

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN BANCO DE PRUEBA PARA LA MEDICION
DE CONDUCTIVIDAD TERMICA EN MATERIALES AISLANTES**

JOSE LUIS BOLIVAR URIBE

ID: 000274563



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECANICA
BUCARAMANGA**

2018

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN BANCO DE PRUEBA PARA LA MEDICION
DE CONDUCTIVIDAD TERMICA EN MATERIALES AISLANTES**

JOSE LUIS BOLIVAR URIBE

ID: 000274563

**Tesis de Grado Para optar por el título de
Ingeniero Mecánico**

DIRECTOR

PhD. ROLANDO ENRIQUE GUZMAN LOPEZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECANICA
BUCARAMANGA**

2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Noviembre del 2018

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	12
1. OBJETIVOS.....	14
1.1 OBJETIVO GENERAL	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2. MARCO DE REFERENCIA.....	15
2.1 MARCO CONCEPTUAL	15
2.1.1 Conductividad	15
2.1.2 Materiales aislantes.	17
2.1.3 Transferencia de calor.	18
2.1.3.1 Transferencia de calor por conduccion.	18
2.1.3.2 Transferencia de calor por conveccion.	19
2.1.3.3 Transferencia de calor por radiacion.....	20
2.1.4 Métodos de estado estable.....	20
2.1.4.1 Placa caliente protegida.....	21
2.1.4.2 Medidor de flujo de calor.....	21
3. METODOLOGIA	22
3.1 FASE I: INVESTIGACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LOS APARATOS PARA MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD EN ESTADO ESTABLE PARA MATERIALES AISLANTES.....	22
3.2 FASE II: CALCULAR LOS COMPONENTES NECESARIOS PARA EL APARATO DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE PLACA CALIENTE PROTEGIDA.....	31
3.2.1 Configuración para el Aparato de Placa Caliente Protegida.	33

3.2.2 Modelo Matemático.....	36
3.2.2.1 Transferencia de Calor por Conducción.....	36
3.2.2.2 Transferencia de Calor por Convección.....	37
3.2.3 Requerimientos Mínimos para el Diseño.	38
3.2.4 Control de Temperatura.	40
3.2.5 Selección de Materiales.	40
3.2.5.1 Aislamiento.	40
3.2.5.2 Placas.	41
3.2.6 Cálculos.	41
3.2.6.1 Estado Estable.....	42
3.2.6.2 Circuito Térmico.....	42
3.2.6.3 Intercambiador de calor.	44
3.3 FASE III: CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS PARA LA MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA PARA MATERIALES AISLANTES.	45
3.3.1 Fundición.	47
3.3.1.1 Proceso de fundición del aluminio.	49
3.3.1.2 Edificación y construcción.....	50
3.3.1.3 Reciclado.	50
3.3.1.4 Aleaciones.	50
3.3.2 Soldadura de estaño.....	50
3.3.3 Maquinado.	51
3.4 FASE IV: CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS PARA LA MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA PARA MATERIALES AISLANTES.	52
3.4.1 Ensamble de Placa Caliente.	52
3.4.2 Resistencias de Calentamiento.....	53
3.4.3 Caja de Control.	54
3.4.4 Ensamblaje de Placas Frías	55
3.4.5 Termocuplas.	56
3.4.6 Microcontrolador.	58
3.4.7 Osciloscopio.....	61

3.4.8 Procedimiento	61
3.4.9 Cálculos.	64
3.4.10 Realización de ensayos con el aparato de medición de conductividad térmica en estado estable con el aparato de placa caliente protegida.	65
3.4.11 Factores que Afectan los Resultados.	69
 4. CONCLUSIONES	 70
 BIBLIOGRAFIA.....	 71
ANEXOS.....	74

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de la geometría esférica empleada para la medición de la conductividad.....	16
Figura 2. Dispositivo de placa para la medición de la conductividad térmica	17
Figura 3. Configuración general double-sided.	34
Figura 4. Configuración general single sided.....	35
Figura 5. Flujo de calor en configuración double sided.....	38
Figura 6. Circuito térmico	43
Figura 7. Despiece del prototipo	46
Figura 8. Ensamble de placa caliente	53
Figura 9. Resistencias de calentamiento	54
Figura 10. Caja de control.....	55
Figura 11. Ensamble de placas frias.....	56
Figura 12. Ubicación de termocuplas.....	58
Figura 13. Diagrama control PID.....	59
Figura 14. Tipos de control	60
Figura 15. Control ON/OFF.....	61
Figura 16. Pirómetro	63
Figura 17. Diagrama de flujo del controlador	63
Figura 18. Voltaje instantáneo	64
Figura 19. Montaje correcto del aparato de placa caliente protegida.....	66
Figura 20. Montaje realizado en el laboratorio	67

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Métodos para la medición de conductividad térmica	31
Tabla 2. Formato para registrar caracterización física de la probeta	62
Tabla 3. Formato para registrar variables del ensayo	64
Tabla 4. Caracterización probetas drywall	66
Tabla 5. Variables de ensayo drywall	67
Tabla 6. Caracterización probetas dryboard	68
Tabla 7. Variables de ensayo dryboard	68

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Planos	74
Anexo B. Resultados de Calibración de Termocuplas	77
Anexo C. Fichas Técnicas de Materiales Aislantes de Prueba	84

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBA PARA LA MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN MATERIALES AISLANTES

AUTOR(ES): Jose Luis Bolivar Uribe

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): PhD. Rolando Guzman

RESUMEN

En el presente proyecto se realizó el proceso de diseño e implementación de un banco de pruebas de medición de conductividad térmica para materiales aislantes. Para este propósito se tuvo en cuenta el estado del arte de los aparatos para la medición de conductividad térmica, en materiales aislantes, haciendo un recorrido tanto a nivel nacional como internacional por trabajos científicos presentes en las bases de datos de la universidad pontificia bolivariana. Siguiendo las recomendaciones de la norma que rige el ensayo de medición de propiedades térmicas en estado estable mediante el método de la placa caliente protegida, la norma ASTM C177-13, se determinan los requerimientos mínimos que deben cumplir los elementos del aparato de medición para lograr obtener pruebas satisfactorias. Posteriormente teniendo en cuenta esos factores se procede a fabricar los elementos propios del aparato de medición. Se realiza el montaje de los elementos y se realizan pruebas que demuestran la validez del diseño.

PALABRAS CLAVE:

conductividad térmica, aislante, transferencia de calor

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TEST BANK FOR THE MEASUREMENT OF THERMAL CONDUCTIVITY IN INSULATING MATERIALS

AUTHOR(S): Jose Luis Bolivar Uribe

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: PhD. Rolando Guzman

ABSTRACT

This document contains the design and construction of a guarded hot plate instrument for the measurement of thermal conductivity in insulation materials for this process, the first step is to describe the state of the art, for instrumentation which measures thermal conductivity in insulation materials, for that purpose it has been made a review of national and international articles that are uploaded at the databases of Universidad Pontificia Bolivariana. Following the parameters which are presented on the document ASTM C177-13 for measuring of thermal properties on steady state by the hot guarded plate method are determined the minimum requirements that the apparatus must have for the obtention of valid tests and results taking account those parameters, the next step is to manufacture the elements that compose the guarded hot plate apparatus. Finally, the elements are mounted and tests are realized for proving the functionality and validity of the designed apparatus.

KEYWORDS:

Thermal Conductivity, insulation, heat transfer

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCION

Durante toda la historia de la humanidad el hombre ha buscado solucionar problemas para mejorar su confort y garantizar su supervivencia, una de los problemas más críticos es cómo mantener su temperatura corporal, con este fin ha usado gran cantidad de materiales que con el tiempo y el desarrollo tecnológico han venido evolucionando.

Esa evolución de los materiales aislantes térmicos ha impactado fuertemente sectores como el de la construcción, y gracias a eso hoy contamos con una gran variedad de productos que cumplen satisfactoriamente su función de minimizar el flujo de calor entre el exterior y el interior de nuestra vivienda, garantizando así el confort y condiciones ideales para la supervivencia.

Los materiales aislantes convencionales más usados son, la espuma de poliuretano, lana de vidrio, poliestireno expandido y poliestireno extruido demandan cantidades excesivas de energía, además que en su mayoría por ser derivados del petróleo, durante su fabricación emiten gases nocivos para el ser humano, impactando la calidad del aire; además de afectar la capa de ozono.

Muchos otros materiales aislantes térmicos, no generan gases nocivos ni necesitan una alta demanda energética, el problema ocurre cuando se encuentran en etapa de reciclado, debido a que muchos de ellos no son biodegradables impactando grandemente a los ecosistemas y el medio ambiente

Por esta razón, hoy en día existe una tendencia a la investigación sobre materiales aislantes que puedan tener propiedades térmicas similares o mejores, pero reduciendo el impacto hacia el medio ambiente, teniendo en cuenta todo el ciclo de

vida del producto, esto ha llevado a la producción de materiales bio-aislantes ecológicos, comúnmente llamados materiales compuestos.

Como un aporte a esa tendencia ecológica y además con el fin de promover la investigación sobre materiales aislantes en la Universidad Pontificia Bolivariana nace la idea de diseñar y construir un aparato de medición de bajo coste que permita la obtención de valores de conductividad térmica tanto de materiales con propiedades térmicas conocidas como de materiales cuya caracterización como aislante térmico no se encuentra en la literatura.

Este aparato de medición de conductividad térmica en estado estable por el método de placa caliente protegida posiciona a la Universidad Pontificia Bolivariana como pionera en la región en temas relacionados con la medición de propiedades térmicas, como la conductividad térmica, ya que se considera este instrumento de medición por parte de la norma que rige el método, (ASTM C177) como un método primario.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Construir un prototipo funcional para la medición de propiedades de transmisión térmica en régimen estable para materiales aislantes, mediante el diseño suministrado por el grupo de investigación GideTechMA, en el marco del desarrollo del proyecto de investigación “Desarrollo de materiales no tejidos a partir de residuos fibrosos textiles y agroindustriales para acondicionamiento termo-acústico”

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión general del entorno tecnológico de los métodos de ensayo para la conductividad térmica en los últimos diez años por medio de las distintas bases de datos que se tiene acceso en la Universidad Pontificia Bolivariana.
Resultado: Estado del arte, **Indicador:** Documentos científicos para la revisión en base de datos.
- Seleccionar el método de medición adecuado, que permita obtener valores de conductividad térmica para materiales aislantes. **Resultado:** Condiciones iniciales del prototipo. **Indicador:** Norma ASTM C177-13.
- Establecer el proceso de fabricación del banco de prueba para la medición de conductividad térmica. **Resultado:** Fabricación de los elementos del prototipo propuesto, **Indicador:** Técnicas de procesos de fabricación
- Implementar el banco de prueba para la medición de conductividad térmica para materiales aislantes en la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga. **Resultado:** Montaje del banco de medición de conductividad. **Indicador:** Pruebas de funcionamiento del prototipo de medición.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO CONCEPTUAL

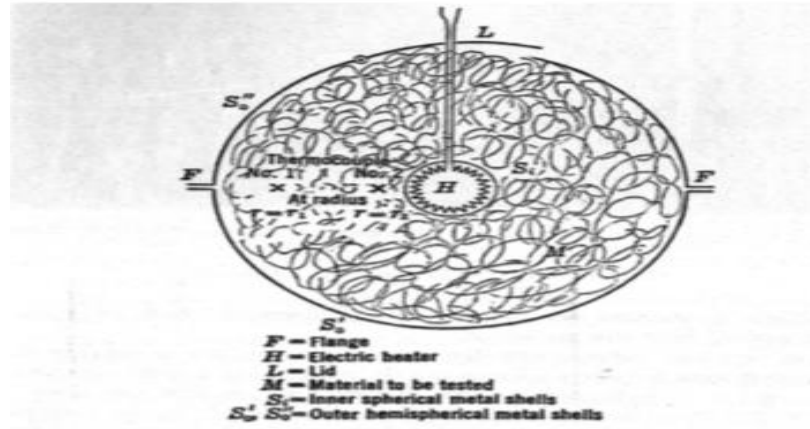
2.1.1 Conductividad. La conductividad es la propiedad física de aquellos objetos que tienen la facultad de transmitir la electricidad o el calor.

Conductividad eléctrica: Es la capacidad de los cuerpos que permite el paso de la corriente a través de sí mismos, debido a la facilidad con la que los electrones pueden atravesarlos, por lo cual resulta inversa a la resistividad.

Conductividad térmica: Es la propiedad de los cuerpos de conducir el calor; por lo cual el proceso implica la transferencia de energía cinética de molécula a molécula, y su propiedad inversa es conocida como resistencia térmica. (Pérez Porto & Gardey, 2012). La medición de la conductividad térmica se puede realizar de dos formas:

- 1) Medición empleando geometría esférica: Método ideado por Péclet, el cual consta de dos esferas metálicas concéntricas de un pequeño espesor a fin de minimizar la capacidad calórica del sistema.

Figura 1. Esquema de la geometría esférica empleada para la medición de la conductividad.



Fuente: HEAT TRANSFER V. I – Max Jakob – 9th printing – 1964 – John Wiley & Sons Inc.

Haciendo mediciones de temperatura a dos distancias radiales (r_1 y r_2) con las termocuplas (t_1 y t_2), se obtiene la conductividad térmica con:

$$Q = P = U \cdot I = \lambda \cdot 4 \cdot \pi \cdot \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}$$

Donde U es la tensión aplicada en bornes de la resistencia e I es la corriente que circula a través de ella. (Jakob, 1964)

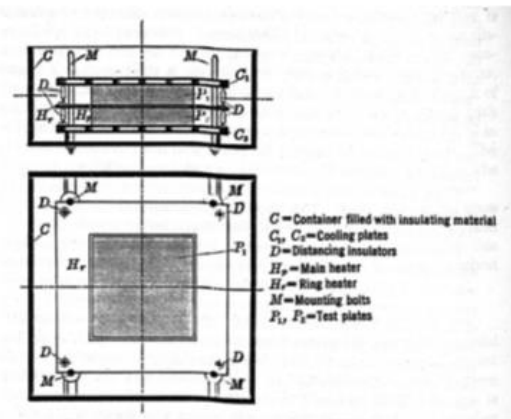
- 2) Medición empleando geometría cilíndrica: Método usado desde 1905 donde se emplean dos cilindros concéntricos, alojando el material a testear entre ellos. Es usual emplear este método para medir la conductividad en materiales tales como sólidos aislantes, refractarios y materiales para construcción, como a su vez para líquidos, gases y metales a altas temperaturas.

Para todos los casos, el valor de la conductividad térmica se calcula con:

$$Q = P = U = I = \lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{t_1 - t_2}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}$$

- 3) Medición empleando geometría plana: Método que data de 1885 y usado comúnmente para la medición de la conductividad térmica en sólidos metálicos y no metálicos.

Figura 2. Dispositivo de placa para la medición de la conductividad térmica



Fuente: HEAT TRANSFER V. I – Max Jakob – 9th printing – 1964 – John Wiley & Sons Inc.

La conductividad térmica se obtiene así:

$$\frac{Q}{2} = \frac{P}{2} = \frac{U \cdot I}{2} = \lambda \cdot A \cdot \frac{t_1 - t_2}{e}$$

Donde e es el espesor de la placa y A el área de la misma, perpendicular al flujo de calor. (Jakob, 1964)

2.1.2 Materiales aislantes. Son materiales donde los electrones no pueden circular libremente, como por ejemplo la cerámica, el vidrio, los plásticos, la madera, entre otros.

2.1.3 Transferencia de calor. Proceso por el cual se intercambia energía en forma de calor entre diferentes cuerpos o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que se encuentren a distinta temperatura. Esta propiedad puede ser transferida de tres formas: convección, radiación o conducción.

2.1.3.1 Transferencia de calor por conducción. Sabiendo que la conducción es un proceso mediante el cual el calor fluye desde una región de temperatura mayor a una región de temperatura menor dentro de un medio ya sea sólido, líquido o gaseoso; en el flujo de calor por conducción, la energía se transmite por comunicación molecular directa sin desplazamiento apreciable de las moléculas. De acuerdo con la teoría cinética, la temperatura de un elemento de materia, es proporcional a la energía cinética media de su constituyente molecular. Cuando las moléculas de una región adquieren una energía cinética media mayor que la de las moléculas de una región adyacente, lo que se manifiesta por una diferencia de temperatura, las moléculas que poseen mayor energía transmitirán parte de ella a las moléculas de la región a más baja temperatura.

Fourier estableció que la rapidez del flujo de calor por conducción (q_k) en un material, es igual al producto de las siguientes cantidades.

$$q_k = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

Donde:

q_k = tasa de transferencia de calor (W)

k = conductividad térmica del material (W/m.K)

A = área normal a la dirección del flujo de calor (m^2)

$\frac{\partial T}{\partial x}$ = gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor.

La conductividad térmica k es una propiedad del material e indica la cantidad de calor que fluirá a través de un área unitaria si el gradiente de temperatura es la

unidad. (F, 1970). La conducción puede ser:

Conducción en estado estable: A través de sistemas simples en los que la temperatura y el flujo de calor son funciones de una sola coordenada. Para el caso de una pared plana, el gradiente de temperatura y el flujo de calor no varían con el tiempo y el área de la sección recta a lo largo de la trayectoria del flujo de calor que es uniforme.

Conducción en estado transitorio: Se genera cuando cambian las condiciones de frontera del mismo, como por ejemplo cuando se altera la temperatura superficial, la temperatura en cada punto comenzara a cambiar, hasta alcanzar una temperatura de estado estable.

2.1.3.2 Transferencia de calor por convección. Es un proceso de transporte de energía por acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento de mezcla. Este proceso tiene gran importancia como mecanismo de transferencia de energía entre un sólido y un líquido o un gas. (INCROPERA, 1996)

Existen dos tipos de convección:

- Convección forzada: Esta ocurre cuando el movimiento de mezclado es inducido por algún agente externo, tal como una bomba o un agitador. En si ocurre cuando el movimiento es inducido por algún tipo de elemento mecánico.
- Convección natural o libre: Ocurre cuando el movimiento de mezclado tiene lugar exclusivamente como resultado de la diferencia de densidades causado por los gradientes de temperatura.

La ecuación para determinar la transferencia de calor por convección es:

$$q = h * A * (T_s - T_{\infty})$$

Donde:

q = Tasa de transferencia de calor por convección (W)

h . = coeficiente de convección (W/m².K)

A = área normal a la dirección del flujo (m²)

T_s = temperatura de la superficie del sólido (°C)

La eficiencia de la transferencia de calor por convección depende básicamente del movimiento de mezclado del fluido, y por él se basa en el conocimiento de las características del flujo del fluido.

