

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS



TESIS

**Estudio de la conductividad térmica de
compuestos estructurales tipo sándwich para su
uso en construcciones ubicadas en zonas
expuestas a heladas**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FÍSICO

ELABORADO POR:

MARCO ANTONIO MENDOZA REYES

ASESORA:

DRA. MÓNICA MARCELA GÓMEZ LEÓN

LIMA – PERÚ

2021

DEDICATORIA:

Esta tesis va dedicada a mi madre Nelly, por todo su apoyo y fe en mí, a mi hermano German por enseñarme la dedicación a los estudios, a mi papá y a mis menores hermanos por ser fuente de motivación en mi vida, y a toda mi familia quienes siempre me dieron la confianza para seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Dra. Mónica Marcela Gómez León por la oportunidad brindada para el desarrollo de esta tesis, por su asesoría, su apoyo, y motivación, así también por todo lo enseñado en mis últimos años de estudio.

Agradecer también a los profesores Dr. Manfred Horn y el Dr. José Solís, por su buena disposición y consejos en todo el desarrollo de la investigación.

Agradezco al Ing. Oswaldo Rojas por su gentil apoyo para la disposición del laboratorio de Ingeniería Física en la Facultad de Ciencias.

A mis profesores el Ing. Henry Huanca, Dr. José Díaz y al Dr. Abel Gutarra de la Facultad de Ciencias de los cuales aprendí mucho en mis últimos años de estudio.

A mis Amigos y compañeros Joshua Piñas, Frank Espinoza quienes me han compartido su experiencia y el cual me ha servido como base para el desarrollo de esta investigación.

A mis tías Licaria Reyes y Paulina Reyes quienes siempre me han apoyado y hecho sentir un buen hijo y sobrino.

A mis tíos Natalia Mendoza y Rigoberto Romaní por su apoyo y buena fe en los inicios de mis estudios.

Finalmente, agradecer a la Universidad Nacional de Ingeniería, mi alma mater, del cual siempre he de sentir un profundo cariño por haberme brindado las herramientas necesarias para lograr mi meta de ser un profesional.

El desarrollo de esta tesis fue posible debido al financiamiento recibido por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT) del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) por medio del convenio de financiación N° 024-2016-FONDECYT, y al financiamiento recibido por los Proyectos Formativa de la Facultad de Ciencias y del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería (VRI-UNI) recibidos durante los años 2018, 2019 y 2020.

RESUMEN

Los compuestos tipo sándwich son compuestos estructurales que se vienen empleando en programas como el Sumaq Wasi, para la construcción de viviendas bioclimáticas en beneficio de los pobladores alto andinos que año tras año son afectados por las heladas. Sin embargo, estas construcciones carecen de un sustento técnico al no contemplar las propiedades físicas, como las propiedades térmicas que respalden su construcción bajo condiciones tan adversas como las heladas. El presente trabajo muestra el estudio realizado sobre los valores de conductividad térmica de compuestos estructurales tipo sándwich elaborados a partir de materiales usados convencionalmente en construcción, donde los resultados obtenidos pueden ser empleados como medidas referenciales que respalden las decisiones técnicas consideradas para las construcciones de estas viviendas.

Los compuestos tipo sándwich constan de dos capas externas y un núcleo, los materiales seleccionados para las capas fueron el ladrillo pastelero (LP) y el drywall (DW) debido a su consistencia, y los materiales seleccionados para el núcleo fueron la lana de vidrio (PLV), la lana poliéster (ECOTERM) y el poliestireno expandido (PLEX), debido a sus propiedades térmicas aislantes.

La elaboración de estos compuestos consistió en dar forma a los materiales de modo que su estructura tenga la forma de un paralelepípedo con dimensiones 15 cm x 15 cm de basa cuadrada y un espesor no mayor a 5 cm.

En el estudio también se realizan pruebas independientes a cada uno de los materiales usados en la elaboración de los compuestos tipo sándwich. Siendo así, un total de 11 muestras medidas a condiciones de temperatura entre -2 °C a 2 °C en una de sus caras y entre 13 °C a 17 °C en la cara opuesta. Dichas muestras fueron, tres muestras de un solo material (DW, PLV, ECOTERM, PLEX y LP), y seis muestras estructurales tipo sándwich (DW-ECOTERM-DW, DW-PLV-DW, DW-PLEX-DW, LP-ECOTERM-LP, LP-PLV-LP y LP-PLEX-LP)

De acuerdo a los resultados obtenidos los valores de las conductividades térmicas de las muestras de LP, DW, PLV, PLEX y Ecoterm fueron $0,164 \pm 0,019 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,140 \pm 0,016 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0386 \pm 0,0042 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0502 \pm 0,0054 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ y $0,0513 \pm 0,0058 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, respectivamente.

Respecto a los compuestos tipo LP-PLEX-LP, LP-Ecoterm-LP, LP-PLV-LP, DW-Ecoterm-DW, DW-PLV-DW, y DW-PLEX-DW los valores obtenidos, para la conductividad térmica, fueron $0,0891 \pm 0,0102 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0709 \pm 0,0077 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0602 \pm 0,0069 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0833 \pm 0,0094 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0675 \pm 0,0076 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ y $0,0953 \pm 0,0107 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, respectivamente.

Finalmente, se realizaron simulaciones de los ensayos de conductividad térmica de los compuestos tipo sándwich empleando el *software* COMSOL Multiphysics, a fin de

comparar las temperaturas en la zona de medición obtenida experimentalmente con el de la simulación, encontrando un error por debajo del 8 % de entre estos valores.

Palabras Clave: Compuesto estructural, compuesto tipo sándwich, zonas Altoandinas, heladas, zona de medición, conductividad térmica.

ABSTRACT

Sandwich compounds are structural compounds that have been used in programs such as Sumaq Wasi, for the construction of bioclimatic houses for the benefit of high Andean settlers who year after year are affected by frosts. However, these constructions lack technical support as they do not consider the physical properties, such as the thermal properties that support their construction under conditions as adverse as frost. This work shows the study carried out on the thermal conductivity values of sandwich-type structural compounds made from materials conventionally used in construction, where the results obtained can be used as referential measures that support the technical decisions considered for the constructions of these houses.

Sandwich composites consist of two outer layers and a core, the materials selected for the layers were pastry brick (LP) and drywall (DW) due to their consistency, and the materials selected for the core were glass wool (PLV), polyester wool (ECOTERM) and expanded polystyrene (PLEX), due to their thermal insulating properties.

The elaboration of these compounds consisted of shaping the materials so that their structure has the shape of a parallelepiped with dimensions 15 cm x 15 cm of square base and a thickness no greater than 5 cm.

During the study was also performed an independent measurement of each of the materials used in the preparation of sandwich-type compounds. Thus, a total of 11 samples measured at temperature conditions close to 0 °C on one side and 15 °C on the opposite side. Said samples were three samples of a single material (DW, PLV, ECOTERM, PLEX and LP), and six structural sandwich samples (DW-ECOTERM-DW, DW-PLV-DW, DW-PLEX-DW, LP ECOTERM- LP, LP-PLV-LP and LP-PLEX-LP).

According to obtained results, the values of the thermal conductivities of the LP, DW, PLV, PLEX and Ecoterm samples were $0,164 \pm 0,019 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,140 \pm 0,016 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0386 \pm 0,0042 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0502 \pm 0,0054 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ and $0,0513 \pm 0,0058 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, respectively.

Regarding the compounds type LP-PLEX-LP, LP-Ecoterm-LP, LP-PLV LP, DW-Ecoterm-DW, DW-PLV-DW, and DW-PLEX-DW, the thermal conductivity values were $0,0891 \pm 0,0102 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0709 \pm 0,0077 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0602 \pm 0,0069 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0833 \pm 0,0094 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0675 \pm 0,0076 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ and $0,0953 \pm 0,0107 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, respectively.

Finally, simulations of the thermal conductivity analysis of the sandwich-type compounds were carried out using the COMSOL Multiphysics software. It was found out that the measuring zone temperature differed in 8% from the one obtained in the simulation.

Key Words: Structural compound, Sandwich compound, frost, High Andean areas, Measurement area, Thermal conductivity.

PRÓLOGO

El estudio realizado en el presente trabajo parte del interés de aportar información sobre las propiedades térmicas de los materiales usados convencionalmente en construcción, y que, en forma de compuesto estructural, pueden ser considerados para la construcción de viviendas en zonas Altoandinas.

Para este trabajo se consideró el estudio de la conductividad térmica de compuestos tipo sándwich bajo condiciones de temperatura entre $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, que se asemejan en lo posible a las condiciones climáticas de las zonas Altoandinas. De ese modo se tienen resultados que van ayudar a tomar mejores decisiones en relación a costos y beneficios que podría traer el empleo de estos materiales compuestos elaborados.

En la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), se vienen desarrollando, desde hace cinco años, estudios de las propiedades térmicas de materiales empleados en las envolventes de construcciones ubicadas en zonas Altoandinas, tales como las tesis de título profesional desarrolladas por J. Piñas¹, F. Espinoza² y M. Cuenca³, así como la tesis de maestría de I. Chino⁴.

Parte de este trabajo ha sido presentado en el XXVII Simposio Peruano de Energía Solar (desarrollado virtualmente en noviembre del 2020, por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa), con el trabajo titulado: Conductividad térmica de compuestos tipo sándwich usados en la industria de la construcción.

Además, durante el desarrollo de la presente tesis se participó del trabajo a ser publicado en el *Proceedings* de las Jornadas Peruanas de Energía Solar 2020: *Design and construction of a portable apparatus to measure the thermal conductivity*. Y de la postulación a patente ante INDECOPI, del proyecto titulado: Sistema Portátil Medidor de Conductividad Térmica de Materiales Sólidos, presentado en el año 2019.

¹ M.J. Piñas, *Estudio de las Propiedades Térmicas, Mecánicas, Morfológicas y Estructurales del Adobe como Material Biocompósito*, 2018. Tesis para Optar el Título de Ingeniero Físico, Facultad de Ciencias. UNI.

² F.S. Espinoza, *Caracterización Térmica, Estructural y Mecánica de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa*, 2020. Tesis para Optar el Título de Ingeniero Físico, Facultad de Ciencias. UNI.

³ M. Cuenca, *Diseño y construcción de un aparato portátil medidor de conductividad térmica de materiales sólidos*, 2020, Tesis para Optar el Título de Ingeniero Físico, Facultad de Ciencias. UNI.

⁴ I.Chino, *Propiedades mecánicas y térmicas de adobes compactados*, 2018. Tesis para Optar el Grado de Maestro en Ciencias con Mención en Energías Renovables y Eficiencia Energética, Facultad de Ciencias, UNI.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA:.....	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	V
PRÓLOGO	VII
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ÍNDICE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS.....	XV
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 ANTECEDENTES	8
1.4.1 En el exterior	8
1.4.2 En el Perú.....	8
CAPÍTULO 2: MATERIALES COMPUESTOS Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	11
2.1 MATERIALES COMPUESTOS	11
2.2 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	16
2.3 EQUIPO DE PLACA CALIENTE CON GUARDA	20
CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	26
3.1 MEDIDAS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA: LAMBDA UNI	26
3.1.1 Partes y componentes del equipo LAMBDA UNI.....	29
3.1.2 Muestras	32
3.1.3 Aislante de borde	33
3.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS	35
3.2.1. Elaboración de muestras laminares	37
3.2.2. Elaboración de muestras tipo sándwich.	38
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS (A-INDIVIDUAL Y B-TIPO SÁNDWICH)	39
CAPÍTULO 4: CÁLCULOS, DATOS Y RESULTADOS	41
4.1. CÁLCULO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	41
4.2. CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE.....	42

4.2.1. Incertidumbre debido a la potencia eléctrica en la zona de medición μQ	42
4.2.2. Incertidumbre debido al espesor promedio de las muestras μe	42
4.2.3 Incertidumbre debido al área total de medición $\mu 2A$	42
4.2.4 Incertidumbre debido al gradiente de temperatura $\mu \Delta T$	43
4.3. DATOS OBTENIDOS.....	44
4.3.1 Datos gráficos.....	44
4.3.2 Datos y Resultados	60
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	73
CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES	74
CAPÍTULO 7: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
ANEXOS	80
ANEXOS 1: ANÁLISIS Y CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE.....	80
ANEXOS 2: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN PARA EL EQUIPO LAMBDA UNI.....	89
ANEXOS 3: DATOS GRÁFICOS DE LA TEMPERATURA EN LA ZONA MEDICIÓN OBTENIDOS EN LAS SIMULACIONES CON COMOSOL MULTIPHYSICS.	94
ANEXO 4: ARTÍCULO DESARROLLADO PARA LA PARTICIPACIÓN EN EL XXVII SIMPOSIO PERUANO DE ENERGÍA SOLAR.....	99
ANEXO 5: PARTICIPACIÓN EN EL PROGRAMA PATENTA Y EN EXPOPATENTA 2019.....	111

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Rankings de índice de desarrollo humano (IDH) e IDH por departamento en 2003 y 2019 del Perú [22].....	6
Tabla 2. Rigidez a flexión y resistencia relativa de un compuesto estructural tipo sándwich	15
Tabla 3. Conductividad térmica de algunos materiales de construcción	19
Tabla 4. Medidas de características físicas de las muestras laminares antes de las pruebas de conductividad térmica.	40
Tabla 5. Medidas de características físicas de los compuestos tipo sándwich antes de las pruebas de conductividad térmica.	40
Tabla 6. Datos y Resultados de conductividad térmica en cada ensayo.	61
Tabla 7. Datos y resultados de incertidumbre en cada ensayo	61
Tabla 8. Datos y resultados del cálculo teórico de la conductividad térmica de los compuestos tipo sándwich.	63
Tabla 9. Datos y resultados del cálculo teórico de la conductividad térmica de los compuestos tipo sándwich.	63
Tabla 11. Datos para el cálculo de la incertidumbre combinada de la tensión eléctrica suministrada a la zona de medición.....	87
Tabla 12. Datos para el cálculo de la incertidumbre combinada de la corriente eléctrica suministrada a la zona de medición.....	87
Tabla 13. Datos para el cálculo de la incertidumbre combinada del espesor de la muestra superior.	87
Tabla 14. Datos para el cálculo de la incertidumbre combinada del espesor de la muestra inferior.....	87
Tabla 15. Datos para el cálculo de la incertidumbre combinada del diámetro de la zona de medición.....	87
Tabla 16. Datos para el cálculo de la incertidumbre combinada del diámetro de la zona de medición más gap	87
Tabla 17. Datos para el cálculo de la incertidumbre combinada de la temperatura en la zona de medición.....	87
Tabla 18. Datos para el cálculo de la incertidumbre combinada de la temperatura en la placa fría superior.....	88
Tabla 19. Datos para el cálculo de la incertidumbre combinada de la temperatura en la placa fría inferior.....	88
Tabla 20. Datos para el cálculo de los factores que determinan el valor de la conductividad térmica.	88
Tabla 21. Datos para el cálculo de la incertidumbre de la conductividad térmica.	88
Tabla 22. Especificaciones técnicas del chiller.	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Número de episodios de neumonías en menores de 5 años en el departamento de Cusco durante la semana 1 del año 2017 hasta la semana 17 del año 2020	2
Figura 2. Viviendas rurales con paredes de adobe o tapia. Datos tomados de los censos de los años 1993, 2007 y 2017 [21].	5
Figura 3. Vivienda Sumaq Wasi elaborada con ladrillo y poliestireno expandido dispuesto en forma de sándwich [26].	7
Figura 4. Clasificación de materiales compuestos.....	11
Figura 5. Esquema de compuestos laminares. (a) unidireccional; (b) capa cruzada; (c) capas angulares; y (d) multidireccional	13
Figura 6. Compuesto laminar <i>plywood</i>	14
Figura 7. Diagrama esquemático de un compuesto estructural tipo sándwich.....	14
Figura 8. Materiales más usados en la fabricación de capas y núcleos de un compuesto tipo sándwich	16
Figura 9. Diagrama del proceso de transferencia de calor entre dos cuerpos a diferentes temperaturas que están en contacto	16
Figura 10. Conducción de calor unidimensional en un sólido [39].....	18
Figura 12. Esquema de configuración de un aparato de placa caliente de doble muestra.	21
Figura 13. Esquema del equipo de placa caliente con guarda LAMBDA UNI.....	26
Figura 14. Perfiles de potencia y temperaturas para el ensayo 1 en la determinación de la conductividad térmica de la Ignimbrita de la región Arequipa [48].	27
Figura 15. Perfiles de potencia y temperaturas para el ensayo 2 en la determinación de la conductividad térmica de la Ignimbrita de la región Arequipa [48].	27
Figura 16. Perfiles de potencia y temperaturas para el ensayo 2 en la determinación de la conductividad térmica de la Ignimbrita de la región Arequipa [49].	28
Figura 18. Esquema de la zona de guarda: (a) muestra la zona de guarda y (b) muestra cómo se constituye internamente la zona de guarda.	30
Figura 20. Esquema de ubicación de los serpentines de Cobre.	31
Figura 21. Esquema de conexión serpentines de cobre, refrigerante y chiller.	31
Figura 22. Distribución de termopares tipo T y las fuentes de alimentación a las resistencias de nicrom	32
Figura 24. Esquema de una muestra con aislante de borde: (a) es el aislante de borde, (b) es la muestra.	33
Figura 25. Equipo Lambda UNI.	34
Figura 27. Muestras laminares de: (a) PLV, (b) DW, (c) PLEX, (d) ECOTERM, (e) LP.	38
Figura 28. Muestras tipo sándwich: (a) Ladrillo-poliestireno expandido-ladrillo (LP – PLEX-LP), (b) Ladrillo-lana poliéster-ladrillo (LP – ECOTERM-LP), (c) Ladrillo-lana de vidrio-ladrillo (LP-PLV-	

LP), (d) Drywall-lana poliéster-drywall (DW – ECOTERM-DW), (e) Drywall-lana de vidrio-drywall (DW-PLV-DW), (f) Drywall-poliestireno expandido-drywall (DW-PLEX-DW).	38
Figura 29. (a) Aislante de borde y (b) muestra de LP-PLV-LP con aislante de borde.....	39
Figura 30. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del DW, (a) muestra el comportamiento térmico de las TF_{sup} , TF_{inf} , TZM y TZG y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM}	45
Figura 32. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del ECOTERM, (a) muestra el comportamiento térmico de las TF_{sup} , TF_{inf} , TZM y TZG y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM}	46
Figura 33. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del ECOTERM.	47
Figura 34. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del PLV, (a) muestra el comportamiento térmico de las TF_{sup} , TF_{inf} , TZM y TZG y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM}	47
Figura 35. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del PLV.	48
Figura 36. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del LP, (a) muestra el comportamiento térmico de las TF_{sup} , TF_{inf} , TZM y TZG y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM}	49
Figura 37. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del LP.	50
Figura 38. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del PLEX, (a) muestra el comportamiento térmico de las TF_{sup} , TF_{inf} , TZM y TZG y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM}	50
Figura 39. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del PLEX.....	51
Figura 40. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del DW- PLEX-DW, (a) muestra el comportamiento térmico de las TF_{sup} , TF_{inf} , TZM y TZG y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM}	52
Figura 42. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del DW- ECOTERM-DW, (a) muestra el comportamiento térmico de las TF_{sup} , TF_{inf} , TZM y TZG y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM}	53
Figura 43. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del DW-ECOTERM-DW.....	54
Figura 44. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del DW-PLV- DW, (a) muestra el comportamiento térmico de las TF_{sup} , TF_{inf} , TZM y TZG y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM}	55
Figura 45. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del DW-PLV-DW.	56
Figura 46. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del LP- PLEX- LP, (a) muestra el comportamiento térmico de las TF_{sup} , TF_{inf} , TZM y TZG y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM}	56

Figura 47. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del LP-PLEX-LP.....	57
Figura 48. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del LP-ECOTERM-LP (a) muestra el comportamiento térmico de las TF_{sup} , TF_{inf} , TZM y TZG y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM}	57
Figura 49. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del LP-ECOTERM-LP.....	58
Figura 50. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del LP-PLV-LP, (a) muestra el comportamiento térmico de las TF_{sup} , TF_{inf} , TZM y TZG y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM}	59
Figura 51. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del LP-PLV-LP.....	60
Figura 57. Cámara Termohigrométrica para el equipo LAMBDA UNI: (a) estructura de cámara termohigrométrica de doble vidrio y aislante (poliestireno expandido), (b) puerta de doble vidrio y aire, (c) equipo de placa caliente LAMBDA UNI, (d) soporte metálico del equipo LAMBDA UNI.....	68
Figura 58. Estructura de cámara termohigrométrica para el equipo LAMBDA UNI: (a) orificio para la manguera por la cual fluye el líquido refrigerante del chiller al LAMBDA UNI, (b) orificio para la manguera por la cual retorna el líquido refrigerante del equipo LAMBDA UNI al chiller, (c) orificio para los cables de alimentación, de circuitería y de transmisión de datos, (d) puntos de ubicación del soporte metálico del equipo LAMBDA UNI.	69
Figura 59. Vista explosionada de la Estructura de cámara termohigrométrica para el equipo LAMBDA UNI: (a) marco de soporte interno de aluminio, (b) cubierta interior de vidrio laminado, (c) aislante intermedio de poliestireno expandido, (d) cubierta exterior de vidrio laminado, (e) marco de soporte exterior de aluminio, (f) marco de aluminio para puerta.....	70
Figura 60. (a) Puerta de la cámara de la cámara termohigrométrica del equipo LAMBDA UNI, (b) vista explosionada de partes que conforman la puerta de la cámara termohigrométrica del equipo LAMBDA UNI.	71
Figura 61. Equipo LAMBDA UNI instalado en la cámara termohigrométrica	71
Figura 63. Vista frontal del Chiller.	89
Figura 64. Vista lateral del Chiller.....	90
Figura 65. Controlador de temperatura Autonics.	92
Figura 66. Gráfico de la temperatura en la placa caliente, (a) temperatura en la zona de guarda, (b) temperatura en la zona de medición.....	94
Figura 67. Gráfico de la temperatura en la placa caliente, (a) temperatura en la zona de guarda, (b) temperatura en la zona de medición.....	95
Figura 68. Gráfico de la temperatura en la placa caliente, (a) temperatura en la zona de guarda, (b) temperatura en la zona de medición.....	96
Figura 69. Gráfico de la temperatura en la placa caliente, (a) temperatura en la zona de guarda, (b) temperatura en la zona de medición.....	96
Figura 70. Gráfico de la temperatura en la placa caliente, (a) temperatura en la zona de guarda, (b) temperatura en la zona de medición.....	97

Figura 71. Gráfico de la temperatura en la placa caliente, (a) temperatura en la zona de guarda, (b) temperatura en la zona de medición.....	98
Figura 72. Participación en Feria Expo patenta 2019 INDECOPI [33].	111
Figura 73. Aparato Lambda portátil UNI para la medición de la conductividad térmica de materiales sólidos.	112

LISTA DE ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS

OMS	Organización Mundial de Salud.
ASTM	Asociación americana para ensayos y materiales (de los términos en inglés: <i>American Society for Testing and Materials</i>).
UNI	Universidad Nacional de Ingeniería.
IDH	Índice de desarrollo humano.
CER-UNI	Centro de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Ingeniería.
UTEC	Universidad de Ingeniería y Tecnología.
CENAM	Centro Nacional de Metrología (de México).
Ecoterm	Lana poliéster.
PLV	Panel de lana de vidrio.
PLEX	Poliestireno expandido.
LP	Ladrillo pastelero.
DW	Drywall Volcanita.
LP-PLEX-LP	Ladrillo-poliestireno expandido-ladrillo.
LP-Ecoterm-LP	Ladrillo-lana poliéster-ladrillo.
LP-PLV-LP	Ladrillo-lana de vidrio-ladrillo.
DW-Ecoterm-DW	Drywall-lana poliéster-drywall.
DW-PLV-DW	Drywall-lana de vidrio-drywall.
DW-PLEX-DW	Drywall-poliestireno expandido-drywall.
\vec{Q}	Vector flujo total de calor por unidad de área (Wm^{-2}).
λ	Conductividad térmica ($Wm^{-1}C^{-1}$).
T	Temperatura ($^{\circ}C$).
$\vec{\nabla}T$	Vector de gradiente de temperatura ($^{\circ}Cm^{-1}$).
$\frac{\partial T}{\partial x}$	Derivada parcial de la temperatura respecto a x ($^{\circ}Cm^{-1}$).
$\frac{\partial T}{\partial y}$	Derivada parcial de la temperatura respecto a y ($^{\circ}Cm^{-1}$).
$\frac{\partial T}{\partial z}$	Derivada parcial de la temperatura respecto a z ($^{\circ}Cm^{-1}$).
\hat{i}	Vector unitario en la dirección x.
\hat{j}	Vector unitario en la dirección y.
\hat{k}	Vector unitario en la dirección z.
Q_x	Flujo de calor por unidad de área en la dirección x (Wm^{-2}).
Q_y	Flujo de calor por unidad de área en la dirección y (Wm^{-2}).
Q_z	Flujo de calor por unidad de área en la dirección z (Wm^{-2}).
$\frac{dT}{dx}$	Diferencial de la temperatura respecto a x ($^{\circ}Cm^{-1}$).
Q_x	Flujo de calor en la dirección x (W).

A	Área de sección transversal que atraviesa el flujo de calor Q_x (m^2).
T_1	Temperatura caliente en la superficie de entrada del flujo de Calor en la dirección x ($^{\circ}C$).
L	Espesor del solido en la dirección x (m).
e_1	Espesor del solido 1 (m).
e_2	Espesor del solido 2 (m).
λ_1	Conductividad térmica del sólido 1 ($Wm^{-1}C^{-1}$).
λ_2	Conductividad térmica del sólido 2 ($Wm^{-1}C^{-1}$).
Q_1	Flujo de calor en el sólido 1 (W).
Q_2	Flujo de calor en el sólido 2 (W).
T_{inf}	Temperatura en la interfaz de contacto del sólido 1 y el sólido 2 ($^{\circ}C$).
$2A$	Área total de medición (m^2).
ΔT	Diferencia de temperatura entre la zona de medición y el promedio de temperaturas de las placas frías ($^{\circ}C$).
e	Espesor promedio de las muestras (m).
Q	Flujo de calor (W).
μ_{λ}	Incertidumbre debido al valor de la conductividad térmica ($Wm^{-1}C^{-1}$).
μ_Q	Incertidumbre debido al flujo de calor (W).
μ_{2A}	Incertidumbre debido al área total de medición (m^2).
$\mu_{\Delta T}$	Incertidumbre debido a la diferencia de temperatura entre la zona de medición y el promedio de temperaturas de las placas frías ($^{\circ}C$).
μ_e	Incertidumbre debido al espesor promedio de las muestras (m).
μ_V	Incertidumbre debido al tensión eléctrica suministrado a la zona de medición (V).
μ_I	Incertidumbre debido a la corriente eléctrica suministrada a la zona de medición (A).
V	Tensión eléctrica suministrado a la zona de medición (V).
I	Corriente suministrada a la zona de medición (A).
e_{sup}	Espesor de la muestra superior (m).
e_{inf}	Espesor de la muestra inferior (m).
A	Área de medición (m^2).
A_{ZM}	Área de la zona de medición (m^2).
A_g	Área del gap (m^2).
T_{ZM}	Temperatura de la zona de medición ($^{\circ}C$).
T_F	Promedio de temperaturas de las placas frías ($^{\circ}C$).
T_{Fsup}	Temperatura en la placa fría superior ($^{\circ}C$).
$\mu_{e_{sup}}$	Incertidumbre debido al espesor de la muestra superior (m).
$\mu_{e_{inf}}$	Incertidumbre debido al espesor de la muestra inferior (m).
$\mu_{A_{ZM}}$	Incertidumbre debido al área de la zona de medición (m^2).
μ_{A_g}	Incertidumbre debido al área del gap (m^2).

$\mu_{T_{ZM}}$	Incertidumbre debido a la temperatura en la zona de medición (°C).
$\mu_{T_{Fsup}}$	Incertidumbre debido a la temperatura en la placa fría superior (°C).
$\mu_{T_{Finf}}$	Incertidumbre combinada debido a la temperatura en la placa fría inferior (°C).
U_{λ}	Incertidumbre expandida del valor de la conductividad térmica ($Wm^{-1}C^{-1}$).
k	Factor de cobertura.
$\lambda_{compuesto}$	Conductividad térmica del compuesto sándwich. ($Wm^{-1}C^{-1}$).
$e_{compuesto}$	Espesor del compuesto sándwich (m).
$e_{capa-exterior}$	Espesor de la capa exterior (m).
$e_{núcleo}$	Espesor del núcleo (m).
$\lambda_{capa-exterior}$	Conductividad térmica de la capa exterior ($Wm^{-1}C^{-1}$).
$\lambda_{núcleo}$	Conductividad térmica del núcleo ($Wm^{-1}C^{-1}$).
$\lambda_{calculado}$	Conductividad térmica calculada teóricamente ($Wm^{-1}C^{-1}$).
$\lambda_{experimental}$	Conductividad térmica obtenida experimentalmente ($Wm^{-1}C^{-1}$).
$T_{ZMsimulado}$	Temperatura de la zona de medición en la simulación.
X	Mensurando proveniente de la suma o resta de otros 2 Mensurandos X_1 y X_2 .
μ_X	Incertidumbre del mensurando X .
μ_{X_1}	Incertidumbre del mensurando X_1 .
μ_{X_2}	Incertidumbre del mensurando X_2 .
f	Mensurando del producto de dos o más variables.
x_i	Factor i-esimo del mensurando f .
μ_f	Incertidumbre del mensurando f .
μ_{x_i}	Incertidumbre del factor x_i .
$\frac{\partial f}{\partial x_i}$	Derivada parcial de f respecto de x_i .
x	Mensurando independiente.
\bar{I}_x	Promedio de medidas realizadas.
C_{certf}	Corrección debido al certificado de calibración.
C_{resol}	Corrección debido a la resolución del instrumento.
C_{espf}	Corrección debido especificaciones del instrumento.
C_{deriv}	Corrección debido a la deriva del instrumento.
C_{df}	Correcciones debido a distintos factores que afecten al valor del mensurando.
μ_x	Incertidumbre del mensurando independiente x .
$\mu_{\bar{I}_x}$	Incertidumbre debido a la repetibilidad.
μ_{certf}	Incertidumbre debido a la corrección por certificado de calibración del instrumento de medición.
μ_{resol}	Incertidumbre debido a la corrección por resolución del instrumento de medición.

μ_{esp}	Incertidumbre debido a la corrección por especificaciones del instrumento de medición.
μ_{deriv}	Incertidumbre debido a la corrección por deriva del instrumento de medición.
μ_{df}	Incertidumbre debido a la corrección por diversos factores que afectan las mediciones realizadas con el instrumento de medición.
S	Desviación estándar de los datos medidos.
I_{x_i}	Medición i-ésima del mensurando.
n	Número de mediciones realizadas.
d	Resolución del instrumento de medición.
EMP	Error Máximo Permitido, se obtiene en la ficha técnica del instrumento de medición.
Dv	Deriva del instrumento de calibración.
$U_{certf_{ultimo}}$	Incertidumbre del ultimo certificado de calibración.
$U_{certf_{penultimo}}$	Incertidumbre del penúltimo certificado de calibración.
t	Periodo de calibración del instrumento de medición.
D_1	Diámetro de la zona de medición.
μ_{D_1}	Incertidumbre del diámetro de zona de medición.
D_2	Diámetro de la zona de medición más gap.
μ_{D_2}	Incertidumbre del diámetro de zona de medición más gap.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el desarrollo de técnicas modernas de construcción y nuevos materiales ha ido evolucionado, y a su vez enfrentado nuevas dificultades de acuerdo a las necesidades de la población, la dependencia de la disponibilidad de material, las tradiciones culturales y sociales, y la geografía del lugar [1]. Esta última es una de las principales dificultades que afectan a la calidad de vida de la población en zonas Altoandinas, debido a las bajas temperaturas que afrontan estas regiones. Por lo que, es necesario el desarrollo y diseño de nuevos materiales que superen las dificultades mencionadas y le permitan a al poblador altoandino afrontar las inclemencias del frío, lo que nos lleva a la realización de estudios de las propiedades y características de estos nuevos materiales. En esta gama de propiedades se resalta la conductividad térmica, por ser un parámetro que permite saber la facilidad con la que un material permite el flujo de calor. En las zonas Altoandinas del Perú la temperatura en épocas de heladas⁵ oscila por debajo de los 0 °C y puede descender aún por debajo de -20 °C en horas de la noche y madrugada [2], siendo los departamentos de la región sur país los más afectados por este fenómeno [3]. Bajo estas condiciones se hace muy necesario que las viviendas ubicadas en estas zonas sean construidas con materiales de baja conductividad térmica que permita optimizar la energía producida por los ocupantes y toda la ganancia pasiva solar que el diseño permita, ya que estas zonas cuentan con un gran potencial de energía solar, con valores promedios diarios de irradiación que van de 5,2 kWhm⁻² a 7,2 kWhm⁻² [4].

La Organización Mundial de Salud (OMS) define el confort térmico como un estado completo de bienestar físico, mental y social [5]. Las poblaciones en zonas Altoandinas que afrontan el frío extremo provocado por las heladas se ven principalmente afectados en su salud, lo que en consecuencia se vuelve también uno de los factores que impiden el desarrollo normal de sus actividades económicas y sociales. En ese sentido, se vuelve una prioridad reducir los problemas de salud, reconociendo que no se pueden frenar las heladas, pero sí minimizar sus efectos mediante el mejoramiento, construcción o reconstrucción de viviendas que retengan la mayor cantidad de calor posible en su interior.

En la presente tesis se realizó el estudio de nuevos compuestos estructurales que podrían ser usados como nuevas alternativas para la construcción de viviendas en zonas expuestas a heladas. Así también, se estudió cada material con los que están conformados estos compuestos estructurales de forma individual; el estudio realizado consistió en la evaluación de la conductividad térmica a condiciones de temperatura cercanas a 0 °C en una cara de la muestra y a 15 °C en la cara opuesta. Los resultados de estas evaluaciones permitirán reconocer la idoneidad de estos compuestos

⁵ Heladas: fenómeno meteorológico que consiste en un descenso de la temperatura del aire por debajo de los 0 °C [2].

estructurales o la de los materiales que lo conforman de manera individual para su uso en la construcción de viviendas Altoandinas. El estudio planteado se realizará mediante el empleo de un equipo de medición de conductividad térmica, denominado LAMBDA UNI, el cual fue diseñado y presentado en el trabajo de tesis del Ingeniero Mc Joshua Piñas Moya [6], y cuya posterior construcción se realizó con los lineamientos dados por la norma ASTM C177 [7]. El equipo LAMBDA UNI se encuentra ubicado en el Laboratorio de Ingeniería Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Año tras año desde abril hasta septiembre las zonas Altoandinas en el Perú son afectadas por un fenómeno meteorológico conocido como la helada [3]. Este fenómeno trae consecuencias graves que afectan directamente la calidad de vida de las comunidades que se ubican en estas regiones del Perú, especialmente en la salud de sus pobladores donde los niños y ancianos son los más afectados. En la Figura 1 se observa la cantidad de niños menores de 5 años en el departamento de Cusco que han sufrido de episodios de neumonía desde la semana 1 del año 2017 hasta la semana 17 del año 2020 (Datos obtenidos de la Dirección Regional de Salud del Cusco [8]).

