamente que en el caso de la placa caliente guardada, y se diferencia del método de la placa caliente solamente en la forma de medición del flujo de calor.

El principio del método flujométrico es someter a la muestra a un flujo de calor, generado por una resistencia



calentadora alimentada por una fuente de tensión. Si observamos la figura (b), la resistencia calentadora disipa calor en la placa caliente, que tiene la función de distribuir uniformemente el calor en toda su área, transformándose en una superficie isotérmica. Todo el calor generado por la resistencia calentadora atraviesa el primer transductor, luego la muestra, después el segundo transductor y finalmente es retirado por la placa fría.



Los Flujómetros o Transductores miden el flujo de calor que lo atraviesa, que es el mismo que atraviesa la muestra, considerando que no ocurran fugas laterales. De esta forma, el flujo de calor que atraviesa la muestra es obtenido sin la necesidad de conocer la potencia inyectada, como en el caso de la placa caliente guardada. Conociéndose el área de la muestra,

el espesor, el flujo de calor que atraviesa la muestra y midiéndose las temperaturas de las caras de la misma, se obtiene a través de la Ley de Fourier, la conductividad térmica de la muestra.

### 3.3 Normas utilizadas

En nuestro caso adoptamos la norma ASTM C-177 para establecer el diseño, criterios de fabricación y operación de nuestro calorímetro. Este método de prueba abarca los modos de medición de una cara y de doble cara, con flujo de calor horizontal o vertical, aplicable a la medición de una amplia variedad de muestras, desde sólidos opacos hasta materiales porosos o transparentes, y una amplia gama de condiciones que incluyen mediciones realizadas en extremos de temperatura y con diversos gases y presiones.

### 3.4 Componentes mecánicos del Calorímetro

#### 3.4.1 Placa caliente con anillo de guarda

Es el equipamiento de calentamiento del sistema, que se divide en dos partes: la parte central o núcleo y el anillo de guarda o protección. Posee elementos calientes localizados



### 3.4.3 Muestras

En el método simétrico la muestra es compuesta de dos piezas idénticas. La medición en este caso produce como resultado la media de los dos valores obtenidos, que deben ser tan próximos como fuese posible.

La muestra se debe dimensionar para cubrir toda la sección medida y el área de protección cuando sea posible. Es deseable cubrir el espacio entre la placa caliente guardada y la protección primaria cuando el tamaño de la muestra es limitado. La porción de protección del volumen entre las placas de calentamiento y enfriamiento debe llenarse con material que tenga características de conductancia térmica similares a las de la muestra.

### 3.4.4 Aislamiento de borde

El espacio intermedio entre los conjuntos de la superficie fría y caliente, las muestras y la protección secundaria debe llenarse con un material aislante.

### 3.4.5 Recinto

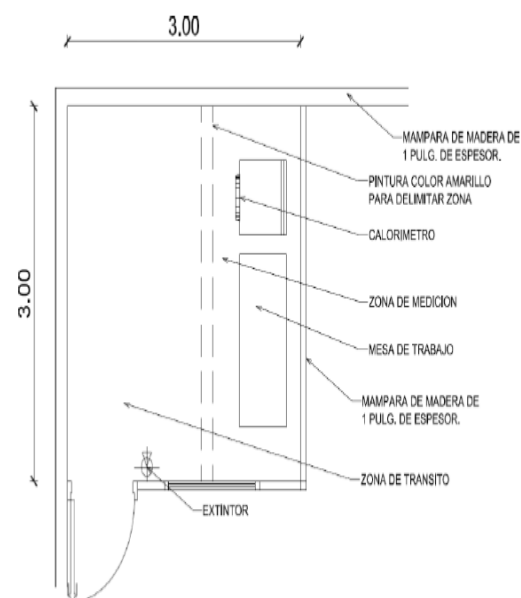
La placa caliente debe colocarse dentro de un gabinete cuando se usa el aparato para mantener un ambiente gaseoso diferente al ambiente del laboratorio.

El ambiente del laboratorio debe ser mantenido a una temperatura entre

18 y 23 °C ( $\pm 3K$ ) con una humedad relativa mantenida entre 25 a 65%. Para materiales que contengan humedad, las muestras deben ser acondicionadas a  $20\pm 2$  °C y  $50\pm 5\%$  de humedad relativa.

### 3.4.6 Adecuaciones Físicas del Laboratorio.

El lugar designado para la ubicación del calorímetro es el Laboratorio de Mecánica y Energía, el mismo debió adecuarse en términos de liberación del espacio, montaje de mamparas de forma tal a delimitar el espacio a ser utilizado, acondicionamiento del aire, así como las tomas corrientes monofásicas y trifásicas.



### 3.4.7 Método de Refrigeración

Para la refrigeración de la placa fría del calorímetro se utilizó un tanque de plástico de 100 litros que contenía

agua de la canilla a 22°C tomada por una cañería de succión por una motobomba de ¼ HP, la misma impulsaba el agua hacia las 2 placas frías y luego retornaba al recipiente completando un circuito cerrado.



### 3.4.8 Puesta en Funcionamiento

Solo basta con aplicarle tensión 220V alterna a la fuente de la resistencia eléctrica, la fuente transforma a corriente continua y a una tensión de 24V que es la necesaria para que la placa caliente funcione y entre en servicio. Posterior a la puesta en funcionamiento de la placa caliente, se conecta el Arduino a través de un puerto USB a la PC, la misma usa como fuente de energía la tensión del puerto USB (5 voltios CC).

Luego de la puesta en funcionamiento, se pudo observar primeramente el tiempo de estabilización de la temperatura de la placa caliente, con esto iniciando en 25°C y luego de 15 minutos se pudo observar que la placa caliente llego a su temperatura de seteo que fue de 41,4°C.