2.1.3.3 Transferencia de calor por radiación. La radiación es una forma de transferencia de calor la cual no requiere de un medio para su propagación, la radiación es mayor cuando las dos superficies de intercambio de energía están separadas por un vacío perfecto. La forma de transferencia de calor no está muy claro, puede ser respaldado por el argumento ondulatorio como corpuscular, se le puede describir por una expresión analítica sencilla.

La ecuación para determinar la transferencia de calor por radiación está dada por:

$$q = \sigma * A * T^4$$

q = rapidez de emisión de energía radiante (W)

A_e = área de la superficie emisora (m²)

σ = constante de Stefan-Boltzman = $5.66 * 10^{-8}$ (w/m²K⁴)

T = temperatura absoluta.

2.1.4 Métodos de estado estable. Estos métodos hacen uso de la ley de Fourier para transferencia de calor por conducción, para medir la conductividad térmica de diversos materiales, variando en diseño, según su respectiva aplicación, rango de operación, exactitud, etc. Su principio se basa en garantizar solamente flujo unidireccional, simplificando así los cálculos matemáticos.

2.1.4.1 Placa caliente protegida. También conocido como el aparato de Poengsen, es el método más efectivo y usado para medir conductividad térmica en materiales aislantes. Este método depende de una diferencia de temperatura constante sobre una probeta y requiere controlar el flujo de calor que atraviesa el material de prueba. Las mediciones realizadas con el método de placa caliente protegida son analizadas asumiendo transferencia de calor en una placa infinita, aunque las dimensiones de la probeta son finitas, se consigue el flujo unidireccional gracias al uso de las guardas de calor. Luego de que se alcanza la condición de estado estable, la placa caliente y fría tienen temperaturas estables, entonces la conductividad térmica puede ser medida basado en la entrada de calor al sistema, la diferencia de temperatura entre las placas, el grosor de la probeta y el tamaño del área de medición de transferencia de calor.

La configuración del aparato de placa caliente consiste en placas frías, una placa caliente, un sistema de guardas de calor y aislante térmico, la placa caliente es eléctricamente calentada y la placa fría es refrigerada por celdas peltier o intercambiador de calor por líquido. A continuación, se muestran los diferentes tipos de configuraciones aceptadas por la norma ASTM.DW.F.WEF. La medición de la temperatura es realizada por termocuplas.

2.1.4.2 Medidor de flujo de calor. La idea básica del medidor de flujo de calor, es deducir el flujo de calor basado en la medición del cambio de temperatura que ocurre a través de un termistor. La probeta se ubica entre dos placas, una que va a ser calentada y otra enfriada, como se muestra en la figura, el flujo de calor es medido con la corriente con la medida del cambio del voltaje dentro de un resistor eléctrico. Los sensores generan una salida eléctrica, la señal medida y el cambio en el termovoltaje es proporcional al cambio de temperatura a través de la placa. Las condiciones de estado estable se alcanzan cuando la cantidad de flujo de calor es igual en cada punto del sistema; las condiciones de estado estable pueden ser alcanzadas en poco tiempo lo cual se traduce en ganancia energética.

3. METODOLOGIA

El proyecto surge por la necesidad de conocer la conductividad térmica en materiales aislantes, permitiendo así, clasificar los materiales y ampliar el conocimiento sobre los mismos, permitiendo una mejor elección para las diversas aplicaciones requeridas en la industria y la academia. Como metodología para el desarrollo del proyecto se efectúa un proceso secuencial y directamente progresivo, el cual consta los pasos explicados a continuación.

El banco de pruebas de medición de conductividad se fabrica siguiendo las pautas, prescripciones y recomendaciones de las normas ASTM C177-13. Dicha norma es guía para la construcción de un modelo que asegure una transmisión estable y constante de la energía estrictamente por conducción de forma perpendicular a los focos frío y caliente; unas sondas de control sobre el funcionamiento del sistema y una medición precisa del flujo de calor y las temperaturas resultantes del experimento. Dicho método, prescriptivo, aporta la suficiente flexibilidad al modelo como para permitir la construcción de aparatos de ensayo destinados al análisis de compuestos, con un rango de características y formatos muy amplio.

3.1 FASE I: INVESTIGACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LOS APARATOS PARA MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD EN ESTADO ESTABLE PARA MATERIALES AISLANTES.

Se revisaron catálogos, revistas y trabajos de investigación sobre los aparatos de medición de conductividad en estado estable para conocer el estado del arte de las diferentes configuraciones presentadas, materiales y componentes utilizados para su fabricación, así como su confiabilidad, precisión y exactitud, para así tener un panorama claro y nutrir el trabajo de investigación, estando al tanto de la última tecnología en tal instrumento de medición.

A continuación, se reseñan investigaciones asociadas los métodos de ensayo para la conductividad térmica en los últimos diez años. La primera referencia que fundamenta esta investigación es la proporcionada por (Velasco Roldán, Goyos Pérez, Delgado García, & Freire Amores, 2016) y Titulada “Instalación para medición de conductividad térmica en composites basados en residuos de biomasa”. Se diseñaron, construyeron y calibraron un banco de pruebas normalizado con el fin de determinar la conductividad térmica en materiales aislante para la construcción. La investigación se basó en recursos no valorizados con el fin de producir aislamiento térmico de bajo costo, repercutiendo en la mejora de la eficiencia energética de las edificaciones. La posibilidad del análisis de alistamiento que aporta el banco de pruebas, está compuesto por materiales de mayor espesor y de diferentes formatos gracias al diseño de prensa, permitiendo el ajuste y la presión de las placas sobre las muestras, sosteniendo estas en el aire y evitando cualquier transmisión por conducción no deseada.

La metodología utilizada en el estudio se basó en las normas ASTM C177-13 (Method, 2013b), ASTM C1114-13 (Method, 2013a) , ASTM C168 – 13 (Method, 2014) y ASTM C518-10 (Method, 2013c); al no describir un diseño concreto, si se pueden puntualizar en requerimientos mínimos necesarios para la construcción de un modelo que asegure una transmisión estable y constante de la energía estrictamente por conducción de forma perpendicular a los focos frío y caliente; cuyo resultados arrojados facilitaron la construcción de un aparato de conductividades térmicas con el menor costo de producción y tecnología open source¹.

La segunda referencia es la proporcionada por Rafael Ángel Giraldo Brochero y titulada “Diseño y construcción de un banco de pruebas para medir la velocidad de combustión de diferentes materiales poliméricos bajo la norma fmvss 302” (Giraldo

¹ Velasco Roldán, L., Goyos Pérez, L., Delgado García, R., & Freire Amores, L. (2016). Instalación para medición de conductividad térmica en composites basados en residuos de biomasa. Ecuador.

Brochero, 2016), que a través del diseño determina las temperaturas críticas con el fin de elegir el mejor material en este caso el acero y el tipo de vidrio con el que se empezara a trabajar para para construir el banco de pruebas, a través de un diseño Termodinámico. Se determina la poca diferencia que existe entre el gas natural y el gas propano a través de la flama adiabática realizando un análisis termodinámico y estequiométrico de la combustión. Para el cálculo de la temperatura de flama adiabática fue necesario aplicar la norma FMVSS 302 que describe como gas a usar por el mechero el gas natural (CH_4), y de la temperatura de flama adiabática del gas propano (C_3H_8). Durante el ensayo se obtuvieron resultados a través de la fibra de vidrio se pudo evidenciar como el combustible utilizado de la probeta, la fibra se carboniza, manteniendo la combustión en el tiempo necesario que la resina poliéster estuvo en la probeta; por ende, la resina poliéster usada al fabricar piezas de fibra de vidrio, puede ser un retardante o un acelerador en caso de conflagración dependiendo de las propiedades químicas y físicas de la resina. En los ensayos de poliéster, se puede evidenciar que hace parte de un material ignífugo, ya que en ausencia de llama se auto extingue².

La tercera referencia es la proporcionada por: (Espinel Blanco & Hernández Criado, 2015) y titulada “Banco de pruebas para determinar la conductividad térmica como herramienta pedagógica para la enseñanza de transferencia de calor”, la cual a través de la construcción de un banco de pruebas como herramienta pedagógica para la academia, enmarcando el concepto de conductividad térmica como propiedad que incide en la transferencia de calor que se presenta por conducción en un material granulado, a través de un dispositivo que sirvió para medir la conductividad térmica bajo el modelo del cilindro infinito, siendo los materiales granulados aquellos constituidos por una fase sólida no consolidada y una fase fluida. El procedimiento para desarrollar dicha prueba consistió en utilizar los

² Giraldo Brochero, R. A. (2016). Diseño y construcción de un banco de pruebas para medir la velocidad de combustión de diferentes materiales poliméricos bajo la norma fmvss 302. Pereira. Colombia: Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de ingeniería mecánica.

materiales granulados secos como arena, arcilla, cal, cemento y yeso en el área de la construcción, con el fin de elaborar modelos que permitan la descripción de su comportamiento buscando diseñar procesos eficientes en la manipulación de estos materiales. Los resultados arrojados por el presente estudio permitieron a los estudiantes de la asignatura transferencia de calor del programa de ingeniería mecánica de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, observar y comprender como es el comportamiento de la variación de la actividad, en tres materiales utilizados (yeso, caolín, cemento). “Se realizan registros de temperatura con la resistencia en frío y posteriormente en caliente y se observa, que después de un periodo de tiempo se estabiliza la energía transmitida por la resistencia al igual que las temperaturas registradas, generando un coeficiente de conductividad térmica constante”³

La cuarta referencia es la proporcionada por: (Gonzalez Madariaga, 2008) y titulada “Mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola para su uso en la construcción” busca explicar los ensayos que ejercen sobre los materiales de interés y su aplicación, utilizando una metodología experimental, la cual se llevó a cabo de tres fases, describiendo en el presente artículo solo la tercera. La finalidad del artículo era evaluar la facilidad de uso de dos formas de residuos de EPS; residuos cortados y residuos molidos, además de establecer una comparación simple entre un número reducido de mezclas con diferentes conglomerantes hidráulicos y residuos de EPS cortados y/o molidos. Se limitó el estudio a tan solo una muestra de 68 mezclas divididas en 8 grupos de trabajo, en donde cada conjunto estaba compuesto por mezclas con características similares de: tipo y proporción de yeso o escayola, cantidad de agua, tipo y porcentajes de residuos de EPS, uso de otros componentes como fibra de vidrio y papel, además del procedimiento de preparación de la muestra. Una vez definidas

³ Espinel Blanco, E., & Hernández Criado, J. C. (2015). Banco de pruebas para determinar la conductividad térmica como herramienta pedagógica para la enseñanza de transferencia de calor. Ocaña. Colombia: Universidad Francisco de Paula Santander.

las muestras estas fueron sometidas a ensayos especialmente diseñados para la investigación como el comportamiento durante su manejo, peso por unidad de superficie, facilidad de fabricación y, finalmente, su apariencia. Los resultados obtenidos evidencian la relación directa que existe entre el agua y residuos de EPS con el yeso o escayola, en donde las cantidades siempre se indican en porcentaje con relación al peso seco del yeso o escayola⁴.

La quinta referencia es la proporcionada por: (Lira Cortes, 2009) y titulada “Necesidades de medición de conductividad térmica para el cumplimiento de normas de eficiencia energética en edificaciones energéticas en edificaciones “sirve como programa de energías limpias, apoyando a fabricantes, constructores y usuarios de vivienda, en la utilización de materiales certificados, cuya función es la conductividad térmica de materiales sólidos, no sólo aislantes. En el presente artículo se establece cuáles son las propiedades térmicas de los materiales como lo es la Conductividad térmica, la Prueba de desempeño térmico, la Estabilidad térmica (calor), Estabilidad dimensional, Absorción de agua, Absorción de humedad, Medición de dimensiones, Medición de densidad aparente, Contenido de humedad, Medición de transmisión de vapor de agua, entre otras y relacionan los equipos necesarios para realizar las mediciones, como Aparato de placa caliente con guarda, Aparato de flujo de calor, Medidor de permeabilidad de vapor de agua, Hornos, Aparato de flujo de calor, entre los más importantes; los métodos de prueba para los equipos son la Placa caliente con guarda (Método de Prueba ASTM-C-177), para medir materiales aislantes, Es un método absoluto y su aplicación, para medir materiales aislantes ⁵. Las muestras son de dimensiones grandes, en donde la sección de medición se calienta y se rodea una guarda controlada con termopares diferenciales; es un método absoluto y su aplicación requiere condiciones de estado

⁴ González Madariaga, F. j. (2008). Mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola para su uso en la construcción. México: Informes de la Construcción, Vol. 60, No 509.

⁵ Lira Cortes, L. (2009). Necesidades de medición de conductividad térmica para el cumplimiento de normas de eficiencia energética en edificaciones energéticas en edificaciones. Laboratorio de Propiedades Termofísicas División Termometría, Área Eléctrica Centro Nacional de Metrología.

permanente, flujo de calor en unidimensional en la región de medición, medir la temperatura de las placas, medir el espesor de la muestra y otros parámetros los cuales pueden afectar el flujo unidireccional a través del área de medición de la muestra.

La sexta referencia es la proporcionada por (Mosquera Arancibia, 2013) y titulada “Medida de la conductividad térmica con el método de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio, para su aplicación en los cerramientos de adobes y bloques de tierra comprimida” sirve como referencia para realizar ensayos de la PCP en el IETCC sobre adobes Navapalos, el cual requirió muestras con dimensiones de 304X304X90 mm con las caras pulidas y paralelas, para el caso de las dimensiones mayores. En el proceso se disolvían los adobes y se volvían a fundir con un molde específico, deshaciendo la muestra con agua (30% peso aproximado) dejándolo secar a la intemperie hasta que alcanzara su punto el cual se podía volver a moldear. Además, se utilizó para las muestras sobrantes ensayos de contenido de humedad y densidad de acuerdo a lo establecido por la norma EN 12667 “Prestaciones térmicas de materiales y productos para la construcción”. El rango de los aislantes fue de $\lambda > 0,35 \text{ W/mK}$. El objeto del estudio fue obtener el coeficiente de conductividad térmica de la muestra descrita λ (W/mK). Para obtener el coeficiente fue necesario realizar ensayo a través del método de medidor de flujo de calor, con una muestra en posición horizontal y dos placas a distintas temperaturas (20° y 0°); se procedió a realizar 8 ensayos sobre la misma probeta, cuyo resultado arrojó una media de 0,5090 con una desviación típica del 0,04 igual al 8% de la media⁶.

La séptima referencia es la proporcionada por (Fonseca Diaz & Tibaquirá, 2008) y titulada “Método para la estimación experimental de la conductividad térmica de

⁶ Mosquera Arancibia, P. (2013). Medida de la conductividad termica con el metodo de la aguja termica, basado en la fuente lineal de calor transitorio, para su aplicacion en los cerramientos de adoves y bloques de tierra comprimida. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid. Escuela tecnica superior de arquitectura.

algunos materiales comunes en Colombia para aplicaciones HVAC/R” utiliza el método del ensayo para estimar la conductividad térmica mediante el balance térmico sobre un calorímetro, compuesto por 5 paneles de poliuretano expandido de 10 cm de espesor y conductividad térmica de 0,02 W/mK, blindados en lámina de aluminio de baja emisividad. El análisis experimental consta de un voltímetro de exactitud $\pm 1,2\%$ de la cantidad medida, un amperímetro de exactitud $\pm 2\%$ de la cantidad medida; además de medir la temperatura del aire interno y externo del calorímetro y del material en prueba, mediante un termómetro digital de exactitud $\pm 1\text{K}$ y un termómetro infrarrojo de exactitud $\pm 2\%$ de la cantidad medida.

El principal objetivo es el de obtener “mediante un método simple y relativamente confiable, la conductividad térmica de materiales elaborados en el país de los cuales se desconoce este valor o materiales importados en los cuales se busca comparar los valores experimentales con los reportados por los fabricantes en el extranjero, y fijar en ambos casos criterios que permitan incorporar esta información de importancia para quienes diseñan y calculan sistemas HVAC/R en el país”. A través del diseño se logró generar un método simplificado y relativamente confiable para obtener el valor estimado de la conductividad térmica de materiales de uso frecuente en Colombia⁷.

La octava referencia es la proporcionada por (Gome Tena, 2014) y titulada “Determinación de la conductividad térmica en la industria cerámica por el método modificado de la fuente plana transitoria” la cual obtiene datos de forma precisa de conductividad térmica de la cerámica, nombrando varios métodos para obtener resultados satisfactorios pero que se presentan a través de largos tiempos de ensayos con poca flexibilidad en los resultados como es el caso del plato o el hilo caliente; por lo tanto el nuevo método modificado de la fuente plana transitoria

⁷ Fonseca Díaz , N., & Tibaquirá, J. E. (2008). Método para la estimación experimental de la conductividad térmica de algunos materiales comunes en Colombia para aplicaciones hvac/r. Pereira: Red de revistas científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal.

(MTPS) para la medida de la conductividad, ofrece una nueva solución de forma eficiente y flexible, para realizar mediciones en sólidos, líquidos, polvos y pastas (suspensiones con elevado contenido en sólidos. Una de las principales ventajas que ofrece el método es el tiempo de ensayo (entre 5 y 30 minutos) una vez colocadas las a punto las metodologías de ensayo para cada producto con un amplio intervalo de medición (0 a 120 W/mK), con variaciones en la temperatura de (10° hasta 200°) sin la necesidad de realizar mediciones en los equipos. Como método de innovación, permite conseguir resultados más eficientes desde el punto de vista térmico, minimiza la conductividad técnica del material con mayor influencia sobre los valores de la conductividad térmica de los materiales cerámicos es la composición de los mismos y, más concretamente, las fases cristalinas y el porcentaje de fase vítrea que forma parte de su composición⁸.