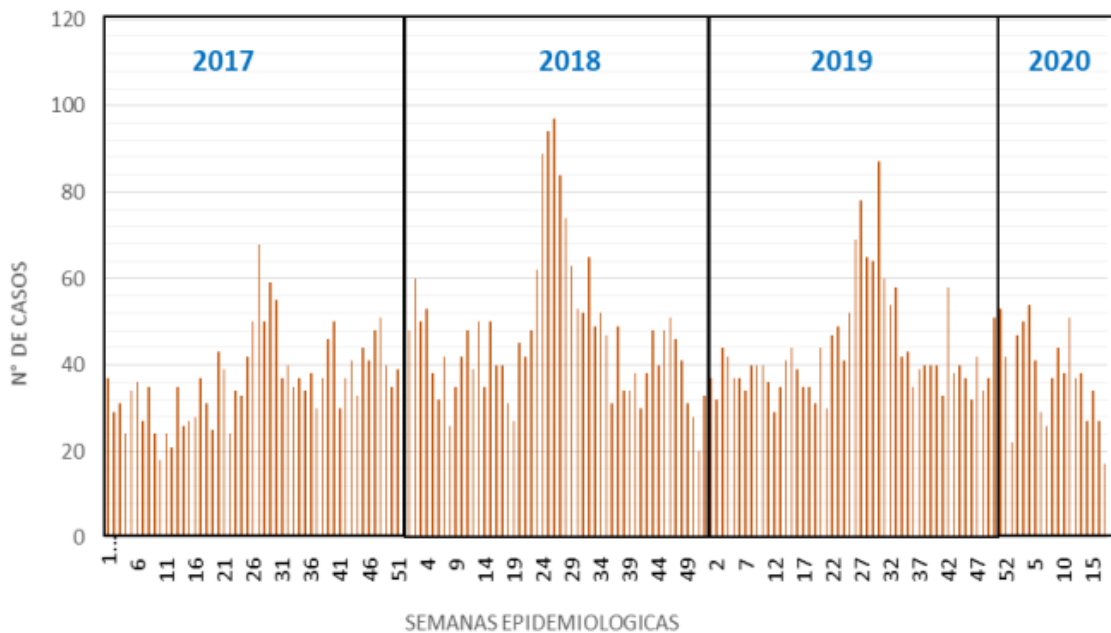


Figura 1. Número de episodios de neumonías en menores de 5 años en el departamento de Cusco durante la semana 1 del año 2017 hasta la semana 17 del año 2020 [8].

De la Figura 1 se observa un incremento sustancial y repetitivo del número de episodios de neumonía año tras año desde la semana 13 a la semana 33 que coincide con la temporada de heladas en las zonas Altoandinas del Perú, comprendiendo de este modo la implicancia de sus efectos en la salud. Las heladas en el Perú y sus

consecuencias es un problema que se viene tratando desde muchos años atrás, por medio de campañas de recolección de ropas y frazadas que se envían a las comunidades afectadas, y a través del mejoramiento de viviendas, para evitar el descenso de temperaturas en el interior de las mismas. Esta última alternativa sería una de las más viables en la lucha contra el efecto de las heladas en la salud de los pobladores Altoandinos [9].

Desde el año 2008 instituciones académicas públicas como la UNI con sus tesis de pregrado y maestría [6], [10]–[14] y la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga (UNSCH) con sus trabajos de tesis y artículos [15], [16] y privadas como la UTEC en su trabajo de investigación [17], vienen abordando el mejoramiento de las viviendas por medio de proyectos de investigación [18]. Entidades del estado como el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), el Ministerio de Salud (MINSa), el Ministerio de Agricultura (MINAG), el Ministerio de la Mujer y Poblaciones Vulnerables (MIMP), y el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS) [19] y organismos no gubernamentales como Global Humanitaria [20], han ido sumando esfuerzos a esta causa; entre las aportantes a considerar se tienen la implementación de diversos sistemas de aislamiento térmico y sistemas de captación de calor en las viviendas de distintas comunidades, y que en muchos casos les ha permitido alcanzar una sensación de confort térmico dentro de ellas [10], [11]. La experiencia acumulada en estos proyectos resalta la importancia de los materiales usados para estos fines, priorizando para la construcción y rehabilitación de viviendas el uso de materiales locales como la tierra, el ichu, totora, lana de oveja, madera, adobe, tapial⁶, kesana⁷ y tumbao⁸ [12].

No obstante, existen diversos materiales que no se consideran o no se les ha dado la importancia de su uso como alternativas viables y eficientes en relación a costos y beneficios para la construcción y mejora de viviendas en zonas afectadas por heladas.

En febrero de 2019 se aprobó el Plan Multisectorial ante Heladas y Friaaje 2019- 2021 promovido por el Viceministerio de Gobernanza Territorial [18], dicho plan tiene como objetivo viabilizar la ejecución de intervenciones orientadas a reducir de manera sostenible la vulnerabilidad de la población en mayor riesgo ante los efectos de las heladas y friaje. En este Plan se reconoce que existen algunas restricciones, principalmente de conocimiento, como determinar que intervenciones y tecnologías son más efectivas y que permitan reducir la vulnerabilidad de la población [18]. De esta manera, el problema planteado sería la falta de conocimiento sobre materiales de construcción apropiados para viviendas que se encuentren expuestas a heladas y que puedan contribuir al desarrollo y la mejora de la calidad de vida del poblador altoandino.

⁶ Tapial, tierra arcillosa húmeda compactada a golpes para la elaboración de muros.

⁷ Kesana, tejido de totora elaborado por pobladores ribereños al lago Titicaca para usarlo en la construcción de sus viviendas en paredes y techos.

⁸ Tumbao, técnica ancestral practicada por la población de Vilcallamas Arriba en Chucuito-Puno para elaborar mantos a base de arcilla e ichu y ser colocados al interior del techo de las viviendas.

1.2 OBJETIVOS

En esta sección se presenta el objetivo general, así como los objetivos específicos de la presente tesis.

1.2.1 Objetivo general

Determinar la conductividad térmica de compuestos estructurales tipo sándwich, los cuales consisten en arreglos laminares (distintos y dispuesto uno sobre otro) bajo condiciones de temperatura cercanas a 0 °C.

1.2.2 Objetivos específicos

- Elaborar compuestos estructurales tipo sándwich contruidos por materiales usados convencionalmente en construcción como el poliestireno expandido (PLEX), drywall (DW), lana poliéster (ECOTERM), lana de vidrio (PLV) y ladrillo pastelero (LP).
- Determinar la conductividad térmica (λ) de los materiales y compuestos estructurales elaborados anteriormente a condiciones de temperatura cercanas a 0 °C.
- Determinar mediante cálculo teórico la conductividad térmica de los compuestos tipo sándwich a partir de los valores de conductividad térmica de sus componentes laminares obtenidos individualmente de forma experimental.
- Evaluar los resultados obtenidos de cada una de las muestras estudiadas mediante simulación en el software COMSOL Multiphysics.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los episodios de neumonías que se registran cada año en las zonas Altoandinas en particular a los niños y ancianos no son solo causa del frio intenso ocasionado por las heladas, sino también por la falta de una buena nutrición y de viviendas adecuadas que brinden un ambiente habitable y proporciones bienestar a sus ocupantes. Según los datos tomados del Instituto Nacional de Estadística e Informaticen (INEI) en la mayoría de estas zonas prima como material de construcción en las viviendas el adobe y la tapia como se muestra en la Figura 2 [21].

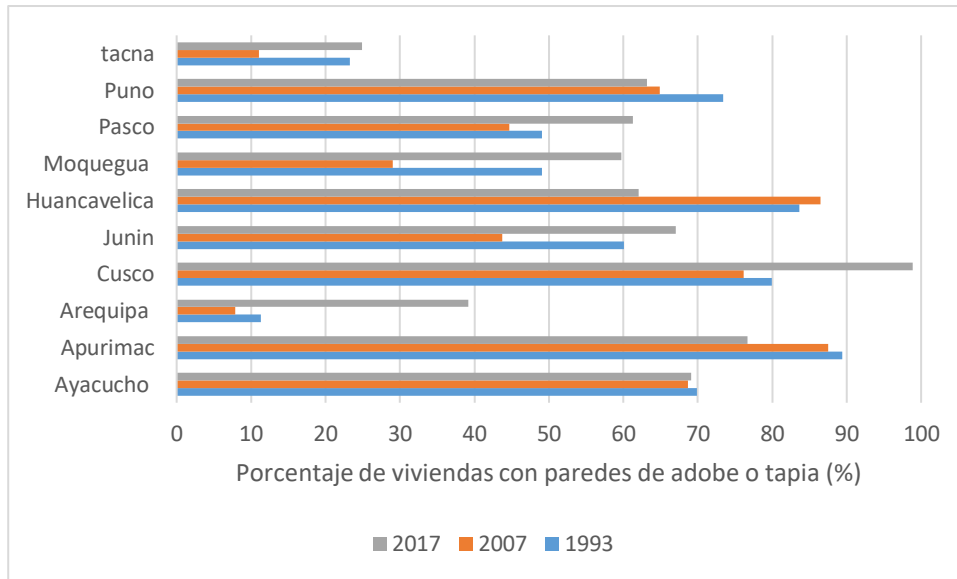


Figura 2. Viviendas rurales con paredes de adobe o tapia. Datos tomados de los censos de los años 1993, 2007 y 2017 [21].

La conductividad térmica del adobe no puede considerarse como un valor único, pero si bajo, por ejemplo en un estudio realizado en México se encontraron valores para el adobe en un rango de $0,5$ a $0,7 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ en comparación con el concreto con valores de conductividad térmica que se encuentran en un rango de $1,3$ a $1,5 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ [22]. En el caso de Perú los estudios realizados con el adobe contemplan valores de conductividad térmica en un rango de $0,25$ a $0,33 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ [23], e incluso valores que alcanzan los $0,371 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ [6]. Esto convierte al adobe en un material que permite retener el calor mucho mejor que el concreto dentro de las viviendas. Sin embargo, muchas de estas construcciones presentan grietas y agujeros en las paredes, las puertas no cierran correctamente, tienen ventanas de un solo vidrio y algunos casos con marcos metálicos, techos de calaminas metálica y mal sellados facilitando así la pérdida de calor y en consecuencia una disminución de temperatura dentro de la vivienda [11]. Las condiciones de estas viviendas evidencian la falta de conocimiento en materia de construcción y refleja también el nivel de pobreza y desarrollo en estas zonas del Perú. En el 2019 Entre los departamentos del Perú la ciudad de Lima ocupó el primer lugar en el ranking de Índice de Desarrollo Humano (IDH), medido a partir de la esperanza de vida, la educación y el PBI per cápita. El valor del IDH para Lima en el 2019 fue de $0,71$ [24], a comparación de las regiones en las zonas Altoandinas, que ocupan los últimos lugares en el *ranking* del IDH, tal como se muestra en la Tabla 1 (Datos obtenidos del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) [24]).

Tabla 1. *Rankings* de Índice de Desarrollo Humano (IDH) e IDH por departamento en los años 2003 y 2019 en el Perú [24].

Indicador	Huancavelica	Ayacucho	Apurímac	Puno	Pasco	Cusco	Junín	Tacna	Moquegua	Arequipa
<i>Ranking</i> 2003 del IDH	24	22	21	13	12	16	8	2	5	3
IDH 2003	0,17	0,23	0,23	0,28	0,28	0,28	0,34	0,47	0,41	0,43
<i>Ranking</i> 2019 del IDH	24	20	23	18	17	12	13	6	2	3
IDH 2019	0,38	0,43	0,41	0,47	0,48	0,51	0,51	0,59	0,66	0,64

Como se puede observar en la Tabla 1 la mayoría de estos departamentos ocupan los últimos lugares en el *ranking* del IDH en el Perú, a excepciones de los departamentos como Tacna, Moquegua y Arequipa. Aun así, estos últimos también tienen poblados con poco desarrollo donde la precariedad de las viviendas no les ha permitido a los pobladores afrontar las inclemencias del frío, tal es el caso de la comunidad de Imata en Arequipa el cual es considerado uno de los pueblos distritales más fríos del Perú donde las temperaturas pueden llegar hasta $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ [13].

Por estos motivos surgió la necesidad de brindarle a la población de las regiones Altoandinas ambientes adecuados que les permitan afrontar los descensos extremos de temperaturas en épocas de heladas. Desde hace muchos años se han ido realizando numerosas intervenciones y estudios que han permitido la rehabilitación de las viviendas, así como un mayor desarrollo en los métodos de construcción aplicados en estas regiones. Un ejemplo a mencionar, sería el proyecto realizado por el Centro de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Ingeniería (CER-UNI) desde el 2008 al 2010 que consistió en la construcción y reformación de 4 viviendas en las comunidades de San Francisco de Raymina en Ayacucho y Vilcallamas en Puno con el objetivo de acondicionarlas para conseguir un ambiente saludable al interior de las mismas y logrando así un incremento de la temperatura mínima interior entre $8\text{ y }10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10]. Las viviendas acondicionadas en la comunidad de San Francisco de Raymina han sido punto de apoyo para el desarrollo de posteriores investigaciones en relación las estrategias bioclimáticas para la construcción de viviendas. Entre ellas caben resaltar; el estudio realizado en la evaluación experimental del tubo radiante y el muro radiante como técnicas bioclimáticas para viviendas rurales Altoandinas, esto durante el 2013 y 2014, en la que se menciona la necesidad de precisar y cuantificar el aporte de paredes puertas y ventanas en el incremento de la temperatura [10]. Así también durante el 2016 se realizó un estudio sobre el análisis cualitativo de la tasa de transferencia de calor de los elementos constructivos de las viviendas y en la que se menciona la necesidad de conocer las propiedades térmicas de los materiales que componen las viviendas para las condiciones propias del lugar [11]. Posteriormente en el 2017 se realizó un estudio sobre la evaluación del desempeño de dos sistemas activos de calefacción solar y técnicas

arquitectónicas de aislamiento pasivo, en este trabajo se menciona la obligación de mejorar el aislamiento de las paredes con el fin de cumplir con los requisitos de la norma técnica EM. 110 CONFORT TÉRMICO Y LUMÍNICO CON EFICIENCIA ENERGÉTICA [12]. Los resultados obtenidos en estos estudios resaltan la importancia de evaluar adecuadamente el aporte térmico de cada elemento constructivo de las viviendas Altoandinas. En los últimos años mediante programas como el Sumaq Wasi el MVCS ha realizado la construcción de viviendas bioclimáticas en beneficio de los pobladores altoandinos tomando en consideración muchos aspectos de los resultados obtenidos de los estudios y experiencias realizadas anteriormente. En estas construcciones las paredes cuentan con doble muro de ladrillo entre las cuales se ubica un material aislante como se muestra en la Figura 3 [25].



Figura 3. Vivienda Sumaq Wasi elaborada con ladrillo y poliestireno expandido dispuesto en forma de sándwich [26].

Sin embargo, estas construcciones carecen de un sustento técnico en cuanto a las propiedades térmicas de los materiales empleados para su realización bajo condiciones tan adversas como lo son las heladas. Por esta razón en la presente tesis se ha considerado aportar al conocimiento de las propiedades térmicas de una serie de materiales y compuestos estructurales que podrían ser usados en construcción de viviendas en condiciones de temperatura entre $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. La propiedad en estudio es la conductividad térmica, dado que se cuenta con un equipo construido siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C177, al cual se le ha denominado LAMBDA UNI [6], [14]. Este equipo ha mostrado excelentes resultados en la medición del adobe con *Stipa ichu* en comparación en resultados obtenidos en los laboratorios del CENAM [14].

1.4 ANTECEDENTES

A continuación, se muestran diversos estudios de propiedades térmicas de materiales y compuestos para su uso en construcción y el acondicionamiento térmico de viviendas a nivel internacional y nacional

1.4.1 En el exterior

En 2011, en la Universidad de Ciencia y Tecnología de Noruega, se presentó un estudio de los materiales aislantes térmicos, tanto los tradicionales (*Mineral wool, expanded polystyrene, extruded polystyrene, cellulose, cork, polyurethane*), los más recientes (*vacuum insulation panels, gas-filled panels, aerogels, phase change materials*), y los futuros *vacuum insulation materials, gas insulation materials, nano insulation materials, dynamic insulation materials, concrete and applications of NIMs, nanoCon*, cada uno presenta beneficios, desventajas y sus retos a futuro [27].

Luego, en 2014, la Universidad Técnica de Riga en Letonia, se hizo un estudio de las diferentes alternativas actuales de aislantes térmicos en las construcciones en la región del mar Báltico, aquí se comparó la aislación térmica de *Thermo-wool* (lana de vidrio, oveja o cáñamo), *Eco-wool* (celulosa en cartones y papeles), poliuretano, aerogel y paneles de aislación en vacío; usando el método *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* “TOPSIS Grey” uno de los métodos *Multiple-criteria decision-making* [28].

En 2016, la Universidad Tecnológica de Brno, Republica Checa, se midió la conductividad térmica bajo el método “*heat flow meter*”, entre otras propiedades a 4 bloques de 30 cm x 30 cm x 8,5 cm de cáñamo con celulosa en relación 6:4 en peso y celulosa 100%, celulosa y paja en relación 3:7 en peso y paja 100%. Se concluyó que el mejor material fue el segundo bloque compuesto por 100% de celulosa [29].

En 2017, en la Universidad de Wuhan en China, con el fin de predecir el comportamiento del concreto expuesto a la acción de heladas, se realizó una simulación mesoscópica del comportamiento termo-mecánico del mismo [30].

Finalmente, en el 2019 en la Universidad de Leaven de Bélgica, se realizaron estudios del daño causado por las heladas a materiales de construcción. Se emplearon de cuatro tipos de ladrillos de arcilla sometiéndolos a pruebas de congelación y descongelación a temperaturas que varían desde -2 °C a -20 °C [31].

1.4.2 En el Perú

El acondicionamiento térmico en las viviendas es un tema que cada año va tomando mayor importancia sobre todo en las regiones que son afectados por las heladas y el friaje, en este sentido el Estado Peruano viene impulsando y mejorando con cada

proyecto la implementación de viviendas acondicionadas térmicamente para la mejora de la calidad de vida del poblador Altoandino, he ahí donde se viene promoviendo a su vez la investigación de nuevas alternativas en materia de construcción.

En el 2014, en la Universidad de San Cristóbal de Huamanga se realizaron mediciones de conductividad térmica de materiales usados en edificaciones de la región de Ayacucho mediante la elaboración de un medidor de conductividad térmica usando el método de placa caliente con guarda basado en la norma ASTM C177 [15]. Una de las muestras evaluadas fue madera tornillo, el estudio consistió en realizar las medidas a distintos espesores de la muestra obteniendo como resultado una conductividad promedio de $0,141 \pm 0,02 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ para un rango de espesores de 0,56 cm a 3,14 cm [16].

En el 2015 la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC) presentó los resultados de las mediciones de conductividad realizadas al Ichu mediante un sistema de medición de conductividad térmica unidireccional diseñado y fabricado en base a la norma ASTM C177. Los resultados obtenidos muestran que la conductividad térmica del ichu varía de $0,047 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ a $0,113 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ dependiendo de su densidad principalmente [17].

En el 2017 en la UNI se desarrolló un estudio de las propiedades térmicas del adobe, para este fin se prepararon muestras de adobe siguiendo la forma tradicional de su preparación acorde al estándar peruano. Los resultados mostraron una conductividad térmica que variaba de $0,25 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ a $0,33 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ y se encontraban en buen acuerdo con los resultados obtenidos mediante modelos numéricos y la literatura respecto al adobe [23].

En el 2018, en la UNI, se presentó los resultados de un estudio de las propiedades térmicas del adobe con y sin *Stipa ichu* como compósito; para este fin se empleó un aparato de placa caliente con guarda (CNM-PNE-16) ubicado en el laboratorio de CENAM México. La data obtenida y su posterior análisis demostró la ventaja de este material como aislante térmico frente a otros materiales de construcción convencionales [6].

También, en el 2018, en la Universidad San Pedro ubicada en Chimbote se realizó un estudio del efecto en las propiedades térmicas y mecánicas de mortero con cemento sustituido 5 % y 10 % con cenizas de ichu, el estudio de la conductividad térmica se realiza mediante el empleo de un sensor adherido a la muestra dando como resultado una reducción significativa en el valor de su conductividad térmica [32].

En el 2020, en la UNI, se presentaron los resultados de un estudio de las propiedades térmicas de la Unidad Blanca de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa. En este estudio se empleó un equipo de placa caliente con guarda denominado LAMBDA UNI para la obtención de la conductividad térmica de este material, cuyos resultados obtenidos fueron de $0,270 \pm 0,045 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ [14].

A finales del 2020, en la UNI, se presentó un equipo medidor de conductividad térmica denominado Lambda Portátil UNI el cual fue diseñado y construido en base a los lineamientos establecidos en la norma ASTM C518, en el cual se han realizado pruebas de medición de conductividad térmica de materiales de base cuadrada de 5 cm de lado y espesores que pueden variar desde 0,6 cm a 1,5 cm. Entre la muestra evaluada se encuentran el drywall, adobe con *Stipa ichu*, lana de vidrio, ladrillo pastelero y madera Capirona, con obteniendo valores de conductividad térmica de $0,265 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,357 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0435 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,556 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ y $0,171 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, respectivamente [33].

CAPÍTULO 2: MATERIALES COMPUESTOS Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

A mediados del siglo XX aparecieron los materiales compuestos o *composites* como un grupo distinto en la clasificación de materiales, separados de metales, cerámicos y polímeros [34]. En este capítulo 2 se presenta una definición de estos materiales compuestos y su clasificación (Reforzado con Partículas, Reforzado con Fibra, Estructural y Nano), enfatizándose en los compuestos estructurales tipo sándwich. Además, se presenta una definición de la conductividad térmica y se detalla el funcionamiento de un equipo de placa caliente con guarda para mediciones de flujo de calor y propiedades térmicas en base a la Norma ASTM C177.

2.1 MATERIALES COMPUESTOS

Se denomina material compuesto a cualquier material multifase que presente una proporción significativa de propiedades de las fases constituyentes de modo que se realice una mejor combinación de propiedades [34]. Además, se considera también que un material compuesto es obtenido artificialmente, en oposición a los que se encuentran en la naturaleza, las fases constituyentes deben ser químicamente distintas y deben estar separadas por una intercara.

La elaboración de materiales compuestos se ha ido desarrollando en el marco de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, dando lugar a una nueva generación de materiales extraordinarios. Esta nueva generación trae consigo una clasificación de materiales compuestos en función de las propiedades de las fases constituyentes, de sus propiedades relativas y geometrías correspondientes, en la Figura 4 se muestra un esquema de esta clasificación [34].

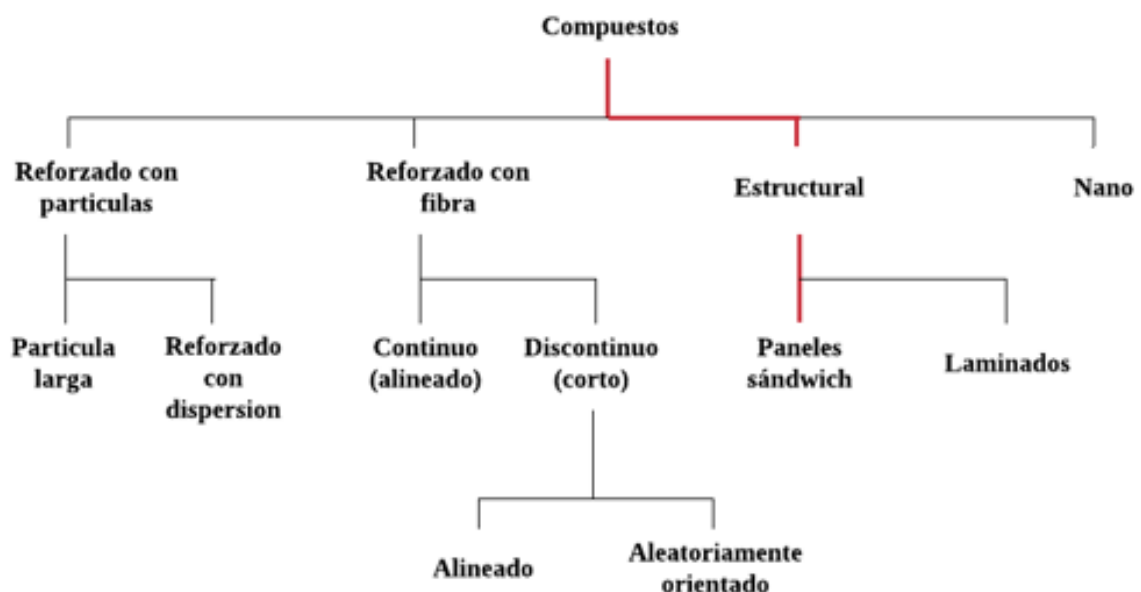


Figura 4. Clasificación de materiales compuestos [34].

En la Figura 4, se observan cuatro divisiones principales de los materiales compuestos, de las cuales son los compuestos estructurales de tipo sándwich los que se han elaborado en el presente trabajo, tomando como base para su elaboración materiales monolíticos usados convencionalmente en construcción.

Existen muchos materiales que actualmente se emplean en construcción, la elección de estos materiales depende generalmente de las condiciones de uso y los costos; en el marco de esta investigación se han elegido algunos de estos materiales convencionales como el PLEX, PLV, ECOTERM, DW y LP, y en base a estos materiales se han elaborado los compuestos estructurales tipo sándwich que son el principal objetivo de esta investigación.

Compuestos estructurales

Un compuesto estructural es un compuesto que está formado de varias capas y que se usa en aplicaciones que requieren de una integridad estructural. Las propiedades de estos compuestos dependen de las propiedades de los materiales constituyentes, así como del diseño geométrico de los elementos estructurales [34]. Entre los compuestos estructurales más conocidos se distinguen principalmente los compuestos laminares y los compuestos tipo sándwich.

Compuesto laminar. Es un compuesto estructural constituido por hojas o paneles bidimensionales (capas o laminas), que de acuerdo con la forma en la que se ubiquen dichas capas, estas pueden variar su nivel de resistencia mecánica. Se pueden clasificar los compuestos laminares de acuerdo con la dirección en las que se ubiquen estas capas, se distinguen 4 tipos: unidireccional, de capas cruzadas, de capas angulares y multidireccionales tal como se muestra en la Figura 5 [34].

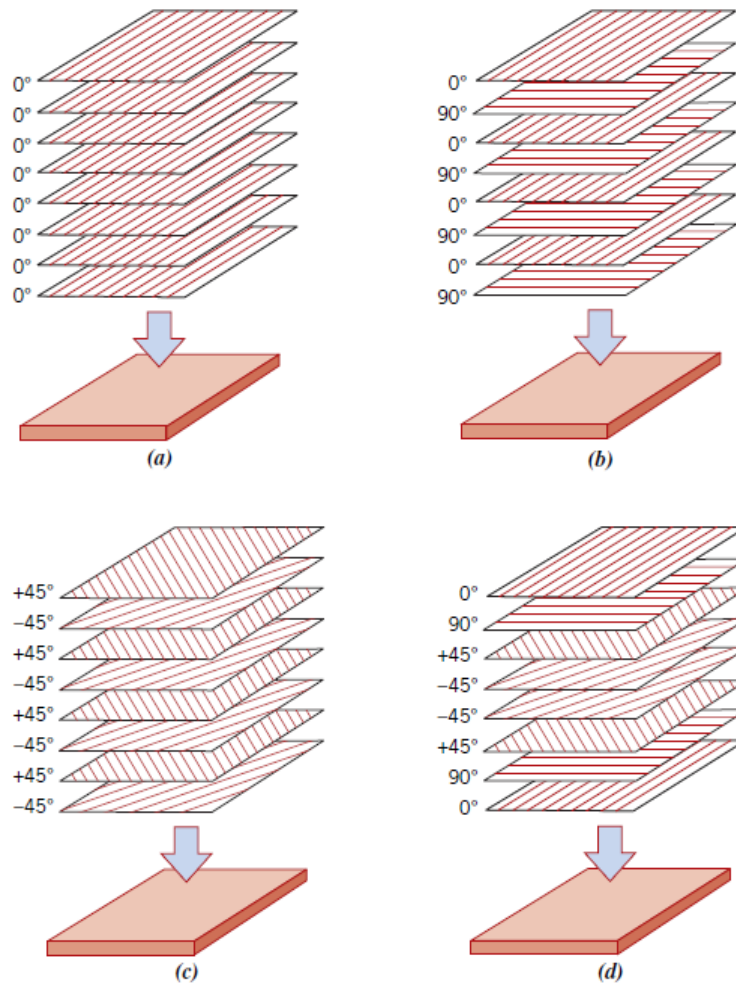


Figura 5. Esquema de compuestos laminares. (a) unidireccional; (b) capa cruzada; (c) capas angulares; y (d) multidireccional [34].

De la Figura 5, en (a) se observa la configuración unidireccional en donde todas las capas presentan su mayor resistencia en la misma dirección y sus propiedades en el plano del laminar son altamente anisotrópicas; por otra parte en (b) los laminados de capas cruzadas tienen su mayor resistencia en las orientaciones de 0° y 90° alternadamente y presentan propiedades de isotropía respecto al plano laminar; en (c) los de capas angulares presentan mayor resistencia en direcciones angulares $+\theta$ y $-\theta$ alternadamente (por ejemplo, para $\pm 45^\circ$) como se muestra en la figura, además tienen isotropía en el plano laminar que puede variar de acuerdo a la orientación angular que presente; por último en (d) los laminados multidireccionales tienen varias orientaciones de mayor resistencia y pueden diseñarse para ser más isotrópicos. Un ejemplo clásico de un compuesto laminar, es el *plywood* (madera contrachapada) correspondiente al tipo de capas cruzadas. La alineación del grano de madera de las capas de chapa de la superficie en la dirección larga del *plywood* da como resultado propiedades de flexión óptimas. esto equivale a la alineación de las fibras anatómicas fundamentales. Las chapas de madera adyacentes están orientadas con su dirección de grano perpendicular a las capas adyacentes, proporcionando una resistencia mecánica mejorada en la dirección transversal e igualmente importante, contribuyendo a la estabilidad

dimensional dentro del plano del panel [35], en la Figura 6 se muestra una configuración sencilla del *plywood*.

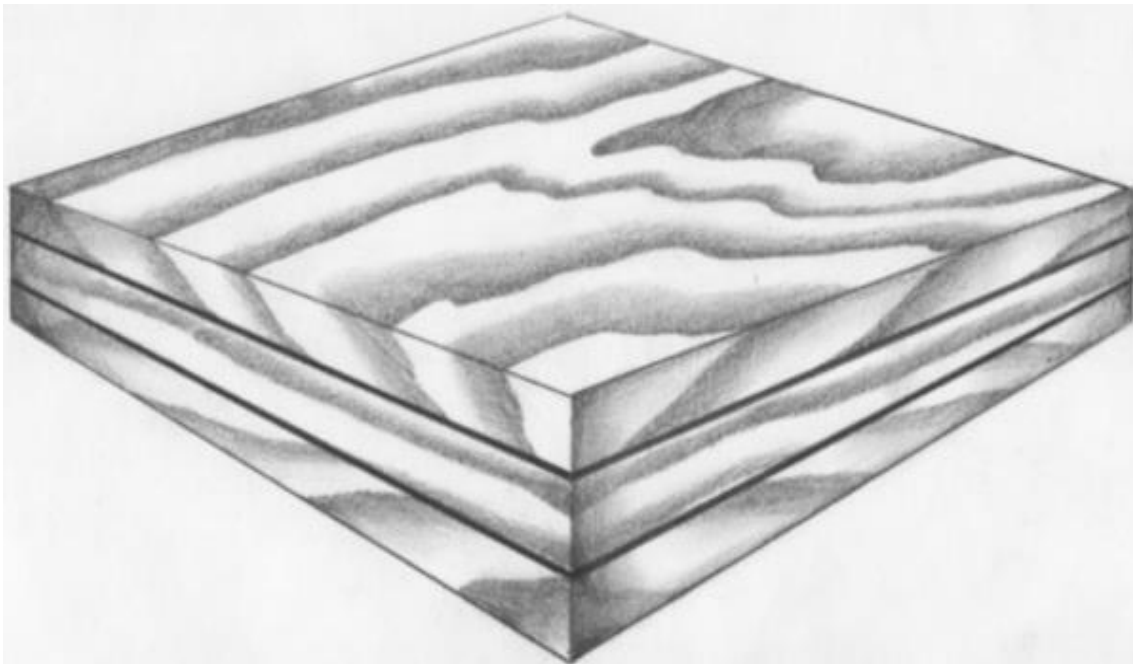


Figura 6. Compuesto laminar *plywood* [35].

Compuesto sándwich. Los compuestos sándwich son una clase de compuesto estructural que consta de dos hojas externas, caras o capas que están separadas y unidas de forma adhesiva a un núcleo más grueso, en la Figura 7 se muestra la configuración de este compuesto. Las capas exteriores están hechas de un material relativamente rígido y resistente. El material del núcleo es liviano (la densidad del núcleo suele ser menor a $0,25 \text{ g/cm}^3$ [34]). La rigidez del panel depende principalmente de las propiedades del material del núcleo y el espesor del núcleo [34].

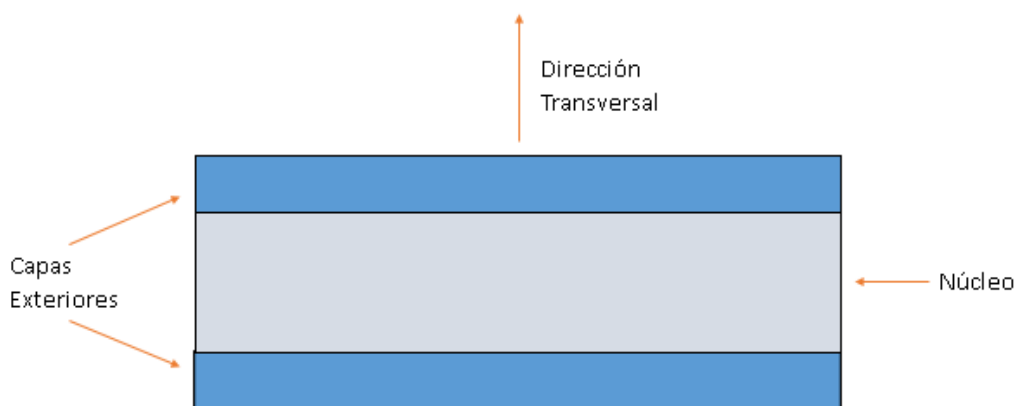


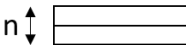
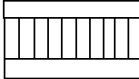
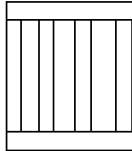
Figura 7. Diagrama esquemático de un compuesto estructural tipo sándwich [34].

Una principal ventaja del compuesto sándwich es su rentabilidad, porque los materiales del núcleo son menos costosos que los materiales utilizados para las caras. Entre las características físicas más favorables de estos materiales de cara a su aplicación, caben citar las siguientes:

a) **Ligereza.** Dado que el núcleo suele ser de mayor espesor que las capas externas y su densidad mucho menor, la densidad total del compuesto se ve reducido en gran medida.

b) **Rigidez a flexión.** Para ilustrar este aspecto, en la Tabla 2 se muestra una comparación entre la rigidez a flexión, resistencia y peso de 3 configuraciones estructurales. En la primera, el material sólido hecho de aluminio de espesor n se toma como referente. En la segunda configuración, se forma un compuesto sándwich con dos capas de aluminio de espesor, n , y un núcleo tipo panel también de aluminio con un espesor, n . En la tercera configuración ocurre lo mismo, solo que ahora el espesor del núcleo es $3n$ [36].

Tabla 2. Rigidez a flexión y resistencia relativa de un compuesto estructural tipo sándwich [37].

	Material Solido	Espesor del Núcleo: n	Espesor del Núcleo: $3n$
			
Rigidez a Flexión	1	7	37
Resistencia	1	3.5	9.25
Peso	1	1.03	1.06

De la Tabla 2. se desprende que, sin prácticamente aumento de peso en el compuesto, la rigidez a flexión se incrementa considerablemente en la segunda y tercera configuración respecto a la primera, del mismo modo con la resistencia.

c) **Aislamiento térmico.** Dado que los materiales usados como núcleo suelen ser materiales aislantes térmicos, el resultado final conlleva a una disminución de la conductividad térmica del panel en comparación con un panel hecho a base solamente del material de las capas externas [36].

En la Figura 8 se recogen los materiales más utilizados para capas y para núcleos, así como sus disposiciones dentro del compuesto tipo sándwich.

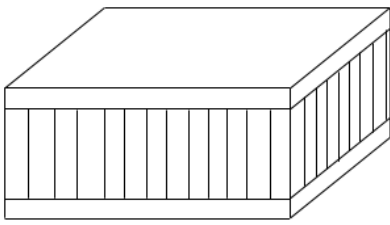
COMPUESTO ESTRUCTURAL	CAPAS	NÚCLEOS
	METALES	ESPUMA DE POLIURETANO
	LAMINADOS	
	CONTRACHAPADOS TERMOPLÁSTICOS	ESPUMA DE POLIESTIRENO

Figura 8. Materiales más usados en la fabricación de capas y núcleos de un compuesto tipo sándwich [36].

2.2 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Cuando se tienen dos cuerpos en contacto y estos se encuentran a diferentes temperaturas ocurre una transferencia de calor del cuerpo caliente al cuerpo frío, esto se origina en la superficie de contacto donde las moléculas del cuerpo caliente que tienen una energía cinética promedio mayor que las del cuerpo frío transfieren parte de su energía a las moléculas del cuerpo frío, ocasionando un descenso gradual de la temperatura del cuerpo caliente y un aumento de temperatura en el cuerpo frío [38]. En la Figura 9 se muestra un diagrama del proceso de transferencia de calor.