### 3.4.9 Parámetros a medir

Para determinar las propiedades térmicas de los materiales mediante este método es necesario alcanzar las condiciones de régimen permanente y realizar mediciones del flujo de calor unidireccional en la sección de medición, el área de la sección de medición, el gradiente de temperatura a través de la muestra en términos de la temperatura de la placa caliente y la temperatura de la placa fría y los espesores de las muestras colocados para su medición. Entre estos, solamente el espesor de la muestra es medido directamente, los otros son calculados a través de mediciones fundamentales o entonces convertido a través de dispositivos eléctricos.

Luego podremos calcular las propiedades térmicas:

$$R: \frac{(T_h - T_c)}{\Phi}$$

$$U: \frac{\Phi}{(T_h - T_c)}$$

$$\lambda: \frac{\Phi \cdot e}{(T_h - T_c)}$$

## **CAPÍTULO 4. CALIBRACIÓN DEL CALORIMETRO**

Antes de realizar las mediciones de los materiales del cual se quieren conocer sus propiedades térmicas se procedió a la calibración del equipo. Para esto se utilizó un cuerpo de prueba hecho de poliestireno expandido, del cual se determinó su conductividad térmica en el Laboratorio de Medios Porosos y Propiedades Termofísicas del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Santa Catarina-Brasil, basado en la norma técnica ASTM C-518. “Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus”.

### **4.1 Equipos utilizados para la calibración de la probeta patrón.**

#### **4.1.1 Medidor de resistencia térmica de alta precisión**

##### **TRSYS01**

En su configuración estándar el sistema viene equipado con dos sensores de flujo de calor así como

también dos sensores de temperaturas utilizados para medir diferencias de temperatura. Incluye el software LoggerNet para monitoreo y recolección de datos. La alimentación es mediante un adaptador para 110 –

220 VAC 50/60 Hz que brinda entre 9.6 y 16 VDC al sistema. Tiene una precisión de medición de voltaje de 1 microvoltio y tiene la capacidad de almacenar datos durante por lo menos 30 días.

El análisis de los datos lo realiza el usuario mediante el software incluido, los datos almacenados en el equipo pueden ser transmitidos a la PC y luego exportados a una hoja de cálculo (EXCEL).

### **4.2 Procedimiento de medición.**

Conectar la fuente que alimenta al arduino que se conecta a la placa caliente, este llega a su temperatura de régimen permanente en unos segundos que fue seteado en 40.1°C.

-Colocar sobre la placa caliente el sensor de temperatura tipo K (cable verde) del TRSYS01 etiquetado como “TC 21” en el centro de la placa caliente.

-Ubicar en el cuerpo de prueba un sensor de temperatura tipo K (cable

verde) del TRSYS01 etiquetado como “TC 12” en la cara de la probeta que ira frente a la placa caliente.

-Ubicar un sensor de temperatura tipo K (cable verde) del TRSYS01 etiquetado como “TC 11” en la cara de la probeta que ira frente a la placa fría.

-Ubicar un sensor de flujo de calor etiquetado como “HFP01-10” en la cara de la probeta que ira frente a la placa caliente atendiendo la siguiente precaución: ubicar la cara de color rojo identificado como lado positivo (+) del sensor de flujo de calor siempre apuntando a la fuente de calor, de lo contrario se tendrán mediciones negativas.

-Un sensor de flujo de calor etiquetado como “HFP01-20” en la cara de la probeta que ira frente a la placa fría atendiendo la siguiente precaución: ubicar la cara de color rojo identificado como lado positivo (+) del sensor de flujo de calor siempre apuntando a la fuente de calor, de lo contrario se tendrán mediciones negativas.

-Introducir la probeta dentro del calorímetro cuidando que se mantenga siempre un buen contacto

entre los sensores y la superficie que será medida.

-Cerrar el calorímetro.

-Energizar el TRSYS01.

### 4.3 Software LOGGERNET para almacenamiento de datos

El TRSYS 01 posee un software en donde es posible monitorear los datos en tiempo real, recopilar los datos y llevarlos a Excel.

Para la configuración del equipo y utilización del software se debe instalar el software en la PC.

### 4.3 Toma de datos y análisis

Las mediciones con el TRSYS 01 son almacenadas en el CR1000. Estos datos pueden ser recopilados para su posterior análisis