La novena referencia es la proporcionada por (Diaz Megchun, Robles Martinez, Macias hernandez, & Osorio Miron, 2013) y titulada “Determinación de la conductividad térmica de materiales para biosecado mediante el método de placa caliente” establece la demanda de datos confiables de las propiedades térmicas de los materiales, con el fin de diseñar, modelar y mejorar los tratamientos biológicos de residuos sólidos; ya que a través del trabajo se determinó la conductividad térmica de madera triturada de residuos de poda (mulch) y de cascara de naranja, antes de ser sometidos a un proceso de biosecado. Se utiliza el método en estado estacionario de placas calientes, con materiales sometidos a distintos contenidos de humedad, esto para poder establecer el modelo que relacione el cambio de la conductividad térmica con respecto a la humedad; por lo tanto, se trabajó con temperaturas entre 30 y 50°C y los datos obtenidos contribuyen a mejorar el modelado matemático y el control de la transferencia de calor del proceso de biosecado. La técnica se basó en la ley de Fourier de conducción en estado

⁸ Gome Tena, M. P. (2014). Determinación de la conductividad térmica en la industria cerámica por el método modificado de la fuente plana transitoria. Castellón, España: Instituto de Tecnología Cerámica (ITC). Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE)Universitat Jaume I.

estacionario que tiene la siguiente ecuación: $K = LP / (\Delta T_m A)$, en donde L es el espesor de la muestra (m), A es el área de distribución de calor (m²) P es la potencia suministrada (watts), y ΔT_m incremento medio de la temperatura de ensayo, que es igual a la media de los incrementos de temperatura entre las caras de cada probeta. Una vez realizado el ensayo se concluye que “la conductividad térmica de los materiales estudiados presentó una relación lineal con respecto al contenido de humedad. Térmicamente hablando, las cáscaras de naranja son un residuo orgánico adecuado para realizar el proceso de biosecado”⁹

La décima referencia es la proporcionada por (Diez Campos, garcia Breijo, Perez Clemente, Ros Lis, Soto Camino, & Vivancos Bono, 2007) y titulada “Determinación experimental de la conductividad térmica de materiales de la construcción”, cuya realización se basó siguiendo la normativa UNE, a través del método de la placa caliente guardada, de gran utilidad para medir conductividad térmica de materiales secos y húmedos para la construcción de alta y media resistencia térmica.. Para la aplicación del método fue necesario medir continuamente la diferencia de temperaturas entre las superficies opuestas de la muestra simétricamente, con una placa calefactora y otra placa de sensores de temperatura. Para realizar el ensayo fue necesario construir dos equipos con la idea de caracterizar el mayor rango posible de materiales con dimensiones muy variadas. Se obtuvieron resultados en la conductividad térmica del material (λ) cambia de forma aproximadamente lineal con respecto a la temperatura de acuerdo con la ecuación: $\lambda = \lambda_{25} + B \cdot (t - 25)$, donde: λ_{25} = conductividad térmica del material a 25°C. B = Coeficiente de variación de la conductividad térmica¹⁰.

⁹ Diaz Megchun, J., Robles Martinez, F., Macias hernandez, M., & Osorio Miron, A. (2013). Determinación de la conductividad térmica de materiales para biosecado mediante el método de placa caliente. Mexico: VSIR-REDISA.

¹⁰Diez Campos, J., garcia Breijo, E., Perez Clemente, I., Ros Lis, J. V., Soto Camino, J., & Vivancos Bono, J. L. (2007). Determinación experimental de la conductividad térmica de materiales de la construcción. Valencia: Instituto de Química Molecular Aplicada Universidad Politécnica de Valencia.

3.2 FASE II: CALCULAR LOS COMPONENTES NECESARIOS PARA EL APARATO DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE PLACA CALIENTE PROTEGIDA.

Posterior a la obtención de información suficiente, confiable y pertinente, se procede a realizar los cálculos necesarios sobre los diferentes componentes del instrumento de medición, teniendo así, un soporte teórico que garantice la funcionalidad y correcta operación del aparato de medición, por lo cual es necesario tener en cuenta factores como la resistencia térmica y su conductividad; para así garantizar el control de las variables en la medición, y así, poder tener buenas prácticas y obtener datos avalados por la norma que rige el método (ASTM C177-13).

La conductividad térmica es una propiedad que indica que tan bueno es un material para transferir energía en forma de calor a través de su superficie, área o longitud. Conocer esta propiedad es importante para clasificar los materiales y poder tener alternativas de solución para diversos problemas según su aplicación.

Debido a la importancia que tiene determinar las propiedades de los materiales, a lo largo de la historia se han creado ensayos estandarizados para medir correctamente estas propiedades, cada uno tiene su rango de aplicación, exactitud, precisión y está diseñado para testar determinados materiales.

A continuación, se muestra en una tabla, resumida la información sobre los métodos de medición de propiedades térmicas más usados en la actualidad.

Tabla 1. Métodos para la medición de conductividad térmica

Estado	Método	Rango de temperaturas (K)	Rango de conductividad (W/mK)	Exactitud	Materiales aplicables	Normas que rigen el método
Estable	Placa Caliente Protegida	80-800	Menor a 0,8	2%	Vidrio, polímeros y materiales	ASTM C177, ISO

					aislantes	8302, EN 12667
Estable	Flujo Axial	90-1300	0,2-200	2%	Polímeros, cerámicos y metales	ASTM E1225
Estable	Medidor de flujo de calor	253-523	Menor a 10	3%	Vidrio, polímeros, cerámicos y materiales aislantes	ASTM C518, ASTM E1530, ISO 8301, EN 12667
Estable	Tubo	293-2770	0,02-200	2%	Metales, materiales inorgánicos con alta conductividad térmica, composites poliméricos	ISO 8497
Transitorio	Destello Laser	373-3273	Menor a 0,01	3%-5%	Vidrios, Polímeros, Cerámicos y metales	ASTM E1461, ISO 22007-4, ISO 18755
Transitorio	Cuerda Caliente	293-2273	Menor a 25	1%-10%	Vidrios, polímeros, cerámicos, la mayoría de líquidos y gases	ASTM C1113, ISO 8894-1, ISO 8894-2, ISO 22007-2

Se escoge el método de la placa caliente protegida como medio para medir la conductividad térmica de materiales aislantes, porque cumple con el rango de temperaturas que requiere el proyecto, es ampliamente usado a nivel mundial para caracterizar propiedades térmicas en materiales con baja conductividad y por ser considerado como un método primario de medición. Para realizar un diseño de un banco de pruebas para la medición de conductividad térmica en materiales aislantes óptimo y confiable, es necesario seguir los parámetros mínimos presentes en la normatividad internacional, para de esa forma, garantizar la validez del instrumento de medición.

3.2.1 Configuración para el Aparato de Placa Caliente Protegida. La norma directriz para este proyecto es la norma ASTM C177-13: “Método de prueba estándar para mediciones de flujo de calor y propiedades de transmisión térmica en estado estable por medio del aparato de placa caliente protegida”.

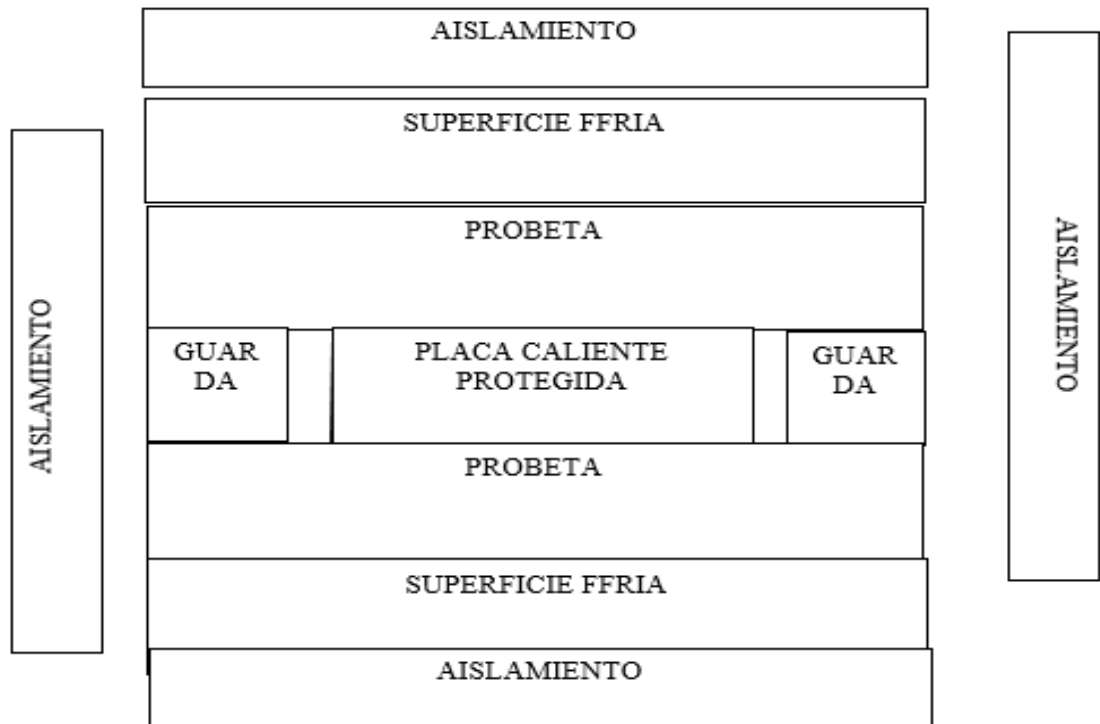
Existen dos configuraciones que son recomendadas por la norma para el aparato de placa protegida; la configuración “single-sided”, en donde el flujo de calor solo va a atravesar una probeta de aislante, y la configuración “double-sided”, en donde tenemos dos especímenes y la fuente de calor va a transmitir calor en dos direcciones opuestas, atravesando las probetas.

Según la norma, para la correcta aplicación del método, se requiere que el material a evaluar posea un valor de conductancia menor a $16 \text{ W/m}^2\text{K}$, y la probeta debe poseer una relación grande área/grosor. Existen dos tipos de configuraciones recomendadas en la norma:

Configuración “Double Sided”.- Se pueden observar en la figura 3. Las partes que componen la configuración definida por el método de placa caliente protegida. En condiciones ideales, habrá tres arreglos isotérmicos, tendremos dos configuraciones frías y la configuración de la placa caliente protegida.

En el ensamble de placas caliente, se encuentra la resistencia de calefacción, encargada de suministrar el calor al sistema; el ensamble también contiene el área o sección de medición, la cual debe estar térmicamente aislada del exterior por medio de una guarda; cuyo propósito es evitar el flujo de calor lateral. La probeta del material a aislar se encuentra presionada entre el arreglo de superficie caliente y el arreglo de superficie fría.

Figura 3. Configuración general double-sided.



Configuración “Single Sided”.- En la configuración “single sided”, se busca que todo el calor generado por el arreglo de placa caliente fluya a través de la probeta, con lo cual se hace necesario el uso de un aislante auxiliar, el cual debe poseer menor conductividad térmica que el material del cual esta elaborado la probeta, como medida para garantizar que el calor generado por la resistencia fluya a través de la probeta. Es necesario el montaje de una placa fría auxiliar, la cual debe estar a la misma temperatura que la placa caliente protegida, para así evitar flujo de calor en la dirección opuesta a la probeta, es decir, a través del aislante auxiliar.

Figura 4. Configuración general single sided.

PLACA FRIA
PROBETA
PLACA CALIENTE
AISLANTE AUXILIAR
PLACA FRIA AUXILIAR

Se elige la configuración “double sided” para el aparato de medición de conductividad en materiales aislantes debido a que su configuración es simétrica, lo cual garantiza una buena distribución del calor y flujos de calor uniformes.

Al usar dos probetas similares en dimensiones y del mismo material, se obtiene una conductividad térmica promedio para el material de estudio, esto reduce el error experimental y permite obtener valores de conductividad térmica más precisos y exactos. La configuración “single sided” tiene mayor error inherente al método para la medición de la conductividad térmica, debido a que al realizar el ensayo, aparte de las pérdidas de calor en los laterales, presentes también en la configuración “double sided”, se pierde calor a través del aislante auxiliar, con lo cual se hace mucho más complejo garantizar que la potencia generada por la resistencia eléctrica va a ser igual al flujo de calor que atraviesa la probeta. Otra desventaja importante presente en el ensayo de conductividad térmica usando la configuración “single sided” es en el momento de determinar la conductividad térmica de un material no certificado o que no tenga registrado el valor de esta propiedad en la literatura, ya que se debe escoger como aislante auxiliar una probeta con menor conductividad y el éxito de este método de ensayo va a estar sujeto a una buena elección del material a utilizar como aislante auxiliar.

3.2.2 Modelo Matemático

3.2.2.1 Transferencia de Calor por Conducción. Este método de medición para conductividad térmica se basa en la transferencia de calor debido al mecanismo de conducción en estado estable. La transferencia de calor por conducción ocurre cuando se tienen dos regiones o cuerpos a diferentes temperaturas; presentándose un flujo de calor desde la zona que posee mayor temperatura hacia la zona de menor temperatura.

Fourier estableció la siguiente ecuación para el cálculo del flujo de calor que ocurre durante un proceso de transferencia de calor por conducción.

$$Q = -K * A * \frac{dT}{dx}$$

Donde:

Q: Flujo de calor (W)

K: Conductividad térmica del material (W/mK)

A: Área perpendicular a la dirección del flujo de calor (m^2)

$\frac{dT}{dx}$: Delta de temperatura

En este proyecto, se busca obtener el valor de conductividad térmica, cuando el sistema se encuentra en estado estable. En este caso, tenemos una pared plana (probeta) sobre la cual va a pasar el flujo de calor proporcionado por la resistencia, debido a la diferencia de temperatura entre la placa caliente y la placa fría del aparato; en este caso el delta de temperatura y el flujo de calor son constantes en el tiempo. Este modelo se describe con la siguiente ecuación

$$\frac{Q}{A} = \int_0^L dx = \int_{T_{caliente}}^{T_{fría}} K * dT$$

$$Q = \frac{K * A * (T_{caliente} - T_{fria})}{L}$$

A pesar de que la conductividad se va a obtener cuando el sistema se encuentre en estado estable, es importante analizar el estado transitorio del sistema, esto con el objetivo de realizar cálculos y estimar el tiempo al que se llega al estado estable. Para el análisis del estado estable, debemos hacer uso del método de la resistencia interna despreciable, con el cual asumimos que la temperatura del cuerpo se distribuye uniformemente en cualquier instante de la etapa transitoria.

Con este método no tenemos en cuenta las diferencias de temperatura en el interior del cuerpo, para definir este estado debemos recurrir a realizar un balance de energía en el cuerpo a estudiar, este balance se expresa de la siguiente manera:

$$E_{entra} - E_{sale} = E_{almacenada}$$

Donde:

E_{entra} : Razon de ganancia de energia

E_{sale} : Razon de pérdida de energía

$E_{almacenada}$: Razon de cambio de la energia interna

3.2.2.2 Transferencia de Calor por Convección. Este mecanismo de transferencia de calor se caracteriza por la presencia de un fluido (líquido, gas, plasma) el cual retira calor entre dos zonas que se encuentran a diferente temperatura. Existen dos tipos de convección; convección forzada y convección natural.

La convección forzada ocurre cuando el fluido es bombeado por alguna fuente artificial (bomba, ventilador). En la convección natural no se requiere de ningún tipo de elemento mecánico para generar el movimiento del fluido. La ecuación para determinar el flujo de calor que se genera por convección es:

$$Q = h * A * (T_s - T_f)$$

Q: Flujo de calor (W)

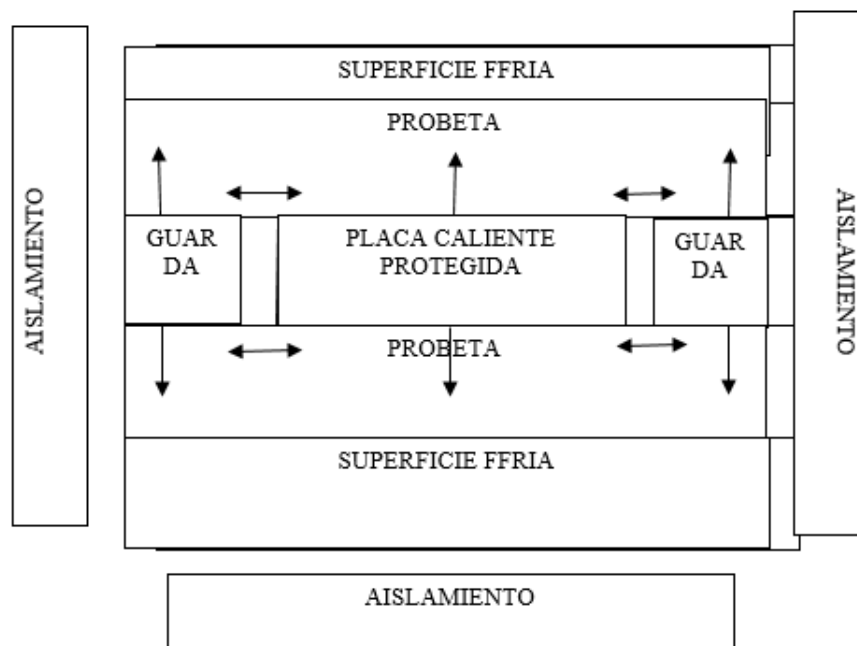
h: Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m^2K)

A: Área de la sección perpendicular al flujo de calor (m^2)

T_s : Temperatura superficial del cuerpo (C)

T_f : Temperatura del fluido (C)

Figura 5. Flujo de calor en configuración double sided



3.2.3 Requerimientos Mínimos para el Diseño. La norma ASTM C177-13 fija los parámetros que deben ser cumplidos por el aparato de medición de conductividad por placa caliente protegida, para que el ensayo tenga validez según el método aplicado.

Se debe cumplir que la diferencia promedio de temperatura entre la superficie de la sección de medición y la superficie de la guarda no debe exceder 0,2 K; además la diferencia de temperatura a través de cualquier superficie en dirección lateral no

debe exceder el 2% del delta de temperatura que atraviesa el espécimen. Las superficies de la zona de medición y la zona de protección primaria que están en contacto con la muestra de prueba, deben ser fabricadas con un material que posea una emitancia mayor de 0,8 en el rango completo de las condiciones de funcionamiento.

Para reducir las diferencias de temperatura lateral a través de las placas de medida y la de protección primaria, se fabrican estas placas a partir de materiales que poseen una alta conductividad térmica y favorable a las condiciones ambientales de operación. El cobre y el aluminio son opciones más recomendadas para este tipo de aplicaciones. Es necesario evaluar la capacidad de transmitir calor del arreglo de placa caliente protegida, ya que, entre mayor capacidad, se reduce el tiempo en alcanzar el equilibrio térmico; así como el espesor de las placas que lo componen.