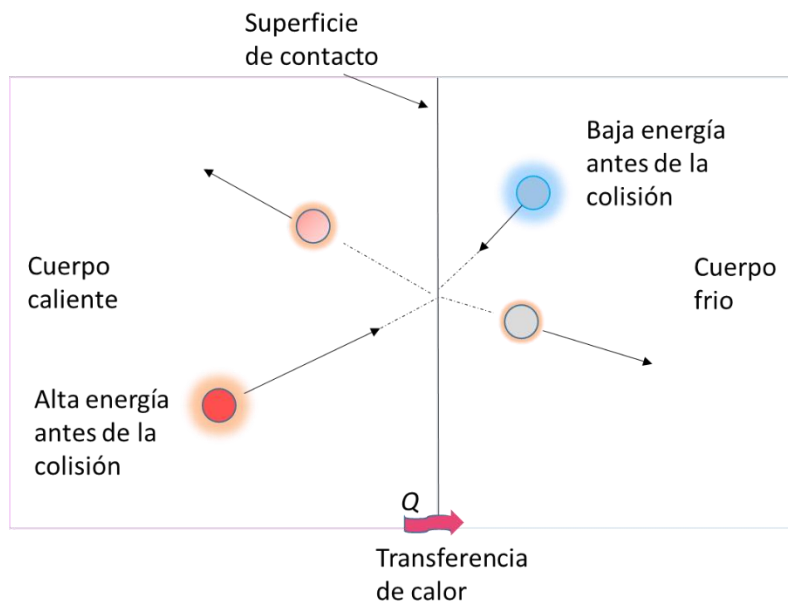


Figura 9. Diagrama del proceso de transferencia de calor entre dos cuerpos a diferentes temperaturas que están en contacto [38].

De la Figura 9, se observa que después de la colisión la molécula con mayor energía antes de la colisión pierde parte de su energía en la colisión y la molécula que se encontraba con menor energía antes de la colisión gana energía durante la colisión. La

repetición de este suceso en toda la superficie en contacto genera el aumento de temperatura en el cuerpo frío y una disminución de la misma en el cuerpo caliente, cabe resaltar que a mayor superficie de contacto habrá una mayor número de colisiones y por ende el proceso de transferencia de calor será más rápido [38]. Además, una mayor diferencia de temperatura entre el cuerpo frío y el cuerpo caliente conllevará a una mayor transferencia de calor durante el choque, incrementando rápidamente la temperatura del cuerpo frío y disminuyendo a su vez la temperatura del cuerpo caliente. Por otro lado, cuanto mayor sea el espesor del material mayor será el tiempo que llevará transferir la misma cantidad de calor ya que el proceso se da mediante una serie de colisiones moleculares y al haber más moléculas será necesario un mayor tiempo para completar el proceso. Los resultados experimentales que corroboran estas afirmaciones fueron desarrollados por Fourier a principios del siglo XIX.

Fourier estableció su teoría en base al estudio del flujo de calor a través de materiales isotrópicos homogéneos en los que se considera que la conductividad térmica es la misma en todas las direcciones. Considerando que el calor fluye en las tres direcciones de los ejes coordenados, el flujo total de calor queda definido por la ecuación (1) [39].

$$\vec{Q} = -\lambda \vec{\nabla}T \quad (1)$$

Donde \vec{Q} es el vector flujo total de calor por unidad de área, λ es el valor de la conductividad térmica, y $\vec{\nabla}T$ el vector de gradiente de temperatura. En el caso de que el material sea anisótropo la transmisión del calor depende de la dirección del flujo térmico, y la conductividad térmica se expresaría en forma de tensor tal como se muestra en la ecuación 2 [40].

$$\vec{Q} = -[\lambda_{ij}]\vec{\nabla}T \quad (2)$$

En el caso del material isotrópico, la ecuación 1 puede expresarse en sus componentes vectoriales como se muestra en la ecuación 3 [39].

$$\vec{Q} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \hat{k} \right) \quad (3)$$

Donde $\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial T}{\partial y}$, $\frac{\partial T}{\partial z}$ son las derivadas parciales de la temperatura ya que esta varía en los tres ejes, y \hat{i} , \hat{j} , \hat{k} son los vectores unitarios de los ejes coordenados. Ahora de la ecuación 3 podemos expresar el flujo de calor por unidad de área en cada una de las direcciones de los ejes coordenados, como se muestran en las ecuaciones 4, 5 y 6 [39].

$$Q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4)$$

$$Q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \quad (5)$$

$$Q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (6)$$

Donde Q_x es el flujo de calor por unidad de área en la dirección x , Q_y es el flujo de calor por unidad de área en la dirección y , y Q_z es el flujo de calor por unidad de área en la dirección z . Las ecuaciones 4, 5, y 6, son conocidas como la forma unidimensional de la Ley de Fourier.

De la ecuación 4, si consideramos un flujo de calor unidimensional a lo largo del eje x , esta se puede expresar como una diferencial tal como se muestra en la ecuación 7.

$$Q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

Sea A el área de sección transversal que atraviesa el flujo de calor Q_x en la dirección x , entonces:

$$Q_x = \frac{Q_x}{A} \quad (8)$$

$$Q_x = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

Ahora, considerando la conductividad térmica constante para un material sólido de espesor L , con temperaturas T_1 y T_2 en caras opuestas del sólido en la dirección x , tal como se muestra en la Figura 10, donde $T_1 > T_2$.

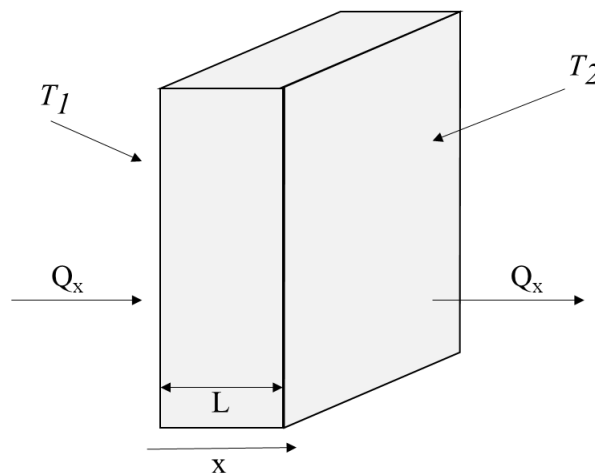


Figura 10. Conducción de calor unidimensional en un sólido [39].

De la ecuación 9, considerando el sistema de la Figura 10 en estado estacionario, se puede integrar y obtener la ecuación 10.

$$Q_x = \frac{\lambda A(T_1 - T_2)}{L} \quad (10)$$

La conductividad térmica de un material depende de la composición química de la sustancia o sustancias que lo componen, de la fase (gaseosa, líquida o sólida) en que se encuentra, de su estructura cristalina si se trata de un sólido, de las temperaturas en sus superficies opuestas, de la temperatura ambiental, de la presión a que está sometido, de la humedad relativa, de las condiciones de medición y de si es o no un material homogéneo [41]. En la Tabla 3 se muestran la conductividad térmica de algunos materiales más usados en construcción.

Tabla 3. Conductividad térmica de algunos materiales de construcción [42]–[46].

Materiales	Conductividad térmica $Wm^{-1}C^{-1}$
Poliestireno expandido (Tecnopor)	0,0316 – 0,0354
Panel de Lana de Vidrio	0,032 – 0,045
Lana Poliéster Ecoterm	0,063
Plancha Drywall Volcanita 1/2'' (yeso y cartón)	0,26
Ladrillo Aislante	0,15
Ladrillo Rojo	0,6

Los valores de conductividad térmica de los materiales descritos en la Tabla 3, son valores referenciales que han sido obtenidos bajo determinadas condiciones de medida.

Un derivado de la ecuación del flujo de calor unidimensional a través de un sólido, es la ecuación del flujo de calor unidimensional a través de 2 o más sólidos juntos dispuestos en serie. Por ejemplo, para 2 sólidos, solido 1 y solido 2, de espesor e_1 y e_2 con conductividad térmica λ_1 y λ_2 respectivamente, que están en contacto térmico una con otra, como se muestra en la Figura 11.

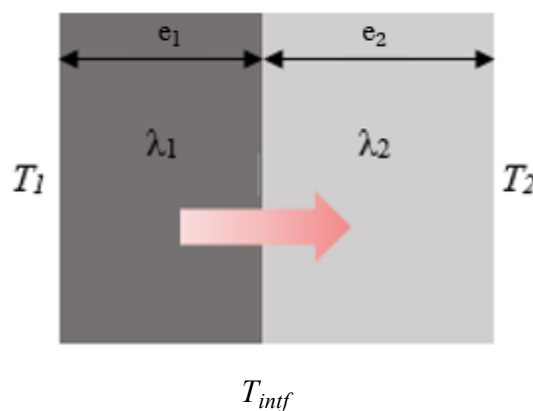


Figura 11. Transferencia de calor por conducción a través de dos sólidos en contacto térmico entre sí.

En la Figura 11, T_1 y T_2 son las temperaturas de las superficies exteriores, y T_{intf} la temperatura en la interfaz de contacto del sólido 1 y el sólido 2. En estado estacionario, el flujo de calor a través del sólido 1 es igual al flujo de calor a través del sólido 2.

$$Q_1 = \frac{\lambda_1 A (T_1 - T_{intf})}{e_1} \quad (11)$$

$$Q_2 = \frac{\lambda_2 A (T - T_2)}{e_2} \quad (12)$$

$$Q_1 = Q_2 \quad (13)$$

$$\frac{\lambda_1 A (T_1 - T_{intf})}{e_1} = \frac{\lambda_2 A (T_{intf} - T_2)}{e_2} \quad (14)$$

De este modo el valor de T_{intf} queda determinado por la siguiente ecuación.

$$T_{intf} = (\lambda_1 e_2 T_1 + \lambda_2 e_1 T_2) / (\lambda_1 e_2 + \lambda_2 e_1) \quad (15)$$

Reemplazando el valor de T en la ecuación 3, se tiene.

$$Q = \frac{A (T_1 - T_2)}{\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2}} \quad (16)$$

Siendo \dot{Q} el flujo de calor en el sistema.

Para una placa compuesta por diferentes materiales en serie, con espesores e_1, e_2, \dots y conductividad térmica $\lambda_1, \lambda_2, \dots$, el flujo de calor en la placa una vez alcanzado el estado estacionario está dado por

$$Q = A (T_1 - T_2) / \sum (e_i / \lambda_i) \quad (17)$$

Donde T_1 y T_2 son las temperaturas de las superficies exteriores opuestas de la placa, las cuales se mantienen constantes.

2.3 EQUIPO DE PLACA CALIENTE CON GUARDA

El equipo denominado placa caliente con guarda, es un equipo diseñado para medir flujo de calor en estado estacionario a través de muestras planas y homogéneas cuando sus superficies están en contacto con sólidos paralelos mantenidos a temperaturas constantes. Estos equipos se rigen bajo la Norma ASTM C-177 que es un método primario o absoluto en el cual además se establece los criterios para su construcción y operación [7].

En la Figura 12 se muestra un esquema de la configuración de un equipo de placa caliente con guarda. Este esquema consta de dos partes, un conjunto de superficie caliente y dos conjuntos de superficies frías.



Figura 12. Esquema de configuración de un aparato de placa caliente de doble muestra.

Este esquema es correspondiente a un equipo de placa caliente con guarda de doble cara o doble lado de medición y flujo de calor vertical. En este tipo de configuración se realizan pruebas a dos muestras del mismo tipo y en iguales condiciones al mismo tiempo donde idealmente se genera un flujo de calor vertical desde el centro (conjunto de placa caliente) hacia los extremos (conjunto de placas frías). A continuación, se detalla la función de cada una de las partes que conforman esta configuración de un aparato de placa caliente con guarda y la ley física que rige este método de prueba.

Partes de un equipo de placa caliente con guarda de doble muestra

Conjunto de superficies calientes. El conjunto de placas calientes está conformado por dos placas, una denominada zona de medición que se encuentra aislada térmicamente por un gap de la otra placa llamada guarda primaria. Cada uno de estos componentes cumplen un rol importante en estos equipos de placa caliente con guarda, tal como se describe a continuación:

- a) **Zona de medición.** Está ubicada en parte central del conjunto de superficies calientes, su función es proporcionar la potencia (flujo de calor por unidad de tiempo) para la medición mediante un calentador intercalado entre sus caras. El tamaño de la zona de medición define el volumen real de la prueba.
- b) **Zona de guarda.** Tiene como función principal proporcionar las condiciones térmicas adecuadas dentro del volumen de prueba para reducir el flujo lateral

de calor dentro del aparato y está ubicado concéntrica y alrededor de la placa caliente. Se compone de uno o más calentadores intercalados entre sus caras.

Conjunto de superficies frías. Está conformado por dos placas frías, una ubicada en la parte inferior de una de las muestras y la otra ubicada en la parte superior de la otra muestra. Su función es disipar el calor generado en el conjunto de placa caliente y mantener a una temperatura homogénea a la cara de la muestra que estén en contacto con ella e inferior respecto a la otra cara que se encuentra en contacto con la placa caliente. Para ello, estas placas frías suelen estar conectadas a un sistema de refrigeración que le permitan mantener una temperatura deseada en estado estacionario.

Respecto a las muestras, la Norma ASTM C177 establece algunas recomendaciones para la elaboración de las muestras a medir. Así, el espesor máximo recomendado para la muestra es un tercio de la dimensión lineal máxima de la zona de medición, las muestras deben dimensionarse para cubrir toda la zona de medición (es deseable que incluya el gap y el área de la guarda primaria cuando sea posible). Cuando se requieren dos muestras, las muestras deben ser seleccionadas para ser tan similares en espesor y características térmicas como sea posible. Además, si es necesario las muestras deben contar con un aislamiento de borde que limite el flujo de calor en el borde lateral de la muestra, la selección de un material de aislamiento de borde dependerá de las condiciones de prueba.

En un equipo de placa caliente con guarda ideal de doble cara, el flujo de calor a través de dos muestras idénticas (material y dimensiones), homogéneas (conductividad independiente de la posición) e isotrópicas (conductividad independiente de la dirección), es unidimensional (flujo de calor unidireccional) e independiente del tiempo (estado estacionario) y se considera que las superficies isotérmicas frías y calientes presentan contacto perfecto con las muestras. Bajo estas condiciones la conductividad térmica λ de las muestras se puede determinar a partir del flujo de calor, Q que atraviesa el área total de medición, $2A$; el variación de temperatura entre la zona de medición y el promedio de temperaturas de las placas frías, ΔT ; y el espesor promedio de las muestras, e , en base a la ley de Fourier mediante la ecuación [47]:

$$\lambda = \frac{Qe}{2A\Delta T} \quad (18)$$

La Norma ASTM C-177 establece una secuencia de pasos para realizar una adecuada medición de los parámetros que permiten determinar el valor de la conductividad térmica, es decir, las temperaturas en las superficies de los conjuntos de placa caliente y placas frías, y la potencia suministrada a la placa caliente y a la guarda primaria.

A continuación, se enumeran la secuencia de pasos necesarios para realizar una adecuada medición:

1. Para una prueba de doble cara, seleccione un par de muestras en igualdad de condiciones, mida y registre la masa y las dimensiones de las muestras.
2. Instale las muestras en el equipo, así como, un aislamiento de borde alrededor de la muestra y una cámara ambiental de ser necesarios.
3. Ajuste los sistemas de calefacción y refrigeración para establecer las condiciones de pruebas deseadas.
4. Inicie la prueba.
5. Registre la hora de inicio y la fecha de prueba al iniciar la toma de datos
6. Después de iniciar la prueba, el sistema debe alcanzar un estado térmico estacionario y debe cumplirse que la diferencia de temperatura entre las superficies de la guarda primaria y la sección de medida sea menor de 0,2 °C durante al menos dos horas, para que el método de prueba sea válido.
7. Después de alcanzar el estado estacionario deseado, tome medidas durante una hora y media.
8. Al finalizar la prueba retire la muestra y registre cualquier cambio en las características físicas de la muestra, así como en los componentes del equipo de placa caliente con guarda.

Finalmente, una vez completada la secuencia de los pasos descritos, se debe realizar el tratamiento de datos para determinar el valor de la conductividad así como el valor de la incertidumbre [7].

Los aparatos de placa caliente con guarda como cualquier otro aparato de medición están propensos errores en su medición, sin embargo, estos errores pueden reducirse si se tienen en cuenta los siguientes criterios [47]:

1. Mantener condiciones de temperatura constante en las superficies de las placas caliente y fría.
2. Las superficies de las placas deben ser lo suficientemente rígidas para mantener un valor de planicidad y paralelismo establecido.
3. Las superficies de las placas deben tener una alta conductividad térmica comparada con la conductividad térmica de la muestra que se desee medir, esto con el fin de asegurar superficies isotermas.

4. Las superficies de las placas deben mantener un valor de emisividad entre 0,8 y 0,9 para evitar la dependencia de la medición sobre la emisividad de las placas.
5. Los materiales de construcción de las placas deben ser tales que aseguren una adecuada capacidad y compatibilidad bajo condiciones de operación extremas
6. El elemento calefactor que se use para generar el flujo de calor en la placa caliente se debe colocar en la dirección radial en forma tal que produzca una distribución uniforme del flujo de calor en toda la placa.
7. El elemento calefactor debe estar simétricamente centrado en la dirección axial para mantener temperaturas iguales en las caras opuestas de la placa caliente.
8. El elemento calefactor que se use para generar el flujo de calor de la guarda se debe colocar en forma tal que produzca una distribución de calor en la guarda que reduzca al máximo transferencia de calor radial en el borde de la placa caliente.
9. El espacio que queda al unir las placas calientes y la guarda debe ser uniforme. su ancho debe ser lo más pequeño posible para minimizar tanto el flujo de calor Q como los efectos de distorsión de temperatura dentro del espécimen cerca de la separación.
10. Los elementos de unión de la placa caliente con la guarda deben tener una resistencia térmica alta, deben ser de sección transversal pequeña y lo más largo que se pueda para evitar transferencia de calor entre ellos.
11. Se debe asegurar un buen contacto térmico y uniforme entre las superficies del espécimen y las placas.

Aun siguiendo los criterios mencionados, el resultado de una medición siempre está sujeta a errores. Para un equipo de placa caliente con guarda, los errores en las mediciones son la incertidumbre en: la razón de transferencia de calor, la diferencia de temperaturas, el área de medición, y el espesor de la muestra. Esta incertidumbre se calcula mediante la ecuación de propagación de errores como se muestra a continuación:

$$\frac{\mu_\lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{\mu_Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\mu_e}{e}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{2A}}{2A}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{\Delta T}}{\Delta T}\right)^2} \quad (19)$$

Donde μ_λ es la incertidumbre del valor de la conductividad térmica, μ_Q es la incertidumbre del flujo de calor, μ_e es la incertidumbre del espesor, μ_{2A} es la incertidumbre del área total de medición, $\mu_{\Delta T}$ es la incertidumbre de la diferencia de temperatura entre la placa caliente y la placa fría.

Además, hay que tener en cuenta que el valor del flujo de calor es el resultado de la corriente y el voltaje de la fuente a la placa caliente. Su incertidumbre se determina en la ecuación.

$$\frac{\mu_Q}{Q} = \sqrt{\left(\frac{\mu_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\mu_I}{I}\right)^2} \quad (20)$$

Donde μ_V es la incertidumbre debido al tensión eléctrica suministrado a la zona de medición y μ_I es la incertidumbre debido a la corriente eléctrica suministrada a la zona de medición.

CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describen los componentes, características y el modo de uso del equipo de placa caliente con guarda denominado, LAMBDA UNI, construido con los lineamientos dados por la norma ASTM C177, y el cual se encuentra ubicado en el Laboratorio de Ingeniería Física de la Facultad de Ciencias de la UNI. Así también, se describe el proceso de elaboración de las muestras a medir, su caracterización y el proceso de medición.

3.1 MEDIDAS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA: LAMBDA UNI

El equipo medidor de conductividad térmica LAMBDA UNI fue diseñado y construido en base a la norma ASTM C177, en la Figura 13 se muestra el diseño de este equipo.

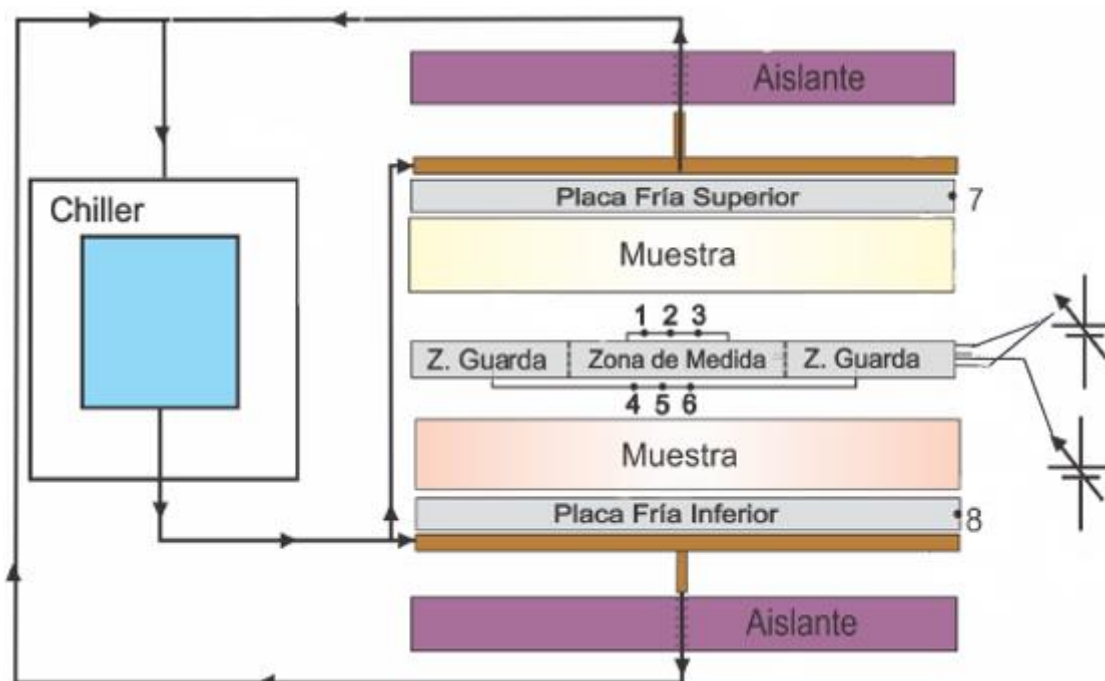


Figura 13. Esquema del equipo de placa caliente con guarda LAMBDA UNI [4].

El equipo LAMBDA UNI fue mejorado desde su construcción inicial (la presentación del esquema inicial se encuentra en los anexos de la tesis de pregrado de J. Piñas [6], y su posterior construcción fue elaborada, también, por J. Piñas; en conjunto con F. Espinoza como parte su tesis de pregrado [14]). En la versión inicial del equipo LAMBDA UNI, el sistema de refrigeración consistía en la circulación de agua por medio de una bomba conectada en serie al equipo LAMBDA UNI y a un tanque lleno de agua. En el desarrollo de esta tesis se ha continuado con la mejora del equipo y, con el apoyo de J. Piñas y F. Espinoza, se adaptó un nuevo sistema de refrigeración mediante un chiller (o sistema refrigerante), el cual permitió un mayor control de la temperatura en las placas frías.

Anteriormente a la instalación del chiller las temperaturas en las placas frías no podían ser establecidas a voluntad, estas eran dependientes de las condiciones climáticas del momento, pudiendo llegar en un día soleado a los 30 °C y en un día nublado a 18 °C. Esto dificultaba la reproducibilidad de los ensayos realizados dado que las potencias a suministrarse tanto a la zona de medición como a la zona de guarda guardan relación con las temperaturas en las placas frías. A continuación, se muestran algunos perfiles de temperatura en las placas frías y la variación de su valor en ensayos realizados en diferentes días.

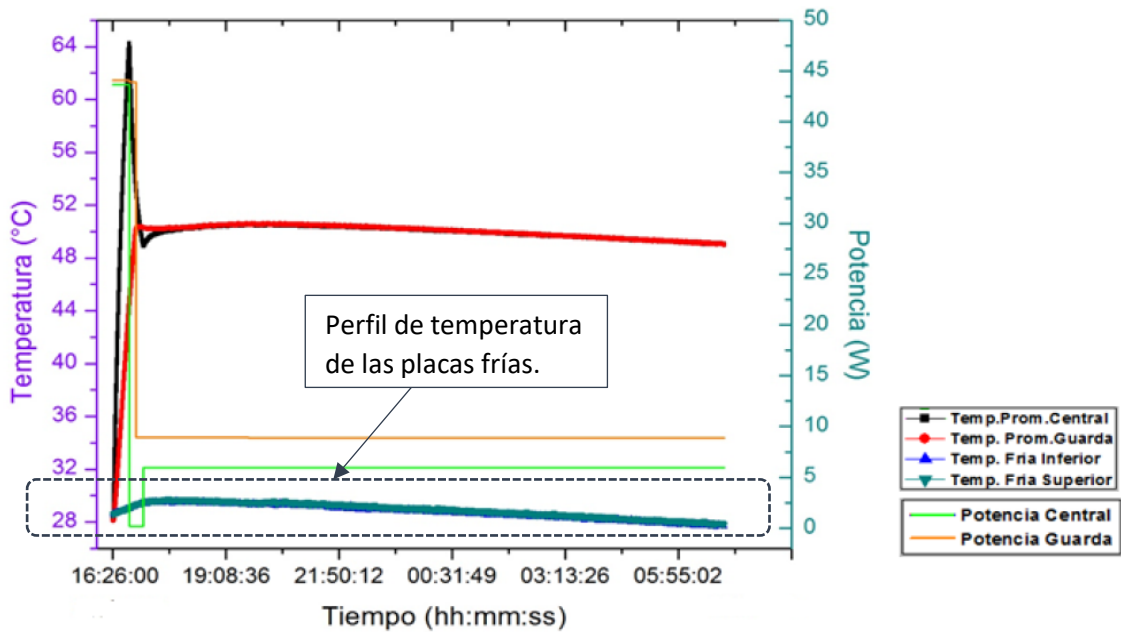


Figura 14. Perfiles de potencia y temperaturas para el ensayo 1 en la determinación de la conductividad térmica de la Ignimbrita de la región Arequipa [48].

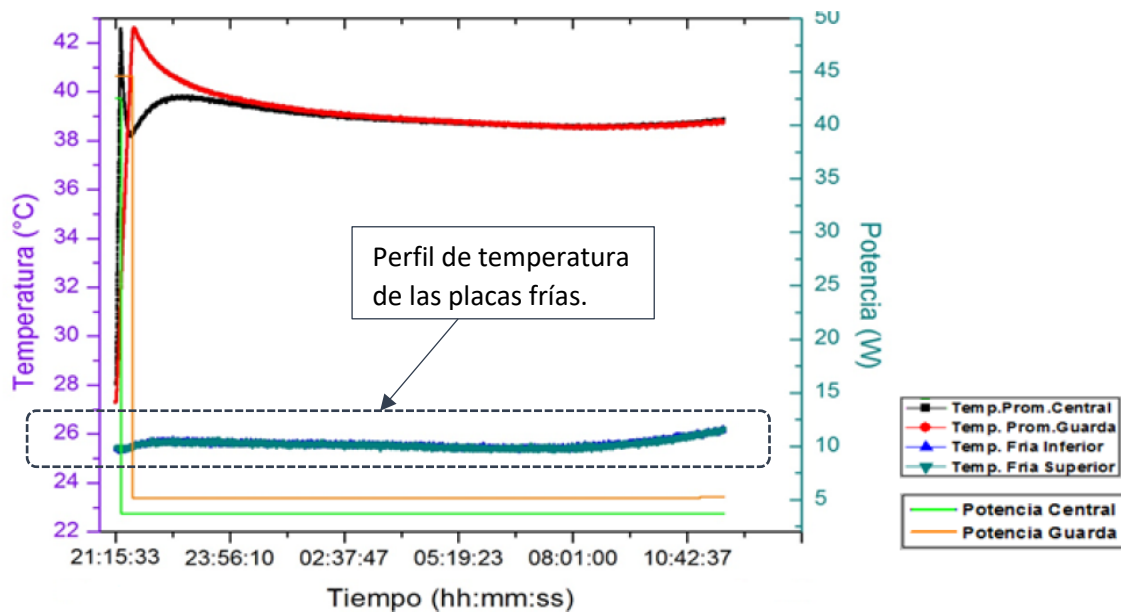


Figura 15. Perfiles de potencia y temperaturas para el ensayo 2 en la determinación de la conductividad térmica de la Ignimbrita de la región Arequipa [48].

De las Figuras 14 y 15, las temperaturas en las placas frías son de 28 °C a 30 °C y de 25 °C a 27 °C dificultando así la reproducibilidad del ensayo en iguales condiciones. Por otro lado, las condiciones de temperatura del ambiente pueden fluctuar en el transcurso de las horas durante el día complicando la tarea de determinar la potencia a suministrar a la zona de medición y zona de guarda para alcanzar el estado estacionario, incrementado así el tiempo de duración del ensayo a realizar.

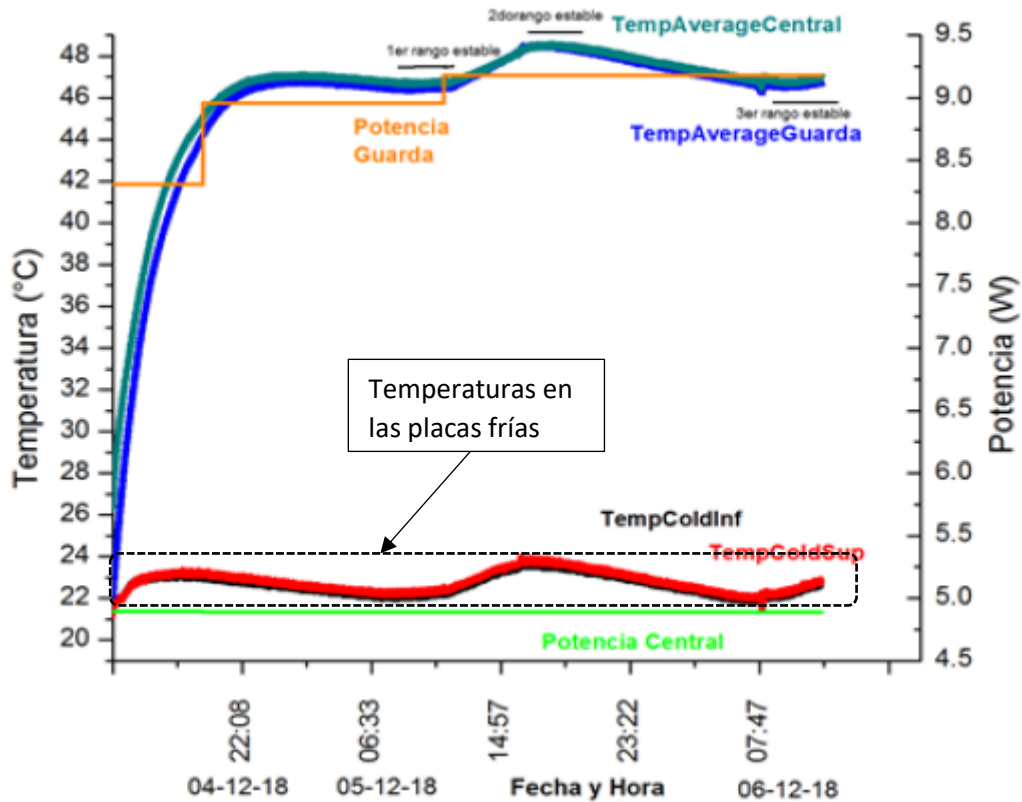


Figura 16. Perfiles de potencia y temperaturas para el ensayo 2 en la determinación de la conductividad térmica de la Ignimbrita de la región Arequipa [49].

De la Figura 16 se observa que, durante las horas de la madrugada las temperaturas en las placas frías descienden aproximadamente de 23 °C a 22 °C entre las 22 h hasta las 6,3 h del día siguiente y manteniéndose estable hasta las 10 h para después volver a subir de 22 °C a los 24 °C desde las 10 h hasta las 17 h, volviendo a descender de 24 °C a 22 °C aproximadamente desde las 19 h hasta las 7, 5 h del día siguiente. Por lo cual, el valor de la potencia suministrada a la zona de guarda y zona de medición debieron ser cambiadas a fin de buscar mantener las condiciones de estado estacionario durante el ensayo.

Además, en el presente trabajo se buscó realizar mediciones bajo condiciones controladas que se asemejen en lo posible a condiciones de temperatura durante las heladas, lo cual es imposible con la condición normal de temperatura en Lima. Siendo por ello, necesario la implementación de un sistema de refrigeración para las placas frías que permita el control de la temperatura y poder trabajar en estos rangos de temperatura.

El equipo LAMBDA UNI actual, consta de un sistema de refrigeración, y otros componentes y características que se detallan a continuación:

3.1.1 Partes y componentes del equipo LAMBDA UNI.

El equipo LAMBDA UNI es un sistema constituido por placas metálicas de superficie plana que conforman zonas de transferencia y disipación de calor, serpentines de cobre, un chiller, fuentes de alimentación, resistencias de nicrom y sensores de temperatura, cada una de los cuales se describe con detalle a continuación:

Zona de medición (ZM). Está formada por el acoplamiento de dos placas circulares de 150 mm, de diámetro y un espesor de 5/16 in, estas placas están hechas de duraluminio. Entre las placas se encuentra una resistencia eléctrica de nicrom de $7,8 \Omega$ ubicada a un radio de calefactor de la zona de medición $r_{C-ZM} = 53$ mm donde hay una ranura concéntrica entre las placas. Esta ranura tiene un diámetro de 8 mm y se aísla eléctricamente del nicrom con anillos cerámicos, en la Figura 17 se muestra un esquema de la configuración en la zona de medición.

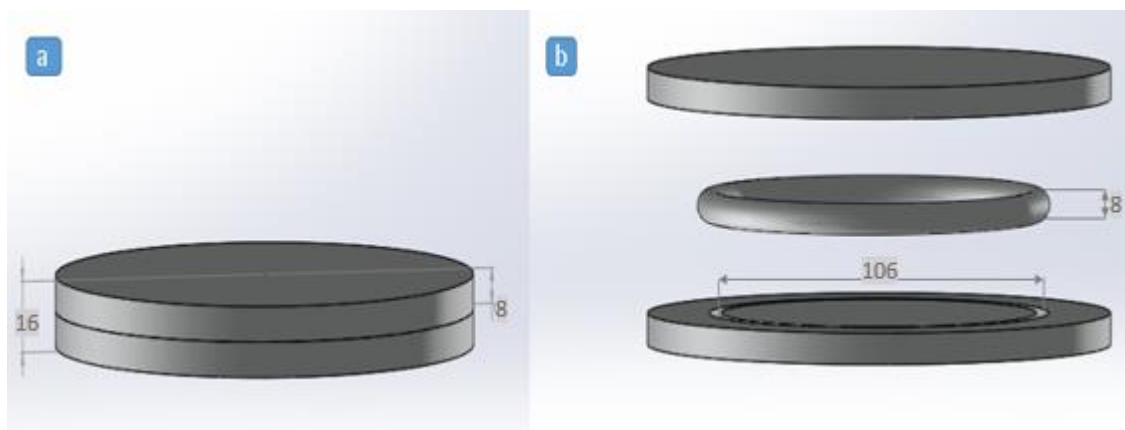


Figura 17. Esquema de la zona de medición: (a) muestra la zona de medición y (b) muestra cómo se constituye internamente la zona de medición. Las medidas representadas están en mm.

De la Figura 17 (b), el anillo ubicado entre las placas es el cerámico en cuyo interior se encuentra la resistencia de nicrom. Esta configuración evita un contacto directo entre el nicrom y la placa de duraluminio.

Zona de guarda (ZG): Está formada por el acoplamiento de dos placas de duraluminio, las cuales tienen una cavidad circular en el centro y son coplanares con la zona de medición de medida. El acoplamiento tiene un diámetro externo de, 375 mm, y un diámetro interno de, 152 mm, dejando así una separación (gap) de 1 mm, respecto de la zona de medición, las superficies de las caras acopladas, presentan ranuras concéntricas ubicadas a un radio de calefactor de la zona de guarda $r_{C-ZG} = 193,5$ mm donde se ubica una resistencia eléctrica de nicrom de $7,8 \Omega$ aisladas eléctricamente de

las placas con anillos de asbesto de 8 mm de diámetro, en la Figura 18 se muestra un esquema de la configuración en la zona de guarda.