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	TOAS	CR1000	CR1000	F1131	CR1000.S	CP11trsys	59174	IIF_10min			
2	HIMLSIAMP	HLECOND	PIemp	L III 1	L III 2	III 1 Avg	III 2 Avg	III 2 Avg	III 2 Avg	III 2 Avg	III 2 Avg
3	IS	RN	deg C	uV/(W/m	uV/(W/m	W/m <sup>2</sup>	deg C	deg C	W/m <sup>2</sup>	deg C	deg C
4		Smp	Smp	Smp	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg	Avg
5	07/08/2020 09:40	0	22.64	60	60	25.88	24.2	-14.13	17.8	39.22	16.62
6	07/08/2020 09:50	1	22.73	60	60	23.76	24.30	14.01	17.91	39.18	16.67
7	07/08/2020 10:00	2	22.78	60	60	23.29	24.65	-13.75	17.66	39.17	16.64
8	07/08/2020 10:10	3	22.87	60	60	22.95	24.92	-13.5	17.4	39.18	16.64
9	07/08/2020 10:20	4	22.98	60	60	22.49	25.2	-13.25	17.11	39.2	16.63
10	07/08/2020 10:30	5	23.04	60	60	21.99	25.47	-13	16.82	39.2	16.62
11	07/08/2020 10:40	6	23.12	60	60	21.59	25.72	-12.76	16.52	39.19	16.61
12	07/08/2020 10:50	7	23.18	60	60	21.25	25.97	-12.51	16.23	39.19	16.57
13	07/08/2020 11:00	8	23.27	60	60	20.83	26.22	-12.28	15.94	39.19	16.5
14	07/08/2020 11:10	9	23.32	60	60	20.61	26.47	-12.05	15.64	39.2	16.5
15	07/08/2020 11:20	10	23.38	60	60	19.9	26.72	-11.82	15.35	39.2	16.39
16	07/08/2020 11:30	11	23.47	60	60	19.74	26.96	-11.58	15.05	39.19	16.42
17	07/08/2020 11:40	12	23.55	60	60	19.25	27.2	-11.34	14.76	39.19	16.43
18	07/08/2020 11:50	13	23.61	60	60	18.77	27.44	-11.12	14.48	39.19	16.43
19	07/08/2020 12:00	14	23.7	60	60	17.95	27.68	-10.89	13.65	39.19	16.37
20	07/08/2020 12:10	15	23.78	60	60	17.92	27.91	-10.68	13.64	39.21	16.35
21	07/08/2020 12:20	16	23.84	60	60	17.91	28.15	-10.46	13.63	39.21	16.31
22	07/08/2020 12:30	17	23.93	60	60	17.39	28.37	-10.24	13.31	39.2	16.3
23	07/08/2020 12:40	18	24.01	60	60	17.2	28.6	-10.01	13.2	39.19	16.29
24	07/08/2020 12:50	19	24.07	60	60	17.15	28.83	-9.8	13.11	39.19	16.26
25	07/08/2020 13:00	20	24.16	60	60	16.5	29.05	-9.58	12.49	39.18	16.24
26	07/08/2020 13:10	21	24.22	60	60	16.13	29.27	-9.39	12.25	39.2	16.26
27	07/08/2020 13:20	22	24.3	60	60	15.38	29.49	-9.17	11.98	39.18	16.17
28	07/08/2020 13:30	23	24.36	58.8	59	15.63	29.7	-8.96	11.83	39.18	16.05
29	07/08/2020 13:40	24	24.45	58.8	59	15.35	29.91	-8.77	11.67	39.19	15.98
30	07/08/2020 13:50	25	24.51	58.8	59	14.97	30.11	-8.57	11.39	39.18	16.06
31	07/08/2020 14:00	26	24.63	58.8	59	14.67	30.33	-8.38	11.15	39.19	16.06

Figura 4.7: Datos recopilados por el TRSY01. Fuente: [11]

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1 Calibración con la probeta patrón

HF\_PC: es el flujo de calor medido en la superficie del cuerpo de prueba próxima a la placa caliente.

HF\_PF: es el flujo de calor medido en la superficie del cuerpo de prueba próxima a la placa fría.

HF\_Medio: flujo de calor medio entre HF\_PC y HF\_PF.

Temp\_PC: temperatura medida en la superficie del cuerpo de prueba próxima a la placa caliente.

Temp\_PF: temperatura medida en la superficie del cuerpo de prueba próxima a la placa fría.

#### 5.1.1 Cálculos para la probeta patrón

En esta sección se muestran las ecuaciones utilizadas en la determinación de los valores de **conductividad, resistencia y transmitancia térmica** para la probeta patrón.

#### 5.1.2 Cálculo de HF\_Medio

$$[HF_{Medio}]_i = \frac{[HF_{PC}]_i + [HF_{PF}]_i}{2}$$

#### 5.1.3 Cálculo de las pérdidas de flujo

$$[Perdidas]_i = [HF_{PC}]_i - [HF_{PF}]_i$$

$$[Perdidas]_{promedio} = \frac{\sum_{i=0}^{i=n} [Perdidas]_i}{n}$$

$$[Perdidas]_{promedio} = 4,23 [W]$$

En promedio se pierden 4,23 Vatios del flujo de calor que ingresa a la probeta. Estas pérdidas podrían ser debidas a flujos de calor en las paredes laterales, fuera del contacto de las placas, y pérdidas debidas al fenómeno de convección producidas por no haber un contacto pleno entre los componentes del calorímetro y el cuerpo de prueba.

#### 5.1.4 Determinación del régimen permanente

Para determinar esta condición se utilizó el criterio establecido en la norma ABNT 15220 parte 5 sección 8.5 en donde se indica que “para considerar un régimen como permanente las mediciones individuales de flujo de calor no deben variar más del 2%, en valor absoluto, con respecto a la media del conjunto de mediciones realizadas” (Ref. 13).

#### 5.1.5 Cálculo del porcentaje de variación

$$[HF_{Medio}]_{promedio} = \frac{\sum_{i=3}^{i=n} [HF_{Medio}]_i}{n}$$

$$[\% \text{Variación}]_i = \text{ABS} \left\{ \frac{[\text{HF}_{\text{Medio}}]_i - [\text{HF}_{\text{Medio}}]_{\text{promedio}}}{[\text{HF}_{\text{Medio}}]_{\text{promedio}}} \right\} \times 100$$

$$[\% \text{Variación}]_i \leq 2\%$$

El criterio establecido en la norma, considera que por lo menos 5 mediciones consecutivas deben cumplir la condición observada en la expresión 5.6 para el cálculo de las propiedades térmicas

### 5.1.6 Determinación de las propiedades térmicas

$$[R]_i = \frac{[\text{Temp}_{\text{PC}}]_i - [\text{Temp}_{\text{PF}}]_i}{[\text{HF}_{\text{Medio}}]_i}$$

$$[U]_i = \frac{1}{[R]_i}$$

$$[\lambda]_i = \frac{L}{[R]_i}$$

$$[\% \text{Error relativo}]_i = \text{ABS} \left\{ \frac{[\lambda]_i - [\lambda]_{\text{patron}}}{[\lambda]_{\text{patron}}} \right\} \times 100$$

$$[\% \text{Error relativo}]_{\text{promedio}} = \frac{\sum_{i=0}^n [\% \text{Error}]_i}{n}$$

$$[\% \text{Error relativo}]_{\text{promedio}} = 2,86\%$$

Con estos datos, el resultado de conductividad térmica muestra un error relativo con respecto a la probeta patrón que se considera indiferente, por lo que se concluye que se encuentra realizada la calibración del Calorímetro.