Debe existir una sección llamada “Gap”, la cual es el área entre la sección de medida y la protección primaria, ésta debe ser rellenada con material aislante. La brecha “Gap” proporciona una resistencia térmica lateral entre estas secciones de la superficie caliente.

El área del espacio entre la placa caliente protegida y la guarda, debe ser menor que el 5% que el área de medición. El espacio o “gap” puede ser rellenado con aislante; los cables que pasen por este espacio deben estar fabricados con materiales con alta resistencia térmica

En cuanto a la selección de los materiales de construcción para el banco de pruebas de conductividad térmica para materiales aislantes, se deben tener en cuenta parámetros como la estabilidad térmica, conductividad térmica, emisión.

Es importante proporcionar un medio que proporcione una fuerza de compresión constante, reproducible, es decir, que se pueda garantizar que para pruebas

posteriores se podrá reproducir o replicar la magnitud de la fuerza aplicada, sobre el sistema de placas, para garantizar la replicabilidad de las pruebas de medición, además de facilitar el contacto entre las diferentes superficies de los arreglos, maximizando así la transferencia de calor entre ellas. Para el caso de materiales compresibles, con el uso de guías espaciadoras es suficiente para garantizar el valor constante en el grosor del espécimen durante la prueba de medición de conductividad.

Según la norma ASTM C177-13, para mantener una separación precisa entre los conjuntos de superficies calientes y frías. Es poco probable que una fuerza superior a 2,5 kPa se requiera para la mayoría de materiales aislantes.

3.2.4 Control de Temperatura. Se hace necesario tener un medio para conocer la temperatura de la sección de medición y la guarda; se debe monitorear la temperatura a lo largo del espacio “gap”. Uno de los puntos críticos del sistema es la elección de sensores de temperatura, ya que la temperatura en cada uno de los elementos del aparato de medición es una variable determinante para el cálculo de la conductividad térmica. Se deben usar sensores de temperatura con una precisión adecuada, tales como termistores, termopares, diodos o termómetros de resistencia de precisión. Los termopares son el detector más ampliamente utilizado debido a su amplia gama de aplicación y la precisión

3.2.5 Selección de Materiales. Sabiendo los requerimientos mínimos que exige la norma ASTM C177-13 para el diseño del aparato de medición de conductividad térmica, se procede a establecer los materiales adecuados para cada uno de los elementos.

3.2.5.1 Aislamiento. El material para este propósito debe cumplir con las siguientes propiedades

- Resistente a la compresión
- Forma y volumen definido
- Baja conductividad térmica

Se elige el grilón para fabricar este elemento, ya que cumple todos los requisitos y además se encuentra fácilmente en la ciudad.

3.2.5.2 Placas. El material para este propósito debe cumplir con las siguientes propiedades:

- Alta conductividad térmica
- Fácil maquinado
- Forma y volumen definido
- Resistente a la compresión

Se elige el aluminio por cumplir con las propiedades anteriormente descritas con excelencia.

3.2.6 Cálculos. Se tomarán las siguientes consideraciones para la realización de los cálculos:

- La resistencia eléctrica presenta temperatura uniforme en todo su volumen
- El flujo de calor presente en el sistema es unidireccional
- No hay espacios entre los elementos del sistema (Resistencia de contacto despreciable)
- No existe generación de energía interna
- Propiedades de los materiales son constantes
- Coeficiente de convección constante
- En cada instante de tiempo las temperaturas son constantes en todo el volumen del cuerpo
- Transferencia de calor por radiación despreciable
- Transferencia de calor por convección entre el sistema y el exterior despreciable

3.2.6.1 Estado Estable. La fuente de calor para el sistema va a ser una resistencia; la cual suministrará una potencia determinada; ese valor es equivalente al flujo de calor que atraviesa en el sistema, y se calcula de la siguiente manera:

$$Q_s = P_e = V * I$$

Donde:

Q_s : Flujo de calor que atraviesa el sistema (W)

P_e : Potencia eléctrica (W)

V: Diferencia de potencial (V)

I: Intensidad de corriente (A)

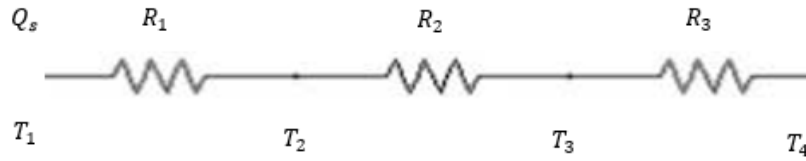
Al realizar el balance energético, se obtiene que el flujo de calor que atraviesa el sistema es constante en el tiempo, teniendo esto, se proceden con los cálculos.

3.2.6.2 Circuito Térmico. “Se puede esquematizar la transferencia de calor por conducción entre diferentes materiales en estado estable utilizando la analogía eléctrica en el cual la variable de impulso es la diferencia de temperaturas y la variable de flujo es el calor. El flujo de calor se lo puede representar en función de la diferencia de temperaturas y de la resistencia térmica de los materiales, donde el flujo de calor unidimensional se lo representa.” (HOLMAN J. P.; 1999; “Transferencia de calor”; CECSA; Décima edición; México; página 43)

$$Q = \frac{\Delta T}{\Sigma R}$$

- ΔT = diferencia de temperatura.
- ΣR =sumatoria de resistencias térmicas
- q = flujo de calor

Figura 6. Circuito térmico



$$Q_s = \frac{K_{Al} * A * (T_1 - T_2)}{L_1} = \frac{K_M * A * (T_2 - T_3)}{L_2} = \frac{K_{Al} * A * (T_3 - T_4)}{L_3}$$

$$Q_s = \frac{T_1 - T_4}{\left(\frac{L_1}{K_{Al} * A} + \frac{L_2}{K_M * A} + \frac{L_3}{K_{Al} * A}\right)}$$

Donde:

- \$K_{cu}\$= coeficiente de conducción térmica de la placa caliente de referencia en (W/m.K).
- \$K_M\$=coeficiente de conducción térmica de la placa de muestra (W/m.K).
- \$A\$= área de contacto entre las probetas, constante para cada superficie (m2).
- \$L_x\$= espesor de cada probeta (m).
- \$T_x\$= temperatura en cada superficie (K).

Aplicando la ecuación anterior, se calcula el espesor mínimo de la probeta para exista una diferencia de temperatura de 20 K entre la placa caliente y la placa fría.

$$Q_s = \frac{K_M * A * (T_2 - T_3)}{L_2} = \frac{0,04 * 0,0225 * (20)}{L_2} = 110 * 1,14$$

$$L_2 = 0,14 \text{ mm}$$

Por cuestiones prácticas, se escogerá un espesor para la probeta \$L_2 = 0,01 \text{ m}\$. Se procede a calcular la potencia eléctrica requerida para mantener la misma diferencia de temperatura con el nuevo espesor.

$$Q_s = \frac{K_M * A * (T_2 - T_3)}{L_2} = \frac{0,04 * 0,0225 * (20)}{0,01} = 1,8 \text{ W}$$

Van a existir pérdidas, por lo cual usaremos un factor de seguridad 1,1; obteniendo así, que la potencia eléctrica mínima debe ser 2 W.

Ahora calculamos, el tiempo que tarda la resistencia en llevar dese la temperatura ambiente 293K, hasta alcanzar 313 K como temperatura de ensayo.

$$\text{Capacitancia Termica} = C = \rho * V * C_p$$

$$C = 2700 * 0,00225 * 880 = 5346 \text{ J/K}$$

$$\left(21384 \frac{\text{J}}{\text{K}}\right) * (20\text{K}) * \frac{1\text{s}}{2\text{J}} * \frac{1\text{ h}}{3600\text{ s}} = 14,85\text{ h}$$

Como se observa la prueba demoraría mucho tiempo en llegar al estado estable con lo cual, se escoge una potencia eléctrica mucho mayor, para acortar el tiempo de la prueba y que así sea más práctica. Se escoge una resistencia interna que proporciona una potencia eléctrica de 200 W y una resistencia externa que entrega 325 W para el calentamiento. Las resistencias van a ser controladas con microcontroladores electrónicos para de esta forma garantizar la estabilidad de la temperatura en el arreglo de placa caliente.

3.2.6.3 Intercambiador de calor. Anteriormente, con el método de la resistencia térmica se calculó el flujo de calor teórico que va a atravesar la probeta de material aislante a la que se le va a aplicar el ensayo de conductividad térmica en estado estable, ahora se van a realizar cálculos para dimensionar un intercambiador de calor capaz de retirar ese calor, para mantener estable la temperatura de la placa fría.

Para ello aplicamos las ecuaciones de convección interna forzada, debido a que el calor a retirar es muy bajo, solamente de 2W, para las condiciones establecidas anteriormente; podemos manejar flujo laminar completamente desarrollado en el intercambiador de calor.

$$Re = \frac{V_{prom} * D}{\nu}$$

Donde:

Re: Numero de Reynolds

V_{prom} : Velociddad promedio del fluido

D : Diametro de la tubería

ν : Viscosidad cinematica del fluido

3.3 FASE III: CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS PARA LA MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA PARA MATERIALES AISLANTES.

Se procede la fabricación de los elementos que componen el aparato de medición de conductividad térmica en estado estable para materiales aislantes, el cual va a ser ubicado en el laboratorio de transferencia de calor de la Universidad Pontifica Bolivariana, seccional Bucaramanga.

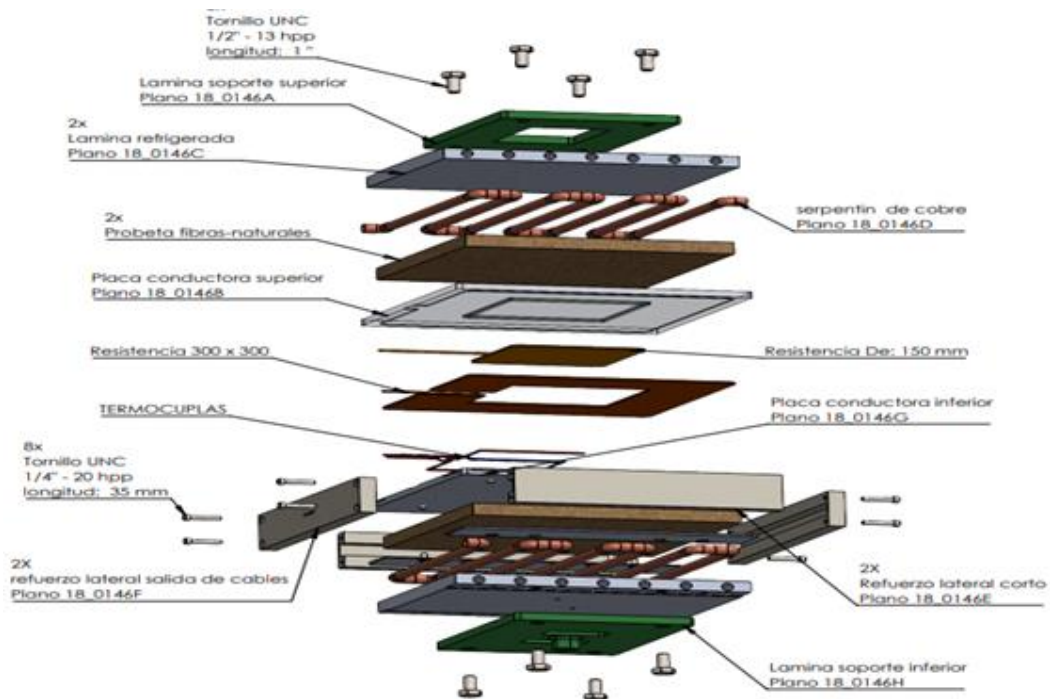
La fabricación del banco de pruebas sigue las pautas y recomendaciones de la norma ASTM C177-13 (Method, 2013b), establecidas para los procesos de medición de conductividad. Aunque las normas no describen un diseño concreto de fabricación, en ella se pueden evidenciar los requerimientos mínimos necesarios para su fabricación, asegurando una transmisión estable y constante de la energía por conducción en la placa caliente protegida¹¹.

Actualmente en Bucaramanga existe una debilidad en el desarrollo industrial acorde a las necesidades tecnológicas y constructivas que conlleven a realizar modelos de fabricación de los elementos del prototipo propuesto en el presente estudio. Es por esta razón que a continuación se establece el proceso de fabricación del banco de

¹¹ Huilcapi Salazar, Karina Stephanie. Caracterización Térmica de Biomosas Ecuatorianas en diferentes Estados de compactación y humedad con vistas a su uso como aislamiento en viviendas. Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. Carrera De Ingeniería Mecánica. Sangolqui. 2016

prueba para medir la conductividad en las pruebas de transferencias de calor de tipo placa caliente (Method, 2013b) específico para el presente estudio, el cual cuenta con buenas especificaciones en prestaciones térmicas y de resistencia, a un costo menor y un impacto ambiental positivo. El aparato fue construido a través del método de placa caliente protegido, para la determinación de las propiedades de transmisión térmica en estado estacionario de muestras de aislamiento térmico con una placa de enfriamiento en ambos extremos y una placa caliente al interior como se observa en la figura 7 .

Figura 7. Despiece del prototipo



La norma establece que para la transferencia es necesaria la medida de flujo unidireccional y estacionario de calor a través de dos muestras planas y homogéneas de caras paralelas y espesor conocido testadas a temperaturas constantes mediante un sistema de placa caliente central y doble placa fría exterior¹².

¹² Luis Velasco Roldán, Leonardo Goyos Pérez, Reinaldo Delgado García & Luis Freire Amores. Instalación para medición de

El banco de pruebas a través del método de placa caliente protegida se fabrica de acuerdo a la norma ASTM C177-13 (Method, 2013b), ASTM C1114-13 (Method, 2013a), ASTM C168 – 13 (Method, 2014).

La figura, permite visualizar el diseño, el cual está hecho con materiales de Aluminio, cobre, y Grilón, la placa caliente la cual contiene una resistencia que emite calor, suficiente para realizar las pruebas necesarias para la medición de conductividad. La resistencia se encuentra aislada mediante las placas térmicas formando un emparedado entre las láminas de aluminio, siendo la resistencia un elemento uniforme para toda el área de calentamiento.

El objetivo del modelo a través de las placas de aluminio es asegurar la conductividad y baja inercia térmica en ambas caras. La función de la placa fría es disipar la energía que llega desde la placa caliente a través de las muestras que se desea medir.

3.3.1 Fundición. El proceso de fundición de metales consiste en obtener un producto, introduciendo el metal en estado líquido en un recipiente con la forma adecuada llamado molde. Para la mayoría de los casos el molde esta hecho de arena. Cualquier metal se puede emplear para el proceso de fundición, entre los metales más empleados se encuentran el cobre para valvureria y el aluminio para la construcción; se puede utilizar siguiendo el siguiente proceso¹³:

- Diseño del modelo original de la pieza a fundir.
- Elaboración del tipo de modelo diseñado.
- Fusión del material a fundir.

conductividad térmica en composites basados en residuos de biomasa
. Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito – Ecuador. 2016

¹³ Víctor Chura Uruchi. Conformado de una pieza de aluminio: moldeo en arena verde, fundición y colada. Revista tecnologica.2014

- Inserción de la colada en el molde.
- Solidificación de la pieza.
- Limpieza de la superficie con proceso vibratorio o de granallado.

La función de la fundición es dar forma a los metales, su objetivo se centra en fundir y colar el metal líquido, que a través de un molde se le da la consistencia, forma y tamaño deseado para que allí solidifique. Generalmente el molde esta hecho de arena, consolidado por un apisonado manual o mecánico alrededor de un modelo, el cual se extrae antes de recibir el metal fundido¹⁴.

La fundición del metal depende directamente de la composición, temperatura de fusión y tensión superficial del metal fundido. Todos estos factores determinan su fluidez; además se utilizan tres tipos de fundición¹⁵:

En lingoteras: Se usa la fundición de primera fusión a la que se añaden los elementos de aleación necesarios que posteriormente se depositan en lingoteras de colada por gravedad o a presión.

Colada continua: En este tipo se eliminan las bolsas de aire y las secreciones, tanto longitudinales como transversales. Mediante este sistema se obtienen barras, perfiles, etc. Fundición en moldes: Se extraen las piezas completas. Preparación de la mezcla:

En el caso del molde, el mismo se elaborará con las siguientes mezclas:

MC -1: Mezcla de cara para piezas fundidas de acero en base a arena de sílice y silicato de sodio para moldes y machos. Composición: Arena de Sílice 94% y silicato

¹⁴ Fundición. Protocolo Curso de procesos de manufactura. Facultad ingeniería industrial Laboratorio de producción. 2008

¹⁵ Arnaldo Ozorio. Fundición y fabricación de materiales metálicos y utensilios en general. Distrito huanuandarias- departamento de alto Parana. 2016

de sodio 6%. La cual ocupara en el molde en un 30%

MR-1: Mezcla de relleno para moldeo de hierro y aceros su composición es: Arena de retorno 94%, bentonita 3%, agua hasta la humedad requerida y melaza 3% la cual ocupara el 70% de la mezcla que se constituye el molde.

Los machos se elaborarán con:

MM-15: Para machos. Su composición es: Arena Sílice 94% y solución silicato-azúcar, 6% (silicato de sodio 80% y azúcar a 4%).

3.3.1.1 Proceso de fundición del aluminio. El aluminio es un material no férreo, por lo que las aleaciones son más importantes debido a su ligereza, endurecibilidad mediante deformación y resistente a la corrosión, además de tener un bajo costo en el mercado a diferencia del acero. Dentro de los materiales utilizados para el presente proyecto, se encuentra el cobre y el estaño que son materiales con densidades mayor a 5Kg/dm³ y pertenece a, los metales pesados; el aluminio posee una densidad de 2,7Kg/dm³ y pertenece a los metales ligeros; siendo este un elemento fácil de encontrar en la corteza terrestre, ya que la misma está conformada por el 8% del elemento y se encuentra con mayor frecuencia en las rocas de la vegetación y de los animales¹⁶.

El aluminio es considerado un metal muy útil en la ingeniería mecánica, debido a su baja densidad y su alta resistencia a la corrosión; el punto de fusión se da a temperaturas de 660°C y en la actualidad es considerado como un buen elemento conductor de calor y electricidad; además es fácil de reciclar.¹⁷

Al ser un material de fácil mecanizado, puede ser bastante dúctil y muy maleable,

¹⁶ Enevely Silerio Benavides. Diseño de un dispositivo experimental de maquinado para aleaciones de aluminio silicio. Universidad Autónoma De Nuevo León - Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. 2012

¹⁷ Millán Gómez, Simón (2006), Procedimientos de Mecanizado, Madrid: Editorial Paraninfo. ISBN 84-9732-428-5.

en su estado puro puede llegar a resistir hasta 160-200N/mm² y forma aleaciones con otros metales para mejorar las propiedades mecánicas¹⁸.