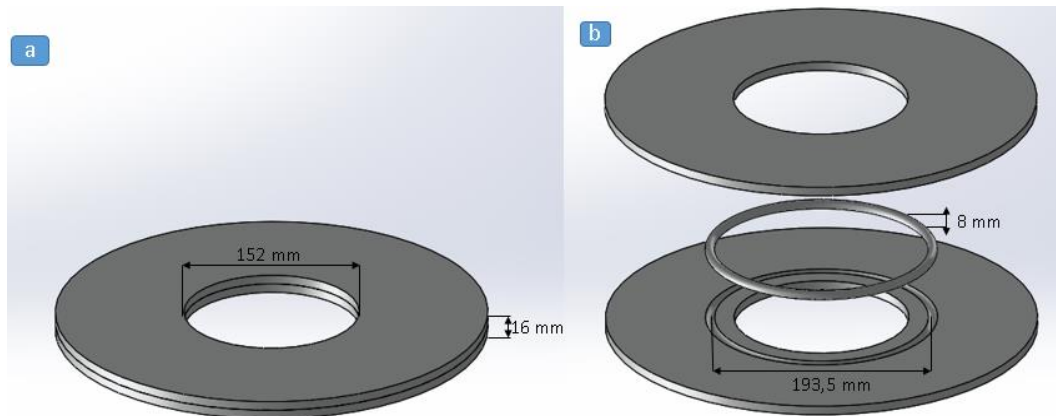


Figura 18. Esquema de la zona de guarda: (a) muestra la zona de guarda y (b) muestra cómo se constituye internamente la zona de guarda.

De la Figura 18 (b), de modo similar que en la placa de la zona de medición el nicrom se encuentra en el interior del anillo de asbesto, impidiendo el contacto directo entre el duraluminio y el nicrom.

Placas frías. Son placas circulares de duraluminio de, 375 mm, de diámetro y con un espesor de, 5/16 in. Están ubicadas en la parte inferior y superior del sistema, en ambos casos, una de sus superficies está en contacto con una cara de la muestra y la otra con un serpentín de cobre. En la Figura 19 se muestra un esquema de su ubicación.

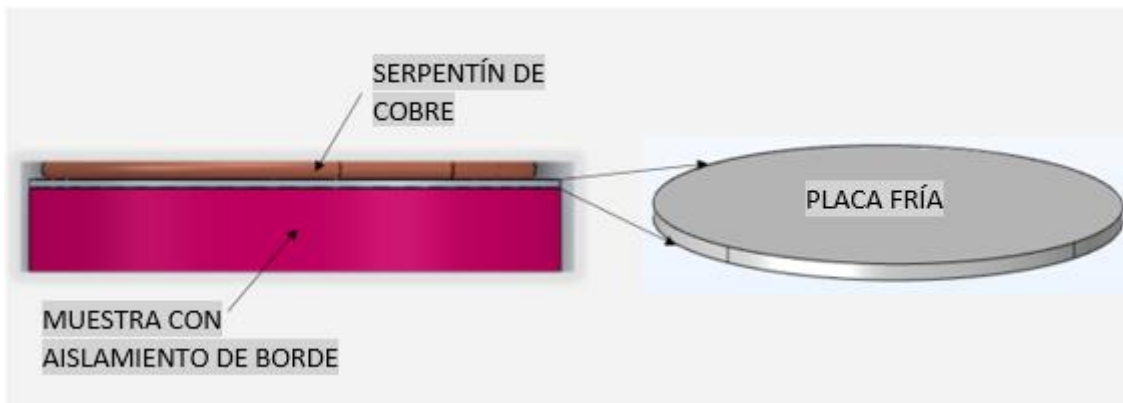


Figura 19. Esquema de ubicación de la placa fría.

Serpentines de cobre. tienen un diámetro de, 0,25 in, y un paso de, 0,5 in, por donde circula un refrigerante, los serpentines se ubican entre un aislante térmico y una de las superficies de cada placa fría respectivamente. En la Figura 20 se muestra un esquema de su ubicación.

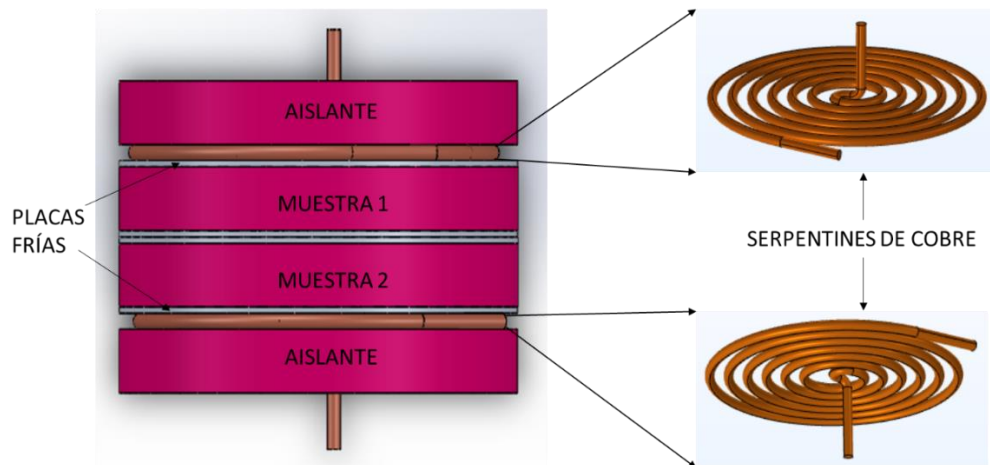


Figura 20. Esquema de ubicación de los serpentines de Cobre.

Refrigerante y chiller. El refrigerante empleado puede ser agua o alcohol, siendo alcohol el refrigerante empleado en los ensayos realizados, que recircula por el sistema a través de una manguera cubierta con un aislante térmico tipo espuma conectada a un serpentín de cobre y un chiller, el cual controla la temperatura del refrigerante en un rango de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y de su circulación en el sistema, permitiendo mantener una temperatura constante en el tiempo a las placas frías. En la Figura 21 se muestra un esquema de las conexiones de los serpentines cobre, el refrigerante y el chiller.

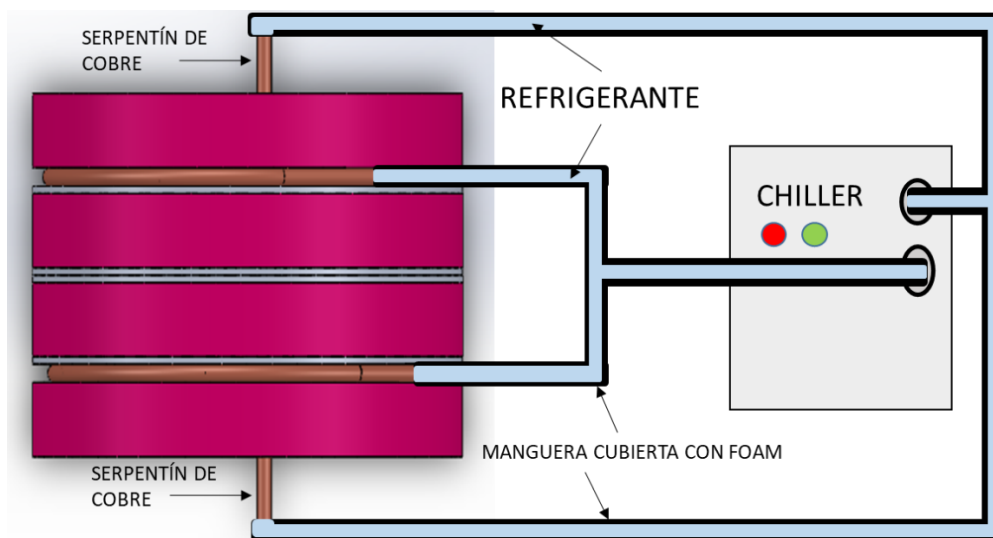


Figura 21. Esquema de conexión serpentines de cobre, refrigerante y chiller.

Durante los ensayos realizados el chiller fue configurado en un rango de trabajo de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Fuentes de alimentación 1 y 2: Son Fuentes de corriente continua con un rango de tensión de 0 V a 30 V y corriente eléctrica de 0 A a 10 A , la fuente 1 suministra de corriente eléctrica a la resistencia de nicrom ubicada en la sección de medida y la fuente 2 a la resistencia de nicrom ubicada en la guarda primaria, tal como se muestra en la Figura 22.

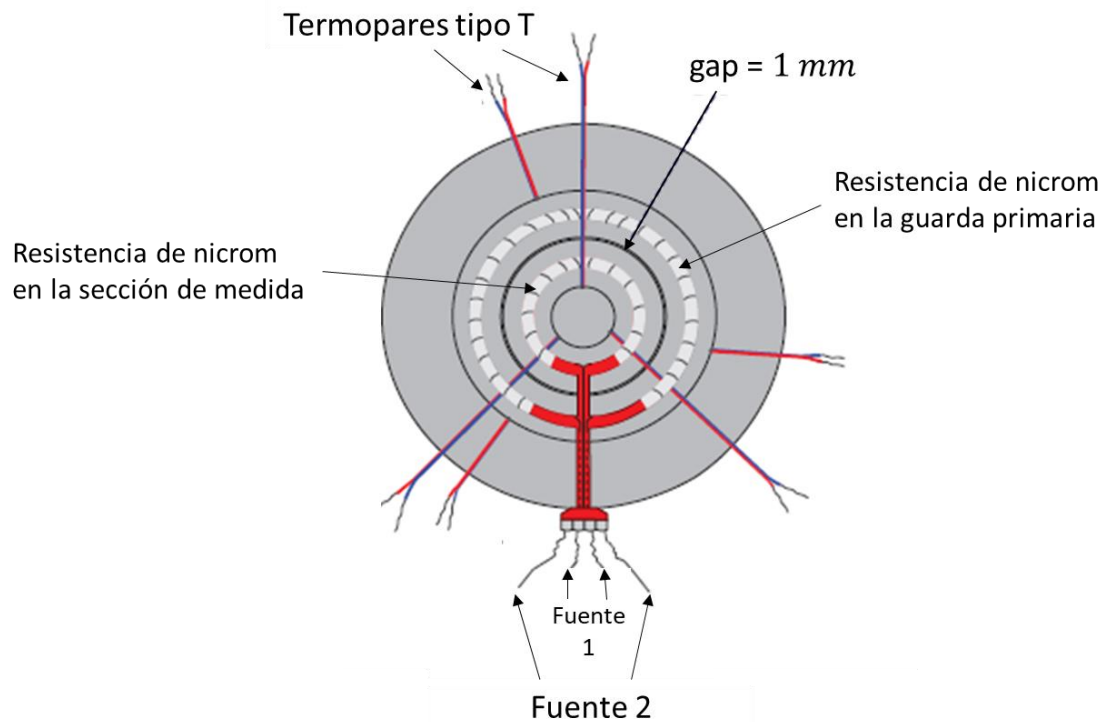


Figura 22. Distribución de termopares tipo T y las fuentes de alimentación a las resistencias de nicrom [14].

Sensores de temperatura: Los sensores de temperatura son termopares tipo T, los cuales tienen un rango de trabajo de, $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, se ubican tres termopares simétricamente distribuidos con un ángulo de separación de $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, y una distancia radial de, $28,7\text{ mm}$, en la sección de medida, del mismo modo se distribuyen tres termopares en la guarda primaria con una distancia radial de, $114,5\text{ mm}$, también se ubica un termopar en cada placa fría. Su distribución en la placa caliente se muestra en la Figura 22.

3.1.2 Muestras

Las muestras elaboradas son tipo laminares y compuestos tipo sándwich, con base cuadrada de 150 mm de lado, y un espesor que varía de 7 mm a 50 mm . Cada muestra está en contacto directo y concéntricas con las superficies de la zona de medición y las superficies de las placas frías.

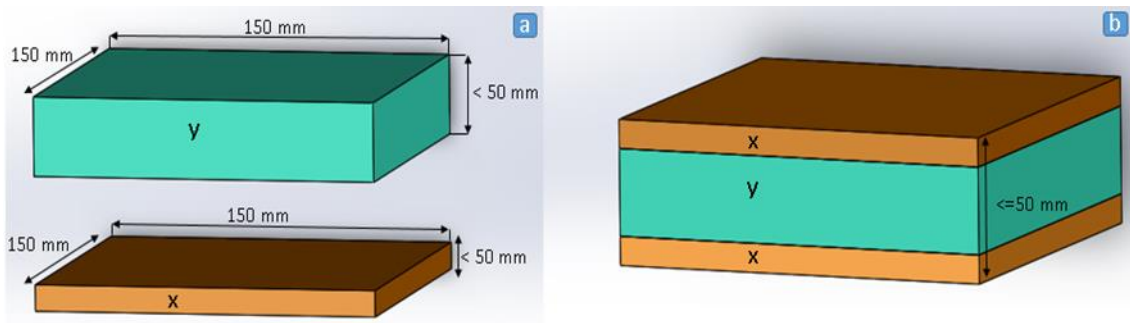


Figura 23. Esquema del diseño para la elaboración del compuesto tipo sándwich: (a) se presentan las muestras laminares “x” y “y”, (b) se observa una muestra tipo sándwich formado por dos muestras laminares “x” y una muestra laminar “y”.

De la Figura 23, las muestras laminares “x” cumplen la función de capas externas y la muestra laminar “y” cumple la función de núcleo, en el compuesto tipo sándwich.

3.1.3 Aislante de borde

Son aislantes térmicos hechos de poliestireno extruido con una conductividad térmica de, $0,035 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. Tienen forma de disco con un diámetro exterior de, 375 mm, con una cavidad en el centro donde debe encajar perfectamente la muestra a medir, estas guardas se elaboran del mismo espesor de las muestras. En la Figura 24 se ilustra la configuración de una muestra con aislante de borde.

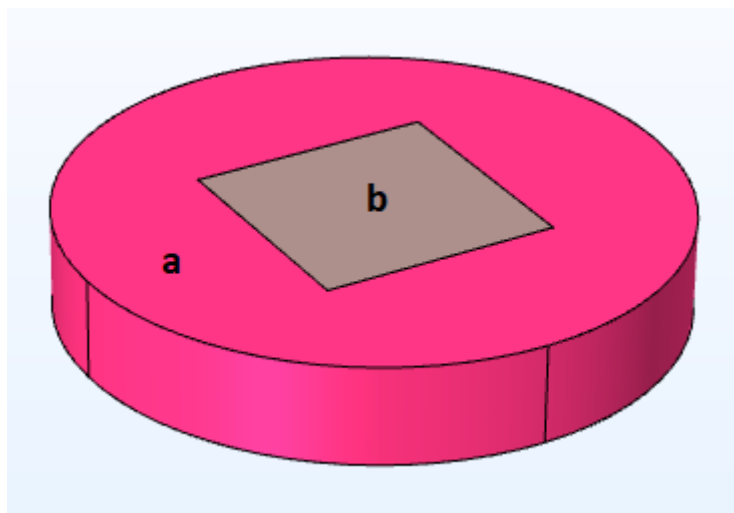


Figura 24. Esquema de una muestra con aislante de borde: (a) es el aislante de borde, (b) es la muestra.

Por último, se muestra en la Figura 25 una imagen real del equipo lambda UNI.



Figura 25. Equipo Lambda UNI.

El equipo LAMBDA UNI permite realizar medidas de conductividad térmica por medio de datos recolectados de temperatura en las placas frías y calientes, la potencia suministrada a los calefactores (resistencias de nicrom), las características del material a medir y las condiciones de medida. Como todo equipo, el uso del LAMBDA UNI se debe realizar siguiendo un instructivo para su correcto uso y reducir los errores en el resultado de la medición.

A continuación, se describen los pasos generales que se deben seguir para realizar las pruebas con el equipo LAMBDA UNI:

1. Preparar las muestras.
2. Realizar la inspección del estado inicial de las muestras, dimensiones y peso.
3. Elaborar los aislantes de borde de las muestras, estas son del mismo espesor de las muestras.
4. Acoplar las muestras con los aislantes de borde, cubrir con plástico film las superficies de las muestras para evitar el ingreso de humedad en las mismas.

5. Colocar las muestras con sus aislantes de borde entre las superficies de las placas frías, y las superficies de placa caliente (sección de medida y guarda primaria).
6. Aislar térmicamente el sistema del entorno (Cubrir todo el sistema con algún material aislante).
7. Encender el chiller y hacer circular el refrigerante a la temperatura deseada.
8. Iniciar el sistema adquisición de datos.
9. Suministrar corriente eléctrica a las resistencias de nicrom para calentar la sección de medida y la guarda primaria, la intensidad de corriente suministrada se ira variando en el tiempo hasta lograr la estabilización térmica del sistema (estado estacionario).
10. Verificar que permanezca en estado estacionario durante al menos 2 horas, de no ser así se debe seguir modificando la intensidad de corriente suministrada hasta cumplir dicha condición.
11. Realizar el almacenamiento de datos de las lecturas registradas por los sensores durante al menos 90 minutos.
12. Apagar el sistema y retirar las muestras.
13. Realizar pruebas de inspección a las muestras retiradas, medición de dimensiones y peso para compararlas con las mediciones realizadas inicialmente.
14. Finalmente, realizar el tratamiento de datos y determinar el valor de la conductividad térmica de las muestras asociados con su incertidumbre correspondiente.

Los pasos mencionados son un instructivo de uso para la realización de las pruebas en la presente tesis, por lo que puede diferir en algunos casos de otras menciones al respecto.

3.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

En el estudio realizado se han elaborado dos tipos de muestras, uno las muestras de tipo laminar y dos las muestras de tipo sándwich. Los materiales usados para la elaboración de muestras tipo sándwich son una combinación de los usados en las muestras tipo laminares.

A continuación, se presenta una descripción breve de cada material (la información descrita es la que se muestra en las fichas técnicas referenciales de cada material):

Lana poliéster (ECOTERM): Ideal para aislamiento acústico al ruido de impacto en viviendas, locales, etc. De acuerdo con las especificaciones propias, el ECOTERM presenta una conductividad térmica de $0,063 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, un espesor de 50 mm, material hecho de 100 % poliéster y una densidad de, $6,3 \text{ kg/m}^3$. En la Figura 26 se muestra una imagen del material.

Panel de lana de vidrio (PLV): Se utiliza ampliamente para construcciones con aislamiento térmico e insonorizadas, en equipos de refrigeración y ahorro energético. De acuerdo con las referencias, el PLV tiene un espesor de 25 mm y una conductividad térmica en el rango de, $0,032 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ a $0,045 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. En la Figura 26 se muestra una imagen del material.

Poliestireno expandido (PLEX): Ideal para aislantes térmicos y juntas estructurales, en cerramientos, particiones, pavimentos, revestimientos y falsos techos, su conductividad térmica de acuerdo a la Tabla 4 oscila entre $0,0316 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ a $0,0354 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. En la Figura 26 se muestra una imagen del material.

Ladrillo pastelero (LP): Ladrillos que van instalados en el techo final de una vivienda, ideal para absorber y disipar la temperatura del sol y aislar la humedad. De acuerdo con las referencias existen distintos valores de conductividad térmica para los distintos tipos de ladrillos, para un ladrillo aislante se considera un valor de conductividad térmica de $0,15 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. En la Figura 26 se muestra una imagen del material.

Drywall Volcanita (DW): Ideal para revestimientos de tabiques, muros, techos, cielo raso y en general en la construcción de cualquier tipo de edificación residencial, comercial e industrial, material hecho de yeso y cartón. De acuerdo con las referencias, el drywall tiene una conductividad térmica de, $0,26 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$. En la Figura 26 se muestra una imagen del material.

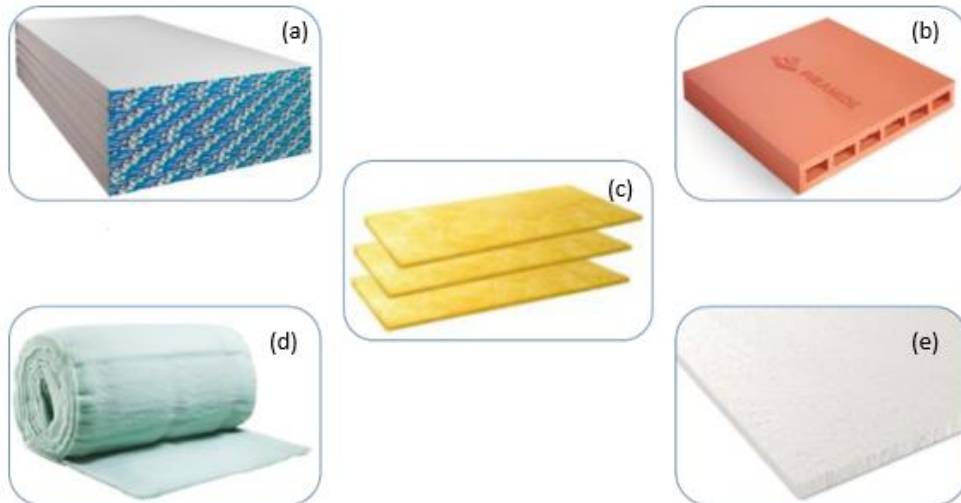


Figura 26. Materiales para la evaluación de su conductividad térmica, (a) DW [50], (b) LP [51], (c) PLV [52], (d) ECOTERM [53], (e) PLEX [54].

Los materiales mostrados en la Figura 26 fueron seleccionados debido a su bajo costo y baja conductividad térmica, a fin de ser evaluados en condiciones de temperatura cercanas a 0 °C, y verificar si un arreglo estructural de estos, como compuestos tipo sándwich, también presentan una baja conductividad térmica en las condiciones mencionadas, y pueda ser usado como elementos de construcción en zonas afectas por heladas.

3.2.1. Elaboración de muestras laminares

Todas las muestras se acondicionaron realizando un corte cuadrado de 15 cm x 15 cm manteniendo su espesor natural de fabricación. En el caso particular del LP se realizaron cortes adicionales para acondicionar el material a las dimensiones apropiadas, en la Figura 27 se pueden observar cada una de las muestras laminares que se han utilizado.

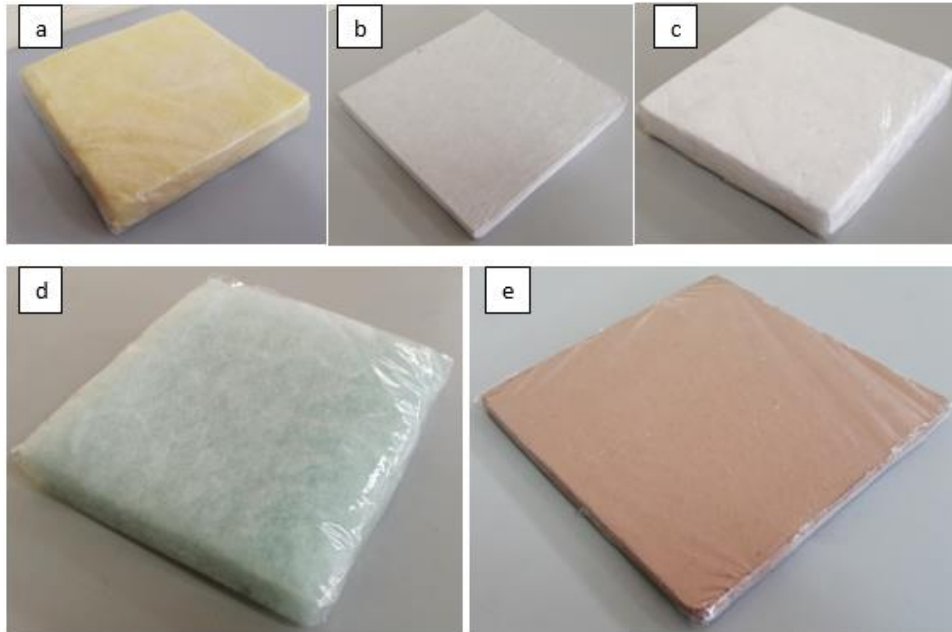


Figura 27. Muestras laminares de: (a) PLV, (b) DW, (c) PLEX, (d) ECOTERM, (e) LP.

3.2.2. Elaboración de muestras tipo sándwich.

Estas muestras constan de tres capas una capa inferior, una capa intermedia llamada núcleo y una capa superior. Para la capa inferior y superior se usó el mismo material tanto ladrillo como drywall, para la capa intermedia se empleó un material diferente en cada muestra, se usaron ecoterm, lana de vidrio y poliestireno expandido. En la Figura 28 se pueden observar cada una de las muestras tipo sándwich que se han elaborado.

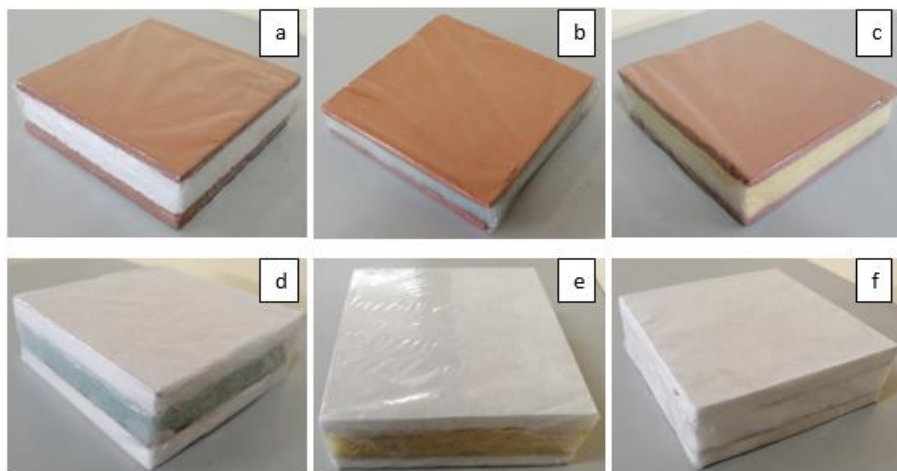


Figura 28. Muestras tipo sándwich: (a) Ladrillo-poliestireno expandido-ladrillo (LP – PLEX-LP), (b) Ladrillo-lana poliéster-ladrillo (LP – ECOTERM-LP), (c) Ladrillo-lana de vidrio-ladrillo (LP-PLV-LP), (d) Drywall-lana poliéster-drywall (DW – ECOTERM-DW), (e) Drywall-lana de vidrio-drywall (DW-PLV-DW), (f) Drywall-poliestireno expandido-drywall (DW-PLEX-DW).

Por cada muestra, ha sido necesario contar con un aislamiento de borde de igual espesor que la muestra a medir, se tiene que elaborar un aislamiento de borde por cada muestra. Los pasos a seguir para la elaboración de los aislantes de borde son los siguientes:

1. Se define el espesor de la muestra
2. Se elabora una muestra en forma de disco de 375 mm de diámetro de poliestireno extruido de, 2" o 1", el que sea mayor al espesor de la muestra.
3. Se realiza un corte cuadrado de 150 mm x 150 mm en el centro del disco
4. Se realiza un corte lateral de modo que el espesor del aislante de borde sea del mismo espesor de la muestra.
5. Finalmente, se verifica la planitud de las caras superficiales del disco con un nivel, de ser necesario se corrige las imperfecciones de la superficie con una lima de grano fino.

En la Figura 29 se muestra el aislante de borde de la muestra de ladrillo-lana de vidrio-ladrillo.

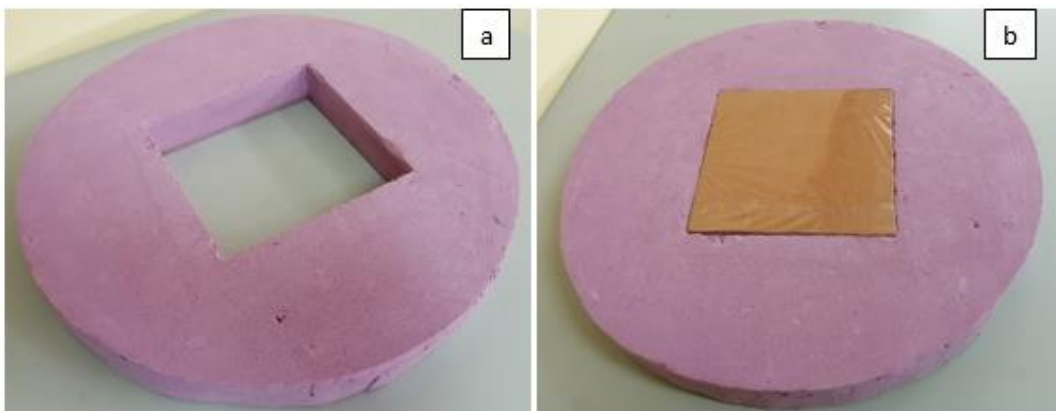


Figura 29. (a) Aislante de borde y (b) muestra de LP-PLV-LP con aislante de borde.

Una vez finalizado el proceso de elaboración y cumplir con los requisitos de las mismas, están listos para su caracterización.

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS (A-INDIVIDUAL Y B-TIPO SÁNDWICH)

Previo a las pruebas de medición de conductividad térmica, se realizaron una serie de medidas de las características físicas iniciales de las muestras, esto para verificar que no se hayan modificado al finalizar las pruebas.

A continuación, en la Tabla 4 y la Tabla 5 se muestran las dimensiones medidas de cada muestra evaluada.

Tabla 4. Medidas de características físicas de las muestras laminares antes de las pruebas de conductividad térmica.

Tipo	Muestra	Espesor e (m)	Área S (cm ²)	Masa antes del ensayo (g)	Masa después del ensayo (g)	Ganancia de masa (%)
Laminar	DW	1,246	225,30	178	180	1,12
	ECOTERM	2,540	225,36	9	9	0
	PLV	2,540	225,18	26	26	0
	PLEX	2,540	225,08	7	7	0
	LP	0,788	225,30	368	370	0,54

Tabla 5. Medidas de características físicas de los compuestos tipo sándwich antes de las pruebas de conductividad térmica.

Tipo	Muestra	Espesor e (m)	Área S (cm ²)	Masa antes del ensayo (g)	Masa después del ensayo (g)	Ganancia de masa (%)
Sándwich	DW-ECOTERM-DW	4,528	225,22	395	396	0,25
	DW-PLV-DW	4,842	225,00	391	392	0,26
	DW-PLEX-DW	5,034	225,24	362	364	0,55
	LP-ECOTERM-LP	3,648	225,30	717	719	0,28
	LP-PLV-LP	3,648	225,22	734	735	0,14
	LP-PLEX-LP	4,116	225,34	715	717	0,28

El incremento de masa en algunas de las muestras se debe a la humedad absorbida por el material o compuesto. Una vez finalizado las medidas de las características físicas iniciales de las muestras se procede con las pruebas de medida de conductividad térmica.

CAPÍTULO 4: CÁLCULOS, DATOS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se definen las ecuaciones para el cálculo de la conductividad térmica e incertidumbre en los ensayos realizados con el equipo LAMBDA UNI, la síntesis de los datos obtenidos, y la presentación de resultados.

4.1. CÁLCULO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica determinada con el equipo Lambda UNI, se define partir de la Ley de Fourier con la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{Q e}{2A\Delta T}$$

Donde Q es el flujo de calor a través del área total de medición $2A$, y es determinado a partir de la tensión V , y la corriente eléctrica I , como la potencia eléctrica suministrada en la zona de medición (P_{ZM}).

$$Q = VI \quad (21)$$

El valor de e representa el espesor promedio del espesor de la muestra superior, e_{sup} , y el espesor de la muestra inferior, e_{inf} .

$$e = (e_{sup} + e_{inf})/2 \quad (22)$$

El área de medición A , se define como el área de la zona de medición A_{ZM} en el plato caliente más la mitad del área del gap A_g que hay entre la zona de medición y guarda.

$$A = A_{ZM} + \frac{A_g}{2} \quad (23)$$

El gradiente de temperatura ΔT , se define como la diferencia entre la temperatura de la zona de medición T_{ZM} y el promedio de temperaturas de las placas frías T_F .

$$\Delta T = T_{ZM} - T_F \quad (24)$$

$$T_F = \frac{T_{Fsup} + T_{Finf}}{2} \quad (25)$$

Donde T_{Fsup} es la temperatura en la placa fría superior y T_{Finf} la temperatura en la placa fría inferior.

4.2. CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE

La Incertidumbre se determina mediante la propagación de incertidumbre en base a los factores presentes en el cálculo de la conductividad térmica. De este modo la incertidumbre asociada a la conductividad térmica se calcula como se muestra en la ecuación 26:

$$\mu_{\lambda} = \lambda \left(\sqrt{\left(\frac{\mu_Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\mu_e}{e}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{2A}}{2A}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{\Delta T}}{\Delta T}\right)^2} \right) \quad (26)$$

A continuación, se define el cálculo para cada una de estas fuentes de incertidumbre:

4.2.1. Incertidumbre debido a la potencia eléctrica en la zona de medición μ_Q

Esta incertidumbre se determina en base a los factores de tensión V y corriente eléctrica I .

$$\mu_Q = Q \left(\sqrt{\left(\frac{\mu_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\mu_I}{I}\right)^2} \right) \quad (27)$$

4.2.2. Incertidumbre debido al espesor promedio de las muestras μ_e

Esta incertidumbre se obtiene promediando la incertidumbre de las medidas de los espesores de las muestras superior e inferior, tal como se muestra en la ecuación 28.

$$\mu_e = \frac{\mu_{e_{sup}} + \mu_{e_{inf}}}{2} \quad (28)$$

Donde:

$\mu_{e_{sup}}$: Incertidumbre debido al espesor de la muestra superior

$\mu_{e_{inf}}$: Incertidumbre debido al espesor de la muestra inferior

4.2.3 Incertidumbre debido al área total de medición μ_{2A}

Esta incertidumbre resulta de la suma de 2 veces la incertidumbre área de la zona de medición y la incertidumbre del área del gap, tal como se muestra en la ecuación 29.

$$\mu_{2A} = 2\mu_{A_{ZM}} + \mu_{A_g} \quad (29)$$

Donde:

μ_{AZM} : Incertidumbre combinada debido al área de la zona de medición.

μ_{Ag} : Incertidumbre combinada debido al área del gap.

4.2.4 Incertidumbre debido al gradiente de temperatura $\mu_{\Delta T}$

Esta incertidumbre se determina como la suma de la incertidumbre de la incertidumbre de la medida de temperatura en la zona de medición y el promedio de incertidumbre de las medidas de la temperatura en la placa fría inferior y placa fría superior, tal como se muestra en la ecuación 30.

$$\mu_{\Delta T} = \mu_{T_{ZM}} + \frac{\mu_{T_{Fsup}} + \mu_{T_{Finf}}}{2} \quad (30)$$

Donde:

$\mu_{T_{ZM}}$: Incertidumbre debido a la temperatura en la zona de medición.

$\mu_{T_{Fsup}}$: Incertidumbre debido a la temperatura en la placa fría superior.

$\mu_{T_{Finf}}$: Incertidumbre debido a la temperatura en la placa fría inferior.

Para asegurar un nivel de confianza del valor de incertidumbre, se multiplica la incertidumbre por un factor de cobertura k.

$$U_{\lambda} = k\mu_{\lambda} \quad (31)$$

Donde:

U_{λ} : Incertidumbre expandida de valor de la conductividad térmica.

Se considera un k=2 para un nivel de confianza del 95% en valor de incertidumbre.

$$U_{\lambda} = 2\mu_{\lambda} \quad (32)$$

EL detalle correspondiente a los cálculos realizados en los ensayos del valor de conductividad térmica e incertidumbres se presenta en el anexo 2.

4.3. DATOS OBTENIDOS

Los datos obtenidos fueron almacenados en un block de notas durante todo el proceso de medición para cada muestra respectivamente. Después, estos datos fueron exportados a Excel donde fueron organizados para posteriormente ser graficados en el software Origin. En este software se realizó el análisis gráfico del comportamiento de la temperaturas y potencias en el tiempo, de modo que, se encontró el rango de tiempo donde se da el estado estacionario. Por otro lado, en Excel también se realiza un proceso similar mediante programación en Visual Basic (VBA) que permitió determinar los puntos de medida en el tiempo que cumplen con la condición establecida por la norma ASTM C-177 en la que la diferencia de temperaturas entre la zona de medición y la zona de guarda no difieran en más de 0,2 °C. Con toda esta información se determinó el intervalo de tiempo exacto del que se extraen los datos para el cálculo de la conductividad térmica.