### 5.1.7 Análisis de errores

$$X = \bar{X} \pm \Delta X$$

Dónde:

$\bar{X}$  : Es el valor promedio de los datos.

$\Delta X$  : Es el error o incertidumbre absoluta de la medición.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N}$$

$$\Delta X = \sqrt{\sigma_{est}^2 + \sigma_{nom}^2}$$

Dónde:

$x_i$ : Los valores individuales medidos.

$N$ : Cantidad de valores medidos.

$\sigma_{est}$  : Es el error o incertidumbre estadística

$\sigma_{nom}$  : Es el error nominal de una medición.

$$\sigma_{est}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}$$

El error nominal  $\sigma_{nom}$  en un experimento dado es la suma de todas las incertidumbres presentes durante la realización del mismo (Ref. 15). Con esto podemos expresar los resultados de las mediciones realizadas.

#### 5.1.7.1 Flujo de calor de la placa caliente. HF\_PC

$$\bar{X} = 17,59 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$\sigma_{est}^2 = -7,19 \times 10^{-17}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,87$$



$$\Delta X = 0,93$$

$$HF_{PC} = 17,59 \pm 0,93 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

### 5.1.7.2 Flujo de calor de la placa fría. HF\_PF

$$\bar{X} = 13,36 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$\sigma_{est}^2 = 1,83 \times 10^{-17}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,66$$

$$\Delta X = 0,81$$

$$HF_{PF} = 13,36 \pm 0,81 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

### 5.1.7.3 Temperatura placa caliente. T\_PC

$$\bar{X} = 39,19 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\sigma_{est}^2 = 3,21 \times 10^{-16}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,78$$

$$\Delta X = 0,88$$

$$T_{PC} = 39,19 \pm 0,88 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### 5.1.7.4 Temperatura placa fría. T\_PF

$$\bar{X} = 28,35 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\sigma_{est}^2 = 1,09 \times 10^{-16}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,56$$

$$\Delta X = 0,75$$

$$T_{PF} = 28,35 \pm 0,75 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

## 5.2 Propiedades térmicas

### 5.3 5.2.1 Resultado de [HF\_Medio]

$$[HF_{Medio}] = \overline{[HF_{Medio}]} + \Delta[HF_{Medio}]$$

Donde:

$$\overline{[HF_{Medio}]} = [HF_{Medio}]_{promedio} = \frac{\sum_{i=1}^n [HF_{Medio}]_i}{n}$$

$$\Delta[HF_{Medio}] = \frac{\Delta[HF_{PC}] + \Delta[HF_{PF}]}{2}$$

$$\Delta[HF_{Medio}] = \frac{0,93 + 0,81}{2} = 0,87$$

$$\overline{HF_{Medio}} = 15,48 \pm 0,87 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

### 5.2.3 Resistencia térmica

$$[R]_i = \frac{[T_{PC}]_i - [T_{PF}]_i}{[HF_{Medio}]_i}$$

$$\Delta R = \left| \frac{\partial R}{\partial T_{PC}} \right| \cdot \Delta T_{PC} + \left| \frac{\partial R}{\partial T_{PF}} \right| \cdot \Delta T_{PF} + \left| \frac{\partial R}{\partial HF_{Medio}} \right| \cdot \Delta HF_{Medio}$$

$$\Delta R = \frac{0,88}{15,48} + \frac{0,75}{15,48} + \frac{(39,19 - 28,35)}{15,48^2} \times 0,87$$

$$\Delta R = 0,14$$

$$R = 0,69 \pm 0,14 \text{ [m}^2 \cdot \text{K/W]}$$

### 5.2.4 Transmitancia térmica.

$$[U]_i = \frac{1}{[R]_i}$$

$$\Delta T = \left| \frac{\partial T}{\partial R} \right| \cdot \Delta R$$

$$\Delta T = \frac{1}{0.69^2} \times 0.14$$

$$\Delta T = 0,30$$

$$U = 1,43 \pm 0,30 [\text{W}/\text{m}^2.\text{K}]$$

### 5.2.5 Conductividad térmica

$$[\lambda]_i = \frac{L}{[R]_i}$$

$$\Delta \lambda = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial R} \right| \cdot \Delta R$$

$$\Delta \lambda = \frac{0,04296}{0,69^2} \times 0,144$$

$$\Delta \lambda = 0,0129$$

$$\lambda = 0,04296 \pm 0,0129 [\text{W}/\text{m}.\text{K}]$$

## 5.4 Determinación de las propiedades térmicas de las muestras.

### 5.3.1 Muestra 1

Tejuela de cerámica + Lona  
+ Teja Cerámica

#### 5.3.1.1 Flujo de calor de la placa caliente. HF\_PC

$$\bar{X} = 113,01 [\text{W}/\text{m}^2]$$

$$\sigma_{est}^2 = -1,24 \times 10^{-15}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 5,65$$