3.3.1.2 Edificación y construcción. La relación que existe entre la resistencia y el peso hacen que el aluminio sea una elección natural de la industria de la construcción, además de su durabilidad y maleabilidad y resistencia a la corrosión. Es utilizado para la construcción de muros de cortinas, estructura de ventanas y puertas; aunque su peso y conductividad hacen que sea un material muy importante para conducir la electricidad y en la industria metalmecánica¹⁹.

3.3.1.3 Reciclado. El aluminio se recicla indefinidamente, debido a su valor intrínseco, sin pérdida de la calidad, siendo el 42% por objetos de consumo, 85% de la construcción y el 95% de transporte; aunque producirlo nuevamente solo gasta el 5% de la energía normal²⁰.

3.3.1.4 Aleaciones. Desde el punto de vista físico, el aluminio tiene resistencia baja a la tracción y es de dureza escasa; durante el proceso de fundición, adquiere características importantes como la influides y capacidad de alimentación²¹.

3.3.2 Soldadura de estaño. La soldadura del estaño, se relaciona con el proceso de soldadura de estaño y plomo, el cual consiste en unir dos segmentos de metal como el bronce, latón o hierro a través del proceso de soldadura blanda (menor de 200° de temperatura); este proceso consiste en combinar en aleación con otros metales teniendo en cuenta las propiedades la cual se compone los materiales a soldar. El uso más frecuente se señala a continuación²²:

¹⁸ Humberto Borja Cerda, Maria Carrera Ramos & Diana Karina Villareal Peralta. Efecto de la dispersión de Nanotubos de carbono en Una aleación de aluminio 7075. Chihuahua, Chih. 2014

¹⁹ IQUA.NET. La importancia del aluminio en las construcciones. 2016

²⁰ Federico Millán Delgado, Diana Pilar Sánchez García & Jhon Jairo Olaya Flórez. Reciclaje de aluminio: Oportunidades de desarrollo en Bogotá (Colombia). Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

²¹ Ernesto Gustavo Maffia. Estructura y propiedades de las aleaciones. 2013

²² Soldadura de estaño y plomo. No. ONU: 9999

- Estaño–Plomo: Es el metal de aportación más común y es el utilizado en casos generales.
- Estaño–Antimonio-Plomo: Se añade antimonio porque mejora las propiedades mecánicas del material de aportación. Así mismo el estaño se usa en combinación con otros metales de acuerdo a los usos requeridos.
- Estaño–Plata: Se utiliza en instrumentos de trabajo delicados.
- Estaño–Zinc: Se utiliza para soldar aluminio.
- Estaño–Bismuto: Tiene una gran aplicación en el campo de la electrónica

3.3.3 Maquinado. El maquinado es el proceso que mediante a través de una herramienta de corte, permite remover el exceso de material no deseado, para lograr una pieza de acuerdo a las características deseada. En este proceso se logra cortar el material, creando una viruta, cuando esta es removida, queda totalmente expuesta a una nueva superficie²³.

El maquinado es realizado en muchas gamas de metales, no solo es unos procesos, es la combinación de varios procesos a través del movimiento del metal y la herramienta, añadiendo productos que facilitan el proceso. Las máquinas herramientas de mecanizado clásicas son²⁴:

- Taladro: La pieza es fijada sobre la mesa del taladro, la herramienta, llamada broca, realiza el movimiento de corte giratorio y de avance lineal, realizando el mecanizado de un agujero o taladro teóricamente del mismo diámetro que la broca y de la profundidad deseada.
- Limadora: esta máquina herramienta realiza el mecanizado con una cuchilla montada sobre la porta herramientas del carnero, que realiza un movimiento lineal de corte, sobre una pieza fijada la mesa, que tiene el movimiento de

²³ Pablo Rivero Borrell Contreras. Análisis de Fuerzas de Corte en Procesos de Taladrado para Aluminio 2024 T6. Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

²⁴ LEVINSOS. Monterrey. Disponible en: <https://www.aceroslevinson.com/2016/11/que-es-el-maquinado/>.

avance perpendicular al movimiento de corte.

- Mortajadora: Máquina que arranca material linealmente del interior de un agujero. El movimiento de corte lo efectúa la herramienta y el de avance la mesa donde se monta la pieza a mecanizar.
- Cepilladora: De mayor tamaño que la limadora, tiene una mesa deslizante sobre la que se fija la pieza y que realiza el movimiento de corte deslizándose longitudinalmente, la cuchilla montada sobre un puente sobre la mesa se desplaza transversalmente en el movimiento de avance.
- Brochadura: Máquina en la que el movimiento de corte lo realiza una herramienta brocha de múltiples filos progresivos que van arrancando material de la pieza con un movimiento lineal.
- Torno: Es la máquina herramienta de mecanizado más difundida, éstas son en la industria las de uso más general, la pieza se fija en el plato del torno, que realiza el movimiento de corte girando sobre su eje, la cuchilla realiza el movimiento de avance eliminando el material en los sitios precisos.
- Fresadora: En la fresadora el movimiento de corte lo tiene la herramienta; que se denomina fresa, girando sobre su eje, el movimiento de avance lo tiene la pieza, fijada sobre la mesa de la fresadora que realiza este movimiento. Es junto al torno la máquina herramienta más universal y versátil.

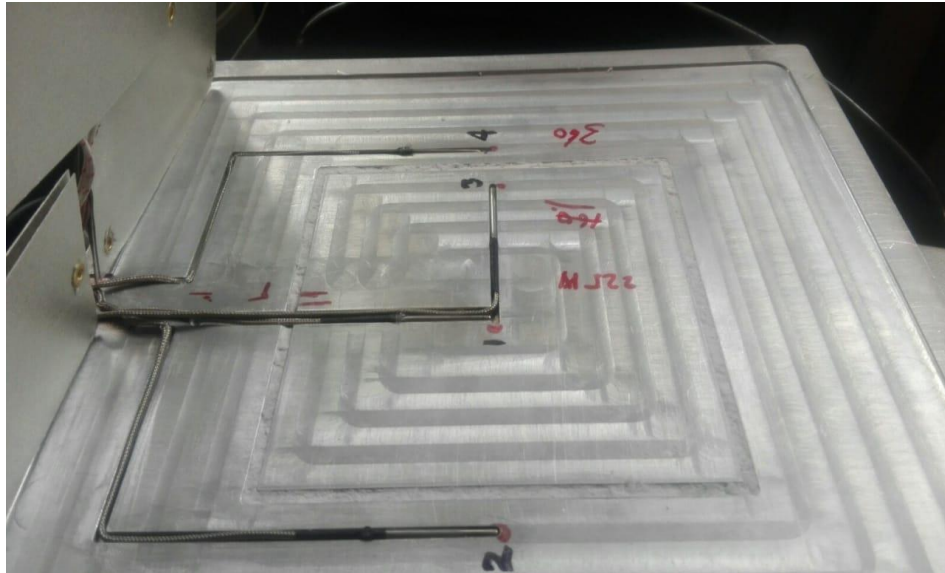
3.4 FASE IV: CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS PARA LA MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA PARA MATERIALES AISLANTES.

3.4.1 Ensamble de Placa Caliente. El ensamble de placa caliente consiste en dos placas de iguales dimensiones, fabricadas en aluminio mediante el proceso de fundición de aluminio, poseen unas dimensiones de 300x300x10 mm, en medio de ellas, se ubican dos resistencias, una en el área correspondiente a la placa caliente protegida con un valor de potencia de 225 W y otra en el área de la guarda suministrando una potencia eléctrica de 360 W, encargadas de suministrar el calor al sistema.

Se ubican cuatro sensores de temperatura sobre esta placa, los cuales son termocuplas tipo K, encargadas de registrar los valores de temperatura en tiempo real en la placa, para asegurar que no exista flujo lateral, es decir, que el flujo sea unidireccional.

Como podemos observar en la figura la placa se divide en dos secciones, la placa caliente protegida, tiene un área de 150x150 mm, la cual es considerada como el área de medición; y la guarda que corresponde al área restante, y cumple la función de evitar pérdidas de calor

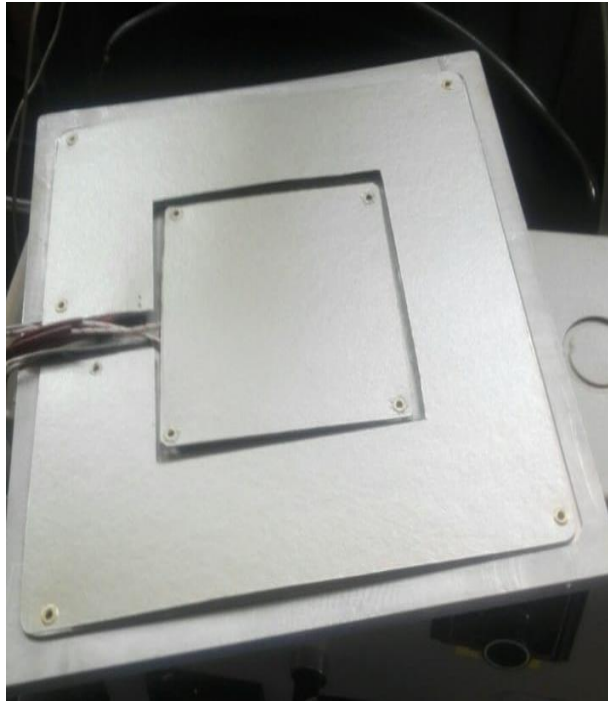
Figura 8. Ensamble de placa caliente



3.4.2 Resistencias de Calentamiento. Las resistencias de la figura son independientes, cada una se encarga de calentar un área determinada, la resistencia interna proporciona energía al área de medición; y la resistencia externa, proporciona energía en forma de calor al área de la guarda.

Las resistencias son planas y están distribuidas uniformemente en el área. Las resistencias se van a controlar mediante microcontroladores electrónicos.

Figura 9. Resistencias de calentamiento



3.4.3 Caja de Control. La caja de control permite conectar en su parte inferior ocho termocupas, como se puede observar en la figura.

Cada pirómetro permite configurar un “set point” para la temperatura, el cual indicara al microcontrolador en que momento apagar o prender la resistencia. El pirómetro 1 controla la resistencia interna y el pirómetro 2 controla la resistencia externa.

Bajo cada pirómetro se encuentra un interruptor de dos posiciones que permite apagar o encender el pirómetro correspondiente. Las lecturas de temperatura correspondientes a las termocupas 1 y 2, se deben observar en el pirómetro 1. Para cambiar de lectura entre esas dos termocupas se usa el interruptor selector de dos posiciones, que se encuentra ubicado sobre ellas. Las lecturas correspondientes a las termocupas 3, 4, 5, 6, 7 y 8 se deben observar en el pirómetro 2. Para cambiar de lectura entre las termocupas anteriormente nombradas se debe seleccionar la posición deseada mediante la perilla selectora, la cual se encuentra ubicada en el

extremo superior derecho; correspondiendo la posición 1, en la perilla selectora, a la termocupla 3 y siguiendo así en orden ascendente.

La caja en todo momento está midiendo la corriente y el voltaje de la(s) resistencia(s), mediante un amperímetro y un voltímetro digital, Con el interruptor de dos posiciones ubicado a la derecha, controlamos si encendemos o apagamos la resistencia externa.

Figura 10. Caja de control



3.4.4 Ensamblaje de Placas Frías. El ensamblaje de placas frías consta de dos placas de aluminio, de iguales dimensiones, 300x300x20 mm, como se observa en la figura.

Cada una de las placas frías cuenta con un sistema de refrigeración, el cual consiste en un intercambiador de calor, fabricado con tubería de cobre, por el cual fluye agua proveniente de un tanque.

En cada placa fría se ubican dos termocuplas tipo K para obtener datos sobre la temperatura a la que se encuentran en cada instante de tiempo

Figura 11. Ensamble de placas frías



3.4.5 Termocuplas. Para medir las temperaturas en los diferentes puntos de interés se emplean termocuplas tipo K, las cuales son usualmente usadas en aplicaciones térmicas de hasta 1300 C. En el aparato de medición de conductividad térmica para materiales aislantes en estado estable, la lectura que proporcionen las termocuplas tipo K es la entrada que tiene el microcontrolador electrónico para realizar el control sobre la resistencia, ya que dependiendo de si la temperatura está por encima o por debajo del “set point” desenergiza o energiza el relé de estado sólido.

El error que pueden tener las termocuplas tipo K al realizar la lectura de temperatura en algún componente del aparato, aporta a que el valor de conductividad térmica arrojado por el ensayo presente alteraciones respecto del valor teórico.

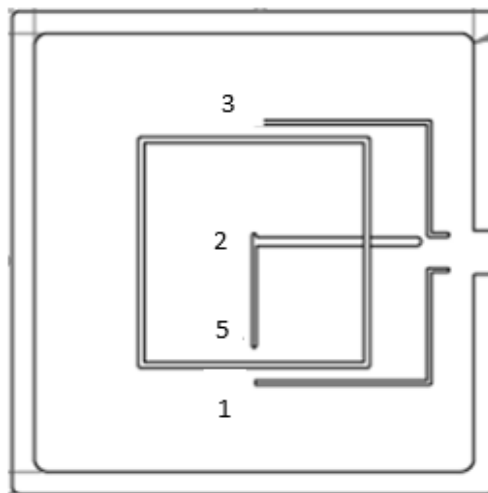
Antes de realizar el montaje y empezar a realizar las pruebas pertinentes para evaluar la conductividad térmica de materiales aislantes en estado estable, se procede a realizar una calibración de las termocuplas tipo K usadas para este proyecto; en el laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

Para la calibración de las termocuplas, la calibración se realiza mediante el método de pozo seco, en donde se establece un rango de operación de las termocuplas y dentro de ese rango se compara el valor registrado por la termocupla y el valor del patrón y de esa forma se encuentra el error en la medición. En el anexo 2 se encuentran los resultados del ensayo.

Las termocuplas 2 y 3 presentaron menor error que las demás en el rango de operación del ensayo, por lo cual van a ser usadas como instrumentos que proporcionen el valor de temperatura que sirva para controlar la resistencia interna y externa.

Sobre el arreglo de placa caliente protegida van montadas cuatro (4) termocuplas tipo K, encargadas de garantizar la temperatura correcta para el ensayo. La distribución de las termocuplas en el arreglo de placa caliente es como se muestra en la siguiente figura:

Figura 12. Ubicación de termocuplas



Tomando como guía la figura anterior, se describen cada una de ellas:

- a) Termocupla 2: Mide la temperatura en el centro de la placa caliente protegida.
- b) Termocupla 1 y 3: Miden la temperatura de la guarda, la cual sirve para conocer las pérdidas de calor por los laterales.
- c) Termocupla 5: Mide la temperatura en un borde de la placa caliente protegida, para garantizar temperatura uniforme de la placa.

3.4.6 Microcontrolador. Un microcontrolador es un circuito integrado que permite ser programado con el fin de realizar una acción específica de control en un proceso determinado.

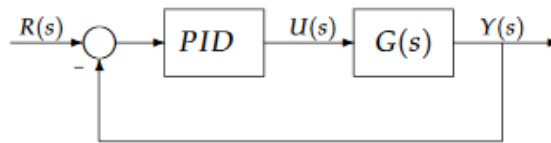
Se hace necesario el uso de microcontrolador para reducir los tiempos de calentamiento y estabilización térmica de los elementos del aparato de placa caliente protegida para materiales aislantes en estado estable.

En esta aplicación el microcontrolador envía o no, una señal a un relé de estado sólido con lo cual se permite o no el paso de corriente hacia la resistencia; por lo tanto, la resistencia no va a estar encendida durante todo el ensayo, buscando de esta manera controlar el calor que entrega la resistencia durante el ensayo.

Existen varios tipos de control, los dos más comunes y usados son:

Control PID: Es un mecanismo de control mediante un lazo de retroalimentación permite regular una variable deseado. El control PID compara en cada instante de tiempo la medida de la variable con el valor deseado de esa misma variable y ejerce una acción dependiendo de la diferencia existente; esa acción es una combinación de tres elementos, el proporcional (P), integral (I) y derivativo (D), cabe aclarar que no en todos los procesos de control se necesitan los tres elementos, por lo cual existe control con un solo elemento o con dos elementos.

Figura 13. Diagrama control PID



La ecuación general que gobierna el control PID es la siguiente

$$U(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{t_i} \int_0^t e(t) dt + K_p * t_d * \frac{de(t)}{dt}$$

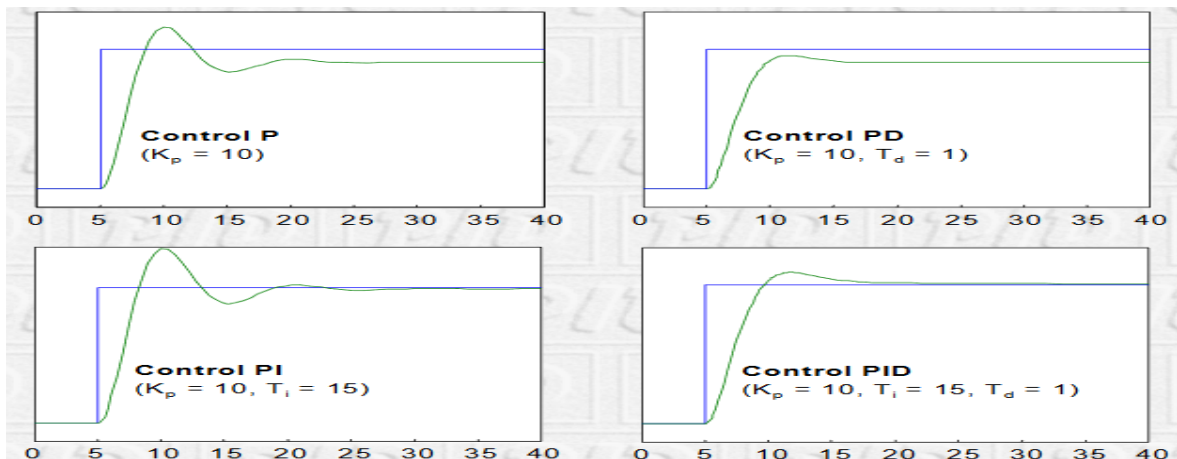
El primer término corresponde al elemento proporcional (P), el cual cuantifica la diferencia entre el valor instantáneo de la variable y el valor del “set point” como un porcentaje y genera una salida proporcional al error.