4.3.1 Datos gráficos

A continuación, se muestran los datos gráficos del comportamiento térmico de las placas calientes y placas frías del sistema, así como la potencia suministrada a la zona de medición y zona de guarda para las muestras laminares.

La Figura 30 muestra el comportamiento en el tiempo de las temperaturas de las placas frías superior (T_{Fsup}) e inferior (T_{Finf}), de la zona de medición (T_{ZM}) y la zona de guarda (T_{ZG}), y las potencias suministradas a la zona de medición (P_{ZM}) y a la zona de guarda (P_{ZG}) durante el ensayo para la determinación de la conductividad térmica del DW.

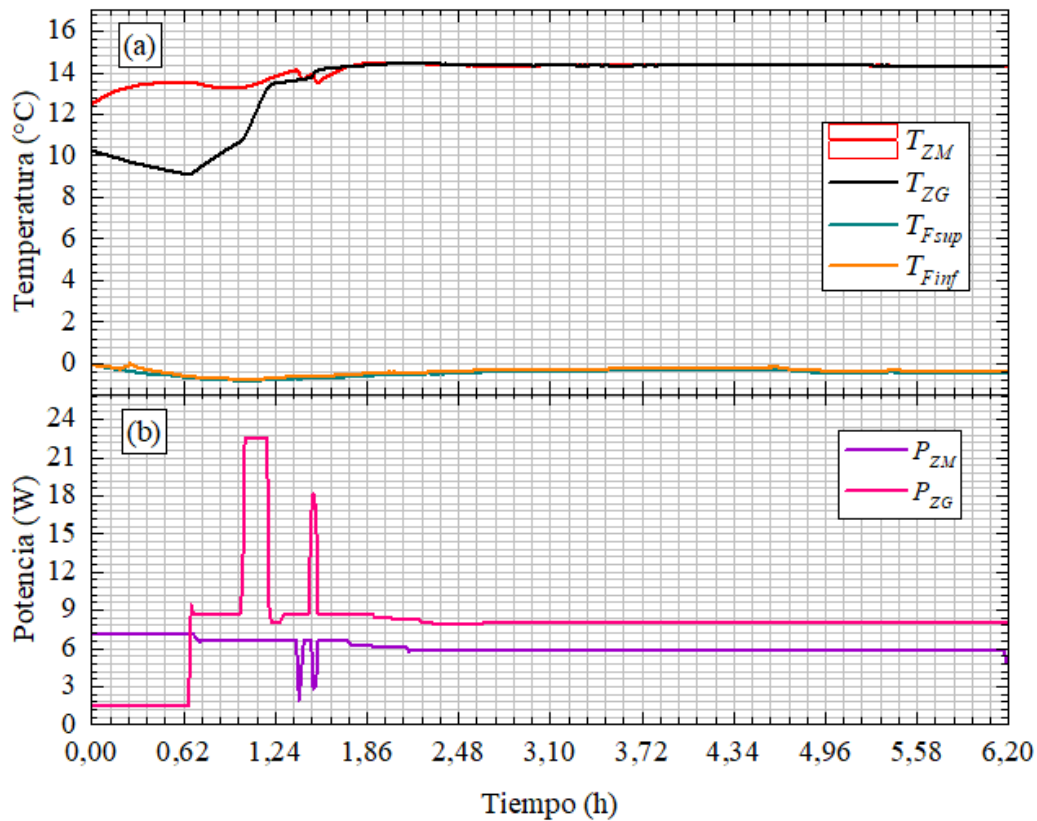


Figura 30. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del DW, (a) muestra el comportamiento térmico de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} y T_{ZG} y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM} .

En la Figura 30 (a) se observa que la T_{ZM} y la temperatura de la zona de guarda (T_{ZG}) inician con una diferencia de 2 °C, pero comienzan a estabilizarse y superponerse entre sí a partir de las 1,8 horas de iniciado el ensayo, quedando así ambas zonas con una temperatura promedio 14 °C. Por otro lado, las temperaturas en las placas frías se superponen entre si desde el inicio a fin con una temperatura promedio de -0,4 °C. En la Figura 30 (b) se observan algunos picos, y ligeros saltos en los valores de la P_{ZG} y la P_{ZM} , estos representan los cambios realizados a las potencias suministradas en dichas zonas para homogenizar y estabilizar sus temperaturas, los cambios se realizaron desde las 0,62 horas hasta las 2,6 horas de iniciado el ensayo.

En la Figura 31 se muestra la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} desde las 4,7 horas hasta las 6,2 horas de iniciado el ensayo. Se observa que la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} en el rango de tiempo seleccionado, desde las 4,7 horas hasta las 6,2 horas, es menor a 0,2 °C e incluso menor a 0,1 °C en la mayor parte del tiempo, cumpliendo con el requisito establecido en la en la norma ASTM-C177, en el cual la diferencia entre la temperatura de la zona de medición y la temperatura de la zona de guarda no sea mayor a 0,2 °C.

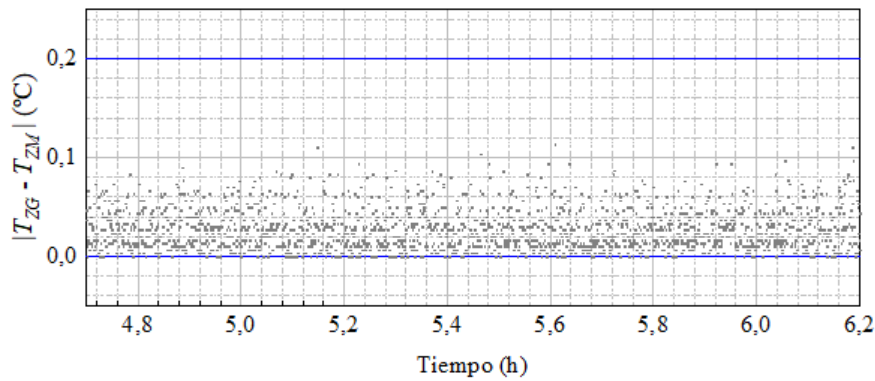


Figura 31. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del DW.

La Figura 32 muestra el comportamiento en el tiempo de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} , T_{ZG} , y las P_{ZM} y P_{ZG} durante en el ensayo para la determinación de la conductividad térmica del ECOTERM.

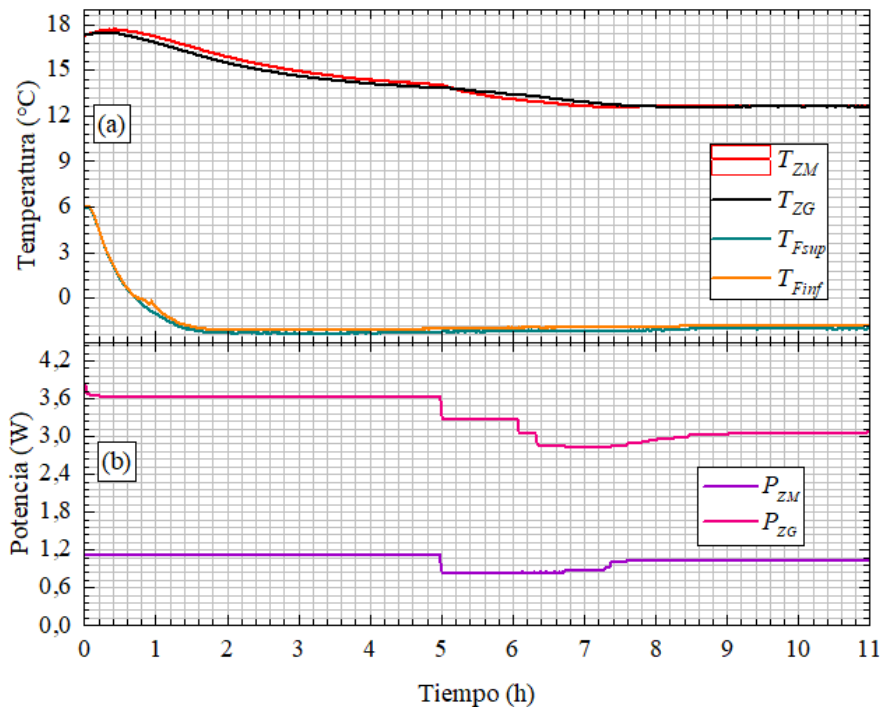


Figura 32. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del ECOTERM, (a) muestra el comportamiento térmico de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} y T_{ZG} y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM} .

En la Figura 32 (a) se observa que la T_{ZM} y la T_{ZG} inician con temperaturas similares de 17 °C y experimentado un ligero ascenso hasta las 0,4 horas de iniciado el ensayo, luego comienzan a descender hasta las 8 horas, a partir del cual empiezan a estabilizarse y superponerse entre sí, quedando de este modo ambas zonas con una temperatura promedio de 13 °C. Por otro lado, se observa que las temperaturas en las placas frías se superponen entre si desde el inicio a fin con una temperatura promedio de -1,8 °C. En la Figura 32 (b) se observan ligeros saltos en los valores de la P_{ZG} y a la P_{ZM} , a partir de las

5 horas hasta las 9 horas, estos representan los cambios realizados a las potencias suministradas en dichas zonas para homogenizar y estabilizar sus temperaturas.

En la Figura 33 se muestra la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} desde las 9,2 horas hasta las 10,7 horas de iniciado el ensayo. Se observa que la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} en el rango de tiempo seleccionado, desde las 9,2 horas hasta las 10,7 horas, es menor a 0,2 °C, cumpliendo con el requisito establecido en la en la norma ASTM-C177.

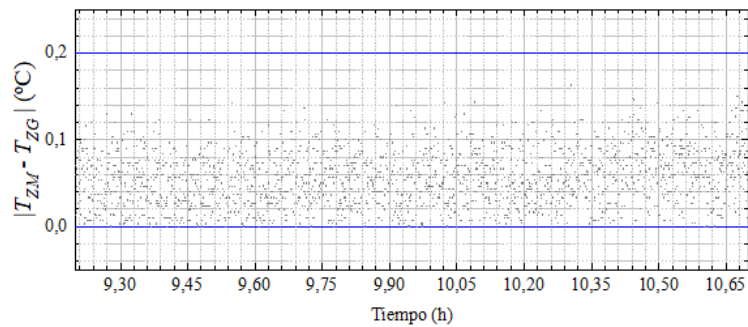


Figura 33. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del ECOTERM.

La Figura 34 muestra el comportamiento en el tiempo de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} , T_{ZG} , y las P_{ZM} y P_{ZG} durante en el ensayo para la determinación de la conductividad térmica del PLV.

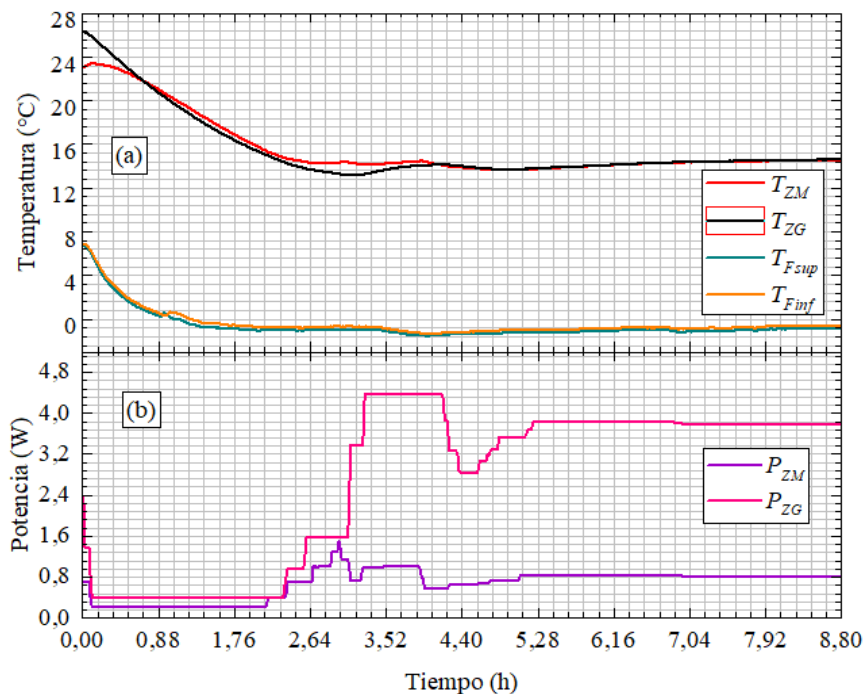


Figura 34. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del PLV, (a) muestra el comportamiento térmico de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} y T_{ZG} y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM} .

En la Figura 34 (a) se observa que la T_{ZM} y la T_{ZG} inician con una diferencia 4 °C y descienden de modo que sus temperaturas se homogenizan luego de 0,5 horas de iniciado el ensayo, para después continuar descendiendo hasta las 5 horas a partir del cual empiezan a estabilizarse y superponerse las temperaturas, con un valor promedio de 15 °C. Por otro lado, se observa una ligera diferencia de 0,3 °C entre las temperaturas de las placas frías la cual se mantiene desde el inicio a fin y llegan a estabilizarse con temperaturas promedio de -0,8 °C. En la Figura 34 (b) se observan saltos en los valores de la P_{ZG} y la P_{ZM} , estos son cambios realizados para homogenizar y estabilizar las temperaturas en la zona de guarda y zona de medición, los cambios se realizaron desde las 0 horas hasta las 7 horas de iniciado el ensayo.

En la Figura 35 se muestra la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} desde las 6,38 horas hasta las 7,88 horas de iniciado el ensayo. Se observa que la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} en el rango de tiempo seleccionado, desde las 6,38 horas hasta las 7,88 horas, es menor a 0,2 °C, cumpliendo con el requisito establecido en la en la norma ASTM-C177.

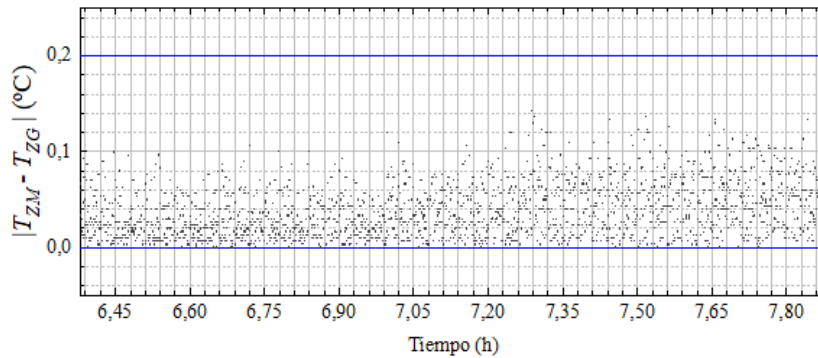


Figura 35. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del PLV.

La Figura 36 muestra el comportamiento en el tiempo de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} , T_{ZG} , y las P_{ZM} y P_{ZG} durante en el ensayo para la determinación de la conductividad térmica del LP.

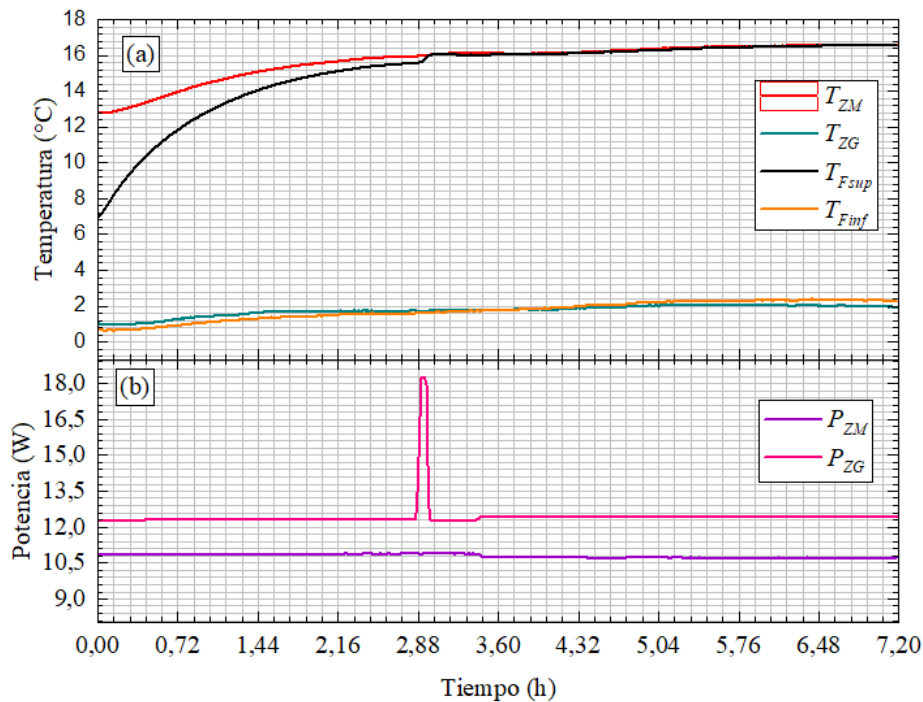


Figura 36. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del LP, (a) muestra el comportamiento térmico de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} y T_{ZG} y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM} .

En la Figura 36 (a) se observa que la T_{ZM} y la T_{ZG} inician con una diferencia de 6 °C y experimentado un ascenso hasta las 3 horas de iniciado el ensayo, luego comienzan a estabilizarse y superponerse entre sí, quedando de este modo ambas zonas con una temperatura promedio de 16 °C. Por otro lado, se observa que las temperaturas en las placas frías empiezan similares cercanas a los 1 °C y posteriormente empiezan a estabilizarse a una temperatura promedio de 2 °C y mantienen una ligera diferencia de 0,3 °C entre ellos. En la Figura 36 (b) se observan un pico, y unos ligeros saltos en los valores de la P_{ZG} y la P_{ZM} , estos representan los cambios realizados a las potencias suministradas en dichas zonas para homogenizar y estabilizar sus temperaturas durante el ensayo.

En la Figura 37 se muestra la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} desde las 5,68 horas hasta las 7,18 horas de iniciado el ensayo. Se observa que la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} en el rango de tiempo seleccionado, desde las 5,68 horas hasta las 7,18 horas, es menor a 0,2 °C, cumpliendo con el requisito establecido en la en la norma ASTM-C177.

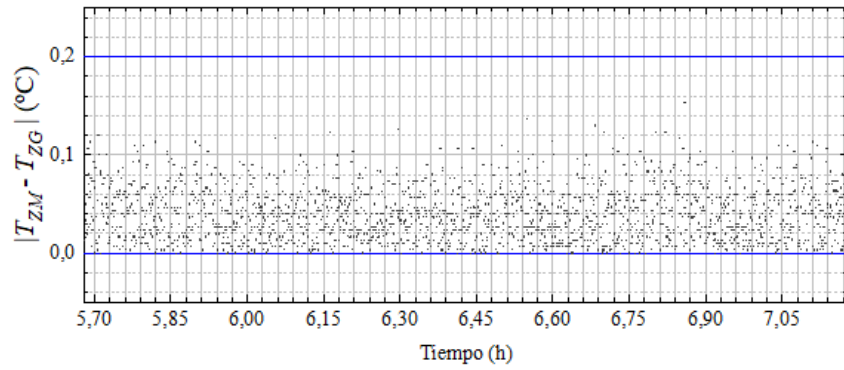


Figura 37. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del LP.

La Figura 37 muestra el comportamiento en el tiempo de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} , T_{ZG} , y las P_{ZM} y P_{ZG} durante en el ensayo para la determinación de la conductividad térmica del PLEX.

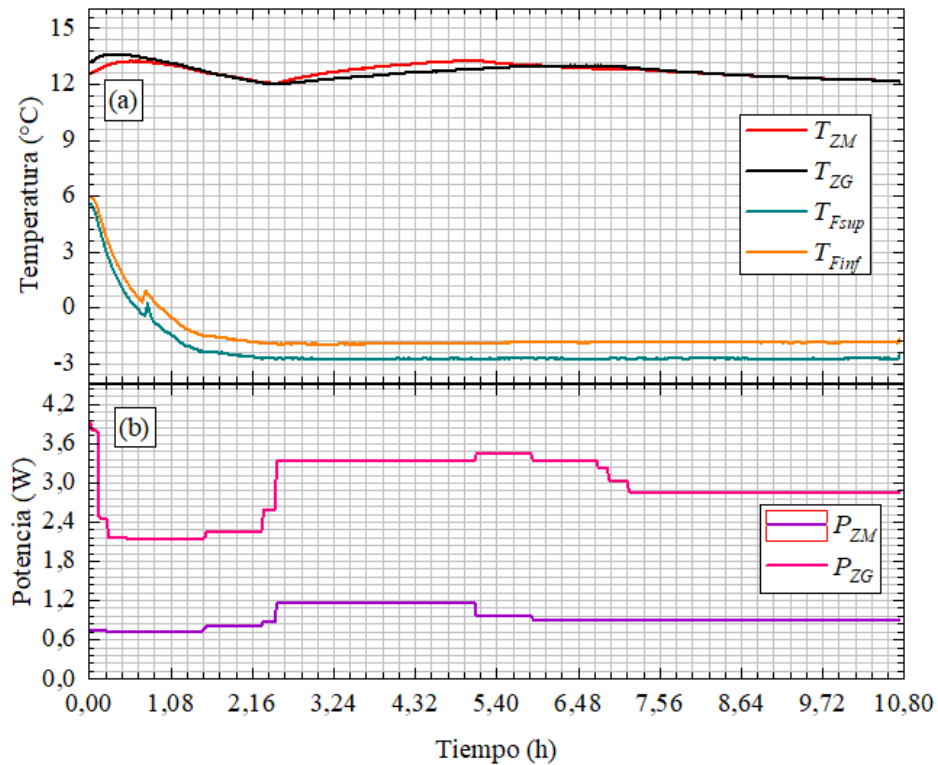


Figura 38. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del PLEX, (a) muestra el comportamiento térmico de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} y T_{ZG} y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM} .

En la Figura 38 (a) se observa que la T_{ZM} y la T_{ZG} inician con una diferencia de temperaturas de 0,5 °C y experimentado algunas fluctuaciones hasta las 7 horas de iniciado el ensayo, a partir del cual empiezan a estabilizarse y superponerse entre sí, quedando de este modo ambas zonas con una temperatura promedio de 12 °C. Por otro lado, se observa que las temperaturas en las placas frías inician con 6 °C y empiezan a descender hasta las 2,5 horas, a partir del cual se mantienen estables con temperaturas

de $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en promedio y con una diferencia de $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre ellas. En la Figura 38 (b) se observa que desde el inicio del ensayo se realizan algunas modificaciones en los valores de la P_{ZG} y la P_{ZM} , estos cambios son representados por saltos de posición en sus valores. Los cambios se realizaron desde las 0 horas hasta las 7 horas de iniciado el ensayo, permitiendo así estabilizar y homogenizar las temperaturas en la zona de medición y zona de guarda

En la Figura 39 se muestra la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} desde las 7,7 horas hasta las 9,2 horas de iniciado el ensayo. Se observa que la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} en el rango de tiempo seleccionado, desde las 7,7 horas hasta las 9,2 horas, es menor a $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, e incluso menor a $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ cumpliendo con el requisito establecido en la norma ASTM-C177.

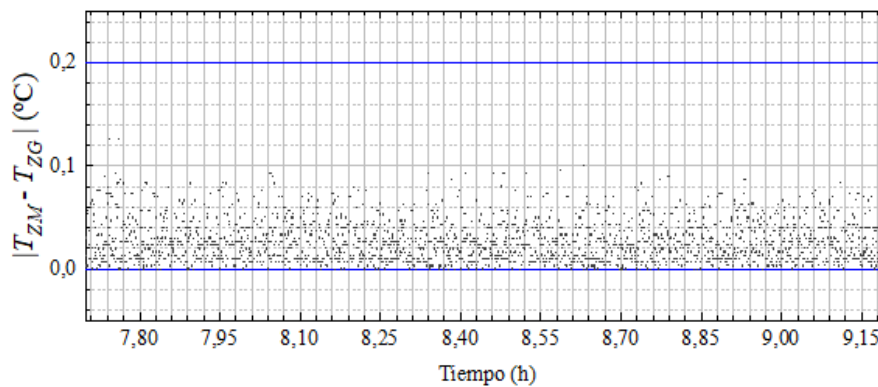


Figura 39. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del PLEX.

A continuación, se muestran los datos gráficos del comportamiento térmico de las placas calientes y placas frías del sistema, así como la potencia suministrada a la zona de medición y zona de guarda para las muestras de compuestos tipo sándwich.

La Figura 40 muestra el comportamiento en el tiempo de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} , T_{ZG} , y las P_{ZM} y P_{ZG} durante en el ensayo para la determinación de la conductividad térmica del DW-PLEX-DW.

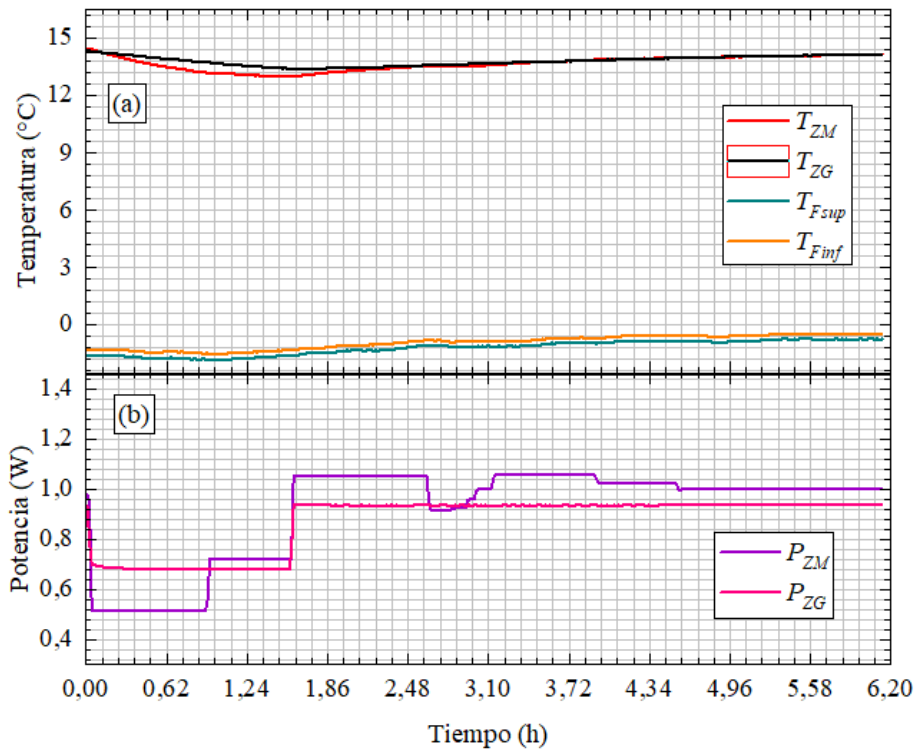


Figura 40. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del DW-PLEX-DW, (a) muestra el comportamiento térmico de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} y T_{ZG} y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM} .

En la Figura 40 (a) se observa que la T_{ZM} y la T_{ZG} inician con temperaturas similares de 14,5 °C y experimentado un ligero descenso hasta las 1,5 horas de iniciado el ensayo, luego comienzan a ascender ligeramente hasta las 3 horas, a partir del cual empiezan a estabilizarse y superponerse entre sí, quedando de este modo ambas zonas con una temperatura promedio de 14 °C. Por otro lado, se observa que las temperaturas en las placas frías inician con valores similares y cercanos a -2 °C, luego experimentan un ligero ascenso hasta las 2,7 horas, después del cual se mantienen a una temperatura promedio de -1 °C. En la Figura 40 (b) se observan algunos saltos en los valores de la P_{ZG} y la P_{ZM} , superponiéndose en algunos puntos antes de llegar a un valor fijo respectivamente, en que los valores de temperatura de la zona de guarda y zona de medición logran la estabilización y homogenización.

En la Figura 41 se muestra la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} desde las 4,64 horas hasta las 6,14 horas de iniciado el ensayo. Se observa que la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} en el rango de tiempo seleccionado, desde las 4,64 horas hasta las 6,14 horas, es menor a 0,2 °C, más aún podemos decir que en su mayoría es incluso menor a 0,08 °C cumpliendo con el requisito establecido en la en la norma ASTM-C177.

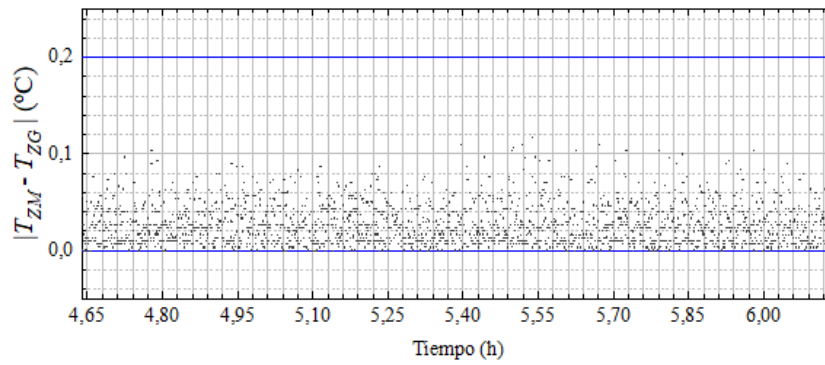


Figura 41. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del DW-PLEX-DW.

La Figura 42 muestra el comportamiento en el tiempo de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} , T_{ZG} , y las P_{ZM} y P_{ZG} durante en el ensayo para la determinación de la conductividad térmica del DW-ECOTERM-DW.

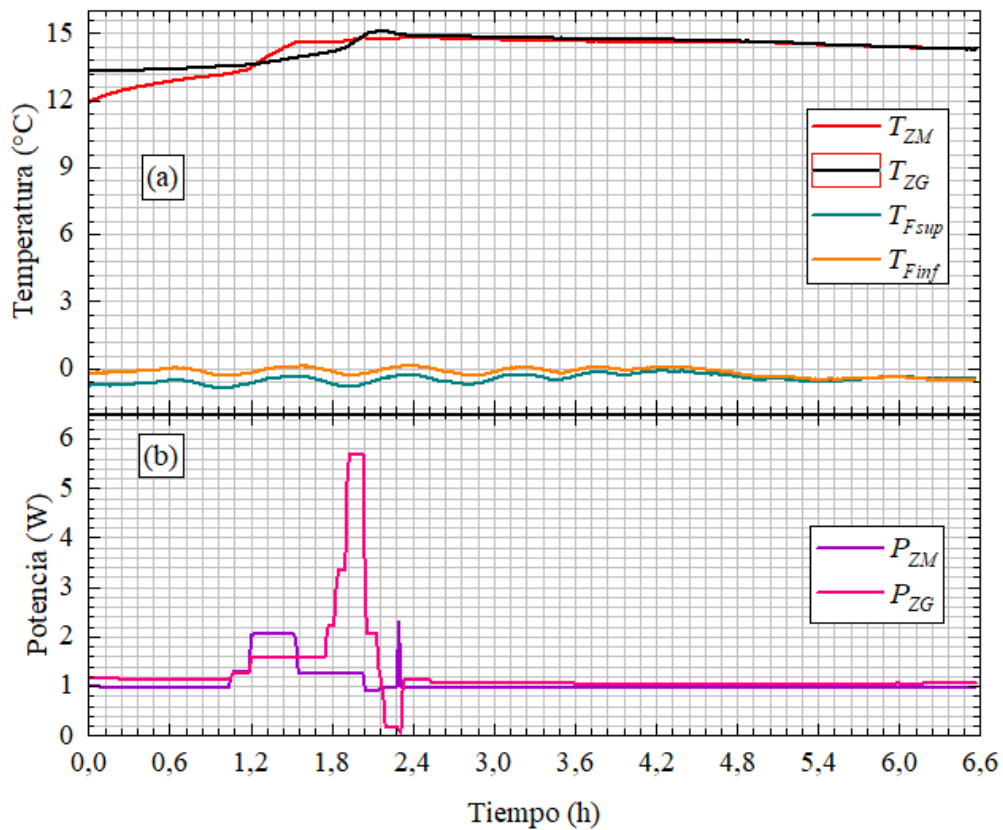


Figura 42. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del DW-ECOTERM-DW, (a) muestra el comportamiento térmico de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} y T_{ZG} y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM} .

En la Figura 42 (a) se observa que la T_{ZM} y la T_{ZG} inician con una diferencia de 2,3 °C, y experimentan un ascenso durante las 2 primeras horas de iniciado el ensayo, luego comienzan a descender hasta las 8 horas, a partir del cual empiezan a estabilizarse y superponerse entre sí, quedando de este modo ambas zonas con una temperatura promedio de 14,3 °C. Por otro lado, se observa que las temperaturas en las placas frías

se diferencian inicialmente en 0,5 °C y luego de 5 horas comienzan a superponerse y estabilizarse a una temperatura promedio de -0,5 °C. En la Figura 42 (b) se observan algunos picos, y saltos en los valores de la P_{ZG} y la P_{ZM} , estos representan los cambios realizados a las potencias suministradas en dichas zonas para homogenizar y estabilizar sus temperaturas, los cambios se realizaron desde las 0 horas hasta las 3,6 horas de iniciado el ensayo.

En la Figura 43 se muestra la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} desde las 5 horas hasta las 6,5 horas de iniciado el ensayo. Se observa que la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} en el rango de tiempo seleccionado, desde las 5 horas hasta las 6,5 horas, es menor a 0,2 °C, cumpliendo con el requisito establecido en la en la norma ASTM-C177.

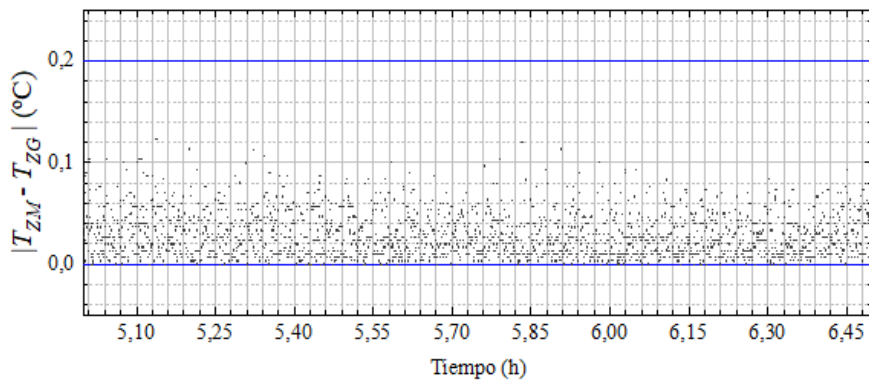


Figura 43. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del DW-ECOTERM-DW.

La Figura 44 muestra el comportamiento en el tiempo de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} , T_{ZG} , y las P_{ZM} y P_{ZG} durante en el ensayo para la determinación de la conductividad térmica del DW-PLV-DW.

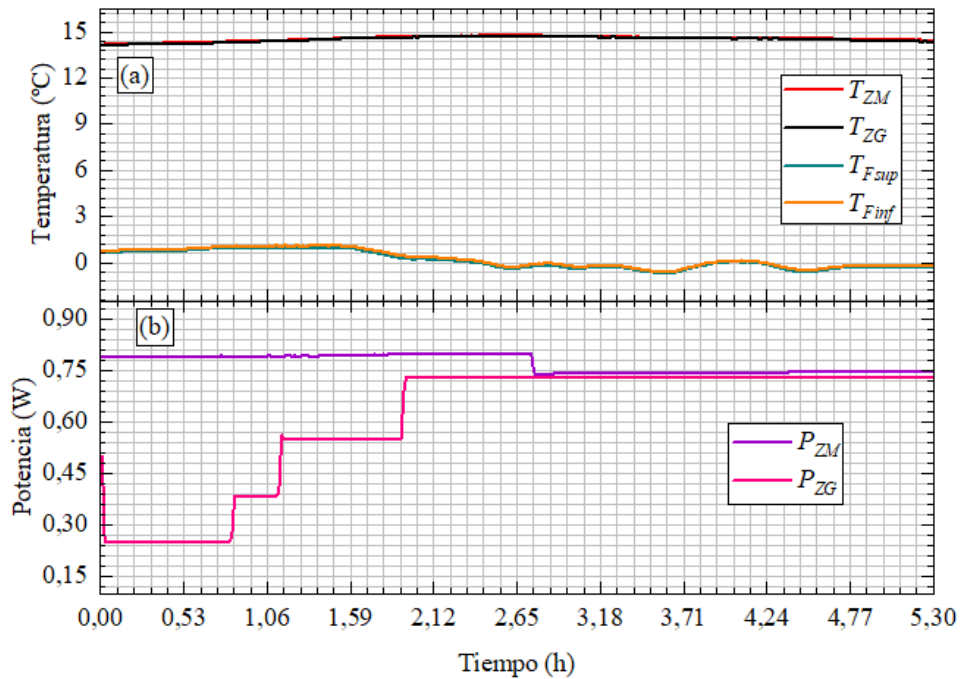


Figura 44. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del DW-PLV-DW, (a) muestra el comportamiento térmico de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} y T_{ZG} y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM} .