$$\Delta X = 2,37$$

$$HF_{PC} = 113,01 \pm 2,37 [\text{W}/\text{m}^2]$$

#### 5.3.1.2 Flujo de calor de la placa fría. HF\_PF

$$\bar{X} = 7,57 [\text{W}/\text{m}^2]$$

$$\sigma_{est}^2 = 0$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,37$$

$$\Delta X = 0,61$$

$$HF_{PF} = 7,57 \pm 0,61 [\text{W}/\text{m}^2]$$

#### 5.3.1.3 Temperatura placa caliente. T\_PC

$$\bar{X} = 36,66 [^{\circ}\text{C}]$$

$$\sigma_{est}^2 = -3,11 \times 10^{-17}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,73$$

$$\Delta X = 0,85$$

$$T_{PC} = 36,66 \pm 0,85 [^{\circ}\text{C}]$$

#### 5.3.1.4 Temperatura placa fría.

##### T\_PF

$$\bar{X} = 24,18 [^{\circ}\text{C}]$$

$$\sigma_{est}^2 = 6,23 \times 10^{-17}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,48$$

$$\Delta X = 0,69$$

$$\Delta \lambda = 0,205$$

$$T_{PF} = 24,18 \pm 0,69 [^{\circ}\text{C}]$$

$$\lambda = 0,409 \pm 0,205 [\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$$

### 5.3.1.5 Resultado de [HF\_Medio]

$$\Delta[\text{HF}_{\text{Medio}}] = \frac{\Delta[\text{HF}_{\text{PC}}] + \Delta[\text{HF}_{\text{PF}}]}{2}$$

$$\Delta[\text{HF}_{\text{Medio}}] = \frac{2,37 + 0,61}{2} = 1,49$$

$$\overline{\text{HF}_{\text{Medio}}} = 60,29 \pm 1,49 [\text{W}/\text{m}^2]$$

### 5.3.1.6 Resistencia térmica

$$\Delta R = \frac{0,85}{60,29} + \frac{0,69}{60,29} + \frac{(36,66 - 24,18)}{60,29^2} \times 1,49$$

$$\Delta R = 0,03$$

$$R = 0,25 \pm 0,03 [\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}]$$

### 5.3.1.7 Transmitancia térmica

$$\Delta T = \left| \frac{\partial T}{\partial R} \right| \cdot \Delta R$$

$$\Delta T = \frac{1}{0,25^2} \times 0,03$$

$$\Delta T = 0,5$$

$$U = 5,12 \pm 0,5 [\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]$$

### 5.3.1.8 Conductividad térmica

$$\Delta \lambda = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial R} \right| \cdot \Delta R$$

$$\Delta \lambda = \frac{0,409}{0,25^2} \times 0,03$$

### 5.3.2 Muestra 2

Tejuela de cerámica + Membrana  
Asfáltica + Teja Cerámica

#### 5.3.2.1 Flujo de calor de la placa caliente. HF\_PC

$$\bar{X} = 38,80 [\text{W}/\text{m}^2]$$

$$\sigma_{est}^2 = 1,26 \times 10^{-16}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 1,94$$

$$\Delta X = 1,39$$

$$HF_{PC} = 38,80 \pm 1,39 [\text{W}/\text{m}^2]$$

#### 5.3.2.2 Flujo de calor de la placa fría. HF\_PF

$$\bar{X} = 14,18 [\text{W}/\text{m}^2]$$

$$\sigma_{est}^2 = -4,3 \times 10^{-18}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,70$$

$$\Delta X = 0,84$$

$$HF_{PF} = 14,18 \pm 0,84 [\text{W}/\text{m}^2]$$

#### 5.3.2.3 Temperatura placa caliente. T\_PC

$$\bar{X} = 38,12 [^{\circ}\text{C}]$$

$$\sigma_{est}^2 = 1,84 \times 10^{-16}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,76$$

$$\Delta X = 0,87$$

$$T_{PC} = 38,12 \pm 0,87 [^{\circ}\text{C}]$$

### 5.3.2.4 Temperatura placa fría.

#### T\_PF

$$\bar{X} = 29,75 [^{\circ}\text{C}]$$

$$\sigma_{est}^2 = -5,31 \times 10^{-17}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,59$$

$$\Delta X = 0,77$$

$$T_{PF} = 29,75 \pm 0,77 [^{\circ}\text{C}]$$

### 5.3.2.5 Resultado de [HF\_Medio]

$$\Delta[\text{HF}_{\text{Medio}}] = \frac{\Delta[\text{HF}_{\text{PC}}] + \Delta[\text{HF}_{\text{PF}}]}{2}$$

$$\Delta[\text{HF}_{\text{Medio}}] = \frac{1,39 + 0,84}{2} = 1,11$$

$$\overline{\text{HF}_{\text{Medio}}} = 26,49 \pm 1,11 [\text{W}/\text{m}^2]$$

### 5.3.2.6 Resistencia térmica

$$\Delta R = \frac{0,87}{26,49} + \frac{0,77}{26,49} + \frac{(38,12 - 29,75)}{26,49^2} \times 1,11$$

$$\Delta R = 0,075$$

$$R = 0,32 \pm 0,075 [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$$

### 5.3.2.7 Transmitancia térmica

$$\Delta T = \left| \frac{\partial T}{\partial R} \right| \cdot \Delta R$$

$$\Delta T = \frac{1}{0,32^2} \times 0,075$$

$$\Delta T = 0,7$$

$$U = 3,10 \pm 0,7 [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$$

### 5.3.2.8 Conductividad térmica

$$\Delta \lambda = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial R} \right| \cdot \Delta R$$

$$\Delta \lambda = \frac{0,409}{0,32^2} \times 0,075$$

$$\Delta \lambda = 0,287$$

$$\lambda = 0,24 \pm 0,287 [\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$$