El segundo término corresponde al elemento integral (I), este hace referencia al tiempo que debe tardar en ejecutar la acción correctiva, por lo cual un valor de tiempo muy pequeño causa que el ajuste sea muy rápido y se genere inestabilidad en la variable a controlar. En este elemento la salida es proporcional al error acumulado.

El tercer término corresponde al elemento derivativo (D), debido a que estamos

derivando la función error respecto del tiempo, podemos tener información sobre cambios en la recta tangente a la curva de la función, esto permite realizar una acción predictiva, es decir, este elemento responde a la velocidad con que cambia el error y corrige, evitando así que el valor de error crezca bruscamente. A continuación, se ve el comportamiento típico de una variable en el tiempo cuando se le aplica este tipo de control.

Figura 14. Tipos de control

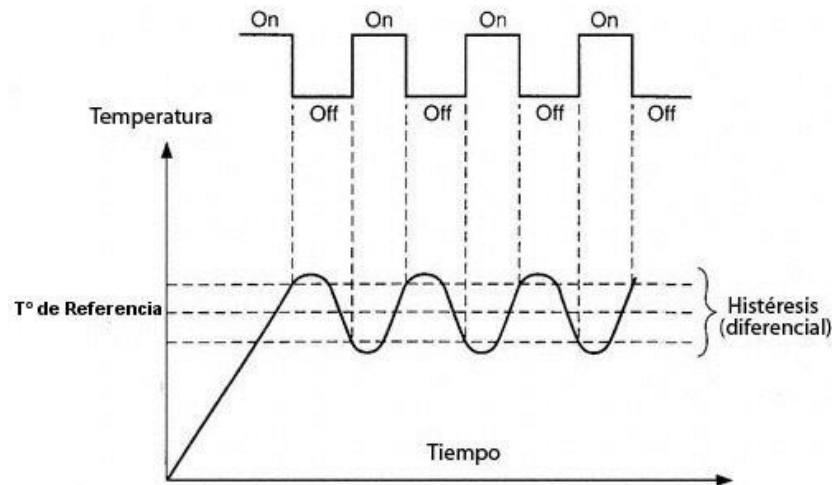


Control ON/OFF: Es un mecanismo de control que permite establecer dos posiciones, una de ellas en donde se va a ejecutar una acción (ON) y la otra donde no se va a realizar ninguna acción sobre el proceso.

Esto permite mantener la variable que se quiere controlar oscilando en un rango de dos valores predeterminados por el usuario

El comportamiento típico de una variable a la cual se le realiza control ON/OFF se muestra en la siguiente imagen:

Figura 15. Control ON/OFF



3.4.7 Osciloscopio. El osciloscopio es un instrumento que permite visualizar fenómenos transitorios, así como formas de ondas en circuitos eléctricos y electrónicos.

Debido a que necesitamos saber la cantidad de energía en forma de calor entregada por la resistencia calefactora, y el control se realiza mediante pulsos que energizan y desenergizan un relé de estado sólido, se hace necesario observar la señal para determinar el tiempo que la resistencia estuvo encendida y así poder determinar con exactitud el calor entregado por la resistencia al sistema y distribuirlo a lo largo del ensayo.

3.4.8 Procedimiento. Seleccionar la probeta teniendo en cuenta los siguientes parámetros;

Grosor: El máximo grosor depende netamente del diseño del aparato de medición de placa caliente protegida y de la exactitud deseada en la medición. Para evitar pérdidas en los laterales se recomienda un grosor máximo para la probeta de un tercio de la máxima dimensión lineal del área de medición.

Tamaño: El espécimen debe cubrir el área de medición y el área de la guarda; de no ser posible cubrir toda el área de guarda debe llenarse el espacio faltante con material aislante, que posea un valor similar de conductancia térmica

Homogeneidad: Se debe observar durante la prueba homogeneidad en la dirección de flujo de calor, de no ser así, ese material no puede ser evaluado por este método de medición

Acondicionar la probeta

Registrar los datos de la siguiente tabla para cada una de las probetas. Se realizan tres mediciones para minimizar el error.

Probeta: Material Aislante (especificar)

Tabla 2. Formato para registrar caracterización física de la probeta

	Medición 1 (m)	Medición 2 (m)	Medición 3 (m)	Valor promedio (m)
Lado 1				
Lado 2				
Espesor				
Masa				
Volumen				
Densidad				

1. Ubicar la probeta en el aparato de placa caliente protegida, entre la placa caliente y la placa fría.
2. Acoplar los refuerzos laterales de grilón.
3. Energizar el sistema de presión que posee el bastidor.
4. Comprimir los elementos, haciendo uso del sistema de presión, hasta verificar que la totalidad del área superficial de la probeta está en contacto con la placa caliente y la placa fría y que estas son paralelas entre sí.
5. Energizar la bomba sumergible
6. Energizar la caja de control
7. Energizar el osciloscopio

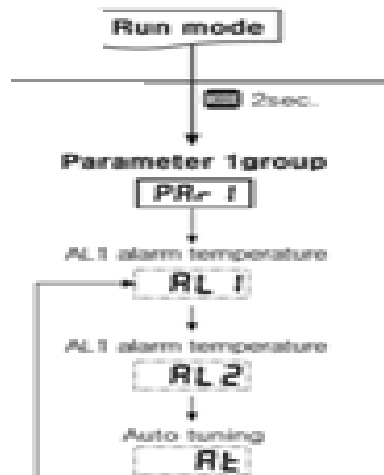
8. Conectar los terminales del osciloscopio a la salida del relé de estado solido
9. Establecer el “set point” para cada pirómetro. Para ello presione las teclas de navegación hasta llegar al valor deseado. El set point aparece en color verde, mientras que la lectura de la termocupla se encuentra en color rojo.

Figura 16. Pirómetro



10. Activar la función “auto-tuning”. Al establecer la función en “ON” se encenderá un led “AT”, lo cual indica que el microprocesador esta autocalibrandose para ejercer control PID.

Figura 17. Diagrama de flujo del controlador



11. Verificar que la temperatura que registra la placa caliente (termocupla 2) esté estable en el “set point”
12. Registrar los siguientes datos. Debe hacerlo apenas concluya el paso anterior y

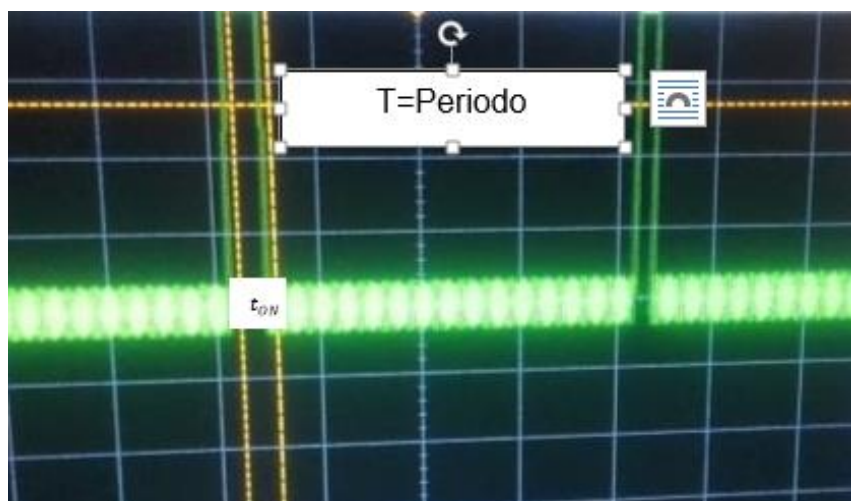
cada 30 minutos, la norma establece que si no existe cambio de las variables durante dos horas, se puede determinar el estado estable.

Tabla 3. Formato para registrar variables del ensayo

Hora (formato 24h)	Temperatura de placa caliente (K)	Temperatura placa fría superior (K)	Temperatura placa fría inferior (K)	ΔT lateral
8:00				
8:30				
9:00				
9:30				
10:00				

13.Registrar el tiempo que tarda el pulso que envía el relé de estado sólido, denominado t_{ON} (ancho del pulso) y el periodo T (tiempo entre pulsos)

Figura 18. Voltaje instantáneo



3.4.9 Cálculos. Se necesita saber la magnitud de la energía suministrada por la resistencia, esa energía se distribuye durante todo el periodo del ciclo, por lo cual obtenemos un flujo de calor promedio durante el ciclo

$$E_s = P_e * t_{ON}$$

$$Q_{prom} = E_s * T$$

Hay que recordar que el flujo de calor está presente en dos direcciones, y por simetría el flujo que atraviesa cada probeta es igual y corresponde a:

$$Q = \frac{Q_{prom}}{2}$$

Ahora se procede a calcular la conductividad para cada una de las probetas, de la siguiente forma:

$$Q = \frac{K * A * (T_{caliente} - T_{fria})}{L}$$

$$K = \frac{Q * L}{(T_{caliente} - T_{fria}) * A}$$

Al finalizar la toma de datos, se debe remover la probeta y examinar los componentes del sistema de medición, tales como las termocuplas, para asegurarse que están en la posición correcta.

También es necesario medir el grosor y el peso de la probeta para determinar que no hayan variado durante la prueba.

3.4.10 Realización de ensayos con el aparato de medición de conductividad térmica en estado estable con el aparato de placa caliente protegida. Se adquieren dos placas de materiales aislantes con conductividad térmica conocida y determinada por el fabricante, para realizar una comparación cuantitativa con los valores obtenidos experimentalmente con el aparato de medición de conductividad térmica en estado estable para materiales aislantes producto de este trabajo de grado.

La primera prueba se realiza con dos placas de drywall, las cuales poseen una conductividad térmica de 0,25 W/mK, suministrada por el fabricante. Para la segunda prueba se tienen probetas de dryboard o fibrocemento, las cuales, según el fabricante poseen una conductividad térmica de 0,289 W/mK. Se sigue el procedimiento descrito anteriormente.

Se verifica que la probeta cumple las condiciones determinadas y es apta para la realización del ensayo. Se procede a registrar los siguientes datos en el formato de la tabla 2.

Tabla 4. Caracterización probetas drywall

	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Valor promedio
Lado probeta 1 (m)	0,3	0,3	0,3	0,3
Lado probeta 2 (m)	0,3	0,3	0,301	0,3
Espesor probeta 1 (m)	0,0129	0,0131	0,0130	0,0130
Espesor probeta 2 (m)	0,0132	0,0132	0,0130	0,0132
Masa probeta 1 (Kg)	0,6336	N/A	N/A	N/A
Masa probeta 2	0,6336	N/A	N/A	N/A

Se realiza el montaje como se muestra en la siguiente figura

Figura 19. Montaje correcto del aparato de placa caliente protegida

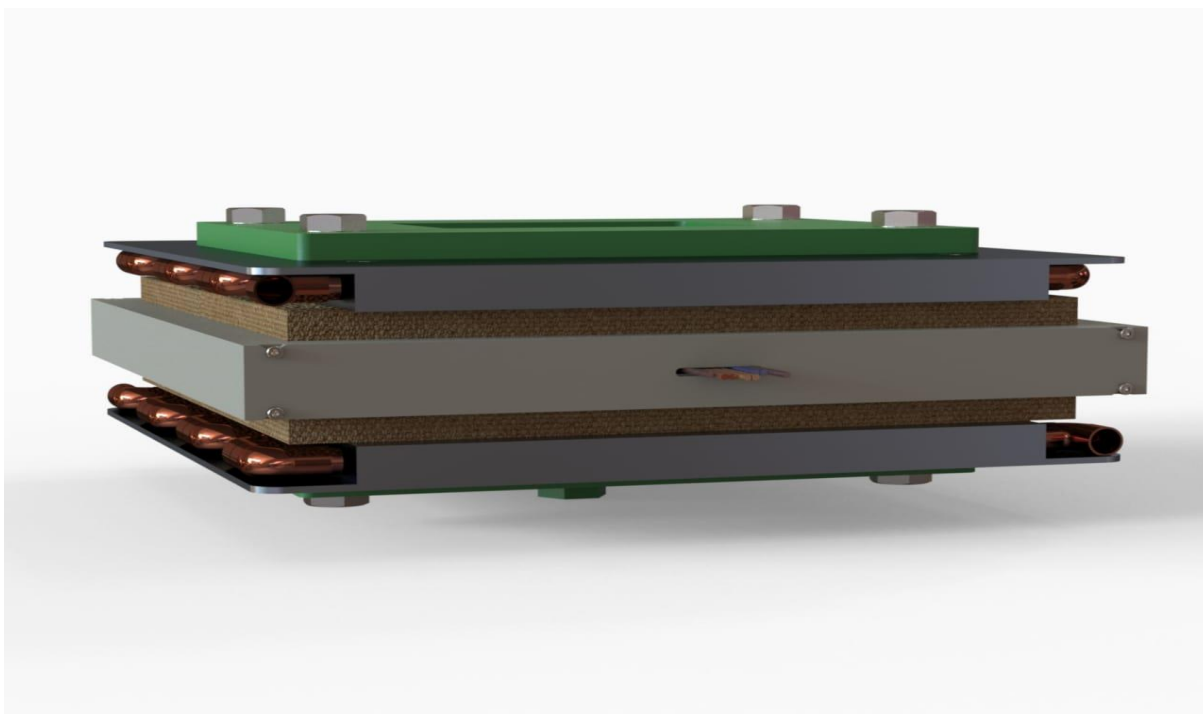


Figura 20. Montaje realizado en el laboratorio



En la figura anterior se observa el montaje del aparato de placa caliente protegida en el laboratorio de procesos. Luego de que el controlador termina el autotuning y se estabiliza la temperatura de la placa caliente, la cual para este ensayo se determinó “set point” de 30 °C, se toman datos cada media hora según el formato de la tabla 3

Tabla 5. Variables de ensayo drywall

Hora (formato 24h)	Temperatura de placa caliente (K)	Temperatura placa fría superior (K)	Temperatura placa fría inferior (K)	ΔT lateral
8:00	30	24	24	1
8:30	30	24	24	1
9:00	30	24	24	1
9:30	30	24	24	1
10:00	30	24	24	1

Ya se puede asegurar que se está en condiciones de estado estable, ahora se toma la lectura en el osciloscopio

$$T = 2 (s)$$

$$t_{on} = 0,006 (s)$$

$$P_e = 200 (W)$$

$$E = P_e * t_{on} = 200 * 0,06 = 12 (J)$$

$$Q_{prom} = 14/2 = 6 (W)$$

$$Q = Q_{prom}/2 = 3 (W)$$

$$K = (Q * L)/(A * dT) = (3 * 0,0132)/(0,0225 * 6) = 0,293 W/mK$$

$$\% Error = 100 * \frac{0,293 - 0,25}{0,25} = 17,2\%$$

Para la prueba con, se obtuvieron los siguientes datos;

Tabla 6. Caracterización probetas dryboard

	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Valor promedio
Lado probeta 1 (m)	0,3	0,3	0,3	0,3
Lado probeta 2 (m)	0,3	0,3	0,301	0,3
Espesor probeta 1 (m)	0,0061	0,0062	0,0062	0,0062
Espesor probeta 2 (m)	0,0062	0,0062	0,0063	0,0062
Masa probeta 1 (Kg)	0,7446	N/A	N/A	N/A
Masa probeta 2	0,7448	N/A	N/A	N/A

Tabla 7. Variables de ensayo dryboard

Hora (formato 24h)	Temperatura de placa caliente (K)	Temperatura placa fría superior (K)	Temperatura placa fría inferior (K)	ΔT lateral
8:00	30	24	24	1
8:30	30	24	24	1
9:00	30	24	24	1
9:30	30	24	24	1
10:00	30	24	24	1

Se obtienen los valores del osciloscopio

$$T = 2 (s)$$

$$t_{on} = 0,130 (s)$$

$$P_e = 200 (W)$$

$$E = P_e * t_{on} = 200 * 0,130 = 26 (J)$$

$$Q_{prom} = \frac{26}{2} = 13 (W)$$

$$Q = \frac{Q_{prom}}{2} = 6,5 (W)$$

$$K = \frac{Q * L}{A * dT} = \frac{6,5 * 0,0062}{0,0225 * 6} = 0,299 \frac{W}{mK}$$

$$\% Error = 100 * \frac{0,299 - 0,28}{0,28} = 6,8\%$$

3.4.11 Factores que Afectan los Resultados. En la norma se identifican los dos errores principales que afectan la operación ideal del aparato de medición de conductividad por placa caliente protegida.

1. Flujo lateral en la probeta: Este error depende principalmente del tamaño de la guarda, la conductividad térmica de la probeta y la temperatura ambiente, si se siguen los requerimientos mínimos para el diseño, este valor va a ser despreciable.
2. Flujo lateral a través de la zona GAP: Este tipo de error se ve influenciado por la diferencia de temperatura entre la placa caliente protegida y la guarda, la geometría del gap, el material de relleno del gap y la emisividad de las superficies de la zona gap.

4. CONCLUSIONES

Los ensayos realizados con los dos materiales aislantes usados en la construcción, presentan un error bajo con respecto al valor teórico de conductividad térmica, por tal motivo se concluye que el diseño del aparato de medición para medir la conductividad térmica en materiales aislantes, construido en este proyecto es satisfactorio.

El tamaño del equipo es adecuado para obtener valor de conductividad reales, éste permite una probeta de material aislante de hasta 0,3 mx 0,3 m.

El control de la resistencia por medio de PID, reduce considerablemente el tiempo del ensayo, debido a que ayuda a la estabilización de la temperatura

BIBLIOGRAFIA

ALVARADO, S., et al. Sistema automatizado para la medición de la conductividad térmica de líquidos mediante el método del alambre caliente. Revista mexicana de física, 2011, vol. 57, no 3, p. 259-265.

Çengel, Y. A. (2004). Transferencia de calor (No. 660.28427 C4).

Diaz Megchun, J., Robles Martinez, F., Macias hernandez, M., & Osorio Miron, A. (2013). Determinación de la conductividad térmica de materiales para biosecado mediante el método de placa caliente. Mexico: VSIR-REDISA.

Diez Campos, J., garcia Breijo, E., Perez Clemente, I., Ros Lis, J. V., Soto Camino, J., & Vivancos Bono, J. L. (2007). Determinación experimental de la conductividad térmica de materiales de la construcción. Valencia: Instituto de Química Molecular Aplicada Universidad Politécnica de Valencia.