En la Figura 44 (a) se observa que la T_{ZM} y la T_{ZG} inician con temperaturas similares de 14,5 °C y se mantienen superpuestas mientras se estabilizan durante el ensayo. Por otro lado, se observa que las temperaturas en las placas frías se superponen entre si desde el inicio a fin con ligeras fluctuaciones alrededor de una temperatura promedio de 0 °C. En la Figura 44 (b) se observan algunos saltos en los valores de la P_{ZG} y la P_{ZM} , los cuales finalizan con una ligera diferencia de 0,015 W entre sus valores. Los cambios realizados son a fin de homogenizar y estabilizar las temperaturas de la zona de guarda y zona de medición durante el ensayo.

En la Figura 45 se muestra la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} desde las 3,5 horas hasta las 5 horas de iniciado el ensayo. Se observa que la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} en el rango de tiempo seleccionado, desde las 3,5 horas hasta las 5 horas, es menor a 0,2 °C, cumpliendo con el requisito establecido en la en la norma ASTM-C177.

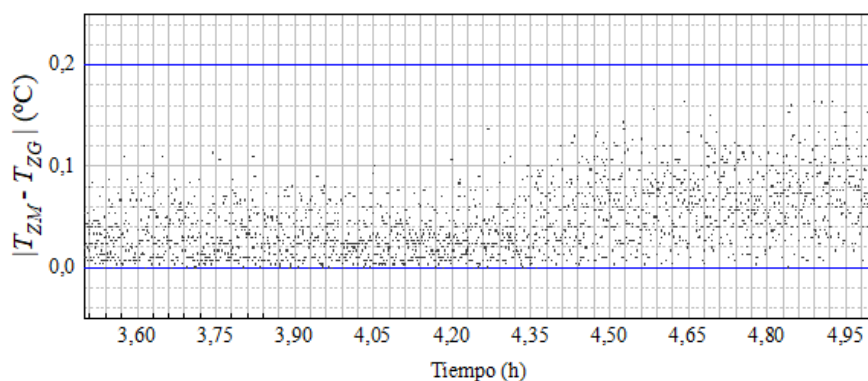


Figura 45. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del DW-PLV-DW.

La Figura 46 muestra el comportamiento en el tiempo de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} , T_{ZG} , y las P_{ZM} y P_{ZG} durante en el ensayo para la determinación de la conductividad térmica del LP-PLEX-LP.

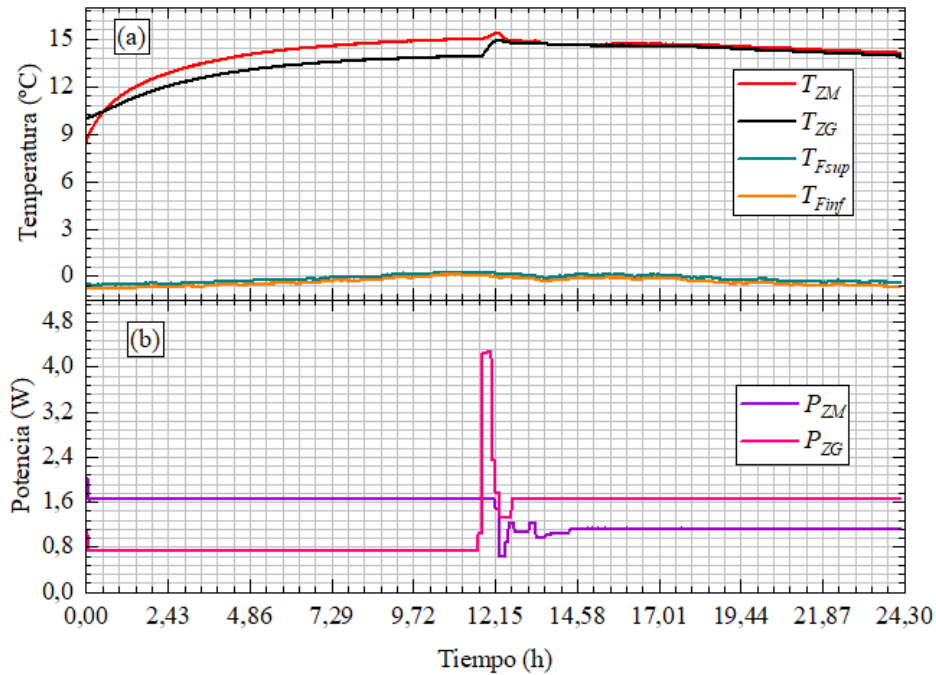


Figura 46. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del LP-PLEX-LP, (a) muestra el comportamiento térmico de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} y T_{ZG} y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM} .

En la Figura 46 (a) se observa que la T_{ZM} y la T_{ZG} inician con una diferencia de 2 °C y experimentado un ligero ascenso hasta las 12,2 horas de iniciado el ensayo, a partir del cual empiezan a estabilizarse y superponerse entre sí, quedando de este modo ambas zonas con un valor de temperatura promedio de 15 °C. Por otro lado, se observa que las temperaturas en las placas frías se superponen entre si desde el inicio a fin con una temperatura promedio de 0 °C. En la Figura 46 (b) se observan algunos picos, y ligeros saltos en los valores de la P_{ZG} y la P_{ZM} entre las 11 y 14 horas de iniciado el ensayo, estos representan los cambios realizados a las potencias suministradas en dichas zonas para homogenizar y estabilizar sus temperaturas durante el ensayo.

En la Figura 47 se muestra la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} desde las 14,5 horas hasta las 16 horas de iniciado el ensayo. Se observa que la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} en el rango de tiempo seleccionado, desde las 14,5 horas hasta las 16 horas, es menor a 0,2 °C, cumpliendo con el requisito establecido en la en la norma ASTM-C177.

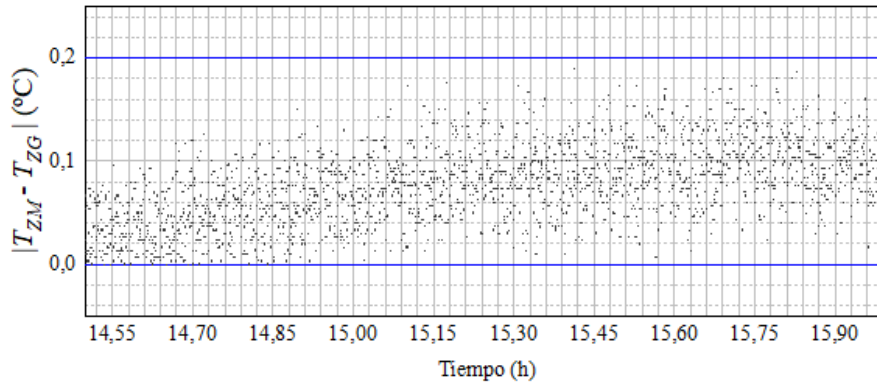


Figura 47. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del LP-PLEX-LP.

En la Figura 47 se observa que la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} en el rango de tiempo seleccionado, desde las 14,5 horas hasta las 16 horas, es menor a 0,2 °C, cumpliendo con el requisito establecido en la en la norma ASTM-C177.

La Figura 48 muestra el comportamiento en el tiempo de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} , T_{ZG} , y las P_{ZM} y P_{ZG} durante en el ensayo para la determinación de la conductividad térmica del LP-ECOTERM-LP.

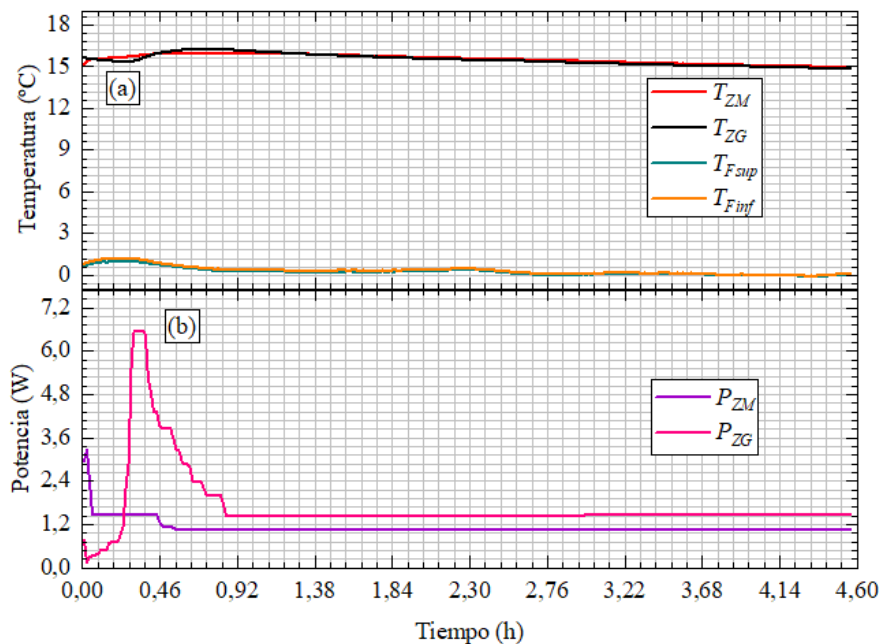


Figura 48. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del LP-ECOTERM-LP (a) muestra el comportamiento térmico de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} y T_{ZG} y (b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM} .

En la Figura 48 (a) se observa que la T_{ZM} y la T_{ZG} inician con temperaturas similares de 15,3 °C en promedio y se mantienen superpuestas mientras se estabilizan durante el ensayo. Por otro lado, se observa que las temperaturas en las placas frías se superponen entre si desde el inicio a fin con ligeras fluctuaciones alrededor de una temperatura

promedio de 0 °C. En la Figura 48 (b) se observan algunos saltos en los valores de la P_{ZG} y la P_{ZM} , estos representan los cambios realizados a las potencias suministradas para homogenizar y estabilizar las temperaturas en la zona de guarda y zona de medición durante el ensayo.

En la Figura 49 se muestra la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} desde las 1 horas hasta las 2,5 horas de iniciado el ensayo. Se observa que la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} en el rango de tiempo seleccionado, desde las 1 horas hasta las 2,5 horas, es menor a 0,2 °C, cumpliendo con el requisito establecido en la en la norma ASTM-C177.

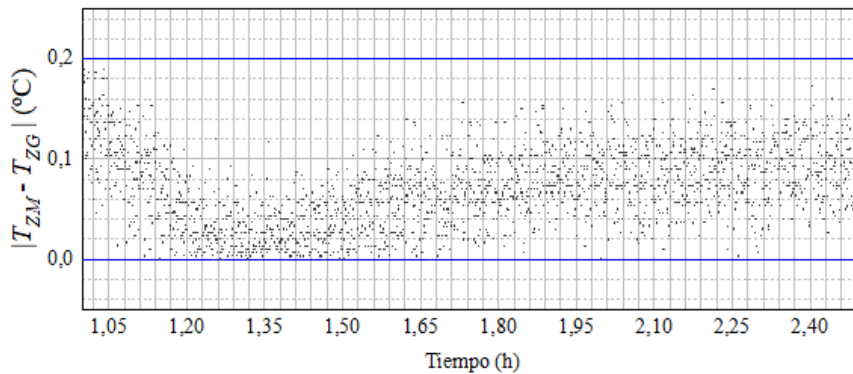


Figura 49. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del LP-ECOTERM-LP.

La Figura 50 muestra el comportamiento en el tiempo de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} , T_{ZG} , y las P_{ZM} y P_{ZG} durante en el ensayo para la determinación de la conductividad térmica del LP-PLV-LP.

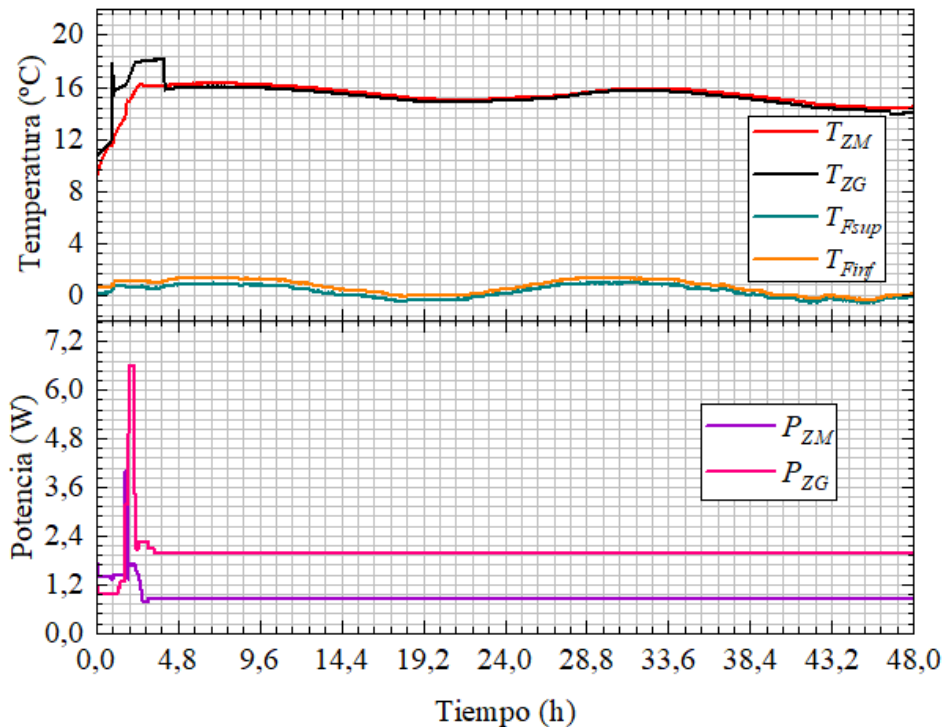


Figura 50. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del LP-PLV-LP, (a) muestra el comportamiento térmico de las T_{Fsup} , T_{Finf} , T_{ZM} y T_{ZG} y b) muestra las variaciones realizadas a la P_{ZG} y a la P_{ZM} .

En la Figura 50 (a) se observa que la T_{ZM} y la T_{ZG} inician con una diferencia de 2 °C, y experimentan un ascenso durante las 4 primeras horas de iniciado el ensayo, a partir del cual empiezan a estabilizarse y superponerse entre sí, quedando de este modo ambas zonas con una temperatura promedio de 15 °C. Por otro lado, se observa que las temperaturas en las placas frías son similares entre si desde el inicio a fin con una temperatura promedio de -1 °C. En la Figura 50 (b) se observan algunos picos, y ligeros saltos en los valores de la P_{ZG} y la P_{ZM} , durante las primeras 3 horas del ensayo, manteniéndose fijos hasta finalizar el mismo. Los cambios realizados a las potencias suministradas en dichas zonas son para homogenizar y estabilizar sus respectivas temperaturas.

En la Figura 51 se muestra la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} desde las 28,9 horas hasta las 30,4 horas de iniciado el ensayo. Se observa que la diferencia entre la T_{ZM} y la T_{ZG} en el rango de tiempo seleccionado, desde las 28,9 horas hasta las 30,4 horas, es menor a 0,2 °C, cumpliendo con el requisito establecido en la en la norma ASTM-C177.

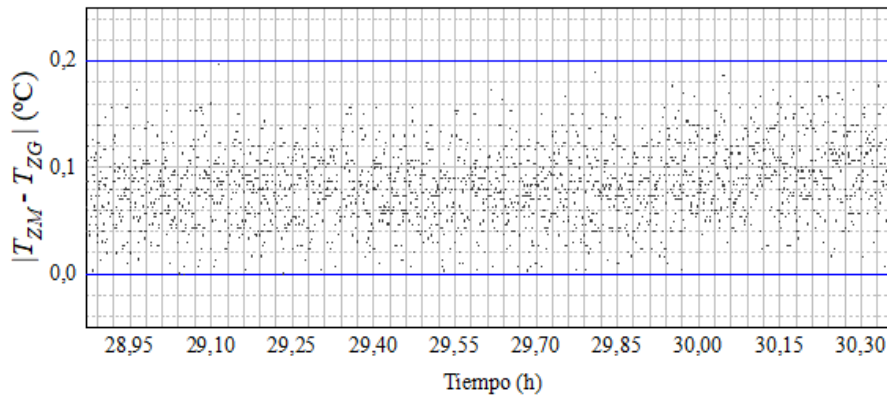


Figura 51. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos empleados en el cálculo de la conductividad térmica del LP-PLV-LP.

El rango de tiempo seleccionado en cada ensayo fue de 90 minutos y va acorde a lo indicado en la norma ASTM-C177 para la toma de datos, además como se ha podido evidenciar, en todos los ensayos realizados se ha cumplido con el criterio de la norma ASTM-C177 en la cual la diferencia entre la temperatura de la zona de medición y la temperatura de la zona de guarda no sea mayor a 0,2 °C

4.3.2 Datos y Resultados

Los ensayos realizados han permitido recopilar los datos de los parámetros que definen el valor de la conductividad térmica de las muestras evaluadas, muestras laminares y compuestos tipo sándwich, a excepción del área total de medición el cual es un parámetro fijo en los cálculos y cuyo valor es de $2A = 0,03558 \pm 0,00004 \text{ m}^2$.

En la Tabla 6 se muestra el valor del Q , e y ΔT , obtenidos en los ensayos realizados, y el valor de la λ de las muestras laminares y compuestos tipo sándwich, obtenido por cálculo a partir de los datos antes mencionados. El valor de la conductividad térmica del drywall encontrada en la referencia es de $0,26 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, y el obtenido en el ensayo es de $0,14 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, lo que significa un error relativo de 54 % del valor de referencia con respecto al obtenido experimentalmente. Esta diferencia puede justificarse al no contar con las especificaciones propias del DW evaluado, así como las condiciones de medición con las que fue evaluado, y el error en la medición por parte del equipo LAMBADA UNI. Para el LP, el valor de la conductividad térmica de acuerdo a la referencia oscila desde $0,15 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ hasta $0,6 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, ubicando el resultado obtenido experimentalmente en un extremo del rango mencionado.

Tabla 6. Valores del Q, el e, el ΔT , y la λ de las muestras laminares y compuestos tipo sándwich.

MUESTRA	Q (W)	e (m)	ΔT (°C)	λ (Wm ⁻¹ C ⁻¹)
DW	5,90	0,01244	14,74	0,140
ECOTERM	1,04	0,02545	14,57	0,0513
PLV	0,865	0,02545	15,27	0,0386
LP	10,7	0,00783	14,38	0,164
PLEX	1,15	0,02404	15,41	0,0502
DW-PLEX-DW	1,00	0,04907	14,72	0,0938
DW-ECOTERM-DW	0,983	0,04526	14,88	0,0840
DW-PLV-DW	0,743	0,04848	14,85	0,0682
LP-PLEX-LP	1,14	0,04000	14,67	0,0873
LP-ECOTERM-LP	1,08	0,03646	15,48	0,0714
LP-PLV-LP	0,865	0,03646	14,60	0,0607

Por otro lado, en la Tabla 7 se muestran los valores de la μ_Q , μ_e , μ_{2A} , $\mu_{\Delta T}$, y la μ_λ correspondientes a los datos calculados para cada uno de las muestras laminares y compuestos tipo sándwich evaluados.

Tabla 7. Datos y resultados de incertidumbre en cada ensayo

MUESTRA	μ_Q (W)	μ_e (m)	μ_{2A} (m ²)	$\mu_{\Delta T}$ (°C)	μ_λ (Wm ⁻¹ C ⁻¹)
DW	0,005	0,00005	0,00004	0,83	0,016
ECOTERM	0,005	0,00005	0,00004	0,82	0,0058
PLV	0,004	0,00005	0,00004	0,82	0,0042
LP	0,05	0,00011	0,00004	0,83	0,019
PLEX	0,005	0,00007	0,00004	0,83	0,0054
DW-PLEX-DW	0,005	0,00013	0,00004	0,82	0,0105
DW-ECOTERM-DW	0,005	0,00004	0,00004	0,83	0,0093
DW-PLV-DW	0,004	0,00005	0,00004	0,83	0,0076
LP-PLEX-LP	0,005	0,00008	0,00004	0,83	0,0099
LP-ECOTERM-LP	0,005	0,00005	0,00004	0,83	0,0077
LP-PLV-LP	0,004	0,00005	0,00004	0,83	0,0069

De la Tabla 7, cabe señalar que el factor que más influye en la incertidumbre de la conductividad térmica es la temperatura, con valores entre 70 % a 80 % de la incertidumbre total.

Podemos tomar los valores obtenidos de la conductividad térmica de los materiales laminares y realizar el cálculo teórico de la conductividad térmica de los compuestos tipos sándwich, a fin de verificar la correlación teórica y experimental de los resultados de medición.

De las ecuaciones 10 y 17 se obtienen las ecuaciones 33, 34, 35 y 36 de modo que se puede determinar por cálculos teóricos los valores de conductividad térmica de los compuestos tipo sándwich a partir de los valores de conductividad térmica y espesores de las muestras laminares evaluadas experimentalmente.

$$Q = \frac{\lambda 2A(T_1 - T_2)}{e} \quad (33)$$

$$Q = 2A (T_1 - T_2) / \Sigma (e_i / \lambda_i) \quad (34)$$

$$\lambda = \frac{e}{\Sigma (e_i / \lambda_i)} \quad (35)$$

$$\lambda_{\text{compuesto}} = \frac{e_{\text{compuesto}}}{\left(\frac{e_{\text{capa-exterior}}}{\lambda_{\text{capa-exterior}}} + \frac{e_{\text{núcleo}}}{\lambda_{\text{núcleo}}} + \frac{e_{\text{capa-exterior}}}{\lambda_{\text{capa-exterior}}} \right)} \quad (36)$$

Donde:

$$e_{\text{compuesto}} = 2e_{\text{capa-exterior}} + e_{\text{núcleo}} \quad (37)$$

En la Tabla 8 se muestran los valores de espesor y conductividad térmica de las muestras laminares obtenidas experimentalmente, así como los valores teóricos calculados para los compuestos tipo sándwich empleando la ecuación 36.

Tabla 8. Datos y resultados del cálculo teórico de la conductividad térmica de los compuestos tipo sándwich.

MUESTRA	$e_{\text{capa-exterior}}$ (cm)	$e_{\text{núcleo}}$ (cm)	$\lambda_{\text{capa-exterior}}$ (Wm ⁻¹ °C ⁻¹)	$\lambda_{\text{núcleo}}$ (Wm ⁻¹ °C ⁻¹)	$\lambda_{\text{compuesto}}$ (Wm ⁻¹ °C ⁻¹)
DW-PLEX-DW	1,244	2,404	0,140	0,0502	0,0745
DW-ECOTERM-DW	1,244	2,038	0,140	0,0513	0,0787
DW-PLV-DW	1,244	2,360	0,140	0,0386	0,0614
LP-PLEX-LP	0,783	2,404	0,164	0,0502	0,0691
LP-ECOTERM-LP	0,783	2,080	0,164	0,0513	0,0728
LP-PLV-LP	0,783	2,080	0,164	0,0386	0,0575

De los resultados obtenidos en la Tabla 8, podemos realizar una comparación con los valores obtenidos experimentalmente en la Tabla 6 de los compuestos tipo sándwich. En la Tabla 9 se realizó dicha comparación determinándose una diferencia porcentual de los resultados experimentales sobre los calculados.

Tabla 9. Datos y resultados del cálculo teórico de la conductividad térmica de los compuestos tipo sándwich.

MUESTRA	$\lambda_{\text{calculado}}$ (Wm ⁻¹ °C ⁻¹)	$\lambda_{\text{experimental}}$ (Wm ⁻¹ °C ⁻¹)	Error Relativo (%)
DW-PLEX-DW	0,0745	0,0938	26
DW-ECOTERM-DW	0,0787	0,0840	8
DW-PLV-DW	0,0614	0,0682	11
LP-PLEX-LP	0,0691	0,0873	26
LP-ECOTERM-LP	0,0728	0,0714	2
LP-PLV-PLV	0,0575	0,0607	6

En la Tabla 9 se observa que el valor experimental de la conductividad térmica de los compuestos se diferencia en un valor porcentual igual o inferior al 26 % y en un 2 % en mejor de los casos.

Por otro lado, se realizaron simulaciones de los ensayos experimentales para los compuestos tipo sándwich en el software COMSOL Multiphysics., introduciendo los parámetros de conductividad térmica, temperatura en las placas frías, potencia suministrada a la zona de medición y a la zona de guarda. Estas simulaciones fueron realizadas elaborando un diseño del equipo LAMBDA UNI en el mismo software COMSOL respetando las dimensiones del equipo, y de las muestras correspondientemente, este se muestra en la Figura 52.

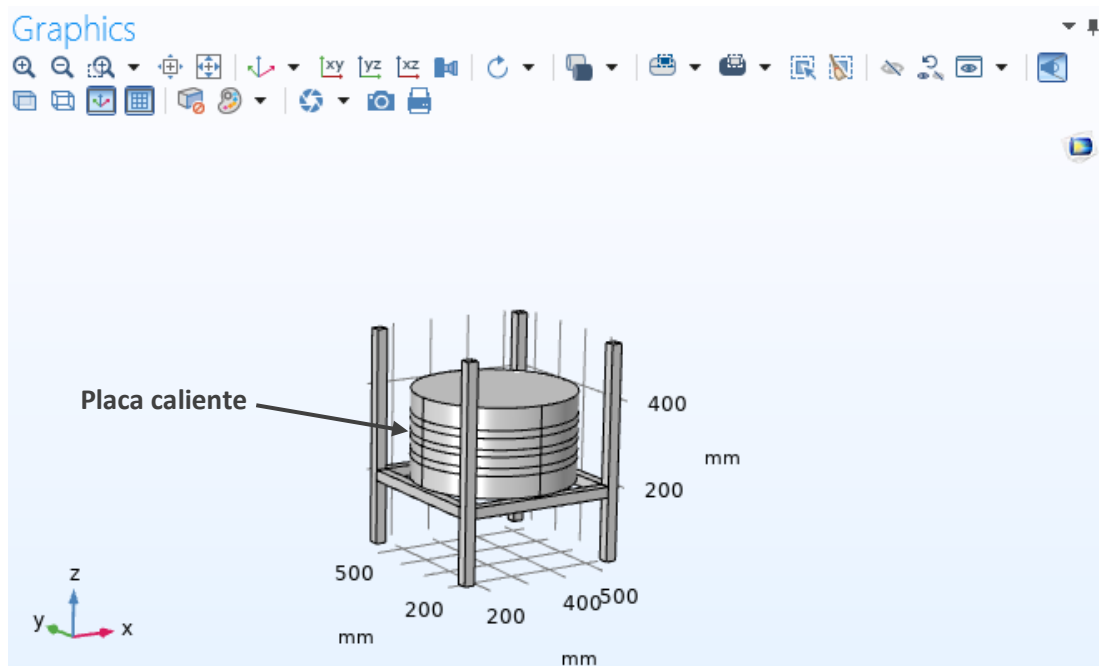


Figura 52. Diseño del equipo LAMBDA UNI en el software COMSOL Multiphysics.

En las simulaciones se busca comparar la temperatura obtenida en la placa caliente con el valor de su temperatura en el ensayo experimental mientras los demás parámetros permanecen fijos. A esto hay que añadir que para la simulación también se consideró un espacio de aire a 21 °C alrededor del equipo LAMBDA UNI, tal como se muestra en la Figura 53.

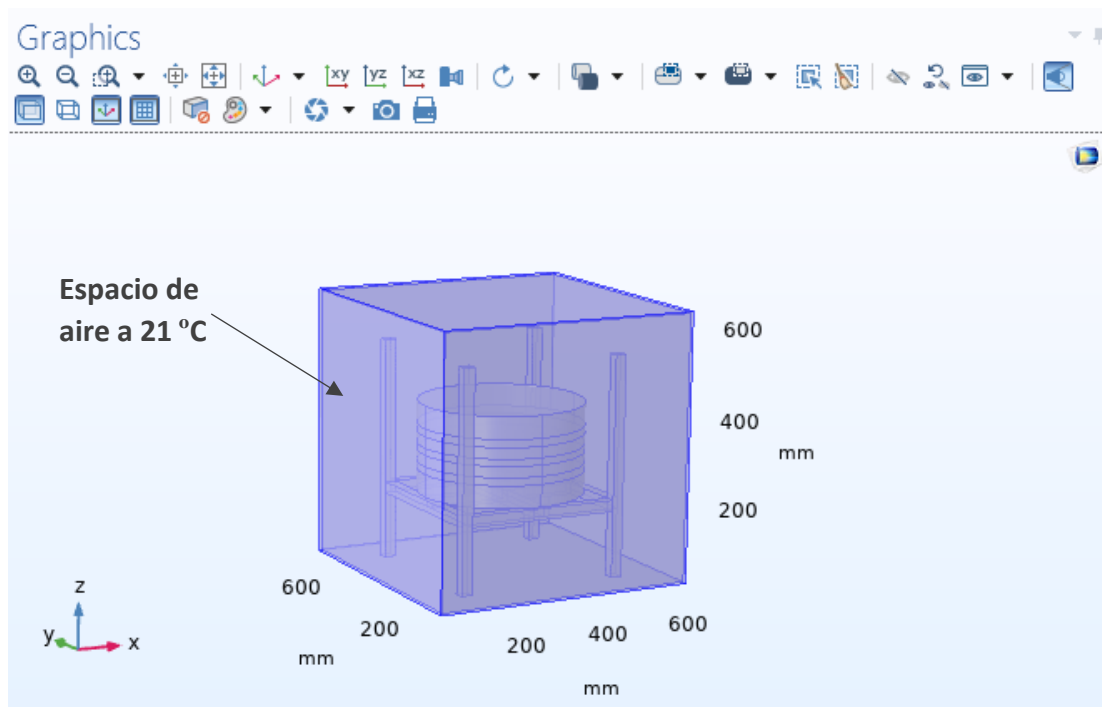


Figura 53. Equipo LAMBDA UNI envuelto en un espacio de aire a 21 °C.

Después de fijar los parámetros de conductividad térmica de la muestra, la temperatura en las placas frías, y las potencias suministradas a la zona de guarda y zona de medición, se procedió con las simulaciones, las cuales al llegar al estado estacionario se podía apreciar visualmente las temperaturas en las superficies de todas los componentes del diseño en la simulación, como se muestra en la Figura 54.

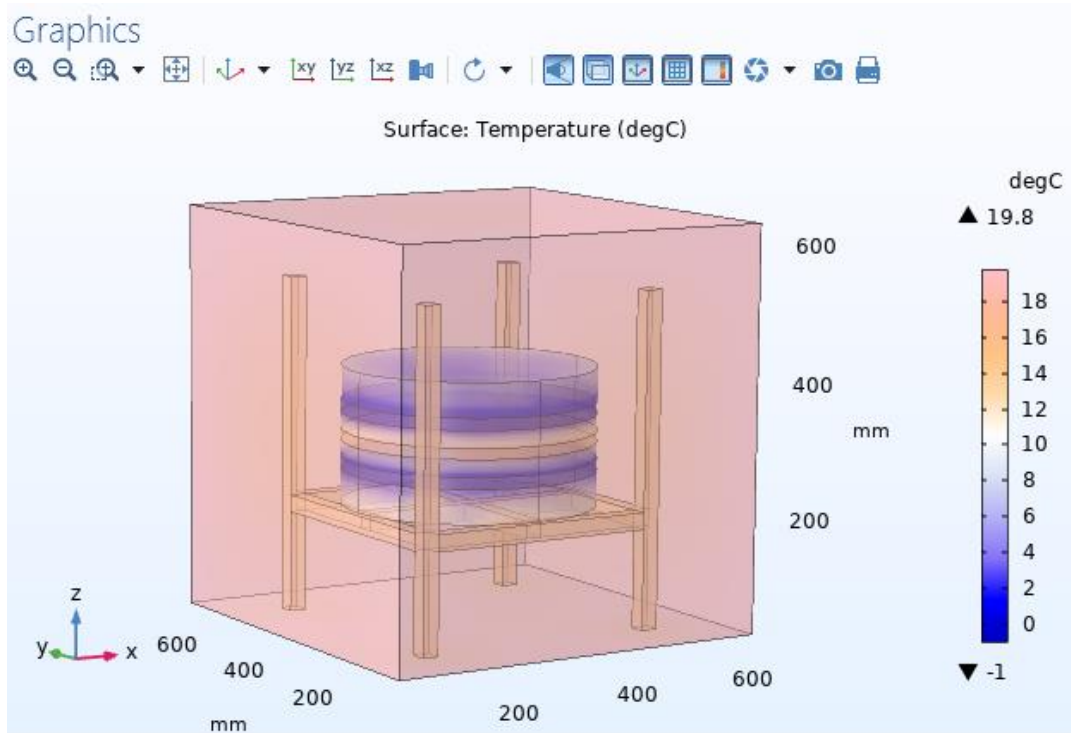


Figura 54. Simulación en estado estacionario del equipo LAMBDA UNI.

Una vez concluida las simulaciones, se rescataron los datos de temperatura en la zona de medición (ver Anexo 4) y fueron comparadas con los obtenidos experimentalmente, en la Tabla 10 se muestra los resultados de estas comparaciones.

Tabla 10. Datos y Resultados de la temperatura en la zona de medición en la simulación y el ensayo experimental de la conductividad térmica de los compuestos tipo sándwich.

MUESTRA	$T_{ZM_{simulado}}$ (°C)	T_{ZM} (°C)	Error Relativo (%)
DW-PLEX-DW	14,75	14,08	5
DW-ECOTERM-DW	14,43	14,46	0
DW-PLV-DW	14,35	14,58	2
LP-PLEX-LP	15,36	14,70	4
LP-ECOTERM-LP	14,60	15,82	8
LP-PLV-LP	15,89	15,72	1

De la Tabla 10, se observa que los porcentajes de error relativo encontrados al comparar la temperatura de la zona de medición del experimental y simulado están por debajo del 8 %, lo cual nos permite afirmar que el modelo propuesto en COMSOL es confiable y podría usarse para determinar los perfiles de temperatura en estado estacionario, y abre la posibilidad de realizar un mayor estudio del comportamiento térmico variando las condiciones de los ensayos a realizar.

Por otro lado, es importante reconocer que en todo ensayo de medición mantener un ambiente controlado influye leve o significativamente en los resultados, dependiendo de lo que se desee medir esencialmente. Los ensayos de conductividad térmica realizados bajo condiciones de temperaturas cercanas a 0 °C en las placas frías genero la formación de una capa de hielo en el borde de las mismas y en el serpentín de cobre por donde circula el líquido refrigerante. En la Figura 55 se observa la formación de escarcha de hielo en las placas frías y los serpentines de cobre.

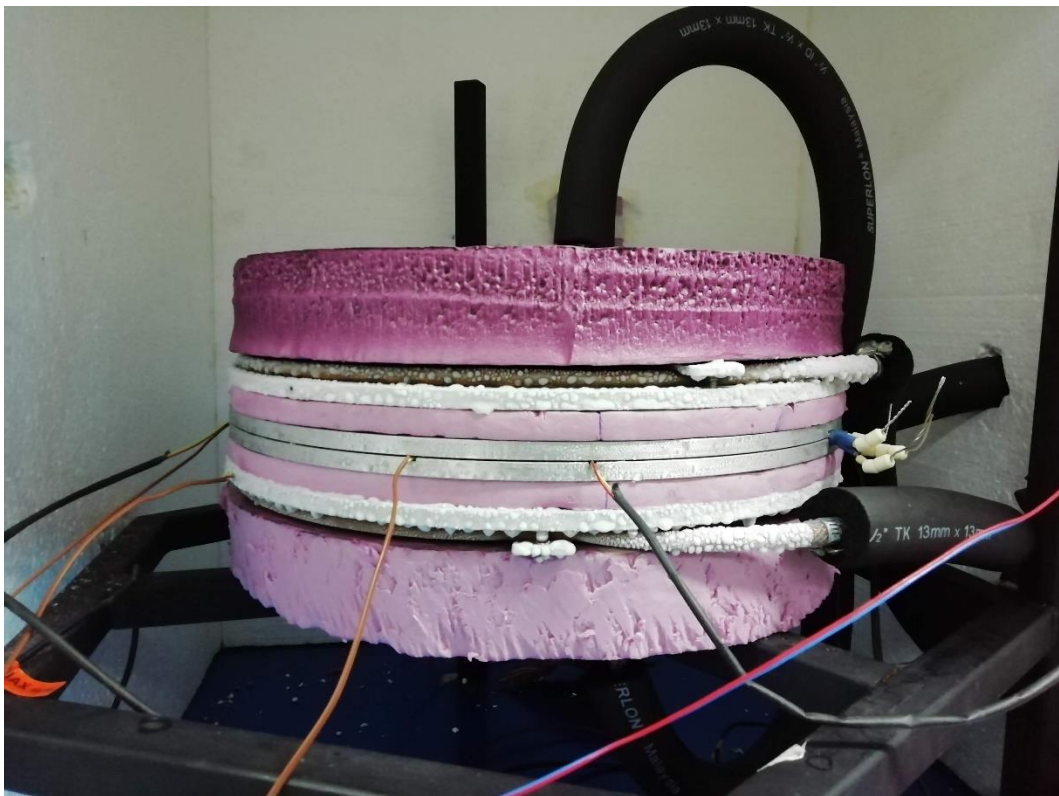


Figura 55. Formación de escarcha de hielo sobre las placas frías y los serpentines de cobre en el equipo LAMBDA UNI.