### 5.3.3 Muestra 3

Tejuela de cerámica + ALU10 + Teja Cerámica

#### 5.3.3.1 Flujo de calor de la placa caliente. HF\_PC

$$\bar{X} = 19,70 [\text{W}/\text{m}^2]$$

$$\sigma_{est}^2 = -5,59 \times 10^{-17}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,98$$

$$\Delta X = 0,99$$

$$\text{HF}_{\text{PC}} = 19,70 \pm 0,99 [\text{W}/\text{m}^2]$$

#### 5.3.3.2 Flujo de calor de la placa fría. HF\_PF

$$\bar{X} = 9,9 [\text{W}/\text{m}^2]$$

$$\sigma_{est}^2 = 2,08 \times 10^{-17}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,49$$

$$\Delta X = 0,70$$

$$HF_{PF} = 9,9 \pm 0,70 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

### 5.3.3.3 Temperatura placa caliente. T\_PC

$$\bar{X} = 38,87 [^{\circ}\text{C}]$$

$$\sigma_{est}^2 = -4,04 \times 10^{-16}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,77$$

$$\Delta X = 0,88$$

$$T_{PC} = 38,87 \pm 0,88 [^{\circ}\text{C}]$$

### 5.3.3.4 Temperatura placa fría. T\_PF

$$\bar{X} = 29,49 [^{\circ}\text{C}]$$

$$\sigma_{est}^2 = 8,46 \times 10^{-17}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,58$$

$$\Delta X = 0,76$$

$$T_{PF} = 29,49 \pm 0,76 [^{\circ}\text{C}]$$

### 5.3.3.5 Resultado de [HF\_Medio]

$$\Delta[HF_{Medio}] = \frac{\Delta[HF_{PC}] + \Delta[HF_{PF}]}{2}$$

$$\Delta[HF_{Medio}] = \frac{0,70 + 0,99}{2} = 0,84$$

$$\overline{HF_{Medio}} = 14,8 \pm 0,84 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

### 5.3.3.6 Resistencia térmica

$$\Delta R = \frac{0,88}{14,8} + \frac{0,76}{14,8} + \frac{(38,87 - 29,49)}{14,8^2} \times 0,84$$

$$\Delta R = 0,14$$

$$R = 0,63 \pm 0,14 \text{ [m}^2\cdot\text{K/W}]$$

### 5.3.3.7 Transmitancia térmica

$$\Delta T = \left| \frac{\partial T}{\partial R} \right| \cdot \Delta R$$

$$\Delta T = \frac{1}{0,63^2} \times 0,14$$

$$\Delta T = 0,36$$

$$U = 1,58 \pm 0,36 \text{ [W/ m}^2\cdot\text{K}]$$

### 5.3.3.8 Conductividad térmica

$$\Delta \lambda = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial R} \right| \cdot \Delta R$$

$$\Delta \lambda = \frac{0,12}{0,63^2} \times 0,14$$

$$\Delta \lambda = 0,046 \lambda = 0,12 \pm 0,046 \text{ [W/ m}\cdot\text{K}]$$

### 5.3.4 Muestra 4

Vidrio 1

### 5.3.4.1 Flujo de calor de la placa caliente. HF\_PC

$$\bar{X} = 17,95 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$\sigma_{est}^2 = 1,79 \times 10^{-17}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,89$$

$$\Delta X = 0,94$$

$$HF_{PC} = 17,95 \pm 0,94 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

### 5.3.4.2 Flujo de calor de la placa fría. HF\_PF

$$\bar{X} = 17,46 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$\sigma_{est}^2 = 7,07 \times 10^{-17}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,87$$

$$\Delta X = 0,93$$

$$HF_{PF} = 17,46 \pm 0,93 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

### 5.3.4.3 Temperatura placa caliente. T\_PC

$$\bar{X}=38,63[{}^{\circ}\text{C}]$$

$$\sigma_{est}^2 = 3,06 \times 10^{-16}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,77$$

$$\Delta X = 0,87$$

$$T_{PC} = 38,63 \pm 0,87 [{}^{\circ}\text{C}]$$

### 5.3.4.4 Temperatura placa fría. T\_PF

$$\bar{X}=36,95[{}^{\circ}\text{C}]$$

$$\sigma_{est}^2 = -1,07 \times 10^{-16}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,73$$

$$\Delta X = 0,85$$

$$T_{PF} = 36,95 \pm 0,85 [{}^{\circ}\text{C}]$$

### 5.3.4.5 Resultado de [HF\_Medio]

$$\Delta[\text{HF}_{\text{Medio}}] = \frac{\Delta[\text{HF}_{\text{PC}}] + \Delta[\text{HF}_{\text{PF}}]}{2}$$

$$\Delta[\text{HF}_{\text{Medio}}] = \frac{0,947 + 0,934}{2} = 0,94$$

$$\overline{\text{HF}_{\text{Medio}}} = 17,71 \pm 0,94[\text{W}/\text{m}^2]$$

### 5.3.4.6 Resistencia térmica

$$\Delta R = \frac{0,87}{17,71} + \frac{0,85}{17,71} + \frac{(38,63 - 36,95)}{17,71^2} \times 0,94$$

$$\Delta R = 0,10$$

$$R = 0,09 \pm 0,10 [\text{m}^2.\text{K}/\text{W}]$$

### 5.3.4.7 Transmitancia térmica

$$\Delta T = \left| \frac{\partial T}{\partial R} \right| \cdot \Delta R$$

$$\Delta T = \frac{1}{0,09^2} \times 0,10$$

$$\Delta T = 11,75$$

$$U = 10,73 \pm 11,75[\text{W}/\text{m}^2.\text{K}]$$

### 5.3.4.8 Conductividad térmica

$$\Delta \lambda = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial R} \right| \cdot \Delta R$$