Espinel Blanco, E., & Hernández Criado, J. C. (2015). Banco de pruebas para determinar la conductividad térmica como herramienta pedagógica para la enseñanza de transferencia de calor. Ocaña. Colombia: Universidad Francisco de Paula Santander.

Fonseca Diaz, N., & Tibaquirá, J. E. (2008). Método para la estimación experimental de la conductividad térmica de algunos materiales comunes en Colombia para aplicaciones hvac/r. Pereira: Red de revistas científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal.

Giraldo Brochero, R. A. (2016). Diseño y construcción de un banco de pruebas para medir la velocidad de combustión de diferentes materiales poliméricos bajo la norma

fmvss 302 . Pereira. Colombia: Universidad tecnológica de pereira. Facultad de ingeniería mecánica.

Gome Tena, M. P. (2014). Determinación de la conductividad térmica en la industria cerámica por el método modificado de la fuente plana transitoria. Castellón, España: Instituto de Tecnología Cerámica (ITC). Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE)Universitat Jaume I.

Gonzalez Madariaga, F. j. (2008). Mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola para su uso en la construcción. Mexico: Informes de la Construcción, Vol 60, No 509.

Holman, J. P., de Morentín, P. D. A. M., Mena, T. D. J. L., Grande, I. P., Pedro Pérez del Notario Martínez de Maraño, & Sánchez, A. S. (1980). Transferencia de calor.

Jakob, M. (1964). Heat Transfer V.I.

Kern, D. Q. (2008). Procesos de transferencia de calor (No. TJ263 K45).

Lira Cortes, L. (2009). Necesidades de medición de conductividad térmica para el cumplimiento de normas de eficiencia energética en edificaciones. Laboratorio de Propiedades Termofísicas División Termometría, Área Eléctrica Centro Nacional de Metrología.

LIRA-CORTÉS, L.; GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, O. J.; MÉNDEZ-LANGO, E. Medición de la conductividad térmica de algunos materiales utilizados en edificaciones. En Simposio de Metrología. 2008.

Maglic, K. D., Cezairliyan, A., & Peletsky, V. E. (1984). Compendium of thermophysical property measurement methods: Vol. 1, survey of measurement

techniques.

Martina, P. E., Aeberhard, A. F., Aeberhard, M. R., & Corace, J. J. (2003). Fabricación de un equipo de placa caliente para determinación de la conductividad térmica de materiales. Uso en investigación y docencia. MATERIALES, 10(30), 15.

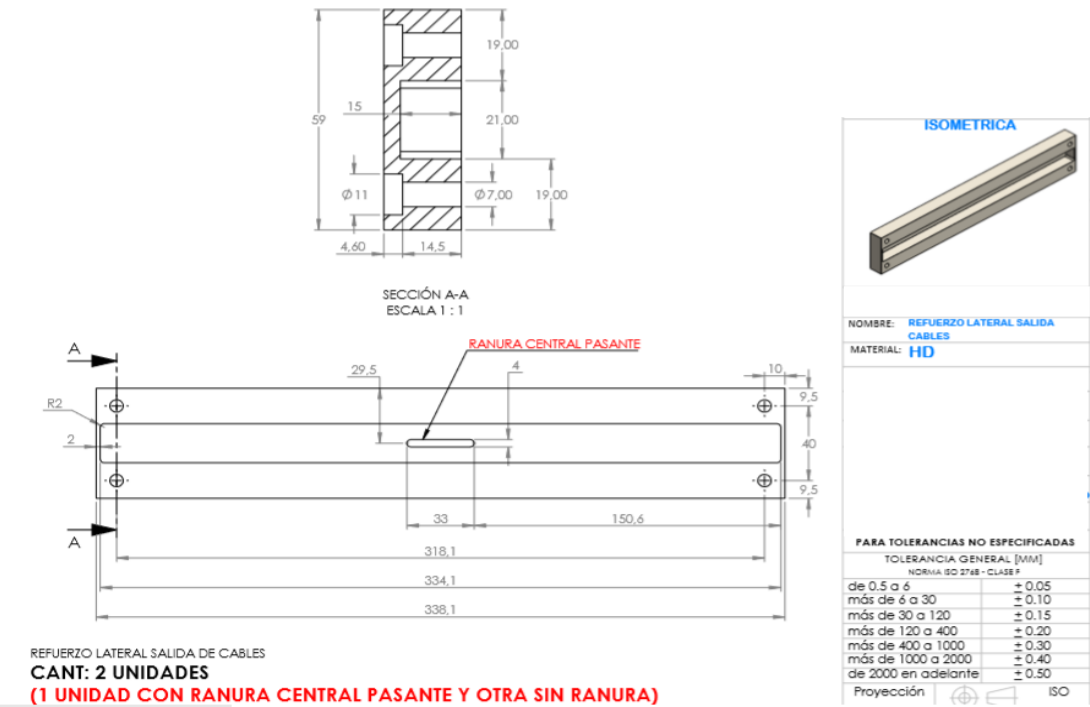
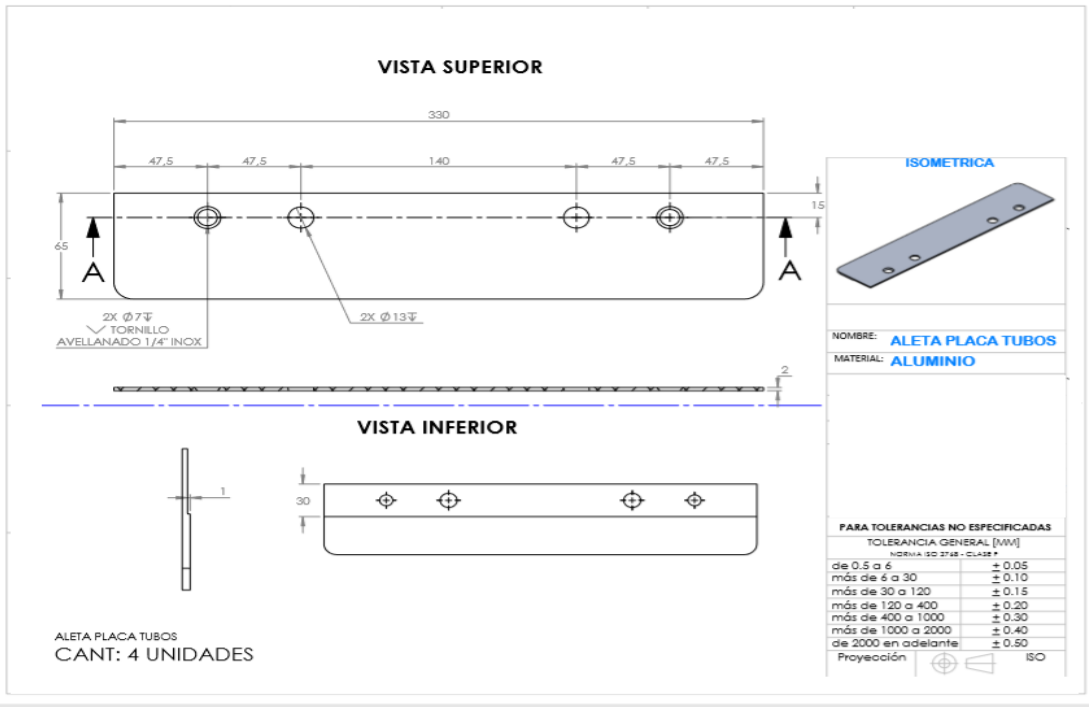
Mosquera Arancibia, P. (2013). Medida de la conductividad térmica con el metodo de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio, para su aplicacion en los cerramientos de adoves y bloques de tierra comprimida. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid. Escuela tecnica superior de arquitectura.

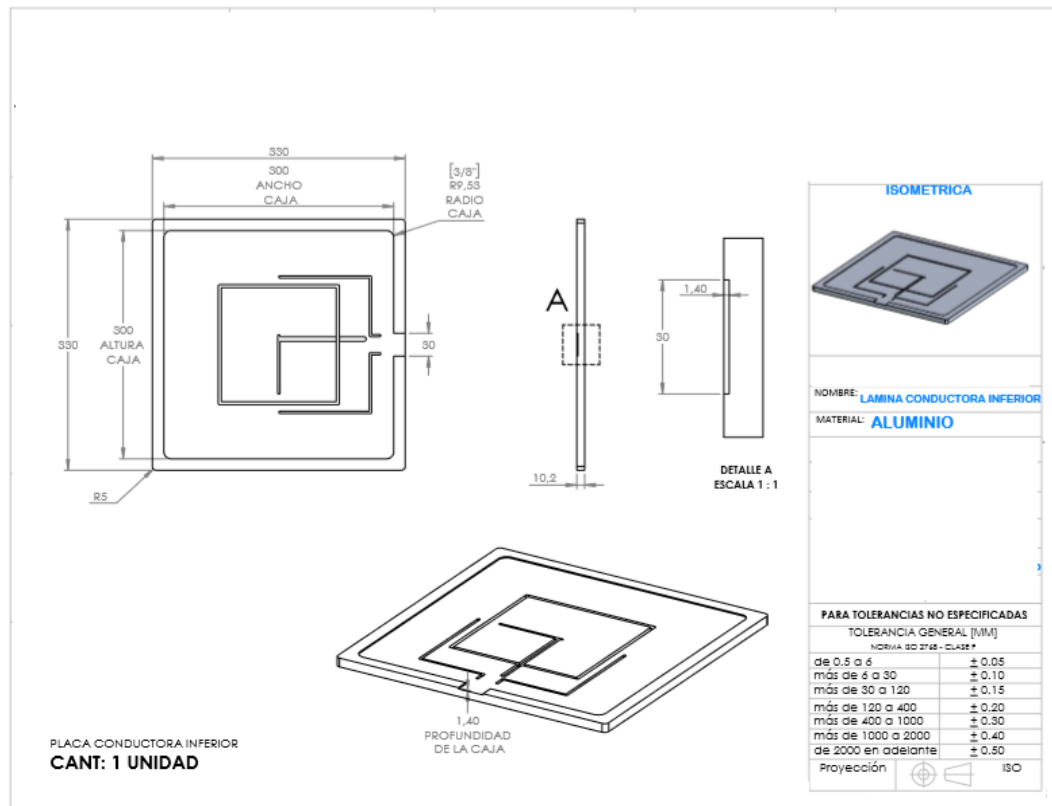
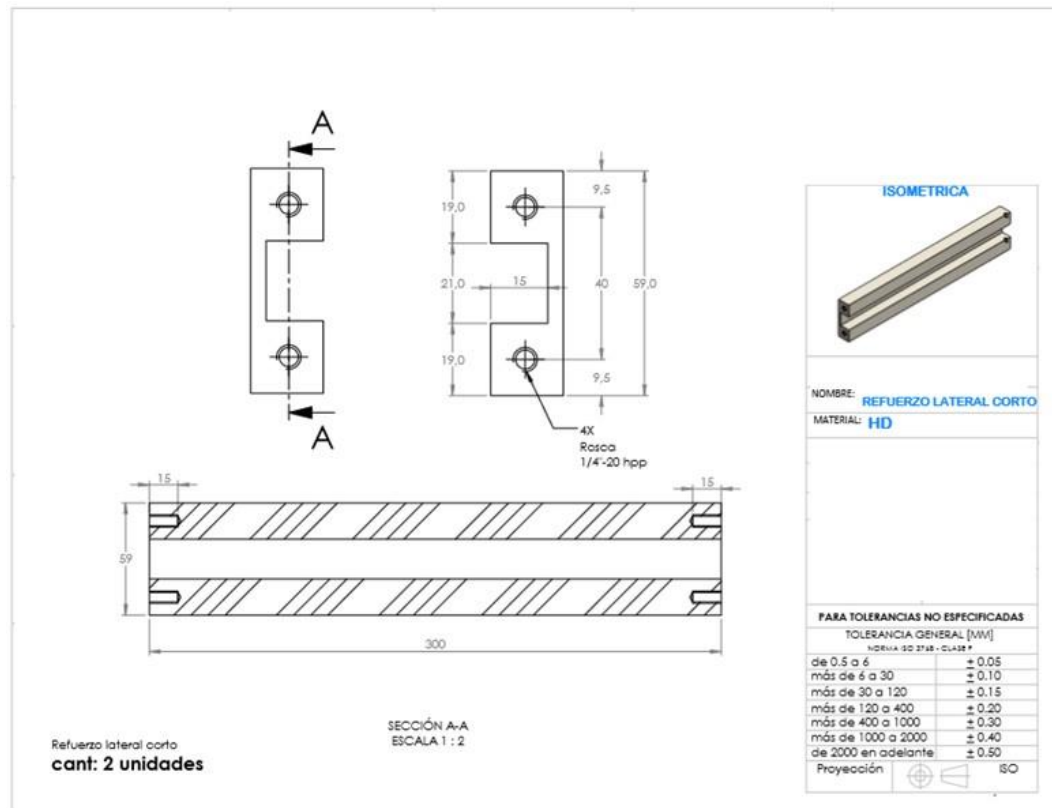
Shirtliffe, C. J., & Tye, R. P. (1985). Guarded Hot Plate and Heat-Flow Meter Technology. ASTM STP, 879.

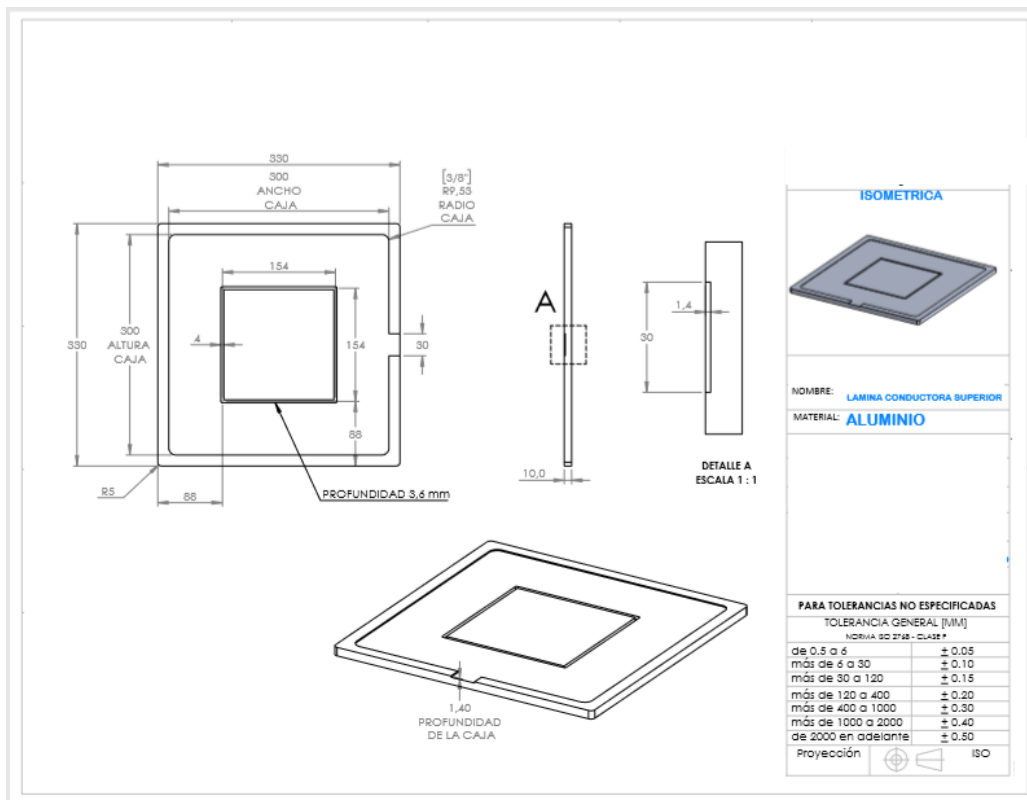
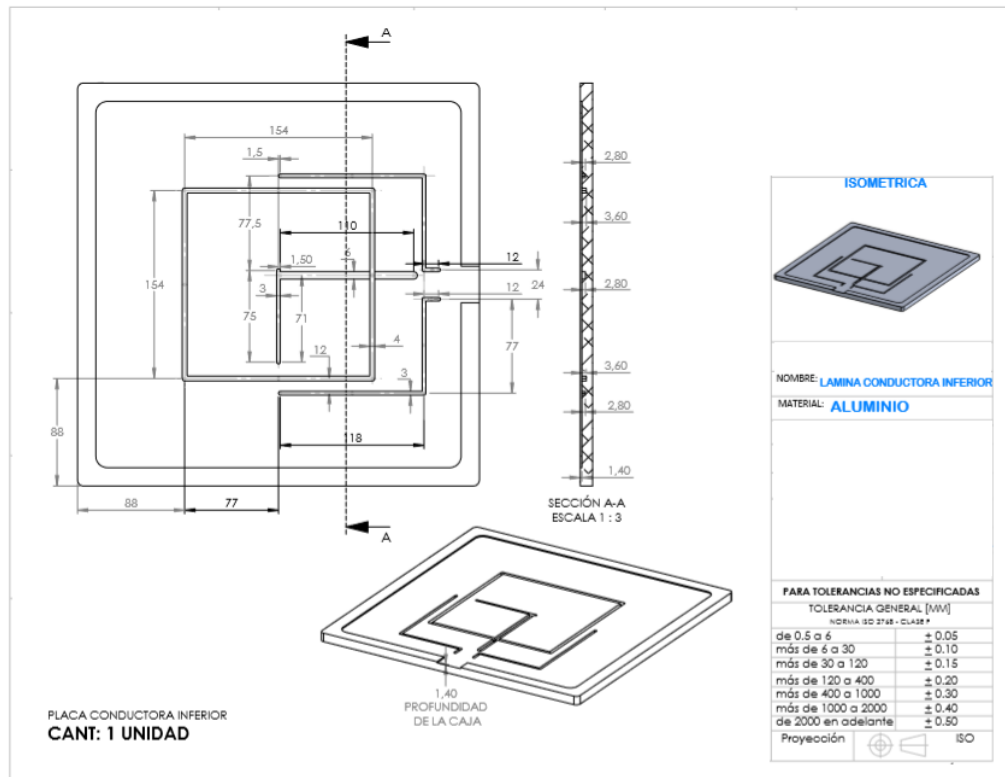
Velasco Roldán, L., Goyos Pérez, L., Delgado García, R., & Freire Amores, L. (2016). Instalación para medición de conductividad térmica en composites basados en residuos de biomasa. Ecuador: Enfoque UTE, V.7-N.2,