De la Figura 55, la escarcha de hielo formado sobre las placas frías y los serpentines de cobre contribuyen al deterioro por oxidación de estos elementos. En la Figura 56 se muestra el comportamiento de la temperatura y humedad en el interior de la envoltura durante la medición de la conductividad térmica del LP.

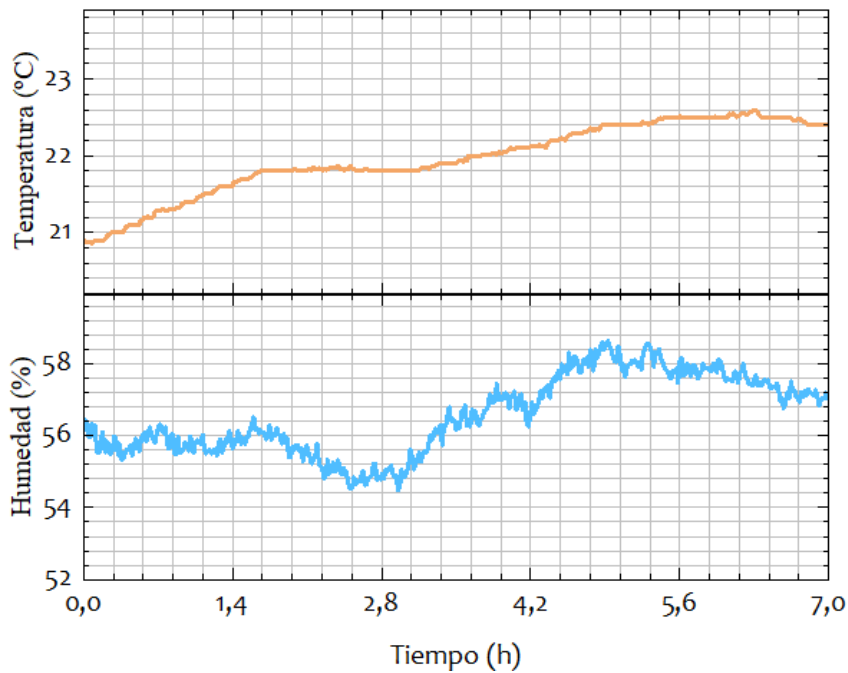


Figura 56. Condiciones de temperatura y humedad durante la medición la conductividad térmica del LP.

De la Figura 56, se observa que al inicio la temperatura en el ambiente se incrementa, esto debería provocar que la humedad en el ambiente disminuya sin embargo la humedad solo desciende brevemente y se vuelve a incrementar y vuelve a disminuir oscilando así durante las primeras 1,6 horas. Después, la temperatura empieza a mantenerse constante durante las siguientes 1,4 horas, lo que debería provocar que la humedad se mantenga en un valor promedio constante también. Sin embargo, la humedad desciende durante las primeras 0,9 horas y recién a partir de ese instante de tiempo se mantiene en un valor promedio constante. Posterior a ello, la temperatura en el ambiente vuelve a incrementarse, de nuevo, esto debería provocar que la humedad disminuya, sin embargo, como se puede apreciar la humedad se incrementa. Ya a partir de las 5,6 horas la temperatura se estabiliza a un valor promedio constante hasta finalizar con el ensayo, lo que debería provocar que la humedad también se mantenga constante, aun así, la humedad disminuye lentamente. Se atribuye este comportamiento del ambiente que rodea el sistema de medición a la falta de hermeticidad de la envolvente de poliestireno expandido y poliestireno extruido con él que se contaba.

Todos estos aspectos, son condiciones que se deben mejorar, a fin de evitar el desgaste prematuro de los elementos que forman parte del sistema de medición del equipo LAMBDA UNI y pueden también afectar a los resultados obtenidos en las mediciones. Por este motivo, se propuso la elaboración de una cámara termohigrométrica que permita mantener controlada la temperatura y humedad en el ambiente que envuelve al sistema. Para ello, se consideran dos etapas en la implementación de la cámara termohigrométrica, la primera consta de la elaboración del diseño de la cámara, la construcción de la estructura envolvente de la cámara y la

instalación de la misma en equipo LAMBDA UNI. La segunda etapa constara de la inserción de un deshumecedor in el interior de la cámara y un sistema de calefacción acoplado al sistema de medición. En el presente trabajo se desarrolló la primera etapa de la implementación de la cámara y su efecto en las condiciones ambientales durante la medición la conductividad térmica. Se deja la culminación de la segunda etapa a posteriores trabajos que se continúen desarrollando con el equipo LAMBDA UNI.

Diseño de cámara termohigrométrica

Para el diseño de la cámara termohigrométrica se trabajó con el software SOLIDWORKS, la idea básica del diseño consiste en una estructura paralelepípeda cuyas dimensiones sean adecuadas para el tamaño del sistema incluido el soporte de metálico del equipo. En la Figura 57 se muestra el diseño de la cámara termohigrométrica.

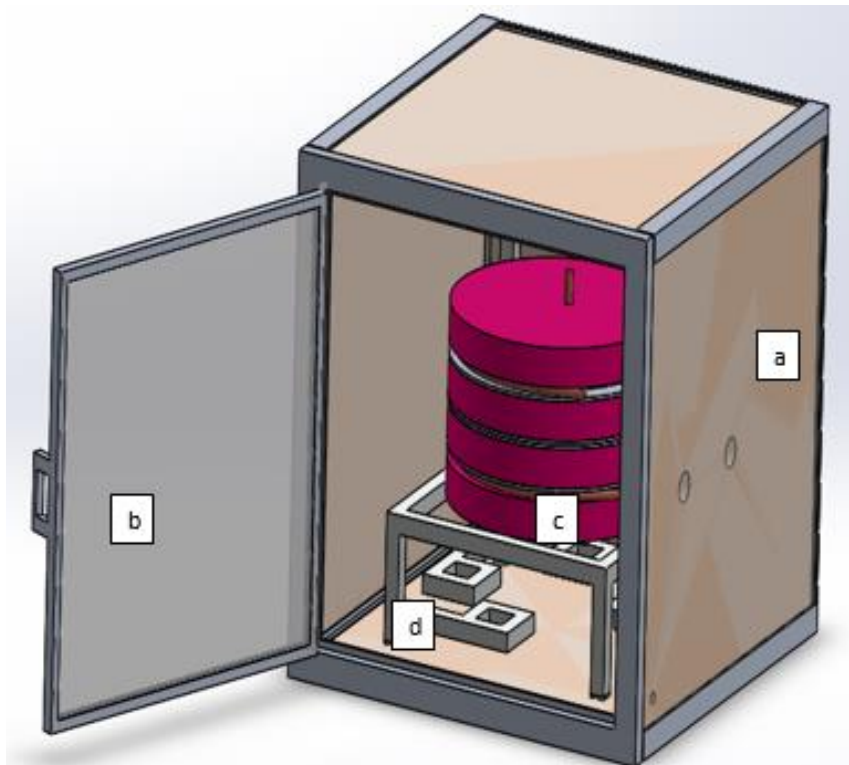


Figura 57. Cámara Termohigrométrica para el equipo LAMBDA UNI: (a) estructura de cámara termohigrométrica de doble vidrio y aislante (poliestireno expandido), (b) puerta de doble vidrio y aire, (c) equipo de placa caliente LAMBDA UNI, (d) soporte metálico del equipo LAMBDA UNI.

Partes de la cámara térmica

Estructura de cámara termohigrométrica. La estructura de cámara termohigrométrica está conformada por una cubierta interna y una cubierta externa de vidrio laminado de 6 mm de espesor y poliestireno expandido de 2,54 mm en medio de dichas caras. Se seleccionaron estos materiales para la construcción debido a sus

propiedades físicas como aislantes y por su costo de fabricación. En la Figura 58 se muestra el diseño de esta estructura.

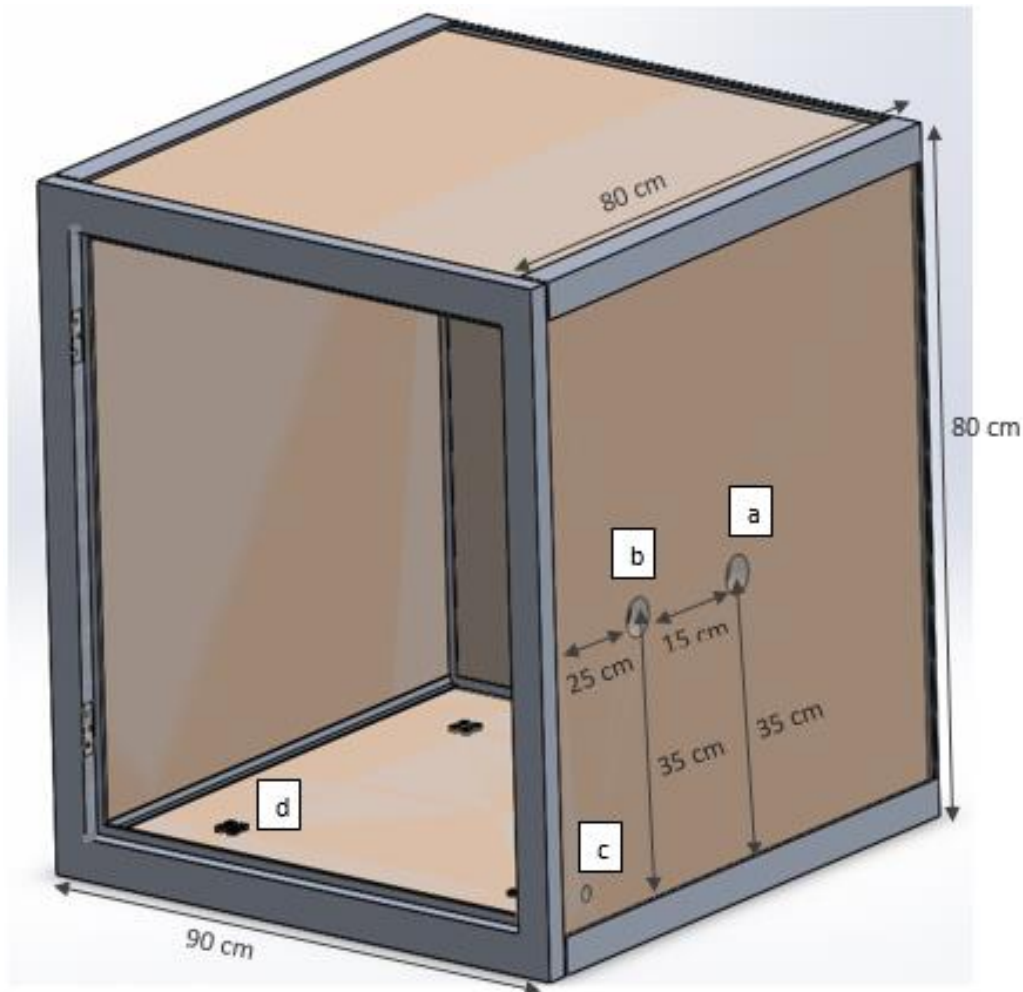


Figura 58. Estructura de cámara termohigrométrica para el equipo LAMBDA UNI: (a) orificio para la manguera por la cual fluye el líquido refrigerante del chiller al LAMBDA UNI, (b) orificio para la manguera por la cual retorna el líquido refrigerante del equipo LAMBDA UNI al chiller, (c) orificio para los cables de alimentación, de circuitería y de transmisión de datos, (d) puntos de ubicación del soporte metálico del equipo LAMBDA UNI.

Los diámetros de las mangueras revestidas con foam es 2,54 cm, y de los orificios 1 y 2 son de 2.1cm. De este modo se tiene colocar las mangueras en estos orificios por presión, siendo posible dado que el foam es un material compresible, y es así que mediante la presión ejercida sobre el foam se reduce al máximo las pérdidas de calor por estos orificios. Por otro lado, el orificio 3 tiene un diámetro de 1,27 cm y los cables que pasan por este no están cubiertos con foam de modo que sería necesario tapan las aberturas existentes mediante la aplicación de una espuma térmica.

A continuación, en la Figura 59 se muestra una vista total de cómo se constituye las partes Estructura de cámara termohigrométrica para el equipo LAMBDA UNI.

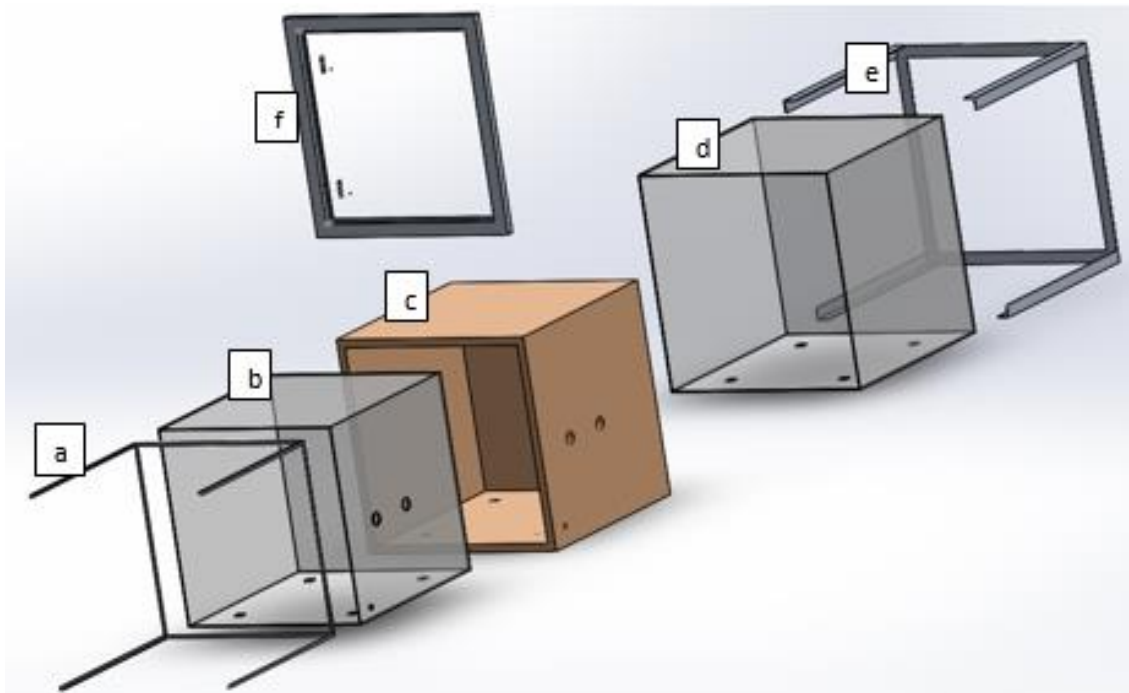


Figura 59. Vista explosionada de la Estructura de cámara termohigrométrica para el equipo LAMBDA UNI: (a) marco de soporte interno de aluminio, (b) cubierta interior de vidrio laminado, (c) aislante intermedio de poliestireno expandido, (d) cubierta exterior de vidrio laminado, (e) marco de soporte exterior de aluminio, (f) marco de aluminio para puerta.

La cubierta exterior interior y exterior de vidrio laminado tienen un espesor de 6mm cada uno, el aislante intermedio de poliestireno expandido tiene un espesor de 2,54 cm el marco interior, exterior y de la puerta son de hechos de aluminio.

Puerta de la cámara termohigrométrica. La puerta de la cámara termohigrométrica ha sido diseñada de modo que permita la visibilidad el equipo LAMBDA UNI sin que esto represente pérdidas de calor notables en comparación con las demás partes de la cámara. El diseño básicamente consiste en una doble capa de vidrio con aire al medio, en la Figura 60 se muestra como se conforma estructuralmente esta puerta.

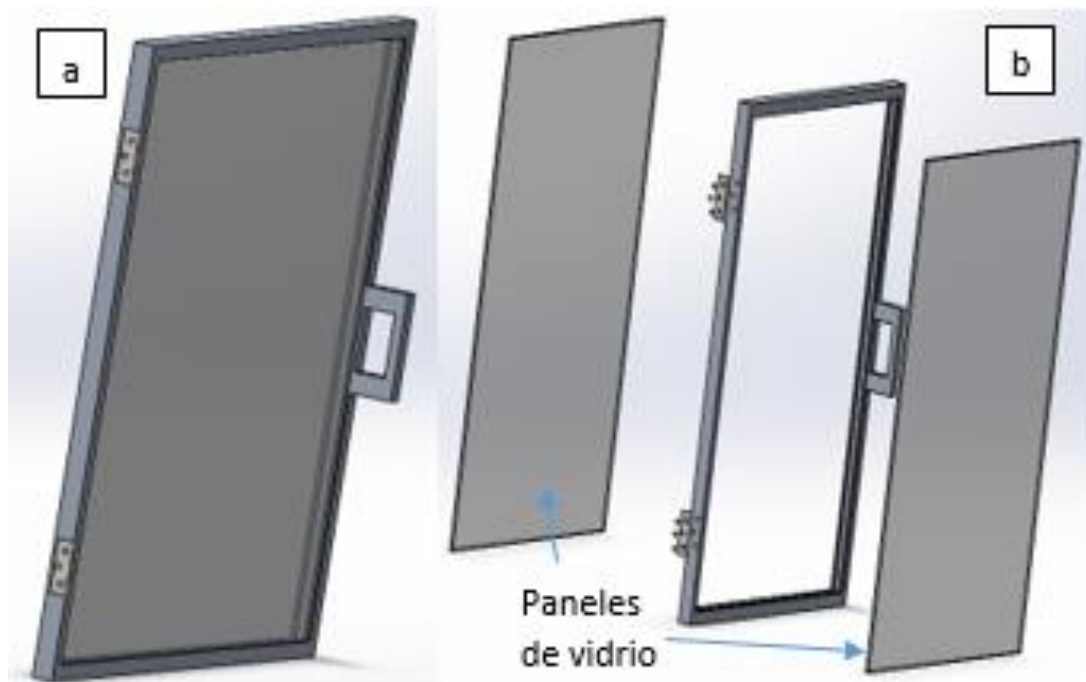


Figura 60. (a) Puerta de la cámara de la cámara termohigrométrica del equipo LAMBDA UNI, (b) vista explosionada de partes que conforman la puerta de la cámara termohigrométrica del equipo LAMBDA UNI.

De la Figura 60, el vidrio empleado en la elaboración de la puerta es un vidrio laminado de 6 mm de espesor.

Finalmente, en la Figura 61 se observa la imagen de la cámara instalada con el equipo LAMBDA UNI.

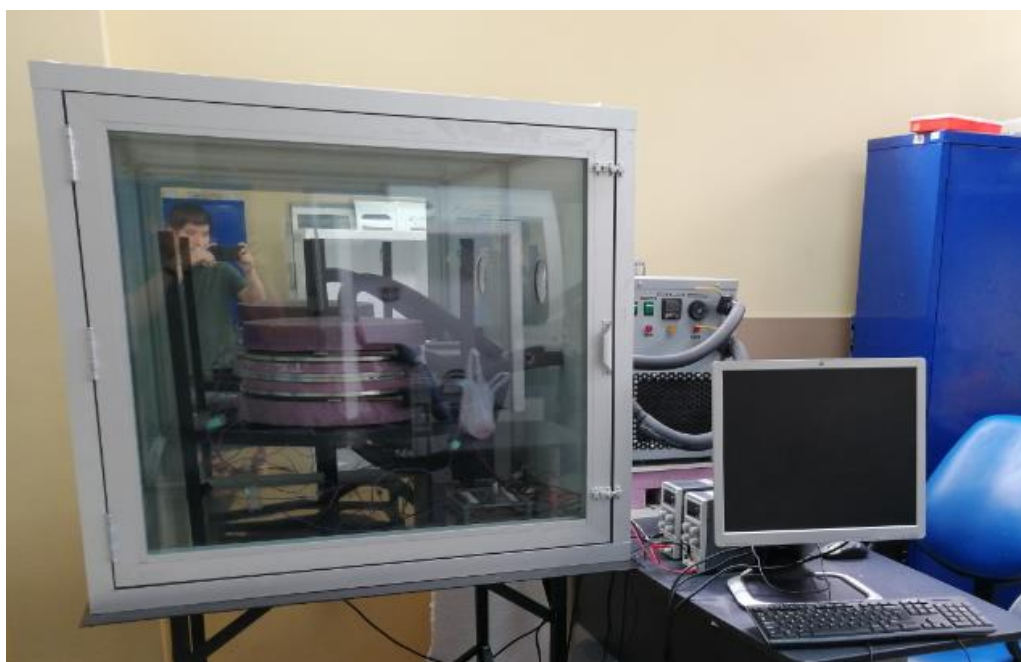


Figura 61. Equipo LAMBDA UNI instalado en la cámara termohigrométrica

Para finalizar, se realizó una prueba en la medición conductividad térmica, tomando al ladrillo como muestra para este ejercicio. En la Figura 62, se muestra el comportamiento de la temperatura y humedad en el interior de la cámara.

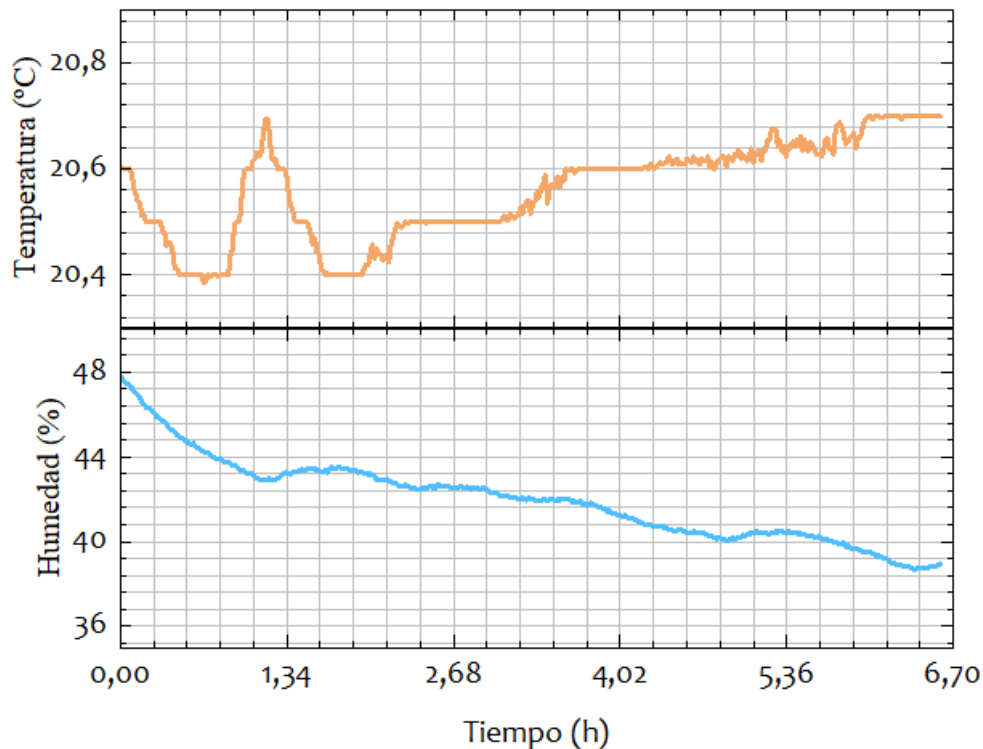


Figura 62. Condiciones de temperatura y humedad durante la medición la conductividad térmica del LP.

De la Figura 62, se observa que durante las primeras 0,5 hora la temperatura en el ambiente interior de la cámara desciende 0,2 °C, lo cual debería provocar un ligero incremento en la humedad del ambiente, sin embargo, observamos un descenso en la humedad de 3 %. A partir de las 0,5 horas hasta completar la primera hora aproximadamente, la temperatura en el ambiente se mantiene constante, sin embargo, la humedad en el ambiente continúa disminuyendo. Después de la primera hora, la temperatura ambiente se incrementa en un valor de 0,5 °C para posteriormente disminuir y mantenerse constante, todo esto hasta las 2,14 horas de medición, en este lapso de tiempo la humedad se mantuvo en valor promedio constante. Hasta ese momento el comportamiento de la temperatura y humedad fue similar a los que se presentaban cuando no se contaba con la cámara. Sin embargo, a partir de ese instante el comportamiento de la temperatura y humedad comenzarían a llevar una relación más razonable, en el que cuando la temperatura aumenta la humedad disminuye y cuando la temperatura se mantiene constante la humedad también tiene a mantenerse constante. En términos generales a excepción de las primeras 0,5 horas se observa que la tendencia de la temperatura ambiente es de incrementarse y la tendencia de la humedad es a disminuir. El descenso de la humedad contribuye a la reducción en la formación de escarcha de hielo en las placas frías y los serpentines de cobre del sistema mejorando así las condiciones de trabajo y la durabilidad el equipo LAMBDA UNI. Se deja a las futuras investigaciones que se realicen con el equipo LAMABDA UNI el continuar con el desarrollo de la segunda etapa de la implementación, a fin de mejorar las condiciones de uso del equipo.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha logrado concretar los objetivos planteados, y a partir de los resultados obtenidos en cada uno de estos se tienen las siguientes conclusiones:

1. Se elaboraron muestras laminares y compuestos estructurales tipo sándwich de materiales empleados en la industria de la construcción.
2. Se determinó el valor de conductividad térmica de las muestras laminares LP, DW, PLV, PLEX y ECOTERM cuyos valores de conductividad térmica fueron: $0,164 \pm 0,019 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,140 \pm 0,016 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0386 \pm 0,0042 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0502 \pm 0,0054 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, y $0,0513 \pm 0,0058 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, respectivamente.
3. Se determinó el valor de conductividad térmica de los compuestos tipo sándwich que emplearon ladrillo pastelero (LP) en las caras externas: LP-PLEX-LP, LP-ECOTERM-LP, LP-PLV-LP, cuyos valores fueron $0,0891 \pm 0,0102 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0709 \pm 0,0077 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, y $0,0602 \pm 0,0069 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, respectivamente.
4. Se determinó el valor de la conductividad térmica de los compuestos tipo sándwich que emplearon drywall (DW) en las caras externas: DW-ECOTERM-DW, DW-PLV-DW, y DW-PLEX-DW, cuyos valores fueron $0,0833 \pm 0,0094 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0675 \pm 0,0076 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, $0,0953 \pm 0,0107 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, respectivamente.
5. A partir de los resultados calculados para las conductividades térmicas de los materiales compuestos tipo sándwich, empleando los valores obtenidos experimentalmente para los materiales laminares individuales; se presentaron los errores relativos de los resultados experimentales respecto de los calculados, estos fueron de 26 %, 8 %, 11 %, 26 %, 2 % y 6 % para los compuestos DW-PLEX-DW, DW-ECOTERM-DW, DW-PLV-DW, LP-PLEX-PL, PL-ECOTERM-LP, y LP-PLV-PLV, respectivamente.
6. Por medio del uso del software COMSOL Multiphysics se presentaron los resultados de las simulaciones de los ensayos experimentales realizados. Para ello, se introdujeron los valores de conductividad térmica, obtenidos experimentalmente, y se procedió a comparar las temperaturas de la zona de medición y se encontraron diferencias porcentuales de 5 %, 0 %, 2 %, 4 %, 8 % y 1 % para los compuestos DW-PLEX-DW, DW-ECOTERM-DW, DW-PLV-DW, LP-PLEX-PL, PL-ECOTERM-LP, y LP-PLV-PLV, respectivamente.
7. La implementación del chiller al equipo LAMBDA UNI ha permitido trabajar con temperaturas en el rango de $-2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en las placas frías lo cual era imposible con el tanque de agua que trabajaba a temperatura ambiente que variaba de $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en invierno hasta $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en verano aproximadamente.

CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo del estudio planteado, han surgido una serie de observaciones que pueden contribuir a mejorar los resultados obtenidos en futuras investigaciones, estas se plantean a continuación a modo de recomendaciones:

1. En el presente trabajo se han considerado para el estudio 5 materiales distintos y de los cuales se formaron 6 compuestos estructurales diferentes, aunque esto es un aporte a la información de los materiales de construcción que se tiene a la fecha, cabe señalar que existen muchos otros materiales que podrían evaluarse bajo las mismas condiciones.
2. Es necesario definir las capacidades de trabajo del equipo LAMBDA UNI, así como validar la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante la evaluación de muestras referenciales cuyos valores de conductividad térmica ya han sido determinados por un laboratorio estandarizado.
3. Se debe realizar la calibración correspondiente a los instrumentos de medición empleados a fin de que estos se sumen al aporte de incertidumbre en los resultados.
4. Se debe mejorar las condiciones ambientales del entorno al sistema mediante un control de temperatura y humedad, a fin de evitar la condensación de agua en la superficie de las placas frías, especialmente cuando se trabaja a temperaturas cercanas a 0 °C.
5. Se debe verificar los sistemas de alimentación y conexión de pozo a tierra, a fin de evitar sobretensiones y sobrecorrientes que puedan dañar los circuitos, y/o corrientes parásitas que afecta la lectura adecuada de los sensores de medición.
6. Por último, se debe complementar con más pruebas que determinen otros parámetros térmicos y condiciones propias del lugar, a fin de reconocer con mayor certeza la idoneidad de estos compuestos.

CAPÍTULO 7: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Vatan, "Evolution of Construction Systems," in *Cultural Influences on Architecture*, A. Board, Ed. IGI GLOBAL, 2017, pp. 35–57.
- [2] SENAMHI, "Heladas," 2018.
<https://www.senamhi.gob.pe/public/images/senamhi-2018-helada.jpg>
(accessed Sep. 27, 2019).
- [3] SENAMHI, "Heladas y Frijaje/ Preguntas Frecuentes."
<https://www.senamhi.gob.pe/?p=heladas-y-friajes-preguntas> (accessed May 05, 2020).
- [4] Global Soalr Atlas, "Mapa de Irradiacion Global Horizontal Perú." SOLARGIS, 2018, [Online]. Available: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/peru>.
- [5] C. P. Lozano Ramón, "Aplicación de sistemas de ventilación para el confort térmico de las habitaciones en un conjunto de viviendas multifamiliares - distrito de Pichanaki," tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú, 2010.
- [6] M. J. M. P. Moya, "Estudio de las Propiedades Térmicas, Morfológicas y Estructurales del Adobe como Material Biocomposito," tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería, 2018.
- [7] ASTM, "ASTM C177: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot-Plate Apparatus." Whashington D.C., 2004, [Online]. Available: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C177-04.htm>.
- [8] Dirección Regional de Salud Cusco, "BOLETÍN EPIDEMIOLOGICO POR TEMPORADA DE BAJAS TEMPERATURAS N° 02 – 2020," *Gobierno Regional Cusco*, vol. 2. Lima, pp. 6–7, 2020.
- [9] M. Horn Mutschler, "Aprovechamiento descentralizado de fuentes renovables de energía," in *Matriz energética en el Perú y energías renovables*, Lima: Fundación Friedrich Ebert, 2010, p. 34.
- [10] R. Espinoza, "Evaluación experimental de La performance de dos componentes bioclimáticas de calentamiento aplicadas en un módulo de vivienda de San Francisco de Raymina-Ayacucho con el propósito de validarlas como técnicas de estrategias bioclimáticas para viviendas rurales Alto Andinas," tesis de maestria, Universidad Nacional de Ingeniería, 2014.
- [11] J. R. Molina Castillo, "Evaluación bioclimática de una vivienda rural Alto Andina de La Comunidad de San Francisco de Raymina de Ayacucho," tesis de maestria, Universidad Nacional de Ingeniería, 2016.

- [12] J. O. Molina Fuertes, "Evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda Alto Andina para lograr el confort térmico con energía solar," tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería, 2017.
- [13] J. O. Molina Fuertes, "Uso del programa energyplus para la simulación del consumo energético de un módulo bioclimático ubicado en imata, arequipa a 4519 msnm," tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, 2018.
- [14] F. S. Espinoza Castillo, "Caracterización térmica, estructural y mecánica de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa," tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2020.
- [15] K. Janampa Quispe, "Conductividad térmica de materiales utilizados en edificaciones de la región de Ayacucho," 2014.
https://dina.concytec.gob.pe/appDirectorioCTI/VerDatosInvestigador.do?id_inv_estigador=17520 (accessed May 24, 2020).
- [16] K. Janampa, O. Cerón, O. Morales, and J. Oré, "Thermal characterization of materials used in rural housing constructions in Ayacucho, Peru," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1433, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1433/1/012004.
- [17] J. Noel *et al.*, "Assessment of Ichu Fibers as Non Expensive Thermal Insulation System for the Andean Regions," 2015, [Online]. Available: <https://repositorio.utec.edu.pe/handle/UTEC/28?mode=full>.
- [18] Viceministerio de Ordenanza Territorial, "Plan multisectorial ante heladas y friaje 2019-2021." 2019, [Online]. Available: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/350878/Plan_Multisectorial_ante_Heladas_y_Friaje_2019_COMPLETO_FINAL_TRIMBOX.pdf.
- [19] Presidencia de Consejo de Ministros, "Plan Nacional De Intervencion Para Enfrentar Los Efectos De La Temporada De Heladas Y Friaje 2012." 2012, [Online]. Available: https://www.mef.gob.pe/contenidos/archivos-descarga/Plan_Heladas_y_Friaje_2012.pdf.
- [20] Global Humanitaria, "Se entregó ropa de abrigo a niños y niñas de escuelas en Puno," 2015. <http://globalhumanitariaperu.org/2015/08/14/se-entrego-ropa-de-abrigo-a-ninos-y-ninas-de-escuelas-en-puno/>.
- [21] INEI, "Viviendas particulares con paredes de adobe o tapia," *Sistema de Información Regional para la Toma de Decisiones*.
<http://censos2017.inei.gob.pe/redatam/> (accessed May 11, 2020).
- [22] B. Aguilar Prieto, *Construir con adobe : Fundamentos, reparación de daños y diseño contemporáneo*. Mexico DF: Trillas, 2008.
- [23] G. A. Abanto, M. Karkri, G. Lefebvre, M. Horn, J. L. Solis, and M. M. Gómez, "Thermal properties of adobe employed in Peruvian rural areas: Experimental results and numerical simulation of a traditional bio-composite material," *Case*

- Stud. Constr. Mater.*, vol. 6, pp. 177–191, 2017, doi: 10.1016/j.cscm.2017.02.001.
- [24] PNUD-Perú, “El reto de la igualdad,” 2019. [Online]. Available: <https://www.pe.undp.org/content/peru/es/home/library/poverty/el-reto-de-la-igualdad.html>.
- [25] ANDINA, “Número de viviendas rurales para heladas y friaje se triplicará en el 2020,” 2019. <https://andina.pe/agencia/noticia-numero-viviendas-rurales-para-heladas-y-friaje-se-triplicara-el-2020-776224.aspx> (accessed May 30, 2021).
- [26] Ministerio de Vivienda Peru, “Esto es lo que debes saber sobre las viviendas bioclimáticas Sumaq Wasi,” 2020. <https://www.facebook.com/ViviendaPeru/videos/855981525176042/?t=13> (accessed May 30, 2021).
- [27] B. P. Jelle, “Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - Properties, requirements and possibilities,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 10, pp. 2549–2563, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015.
- [28] J. Zagorskas, E. K. Zavadskas, Z. Turskis, M. Burinskiene, A. Blumberga, and D. Blumberga, “Thermal insulation alternatives of historic brick buildings in Baltic Sea Region,” *Energy Build.*, vol. 78, pp. 35–42, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.04.010.
- [29] M. Reif, J. Zach, and J. Hroudová, “Studying the Properties of Particulate Insulating Materials on Natural Basis,” *Procedia Eng.*, vol. 151, pp. 368–374, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.390.
- [30] W. Zhou, C. Zhao, X. Liu, X. Chang, and C. Feng, “Mesoscopic simulation of thermo-mechanical behaviors in concrete under frost action,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 117–131, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.009.
- [31] C. Feng, S. Roels, and H. Janssen, “Towards a more representative assessment of frost damage to porous building materials,” *Build. Environ.*, vol. 164, no. August, p. 106343, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106343.
- [32] M. M. Santiago Daga, “Resistencia térmica y mecánica de mortero con cemento sustituido 5% y 10% por cenizas de ichu,” tesis de pregrado, Universidad San Pedro, 2018.
- [33] M. H. Cuenca Mallma, “Diseño y Construcción de un Aparato Medidor de Conductividad Térmica de Materiales Sólidos,” tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería, 2020.
- [34] W. Callister y D. Rethwisch, *Composites*, 9th ed. United States of America: Wiley, 2013.
- [35] D. D. S. Guangping Han, Qinglin Han, *Introduction to Wood and Natural Fiber*

Composites, 1st ed. United States of America: Wiley, 2013.