$$\Delta \lambda = \frac{0,88}{0,09^2} \times 0,10$$

$$\Delta \lambda = 0,88$$

$$\lambda = 0,075 \pm 0,88[\text{W}/\text{m}.\text{K}]$$

### 5.3.5 Muestra 5

Vidrio 2

### 5.3.5.1 Flujo de calor de la placa caliente. HF\_PC

$$\bar{X}=18,39[\text{W}/\text{m}^2]$$

$$\sigma_{est}^2 = 3,62 \times 10^{-18}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,91$$

$$\Delta X = 0,95$$

$$\text{HF}_{\text{PC}} = 18,39 \pm 0,95 [\text{W}/\text{m}^2]$$

### 5.3.5.2 Flujo de calor de la placa fría. HF\_PF

$$\bar{X}=18,97[\text{W}/\text{m}^2]$$

$$\sigma_{est}^2 = 6,99 \times 10^{-17}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,94$$

$$\Delta X = 0,97$$

$$\text{HF}_{\text{PF}} = 18,97 \pm 0,97 [\text{W}/\text{m}^2]$$

### 5.3.5.3 Temperatura placa caliente. T\_PC

$$\bar{X}=38,91[{}^{\circ}\text{C}]$$

$$\sigma_{est}^2 = -5,08 \times 10^{-18}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,77$$

$$\Delta X = 0,88$$

$$T_{PC} = 38,91 \pm 0,88 [{}^{\circ}\text{C}]$$

### 5.3.5.4 Temperatura placa fría.

#### T\_PF

$$\bar{X}=37,17[{}^{\circ}\text{C}]$$

$$\sigma_{est}^2 = 1,74 \times 10^{-17}$$

$$\sigma_{nom}^2 = 0,74$$

$$\Delta X = 0,86$$

$$T_{PF} = 37,17 \pm 0,86 [{}^{\circ}\text{C}]$$

### 5.3.5.5 Resultado de [HF\_Medio]

$$\Delta[\text{HF}_{\text{Medio}}] = \frac{\Delta[\text{HF}_{\text{PC}}] + \Delta[\text{HF}_{\text{PF}}]}{2}$$

$$\Delta[\text{HF}_{\text{Medio}}] = \frac{0,95 + 0,97}{2} = 0,96$$

$$\overline{\text{HF}_{\text{Medio}}} = 18,68 \pm 0,84[\text{W}/\text{m}^2]$$

### 5.3.5.6 Resistencia térmica

$$\Delta R = \frac{0,88}{18,68} + \frac{0,86}{18,68} + \frac{(38,91 - 37,17)}{18,68^2} \times 0,96$$

$$\Delta R = 0,098$$

$$R = 0,09 \pm 0,098 [\text{m}^2.\text{K}/\text{W}]$$

### 5.3.5.7 Transmitancia térmica

$$\Delta T = \left| \frac{\partial T}{\partial R} \right| \cdot \Delta R$$

$$\Delta T = \frac{1}{0,09^2} \times 0,098$$

$$\Delta T = 11,39$$

$$U = 10,77 \pm 11,39[\text{W}/\text{m}^2.\text{K}]$$

### 5.3.5.8 Conductividad térmica

$$\Delta \lambda = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial R} \right| \cdot \Delta R$$

$$\Delta \lambda = \frac{0,075}{0,09^2} \times 0,098$$

$$\Delta \lambda = 0,85$$

$$\lambda = 0,075 \pm 0,85[\text{W}/\text{m}.\text{K}]$$

## 5.5 Utilización del programa Cypetherm loads.

### 5.4.1 Residencia 1: Teja y tejuela.

Se utiliza el software y considerando una cubierta sin material aislante, se obtiene una transmitancia térmica de 5,95 [W/ m<sup>2</sup>.K], con una carga térmica total de la residencia de 13452 W.

### 5.4.2 Residencia 2: Teja, aislapol y tejuela.

Para la residencia número 2, se utilizó el material conocido como aislapol en medio de ambos materiales. Se obtuvo una transmitancia térmica de 5,94 [W/ m<sup>2</sup>.K], el cual comparando con el valor obtenido con el calorímetro nos da un error del 16%. En el análisis de carga térmica realizado se obtuvo una carga total de 13447 [W]. Ambos valores no tuvieron una variación considerable en comparación con la cubierta sin material aislante, por

lo cual podemos considerar que el mismo no posee propiedades aislantes.

#### **5.4.3 Residencia 3: Teja, membrana asfáltica y tejuela.**

En la siguiente simulación, con el material considerado de membrana asfáltica en medio de ambos materiales se obtuvo una transmitancia térmica de 2,86 [W/ m<sup>2</sup>.K], el cual corresponde a un error del 7,74% en comparación con el resultado obtenido con el calorímetro; una carga térmica total en la residencia simulada de 12006 [W]. Podemos observar una pequeña reducción de la carga térmica y concluyendo que el material utilizado puede utilizarse como aislante térmico en techos.

#### **5.4.4 Residencia 4: Teja, alu10 y tejuela.**

El último material utilizado es el denominado alu10 con el cual se obtuvo una transmitancia térmica de 1,75 [W/ m<sup>2</sup>.K], con un error del 10,75% del valor obtenido con el calorímetro y una carga térmica total de 11314 [W]. Se puede observar una reducción significativa de la carga térmica por lo que se considera al material como un buen aislante térmico.