ANEXOS

Anexo A. Planos







Anexo B. Resultados de Calibración de Termocuplas

Termocupla 1

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 1		ERROR
1	23,46	24	-0,023	2,30179028
2	23,45	23,9	-0,0192	0,01918977
3	23,42	23,8	-0,0162	0,01622545
4	23,4	23,6	-0,0085	0,00854701
5	23,4	25,5	-0,0897	0,08974359
6	23,34	23,4	-0,0026	0,00257069
7	23,29	23,4	-0,0047	0,00472306
8	23,29	24	-0,0305	0,03048519
9	23,27	24,1	-0,0357	0,03566824
10	23,29	23,99	-0,0301	0,03005582
PROMEDIO	23,361	23,969		0,25389991

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 1		ERROR
1	90,1	94,2	-0,046	4,55049945
2	90,06	95,1	-0,056	0,05596269
3	90,01	98,1	-0,09	0,0898789
4	90,01	98,2	-0,091	0,09098989
5	90	98,6	-0,096	0,09555556
6	90	98,8	-0,098	0,09777778
7	90,01	98,8	-0,098	0,09765582
8	90,01	98,7	-0,097	0,09654483
9	90,01	98,7	-0,097	0,09654483
10	90	98,7	-0,097	0,09666667
PROMEDIO	90,021	97,79		0,53680764

Termocupla 2

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 2		ERROR
1	22,91	25,5	-0,11305107	11,3051069
2	22,96	25,2	-0,09756098	9,75609756
3	22,97	25,1	-0,09272965	9,27296474
4	22,99	24,8	-0,07872988	7,87298826
5	22,99	24,3	-0,0569813	5,69812962
6	22,99	24,2	-0,05263158	5,26315789
7	23	24,1	-0,04782609	4,7826087
8	23	23,8	-0,03478261	3,47826087
9	23	23,8	-0,03478261	3,47826087
10	23	23,9	-0,03913043	3,91304348
PROMEDIO	22,981	24,47		6,48206189

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 2		ERROR
1	49,77	43,2	0,13200723	13,2007233
2	49,81	44,2	0,11262799	11,2627986
3	49,91	45,3	0,09236626	9,23662593
4	49,95	46,4	0,07107107	7,10710711
5	50	48,7	0,026	2,6
6	50	48,9	0,022	2,2
7	50	49	0,02	2
8	50	49,1	0,018	1,8
9	50	49,1	0,018	1,8
10	50	49,1	0,018	1,8
PROMEDIO	49,944	47,3		5,3007255

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 2		ERROR (%)
1	90,05	85,01	0,05596891	5,59689062
2	90,04	85,9	0,04597956	4,59795646
3	90,03	87,2	0,03143397	3,14339665
4	90,01	88,5	0,01677591	1,67759138
5	90	88,9	0,01222222	1,22222222
6	90,01	89,1	0,01010999	1,01099878
7	90,01	89,2	0,008999	0,89990001
8	90,01	89,3	0,00788801	0,78880124
9	90	89,5	0,00555556	0,55555556
10	90	89,5	0,00555556	0,55555556
PROMEDIO	90,016	88,211		2,00488685

Termocupla 3

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	TC N°3		ERROR (%)
1	21,99	23,8	-0,08231014	8,2310141
2	21,99	23,7	-0,07776262	7,77626194
3	21,99	23,6	-0,0732151	7,32150978
4	22	23,1	-0,05	5
5	22	22,8	-0,03636364	3,63636364
6	22	22,8	-0,03636364	3,63636364
7	22,01	22,7	-0,03134939	3,13493866
8	22,01	22,7	-0,03134939	3,13493866
9	22,01	22,7	-0,03134939	3,13493866
10	22,01	22,6	-0,026806	2,68059973
PROMEDIO	22,001	23,05		4,76869288

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	TC N°3		ERROR(%)
1	50	48,8	0,024	2,4
2	50	48,8	0,024	2,4
3	50	48,9	0,022	2,2
4	50	48,9	0,022	2,2
5	50	48,9	0,022	2,2
6	50	49	0,02	2
7	50	49,1	0,018	1,8
8	50	49,1	0,018	1,8
9	50	49,1	0,018	1,8
10	50	49,1	0,018	1,8
PROMEDIO	50	48,97		2,06

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	TC N°3		ERROR(%)
1	90	82	0,08888889	8,88888889
2	90,05	83,1	0,07717934	7,71793448
3	90,05	83,9	0,06829539	6,82953914
4	90,05	84,6	0,06052193	6,05219323
5	90,04	87,7	0,02598845	2,59884496
6	90,03	88	0,02254804	2,25480395
7	90,03	88	0,02254804	2,25480395
8	90,01	88,2	0,02010888	2,01088768
9	90	88,2	0,02	2
10	90	88,3	0,01888889	1,88888889
PROMEDIO	90,026	86,2		4,24967852

Termocupla 4

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 4		ERROR(%)
1	23	27,2	-0,1826087	18,2608696
2	21,28	26,5	-0,24530075	24,5300752
3	22	26,2	-0,19090909	19,0909091
4	22,25	25,5	-0,14606742	14,6067416
5	22,64	25,2	-0,1130742	11,3074205
6	22,84	24,9	-0,09019264	9,01926445
7	22,96	24,5	-0,06707317	6,70731707
8	22,99	24,4	-0,06133101	6,13310135
9	23	24,3	-0,05652174	5,65217391
10	23,1	24,1	-0,04329004	4,32900433
PROMEDIO	22,606	25,28		11,9636877

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 4		ERROR(%)
1	49,96	47,2	0,0552442	5,52441954
2	49,96	47,5	0,04923939	4,92393915
3	49,97	49,2	0,01540925	1,54092455
4	50	49,2	0,016	1,6

5	50	49,2	0,016	1,6
6	50	49,2	0,016	1,6
7	50	49,2	0,016	1,6
8	50	49,2	0,016	1,6
9	50	49,2	0,016	1,6
10	50	49,2	0,016	1,6
PROMEDIO	49,989	48,83		2,31892832

Termocupla 5

PATRÓN	T/C# 5		ERROR(%)
22,99	23,1	-0,00478469	0,4784689
22,99	23	-0,00043497	0,04349717
23	22,9	0,00434783	0,43478261
22,99	22,9	0,00391475	0,39147455
23	23	0	0
23	22,9	0,00434783	0,43478261
23	22,9	0,00434783	0,43478261
23	22,9	0,00434783	0,43478261
23	22,9	0,00434783	0,43478261
23,1	22,9	0,00865801	0,86580087
23,007	22,94		0,39531545

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 5		ERROR(%)
1	49,7	51,8	-0,04225352	4,22535211
2	49,83	53,3	-0,06963677	6,9636765
3	49,96	55,9	-0,11889512	11,8895116
4	49,97	56,3	-0,12667601	12,6676006
5	50	57,2	-0,144	14,4
6	50	57,5	-0,15	15
7	50	57,5	-0,15	15
8	50	57,5	-0,15	15
9	50,1	57,4	-0,14570858	14,5708583
10	50,1	57,4	-0,14570858	14,5708583
PROMEDIO	49,966	56,18		12,4287857

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 5		ERROR(%)
1	90,27	101,5	-0,12440456	12,4404564
2	90,14	103,5	-0,14821389	14,821389
3	90,07	106,3	-0,18019318	18,0193183
4	90,05	107,1	-0,18933926	18,9339256
5	90,04	107,8	-0,19724567	19,7245669
6	90,02	108,9	-0,20973117	20,9731171
7	90,01	109	-0,21097656	21,0976558
8	90,01	109,1	-0,21208755	21,2087546
9	90	108,9	-0,21	21

10	90	108,9	-0,21	21
PROMEDIO	90,061	107,1		18,9219184

Termocupla 6

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 6		ERROR(%)
1	22,89	22,8	0,00393185	0,3931848
2	22,91	22,8	0,0048014	0,48013968
3	22,93	22,9	0,00130833	0,13083297
4	22,95	22,9	0,00217865	0,21786492
5	22,97	23	-0,00130605	0,13060514
6	22,98	23	-0,00087032	0,0870322
7	22,99	23	-0,00043497	0,04349717
8	22,99	23	-0,00043497	0,04349717
9	22,99	23	-0,00043497	0,04349717
10	23	23	0	0
PROMEDIO	22,96	22,94		0,15701512
NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 6		ERROR(%)
1	49,99	56,3	-0,12622525	12,6225245
2	49,99	56,4	-0,12822565	12,8225645
3	49,99	56,5	-0,13022605	13,0226045
4	50	56,5	-0,13	13
5	50	56,6	-0,132	13,2
6	50	56,6	-0,132	13,2
7	50	56,6	-0,132	13,2
8	50	56,6	-0,132	13,2
9	50	56,6	-0,132	13,2
10	50	56,7	-0,134	13,4
PROMEDIO	49,997	56,54		13,0867694

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 6		ERROR(%)
1	90,14	107,4	-0,19147992	19,147992
2	90	107,4	-0,19333333	19,3333333
3	90	107,4	-0,19333333	19,3333333
4	90	107,4	-0,19333333	19,3333333
5	90	107,4	-0,19333333	19,3333333
6	90	107,4	-0,19333333	19,3333333
7	90	107,4	-0,19333333	19,3333333
8	90	107,3	-0,19222222	19,2222222
9	90	107,3	-0,19222222	19,2222222
10	90	107,3	-0,19222222	19,2222222
PROMEDIO	90,014	107,37		19,2814659

Termocupla 7

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 7		ERROR(%)
1	22,6	56,3	-1,49115044	149,115044
2	22,7	56,4	-1,4845815	148,45815
3	22,78	56,5	-1,48024583	148,024583
4	22,82	56,5	-1,47589833	147,589833
5	22,85	56,6	-1,47702407	147,702407
6	22,89	56,6	-1,4726955	147,26955
7	22,91	56,6	-1,47053688	147,053688
8	22,93	56,6	-1,46838203	146,838203
9	22,94	56,6	-1,46730602	146,730602
10	22,96	56,7	-1,4695122	146,95122
PROMEDIO	22,838	56,54		147,573328

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 7		ERROR(%)
1	49,67	43,9	0,1161667	11,61667
2	50,38	46,9	0,06907503	6,90750298
3	50,77	48,6	0,04274178	4,27417766
4	50,99	49,9	0,02137674	2,13767405
5	51,27	51,5	-0,00448605	0,44860542
6	51,28	53,9	-0,05109204	5,10920437
7	50,34	54,4	-0,08065157	8,06515693
8	50,24	55,6	-0,1066879	10,6687898
9	50,19	56	-0,11576011	11,5760112
10	50,1	56	-0,11776447	11,7764471
PROMEDIO	50,523	51,67		7,25802395
NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 7		ERROR(%)
1	90,37	96,7	-0,07004537	7,0045369
2	90,31	98,3	-0,08847304	8,84730373
3	90,22	99,8	-0,10618488	10,6184881
4	90,17	99,8	-0,10679827	10,679827
5	90,13	99,9	-0,10839898	10,8398979
6	90,1	100,9	-0,11986681	11,9866815
7	90,09	100,9	-0,11999112	11,999112
8	90,07	101,9	-0,13134229	13,1342289
9	90,04	102,5	-0,13838294	13,8382941
10	90,04	103,3	-0,14726788	14,7267881
PROMEDIO	90,154	100,4		11,3675158

Termocupla 8

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 8		ERROR(%)
1	22,98	23,2	-0,00957354	0,95735422
2	22,98	23,2	-0,00957354	0,95735422
3	22,99	23,2	-0,00913441	0,91344063
4	22,99	23,3	-0,01348412	1,34841235

5	22,99	23,3	-0,01348412	1,34841235
6	22,99	23,3	-0,01348412	1,34841235
7	23	23,3	-0,01304348	1,30434783
8	22,99	23,4	-0,01783384	1,78338408
9	22,99	23,4	-0,01783384	1,78338408
10	22,99	23,4	-0,01783384	1,78338408
PROMEDIO	22,989	23,3		1,35278862

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 8		ERROR(%)
1	49,7	23,2	0,5331992	53,3199195
2	49,78	23,2	0,53394938	53,3949377
3	49,83	23,2	0,53441702	53,4417018
4	49,88	23,3	0,53287891	53,2878909
5	49,9	23,3	0,53306613	53,3066132
6	49,92	23,3	0,53325321	53,3253205
7	49,94	23,3	0,53344013	53,3440128
8	49,95	23,4	0,53153153	53,1531532
9	49,96	23,4	0,5316253	53,16253
10	49,96	23,4	0,5316253	53,16253
PROMEDIO	49,882	23,3		53,289861

NÚMERO DE MUESTRA	PATRÓN	T/C# 8		ERROR(%)
1	90,01	106,2	-0,1798689	17,9868903
2	90,01	106,2	-0,1798689	17,9868903
3	90,01	106,2	-0,1798689	17,9868903
4	90,01	106,3	-0,18097989	18,0979891
5	90	106,3	-0,18111111	18,1111111
6	90	106,3	-0,18111111	18,1111111
7	90	106,4	-0,18222222	18,2222222
8	90	106,4	-0,18222222	18,2222222
9	90	106,4	-0,18222222	18,2222222
10	90	106,4	-0,18222222	18,2222222
PROMEDIO	90,004	106,31		18,1169771

Anexo C. Fichas Técnicas de Materiales Aislantes de Prueba



FICHA TÉCNICA PLACAS DE FIBROCEMENTO

dryboard



La placa **Dryboard**, tiene como componentes principales un tipo de cemento especial que garantiza que las reacciones en el proceso de autoclavado: vapor saturado y altas temperaturas, den como resultado una matriz cementicia donde los otros componentes, tales como la fibra celulosa, sílice, agua y óxidos de aluminio, se incorporen dando un producto con una excelente estabilidad dimensional y alta resistencia



CARACTERÍSTICAS

- Resistente: Buen comportamiento ante la aplicación de cargas. Resistente al impacto.
- Estabilidad dimensional: Bajos cambios dimensionales por la acción de la humedad y la temperatura, la cual le proporciona un excelente comportamiento a los cambios climáticos y un buen desempeño una vez instaladas.
- Durabilidad: mantiene constantes sus propiedades en el tiempo. Resistente a hongos, insectos y roedores.
- Resistente a la humedad: No se pudre ni se oxida.
- Resistente al fuego: sus componentes retrasan la propagación del fuego y no genera humo dando tiempo a la evacuación de los recintos.
- Livianas: Bajo peso por metro cuadrado, lo cual contribuye a la reducción del costo de la cimentación.
- Espesores homogéneos.
- Permite la construcción de sistemas que requieren aislamiento térmico y/o acústico.
- Medidas estándar que disminuyen desperdicios.

PROPIEDADES			
PROPIEDAD	NORMA	UNIDAD	VALOR*
Longitud y ancho	NTC 4373	m	Nominal ± 5 mm
Espesor	NTC 4373	mm	Nominal $\pm 0,5$ mm
PROPIEDADES MECANICAS			
Resistencia a la Flexión (MOR):			
Saturado Longitudinal	NTC 4373		11
Saturado Transversal	(Categoría 3)		6
Seco al Ambiente Longitudinal	ASTM C-1185	MPa	15,5
Seco al Ambiente Transversal			9
Módulo de Elasticidad (E):			
Saturado Longitudinal	ASTM C-1185	N/mm ²	1000
Saturado Transversal			3500
Seco al Ambiente Longitudinal			1800
Seco al Ambiente Transversal			3500
Resistencia al Impacto Charpy			
Plana 8mm	ISO 179- 1FA	Kj/m ²	3,69
Longitudinal			2,33
Transversal			

Plana 10mm Longitudinal Transversal			3,71 2,64
Resistencia al esfuerzo cortante por punzonamiento	ASTM D-732	N/mm ²	17
Resistencia a la tracción del tornillo	ASTM D-1037	N	1600
PROPIEDADES FISICAS			
Contenido de humedad	ASTM C-1185	%	8
Densidad	ASTM C-1185	g/cm ³	1,25
Absorción	ASTM C-1185	%	33
Conductividad térmica	ASTM C-177	W/(m-K)	0,289
Cambios dimensionales. Seco al horno (100°C/24 h). Saturado (Agua 24 h).		mm/m	
Ambiente-seco horno			1,6
Saturado- seco horno			2,2
No propaga la llama			

*Valores Promedios

Según al Norma NTC 4373 la placa Dryboard es un Material tipo B.

Fecha Elaboración	Fecha Revisión	Código	Versión
16 - 02 -2009	01-05-2014	TCCFP-03	Versión: 7

DESCRIPCIÓN

Compuesta por alma de yeso aditivado, mezclado con fibra de vidrio y cara vista revestida con lámina de cartón Gris.

La placa KNAUF IMPACT con un peso superior al de la placa Standard, está dotada de un núcleo de mayor densidad con mayor dureza superficial.

Cumple la función de las placas RF en cuanto a resistencia al fuego para el mismo espesor.

CAMPO DE APLICACIÓN

La placa KNAUF IMPACT puede ser utilizada en cualquier espacio interior libre de humedades donde se requiere una mayor resistencia a los golpes en los paramentos del recinto. Recomendada para colegios, circulaciones, salas de espera, oficinas con gran cantidad de personal, depósitos, cualquier zona expuesta a impactos y alto tránsito.

Especialmente recomendada para lograr mayor aislación acústica que las placas ST en el mismo espesor.

USOS

- Tabiques con estructura metálica
- Revestimientos directos y autoportantes
- Revestimientos semidirectos



DATOS TÉCNICOS

CUMPLE NORMA

IRAM 11.643
UNE EN 520
Tipo DI
D, densidad controlada
I, dureza superficial mejorada

DIMENSIONES (MM)

Longitud: 2400
Ancho: 1200
Espesores: 12.5

COLOR

Gris

TIPOS DE BORDES

Longitudinal: Rebajado (REB)
revestido con cartón
Transversal: Cuadrado (CUA)
sin cartón

CLASIFICACIÓN AL FUEGO

Re2 - Muy Baja Propagación de llama
(IRAM 11.910)

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA A

UNE EN ISO 10456 0.25 W/mK

DENSIDAD:

≥ 950 Kg/m³

PESO:

11,10 Kg/m²

DUREZA SUPERFICIAL

Ensayo a choque de cuerpo duro:
Diámetro ≤ 15 mm

COMPORTAMIENTO FRENTE AL AGUA

Esta placa no tiene tratamiento hidrófugo.