#### **5.4.5 Edificio 1: Fachada de vidrio templado con la muestra 4**

La simulación se realizó a partir de un edificio de oficinas de 4 pisos con fachada de vidrio templado con características similares al de la muestra utilizada en el calorímetro. Se obtuvo una transmitancia térmica de 10 [W/ m<sup>2</sup>.K] que corresponde a un error del 6,8% en comparación con la medida obtenida con el calorímetro.

#### **5.4.6 Edificio 2: Fachada de vidrio templado con la muestra 5.**

La simulación se realizó al igual que el ítem anterior para un edificio de oficinas de 4 pisos con fachada de vidrio de características similares a la muestra utilizada, se ingresaron algunos de los valores del fabricante con que contábamos para poder realizar la simulación. Se obtuvo una transmitancia térmica de 3 [W/ m<sup>2</sup>.K], el obtenido con el calorímetro fue un valor de 10 [W/ m<sup>2</sup>.K]. Se observa una gran variación entre ambos valores por lo que no podemos asimilar si hubo errores durante la medición con el calorímetro o si los valores del fabricante para dicha muestra no se corresponden. Al obtenerse un bajo valor de la transmitancia térmica se obtiene un



aumento en la carga térmica total del edificio 2 en comparación con el edificio 1.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

#### **6.1 Conclusiones**

-El método utilizado con el aparato medidor de flujo (flujómetro) resultó bastante práctico en cuanto a la configuración y toma de datos de las muestras consideradas.

-La calibración del calorímetro a partir de la probeta patrón se obtuvo en la primera toma de datos, se determinó el régimen permanente al cumplirse el criterio de la norma ABNT 15220 parte 5 sección 8.5 en donde se indica que *“para considerar un régimen como permanente las mediciones individuales de flujo de calor no deben variar más del 2%, en valor absoluto, con respecto a la media del conjunto de mediciones realizadas”* y se obtuvo un error relativo del 2,86% en el valor de la conductividad térmica, el mismo se considera indiferente y concluimos que el calorímetro construido funciona de manera correcta.

-A partir de los datos obtenidos con el calorímetro de placa caliente guardada y con el análisis de errores de las mediciones se calcularon las propiedades térmicas de cada muestra considerada.

-Los errores relativos que se obtuvieron comparando las mediciones de las muestras y los valores obtenidos con el software simulador cypetherm loads no superan el 15 %.

- El método que hemos desarrollado y utilizado para la determinación de la transmitancia térmica es válido y los resultados son aplicables en el campo de la ingeniería.

#### **6.2 Recomendaciones**

En vista de que este trabajo de investigación aborda un tema muy amplio debido a la cantidad de materiales de construcción con los que contamos en la actualidad, se desea que haya una mejora continua del mismo, por lo que se dan las siguientes recomendaciones:

-Realizar mediciones a un mayor número de muestras de materiales de construcción.

-Realizar mediciones variando la temperatura de la placa fría, para

este trabajo se utilizó agua corriente, y así verificar la influencia de la temperatura de la placa fría en la determinación de la transmitancia térmica de los materiales

-Realizar una estimación más precisa en cuanto a energía y costos involucrados en la selección de uno y otro material.

-Impulsar la elaboración de una norma paraguaya para la eficiencia térmica en edificaciones que cuente con el apoyo y la supervisión de la FIUNA.

-Introducir una asignatura optativa en la que se hagan prácticas de laboratorio con los equipos existentes en el LME y así poder incentivar a los estudiantes a colaborar con los trabajos de investigación a la hora de realizar sus trabajos finales de grado.

## BIBLIOGRAFIA

**[01] Frank Kreith- 1997.**

PRINCIPIOS DA TRANSMISSAO DE CALOR.

**[02] Frank P. Incropera-David P. DeWitt 1999.** FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

**[03] NORMA ASTM C-177 -**

Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate

Apparatus. ASTM International - American Society for Testing and Material.1997

**[04] Moura, Luís Mario.**

Desenvolvimento de um Protótipo de Equipamento de Placa Quente Protegida. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis. 1993

**[05] ÇENGEL, Yunus.A. 2003.**

TRANSFERENCIA DE CALOR. 2. ed. México: McGraw – Hill.

**[06] DONOSO RAMOS, NICOLAS.**

Análisis técnico-económico en mejoras de Eficiencia Energética para viviendas. Tesis para la obtención del título de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. (2009).

**[07] MÁLAGA, CRISTHIAN.**

Modelo Numérico Bidimensional para el Análisis Térmico de Estructuras de Concreto Masivo. Aplicación: Presa CCR, 2004.

**[08]**

Acondicionamiento Higrotermico de Edificios. Manual de Aplicación Ley 13059. Instituto de la vivienda- Buenos Aires.

**[09] IRAM 11601:2002 -**

Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario.

**[10] IRAM 11605:1996 -**

Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y

elementos de construcción en régimen estacionario.

**[11] USER MANUAL, HFP01/HFP03** manual version 0612, Hukseflux Thermal Sensors, <http://www.hukseflux.com>, e-mail: [info@hukseflux.com](mailto:info@hukseflux.com)

**[12] USER MANUAL, TRSYS01 manual** / version 0810, Hukseflux Thermal Sensors, <http://www.hukseflux.com>, e-mail: [info@hukseflux.com](mailto:info@hukseflux.com) .

**[13] ABNT NBR 15220:**  
Desempenho térmico de edificações

**[14] Data reduction and error analysis for the physical sciences**, 2nd ed., P. Bevington and D. K. Robinson, McGraw Hill, New York (1993).

**[15] Rolón, Rocío; “Diseño, Elaboración y Calibración de un Prototipo de Equipo de Placa Caliente Guardada” T1296**  
Proyecto de Titulación a la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción. Asunción-Paraguay. 2012