- [36] J. M. Malavia Otero, "Caracterización de paneles sandwich híbridos frp con alma de nido de abeja de aluminio," tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [37] HexCel Composites, "Honeycomb sandwich design technology," *HexWeb Honeycomb Sandw. Des. Technol.*, no. AGU 075b, pp. 1–28, 2000, [Online]. Available:
https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf.
- [38] P. P. Urone and R. Hinrichs, "Heat Transfer Methods," in *College Physics*, Houston, Texas: OpenStax, 2012, pp. 517–556.
- [39] R. W. Serth and L. Thomas, "Heat Conduction," in *Process Heat Transfer*, 2nd ed., Texas: Academic Press, 2014, pp. 1–30.
- [40] A. Martín Domingo, "Apuntes de transferencia de calor," *Universidad Politécnica de Madrid*. Departamento de Física e Instalaciones, Madrid, 2011, [Online]. Available: <http://oa.upm.es/37245/1/amd-apuntes-transmision-calor-v2.6.pdf>.
- [41] A. J. Chapman, *Transmisión del Calor*, 3rd ed. Madrid: McMILLAN PUBLISHING COMPANY, 1990.
- [42] A. L. P. Robert R. Zarr, "Expanded Polystyrene Board, for Thermal Conductivity from 281 K to 313 K," 2012. [Online]. Available:
<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.260-175.pdf>.
- [43] AAISLACORP 2000, "Panel lana de vidrio." 2018, [Online]. Available:
<https://www.aaislacorp.com/producto/panel-de-lana-de-vidrio/>.
- [44] Texeco, "Aislante Térmico y Absorbente Acústico (Ecoterm)." p. 1, 2016, [Online]. Available:
http://www.texecoperu.com.pe/assets/docs/FICHA_ECOTERM.pdf.
- [45] VOLCAN, "Planchas de Yeso Cartón - Volcanita ST." pp. 1–8, [Online]. Available:
<http://www.especificar.cl/fichas/planchas-de-yeso-carton-volcanita-st>.
- [46] H. D. Young and R. A. Freedman, *Temperatura y Calor*, 12th ed. México.: Pearson, 2009.
- [47] G. M. Betancourt, "Diseño, construcción y caracterización de un instrumento de placas planas paralelas con guarda con doble lado de medición y con cámara de ambiente controlado para determinar la conductividad térmica de materiales sólidos," Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2005.
- [48] P. R. RATAche ROJAS, "Informe N°001 -2019/UNI," Lima, 2019.

- [49] F. S. Espinoza Castillo, "Caracterización Térmica de una Ignimbrita (Sillar) de la Región de Arequipa," Universidad Nacional de Ingeniería, 2018.
- [50] MAESTRO, "Plancha de drywall volcánica 1/2".
<https://www.maestro.com.pe/cart/search/0c83093a8257df127340b20b9cd1c9d9?rel=page&page=2>.
- [51] PROMART, "Ladrillo Pastelero." <https://www.promart.pe/ladrillo-pastelero/p>.
- [52] JARA RESISTENCIAS SRL, "Aislamiento para el frío y calor."
<http://www.jararesistencias.com/index2#contacto>.
- [53] SODIMAC, "Lana Poliéster Ecoterm." <https://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/product/2225638/lana-poliester-ecoterm>.
- [54] PROMART, "Poliéstereno expandido de 1" 1.20 x 2.40 metros."
<https://www.promart.pe/poliestereno-expandido-de-1--1-20-x-2-40m/p>.
- [55] ASTM, "Standard Practice for Calculating Thermal Transmission Properties Under Steady-," *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 14, no. June, pp. 1–13, 2012, doi: 10.1520/C1045-07R13. Copyright.
- [56] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Transferencia de Calor y Masa*, 4th ed. Mexico DF, 2011.

ANEXOS

ANEXOS 1: ANÁLISIS Y CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE.

En el presente anexo se desarrollan las pautas necesarias para el cálculo de incertidumbre asociados a los resultados de una medición.

Incertidumbre de la suma o resta de 2 o más variables

Sean el mensurando X la suma o resta de otros 2 mensurandos X_1 y X_2 , entonces.

$$\mu_X = \mu_{X_1} + \mu_{X_2} \quad (38)$$

Donde:

μ_X : es la incertidumbre del mensurando X

μ_{X_1} : es la incertidumbre del mensurando X_1

μ_{X_2} : es la incertidumbre del mensurando X_2

Incertidumbre del producto o división de 2 o más variables:

De la ley de propagación de incertidumbre se tiene que, dado un mensurando $f = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, donde x_1, x_2, \dots, x_n son los factores que determinan el valor del mensurando, entonces la incertidumbre asociada a dicho mensurando queda definida de acuerdo a la ecuación 39.

$$\mu_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \mu_{x_i}^2} \quad (39)$$

$$\mu_f = f \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \left[\frac{\mu_{x_i}}{f} \right]^2} \right) \quad (40)$$

Donde:

x_i : factor i -ésimo del mensurando f

μ_f : Incertidumbre del mensurando f

μ_{x_i} : es la incertidumbre típica del factor x_i .

Si $x_1, x_2, \dots, y x_n$ son independientes, entonces:

$$\left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \left[\frac{I}{f} \right]^2 = \frac{I}{x_i} \quad (41)$$

$$\mu_{f=f} \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\mu_{x_i}}{x_i} \right]^2} \right) \quad (42)$$

$$\mu_{f=f} \left(\sqrt{\left[\frac{\mu_{x_1}}{x_1} \right]^2 + \left[\frac{\mu_{x_2}}{x_2} \right]^2 + \dots + \left[\frac{\mu_{x_n}}{x_n} \right]^2} \right) \quad (43)$$

El valor de un mensurando independiente x se define de forma sencilla, como la suma del promedio de medidas realizadas \bar{I}_x , la corrección debido al certificado de calibración C_{certf} , la corrección debido a la resolución del instrumento C_{resol} , la corrección debido especificaciones del instrumento C_{espf} , corrección debido a la deriva del instrumento C_{derv} y correcciones debido a distinto factores que afecten al valor del mensurando C_{df} como se indica en la ecuación 44:

$$x = \bar{I}_x + C_{certf} + C_{resol} + C_{espf} + C_{derv} + C_{df} \quad (44)$$

Las correcciones debido a la resolución, las especificaciones, la deriva y distintos factores que afectan el valor del mensurando se considera que su valor más probable es cero, de este modo la ecuación 45 se reduce a la ecuación 45 tal como se muestra.

$$x = \bar{I}_x + C_{certf} \quad (45)$$

Sin embargo, en cálculo de la incertidumbre si se considera el aporte de todos de todas las correcciones, y el aporte debido a la repetibilidad de las medidas realizadas, tal como se indica en la ecuación 46.

$$\mu_x = \sqrt{\mu_{\bar{I}_x}^2 + \mu_{certf}^2 + \mu_{resol}^2 + \mu_{espf}^2 + \mu_{derv}^2 + \mu_{df}^2} \quad (46)$$

Donde:

μ_x : Incertidumbre combinada del mensurando x .

$\mu_{\bar{I}_x}$: Incertidumbre debido a la repetibilidad.

μ_{certf} : Incertidumbre debido a la corrección por certificado de calibración del instrumento de medición.

μ_{resol} : Incertidumbre debido a la corrección por resolución del instrumento de medición.

μ_{espf} : Incertidumbre debido a la corrección por especificaciones del instrumento de medición.

μ_{deriv} : Incertidumbre debido a la corrección por deriva del instrumento de medición.

μ_{df} : Incertidumbre debido a la corrección por diversos factores que afectan las mediciones realizadas con el instrumento de medición.

Incertidumbre debido a la repetibilidad:

$$\mu_{\bar{I}_x} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (47)$$

Donde:

S: desviación estándar de los datos medidos

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (I_{x_i} - \bar{I}_x)^2}{n-1}} \quad (48)$$

I_{x_i} : medición i-ésima del mensurando.

n: número de mediciones realizadas

Incertidumbre debido a la corrección por certificado de calibración del instrumento de medición:

Este dato se obtiene en el certificado eléctrico de calibración del instrumento de medición.

Incertidumbre debido a la corrección por resolución del instrumento de medición digital:

$$\mu_{resol} = d/2\sqrt{3} \quad (49)$$

Donde:

d : resolución del instrumento de medición.

Incertidumbre debido a la corrección por especificaciones del instrumento de medición.

$$\mu_{esp} = EMP/\sqrt{3} \quad (50)$$

Donde:

EMP: Error Máximo Permitido, se obtiene en la ficha técnica del instrumento de medición.

Incertidumbre debido a la corrección por deriva del instrumento de medición.

$$\mu_{deriv} = |Dv|/\sqrt{3} \quad (51)$$

Donde:

Dv : deriva del instrumento de calibración.

$$Dv = (U_{certf_{ultimo}} - U_{certf_{penultimo}})/t \quad (52)$$

$U_{certf_{ultimo}}$: incertidumbre del ultimo certificado de calibración.

$U_{certf_{penultimo}}$: incertidumbre del penúltimo certificado de calibración.

t : periodo de calibración del instrumento de medición.

Incertidumbre debido a la corrección por diversos factores que afectan las mediciones realizadas con el instrumento de medición.

Incertidumbre de la corrección determinada mediante el estudio de diversos factores que pueden influir en los resultados de la medición, por lo general dependen del tipo de magnitud del mensurando.

Cálculo de incertidumbre de la conductividad térmica

El cálculo de la conductividad térmica de los materiales y compuestos medidos en el equipo LAMBDA UNI quedo definida mediante la ecuación 2, como:

$$\lambda = \frac{Q e}{2A \Delta T} \quad (53)$$

Dado que, $\lambda = \lambda(Q, e, 2A, \Delta T)$, donde Q , e , $2A$, y ΔT son independientes. Entonces el cálculo de incertidumbre de la conductividad térmica queda definido por la siguiente ecuación.

$$\mu_{\lambda} = \lambda \left(\sqrt{\left(\frac{\mu_Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\mu_e}{e}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{2A}}{2A}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{\Delta T}}{\Delta T}\right)^2} \right) \quad (54)$$

Cálculo de incertidumbre de cada uno de los factores que determinan la conductividad térmica.

En el presente estudio, para el cálculo de la incertidumbre combinada de los factores que determinan el valor de la conductividad térmica, no se han considerado las aportantes de incertidumbre debido a las correcciones por certificado de calibración, deriva y diversos factores, dado que no se cuenta con esta información en primera instancia.

Incertidumbre del flujo de calor:

$$Q = VI \quad (55)$$

$$Q = Q(V, I) \quad (56)$$

$$\mu_Q = Q \left(\sqrt{\left(\frac{\mu_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\mu_I}{I}\right)^2} \right) \quad (57)$$

Donde:

$$\mu_V = \sqrt{\mu_{I_V}^2 + \mu_{resol}^2 + \mu_{espf}^2} \quad (58)$$

$$\mu_I = \sqrt{\mu_{I_I}^2 + \mu_{resol}^2 + \mu_{espf}^2} \quad (59)$$

Incertidumbre debido al espesor promedio de las muestras:

$$e = \frac{e_{sup} + e_{inf}}{2} \quad (60)$$

$$\mu_e = \frac{\mu_{e_{sup}} + \mu_{e_{inf}}}{2} \quad (61)$$

Donde:

$$\mu_{e_{sup}} = \sqrt{\mu_{I_{e_{sup}}}^2 + \mu_{resol}^2 + \mu_{espf}^2} \quad (62)$$

$$\mu_{e_{inf}} = \sqrt{\mu_{I_{e_{inf}}}^2 + \mu_{resol}^2 + \mu_{espf}^2} \quad (63)$$

Incertidumbre debido al área total de medición:

$$2A = 2 \left(A_{ZM} + \frac{A_g}{2} \right) \quad (64)$$

$$\mu_{2A} = 2 \left(\mu_{A_{ZM}} + \frac{\mu_g}{2} \right) \quad (65)$$

Donde:

$$A_{ZM} = \frac{\pi D_1^2}{4} \quad (66)$$

$$\mu_{A_{ZM}} = A_{ZM} \left(\sqrt{\left(\frac{\mu_{D_1}}{D_1} \right)^2 + \left(\frac{\mu_{D_1}}{D_1} \right)^2} \right) \quad (67)$$

$$\mu_{A_{ZM}} = \frac{\pi D_1^2}{4} \left(\frac{\sqrt{2} \mu_{D_1}}{D_1} \right) \quad (68)$$

$$\mu_{A_{ZM}} = \frac{\pi \sqrt{2} D_1 \mu_{D_1}}{4} \quad (69)$$

D_1 : Diámetro de la zona de medición.

μ_{D_1} : Incertidumbre del diámetro de zona de medición.

$$\mu_{D_1} = \sqrt{\mu_{I_{D_1}}^2 + \mu_{resol}^2 + \mu_{espf}^2} \quad (70)$$

$$A_g + A_{ZM} = \frac{\pi D_2^2}{4} \quad (71)$$

$$A_g = \frac{\pi D_2^2}{4} - A_{ZM} \quad (72)$$

$$A_g = \frac{\pi D_2^2}{4} - \frac{\pi D_1^2}{4} \quad (73)$$

$$A_g = \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)}{4} \quad (74)$$

$$\mu_{A_g} = \frac{\pi\sqrt{2}(D_1\mu_{D_1} + D_2\mu_{D_2})}{4} \quad (75)$$

D_2 : Diámetro de la zona de medición más gap.

$$\mu_{D_2} = \sqrt{\mu_{\bar{T}_{D_2}}^2 + \mu_{resol}^2 + \mu_{espf}^2} \quad (76)$$

μ_{D_2} : Incertidumbre del diámetro de zona de medición más gap.

Incertidumbre debido al gradiente de temperatura:

$$\Delta T = T_{ZM} - T_F \quad (77)$$

$$T_F = \frac{T_{Fsup} + T_{Finf}}{2} \quad (78)$$

$$\Delta T = T_{ZM} - \frac{T_{Fsup} + T_{Finf}}{2} \quad (79)$$

$$\mu_{\Delta T} = \mu_{T_{ZM}} + \frac{\mu_{T_{Fsup}} + \mu_{T_{Finf}}}{2} \quad (80)$$

Donde:

$$\mu_{T_{ZM}} = \sqrt{\mu_{\bar{T}_{ZM}}^2 + \mu_{resol}^2 + \mu_{espf}^2} \quad (81)$$

$$\mu_{T_{Fsup}} = \sqrt{\mu_{\bar{T}_{Fsup}}^2 + \mu_{resol}^2 + \mu_{espf}^2} \quad (82)$$

$$\mu_{T_{Finf}} = \sqrt{\mu_{\bar{T}_{Finf}}^2 + \mu_{resol}^2 + \mu_{espf}^2} \quad (83)$$

A continuación, se detalla el cálculo de incertidumbre para el compuesto de ladrillo-lana de vidrio-ladrillo.

Tabla 11. Datos para el cálculo de la Incertidumbre combinada de la tensión eléctrica suministrada a la zona de medición.

\bar{I}_V (V)	n	S (V)	d (V)	EMP (V)	$\mu_{\bar{I}_V}$ (V)	μ_{resol} (V)	μ_{espf} (V)	μ_V (V)
2,65	2366	0,00397784	0,01	0,01325	8,1779E-05	0,00288675	0,00764989	0,00817685

Tabla 12. Datos para el cálculo de la Incertidumbre combinada de la corriente eléctrica suministrada a la zona de medición.

\bar{I}_I (A)	n	S (A)	d (A)	EMP (A)	$\mu_{\bar{I}_I}$ (A)	μ_{resol} (A)	μ_{espf} (A)	μ_I (A)
0,3264	2366	0,0001526	0,0008	0,0016	3,138E-06	0,0002309	0,000942	0,0009698

Tabla 13. Datos para el cálculo de la Incertidumbre combinada del espesor de la muestra superior.

$\bar{I}_{e_{sup}}$ (m)	n	S (m)	d (m)	EMP (m)	$\mu_{\bar{I}_{e_{sup}}}$ (m)	μ_{resol} (m)	μ_{espf} (m)	$\mu_{e_{sup}}$ (m)
0,03648	5	9,0167E-05	0,00001	0,00004	4,03237E-05	2,887E-06	0,00002	0,00005

Tabla 14. Datos para el cálculo de la Incertidumbre combinada del espesor de la muestra inferior.

$\bar{I}_{e_{inf}}$ (m)	n	S (m)	d (m)	EMP (m)	$\mu_{\bar{I}_{e_{inf}}}$ (m)	μ_{resol} (m)	μ_{espf} (m)	$\mu_{e_{inf}}$ (m)
0,03647	5	7,3824E-05	0,00001	0,00004	3,30151E-05	2,8868E-06	0,00002	0,00005

Tabla 15. Datos para el cálculo de la Incertidumbre combinada del diámetro de la zona de medición.

\bar{I}_{D_1} (m)	n	S (m)	d (m)	EMP (m)	$\mu_{\bar{I}_{D_1}}$ (m)	μ_{resol} (m)	μ_{espf} (m)	μ_{D_1} (m)
0,15003	6	0,00012614	0,00001	0,00004	5,149E-05	2,8868E-06	2,3094E-05	0,00006

Tabla 16. Datos para el cálculo de la Incertidumbre combinada del diámetro de la zona de medición más gap.

\bar{I}_{D_2} (m)	n	S (m)	d (m)	EMP (m)	$\mu_{\bar{I}_{D_2}}$ (m)	μ_{resol} (m)	μ_{espf} (m)	μ_{D_2} (m)
0,15096	6	9,0701E-05	0,00001	0,00004	3,703E-05	2,8868E-06	2,3094E-05	0,00004

Tabla 17. Datos para el cálculo de la Incertidumbre combinada de la temperatura en la zona de medición.

$\bar{I}_{T_{ZM}}$ (°C)	n	S (°C)	d (°C)	EMP (°C)	$\mu_{\bar{I}_{T_{ZM}}}$ (°C)	μ_{resol} (°C)	μ_{espf} (°C)	$\mu_{T_{ZM}}$ (°C)
15,72	7098	0,15484778	0,01	0,72	0,00183796	0,00288675	0,41775911	0,41777312

Tabla 18. Datos para el cálculo de la Incertidumbre combinada de la temperatura en la placa fría superior.

\bar{T}_{Fsup} (°C)	n	S (°C)	d (°C)	EMP (°C)	$\mu_{T_{Fsup}}$ (°C)	μ_{resol} (°C)	μ_{espf} (°C)	$\mu_{T_{Fsup}}$ (°C)
0,92	2366	0,040654	0,01	0,70	0,00083579	0,00288675	0,40494356	0,40495471

Tabla 19. Datos para el cálculo de la Incertidumbre combinada de la temperatura en la placa fría inferior.

\bar{T}_{Finf} (°C)	n	S (°C)	d (°C)	EMP (°C)	$\mu_{T_{Finf}}$ (°C)	μ_{resol} (°C)	μ_{espf} (°C)	$\mu_{T_{Fsup}}$ (°C)
1,32	2366	0,041850	0,01	0,70	0,00086038	0,00288675	0,40529038	0,40530157

Tabla 20. Datos para el cálculo de los factores que determinan el valor de la conductividad térmica.

V (V)	I (A)	e_{sup} (m)	e_{inf} (m)	D_1 (m)	D_2 (m)	T_{ZM} (°C)	T_{Fsup} (°C)	T_{Finf} (°C)
2,65	0,3264	0,03648	0,03647	0,15003	0,15096	15,72	0,92	1,32

Tabla 21. Datos para el cálculo de la Incertidumbre de la conductividad térmica.

Q (W)	e (m)	$2A$ (m ²)	ΔT (°C)	μ_Q (W)	μ_e (m)	μ_{2A} (m ²)	$\mu_{\Delta T}$ (°C)
0,865	0,03646	0,03558	14,60	0,003705926	0,00005	3,67017E-05	0,822901268

De los datos mostrados en las tablas

$$\lambda = 0,0607 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\mu_\lambda = 0,0035 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$U_\lambda = 2\mu_\lambda$$

$$U_\lambda = 0,0069 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Finalmente se muestra el valor de la conductividad térmica con una incertidumbre a un nivel de confianza del 95%.

$$\lambda = 0,0607 \text{ W/m}^\circ\text{C} \pm 0,0069 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

ANEXOS 2: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN PARA EL EQUIPO LAMBDA UNI

En la construcción inicial del equipo LAMBDA UNI el proceso de refrigeración de las placas frías se daba a través de la circulación de agua por medio de una bomba conectada a un tanque de agua de 750 litros. Este sistema de refrigeración no permitía un control adecuado de las temperaturas en las placas frías ya que la temperatura del agua cambiaba aleatoriamente según las condiciones ambientales durante el día.

Esto llevo a la implementación de un nuevo sistema de refrigeración de las placas frías, por medio de un chiller, el cual permite realizar un control de temperatura en las placas frías. A continuación, se muestra la una imagen del chiller.

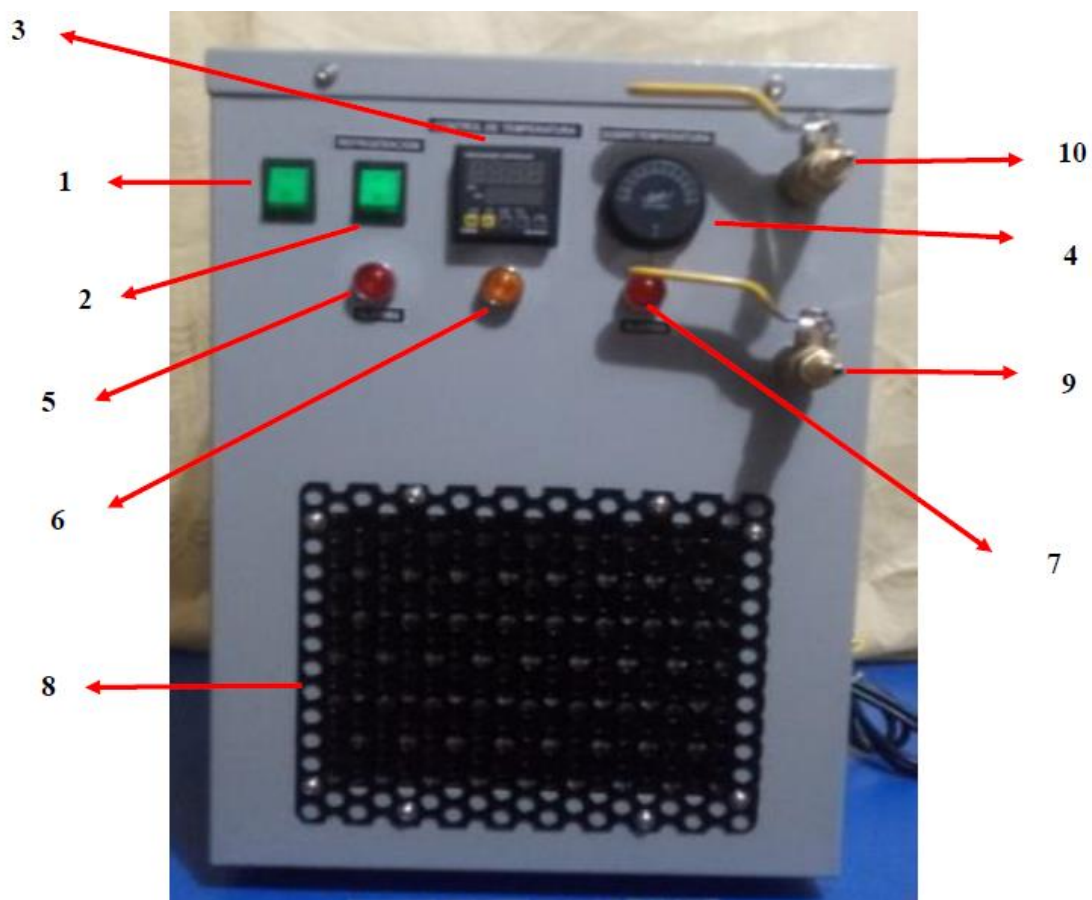


Figura 63. Vista frontal del Chiller.

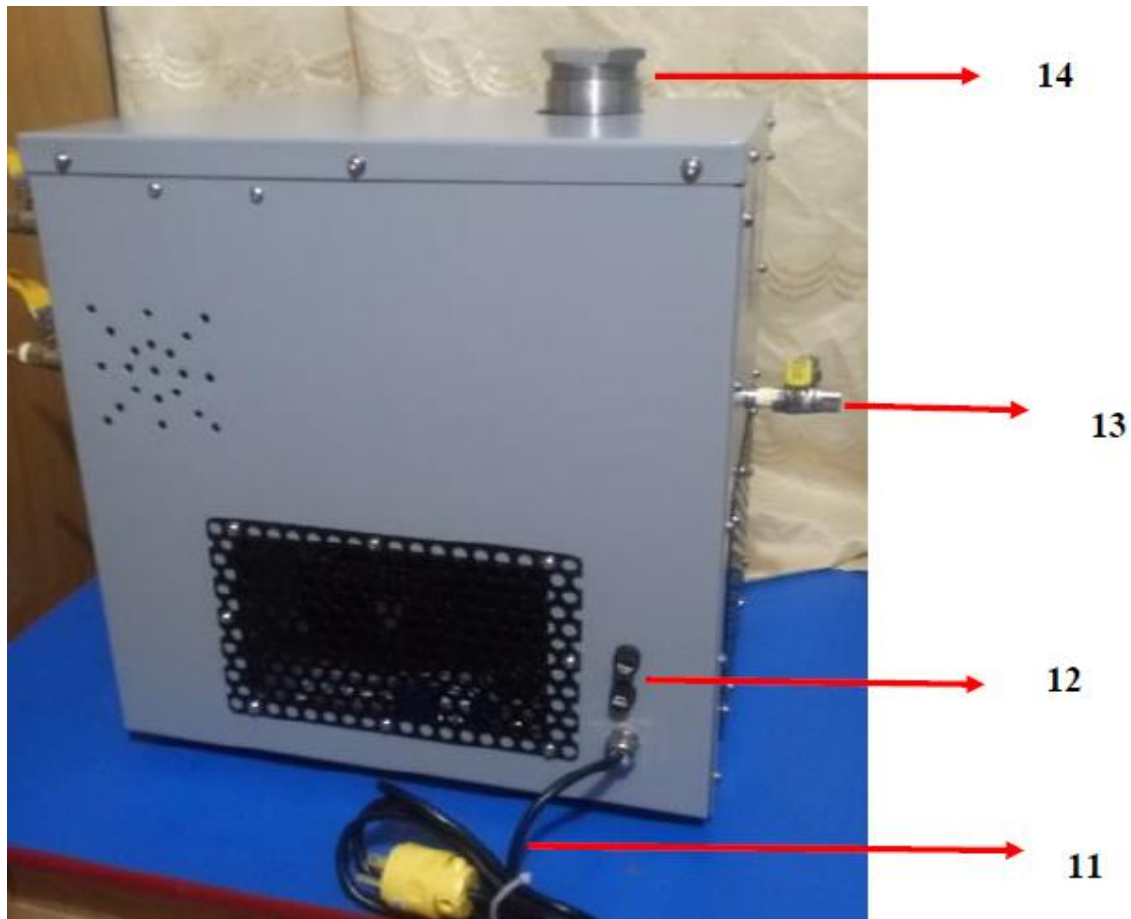


Figura 64. Vista lateral del Chiller.

Partes del Chiller:

1. Interruptor de encendido general
2. Interruptor de encendido del sistema de refrigeración
3. Controlador de temperatura digital
4. Control de sobre temperatura
5. Foco piloto de bajo nivel de agua
6. Foco piloto de resistencia de calentamiento
7. Foco piloto de sobre temperatura
8. Condensador del sistema de refrigeración
9. Válvula de salida de agua del tanque de almacenamiento
10. Válvula de ingreso de agua del tanque de almacenamiento
11. Cable de alimentación
12. Fusible de protección
13. Válvula de drenaje de agua del tanque de almacenamiento
14. Tapa para el ingreso de agua al tanque de almacenamiento

Este equipo nos brinda la posibilidad de abarcar un gran rango de temperaturas a las que se puede someter a las placas frías, y por ende un mayor abanico de condiciones

a la que se puedan realizar las pruebas de conductividad térmica con el equipo LAMBDA UNI. En la Tabla 22 se muestra las especificaciones técnicas del chiller.

Tabla 22. Especificaciones técnicas del chiller.

Modelo	CHSE5L
Tipo	Con sistema de recirculación y refrigeración
Marca	FAEL TECHNICAL SERVICE
Dimensiones Exteriores	Ancho 33 cm; Fondo 43 cm; Alto 49 cm
Capacidad del tanque de almacenamiento	6 litros
Capacidad de la bomba de agua	15 litros por minuto
Energía	220 V – 60 Hz
Potencia	1500 W – 7 A
Tipo de gas refrigerante	R-134a
Temperatura	-15 °C – 50 °C

Uso y Manejo del chiller:

1. Abrir la tapa de ingreso de agua al tanque, y verificar que las válvulas de agua se encuentren completamente cerradas.
2. Verter 6 litros de líquido al tanque, agua destilada o desionizada para temperaturas ensayo de 5 °C a 50 °C y alcohol para temperaturas de -15 °C a 5 °C.
3. Conectar con mangueras las válvulas de ingreso y salida del chiller al serpentín de cobre en contacto con las placas frías, una vez conectadas abrir las válvulas.
4. Conectar el equipo a una toma corriente.
5. Regular el termostato de protección a una temperatura superior a la temperatura de trabajo.
6. Encender el sistema de control de temperatura del equipo con interruptor “verde”, según las siguientes indicaciones:
Posición “I” Interruptor principal de encendido.
Posición “O” Interruptor principal de apagado.
7. Al encender dicho interruptor el controlador de temperatura y la bomba de agua se encienden, en caso de que la bomba de agua no se encienda y el foco piloto de bajo nivel de agua se prenda, se deberá añadir agua, o el líquido que se esté empleando, al tanque de almacenamiento hasta que dicho foco piloto se apague y la bomba de agua se encienda.
8. Una vez que el nivel de agua sea el adecuado, cerrar la tapa del tanque para que no se contamine el agua del tanque de almacenamiento.

9. Programar la temperatura de trabajo, el cual se realiza mediante la configuración del controlador de temperatura Autonics:



Figura 65. Controlador de temperatura Autonics.

La configuración se realiza de la siguiente manera:

- Presionar el pulsador ◀ y aparecerá un dígito parpadeante; con este pulsador se podrá seleccionar el dígito a modificar por desplazamiento a la izquierda de la siguiente forma:
 - * Con el pulsador ▲ se incrementa en uno al dígito parpadeante desde 0 hasta 9.
 - * Con el pulsador ▼ se disminuye en uno al dígito parpadeante desde 9 hasta 0.
 - Una vez seleccionada la temperatura de trabajo presionar el pulsador “MD” para validar o introducir la temperatura de trabajo.
 - Cada vez que se realice una modificación de temperatura, es necesario presionar el pulsador “MD”.
 - NO SE DEBE PRESIONAR EL PULSADOR “AT”, YA QUE PUEDE ALTERAR LOS DATOS DE CONFIGURACION DEL CONTROLADOR.
10. Una vez programada la temperatura de trabajo, se deberá encender el sistema de refrigeración si el equipo va a trabajar a temperaturas inferiores o iguales a 20 °C, es necesario encender el interruptor “verde” según las siguientes indicaciones:
Posición “I” Interruptor principal de encendido.
Posición “O” Interruptor principal de apagado.
 11. Durante el ensayo, en el equipo se observará que el foco piloto color anaranjado se enciende y se apaga simultáneamente, lo que nos indica que la resistencia de calentamiento está siendo controlada para mantener la temperatura constante dentro del tanque de almacenamiento.

12. Luego de terminado el ensayo, colocar los interruptores en la posición "O" y desconectar el equipo.

NOTA: Si el termostato de protección de sobre temperatura se activara, es necesario apagar el interruptor de encendido para resetear el sistema, se debe regular adecuadamente el termostato de protección y volver a encender el equipo, de persistir el problema se debe contactar el proveedor y coordinar una evaluación del estado del equipo.

ANEXOS 3: DATOS GRÁFICOS DE LA TEMPERATURA EN LA ZONA MEDICIÓN OBTENIDOS EN LAS SIMULACIONES CON COMOSOL MULTIPHYSICS.

Las simulaciones en COMSOL Multiphysics, nos permiten tener una mejor comprensión visual de las temperaturas alcanzadas en los compuestos evaluados durante el estado estacionario. El diseño del equipo LAMBDA UNI en el software COMSOL Multiphysics se realizó considerando los mismos materiales y dimensiones del equipo real, de modo que se fijaron las propiedades correspondientes de sus componentes en diseño de COMSOL. Las placas frías y calientes son de duraluminio y se consideró un valor de conductividad térmica de $164 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, para los aislantes de borde se consideró el poliestireno extruido un valor de conductividad térmica de $0,041 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$, además, se consideró la temperatura del aire exterior al equipo con un valor de $21 \text{ }^\circ\text{C}$.

Por otro lado, para cada ensayo realizado fue necesario introducir los valores de las temperaturas de las placas frías, las potencias suministradas a la zona de medición y zona de guarda, el espesor total y la conductividad termia del compuesto, los cuales se han obtenido previamente de manera experimental. A continuación, se muestran los datos gráficos de las temperaturas en la zona de medición y zona de guarda provenientes de las simulaciones.

Para el Drywall - PLEX:

Para el compuesto Drywall – PLEX, se definieron los parámetros de la potencia suministrada al anillo de nicrom en la zona de guarda con un valor de $0,938 \text{ W}$ y en el anillo de nicrom de la zona de medición con un valor de $1,002 \text{ W}$, la temperatura en las placas frías con un valor de $-0,64 \text{ }^\circ\text{C}$, un espesor total del compuesto de $0,04907 \text{ m}$, y una conductividad térmica de $0,0938 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$.

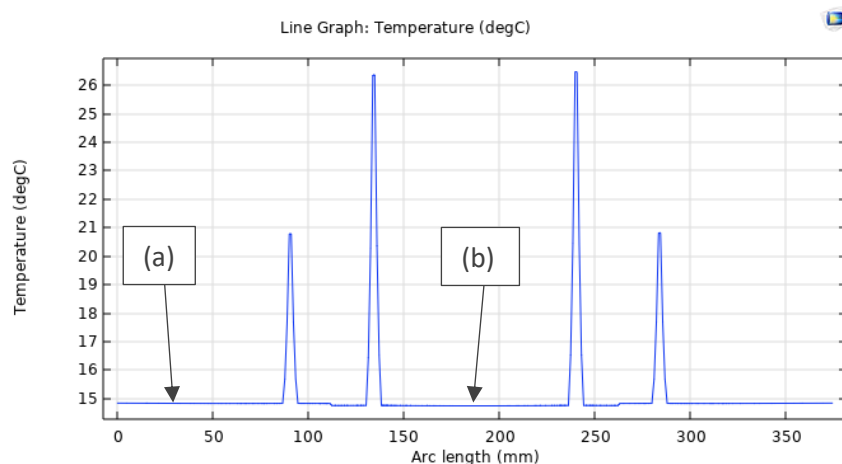


Figura 66. Gráfico de la temperatura en la placa caliente, (a) temperatura en la zona de guarda, (b) temperatura en la zona de medición.

De la Figura 66 se observa que existen picos de temperatura tanto en la zona de medición como en la zona de guarda, estos picos se deben a que en dichos puntos se ubican las resistencias de nicrom, y es similar a lo que se podrá observar en los demás ensayos simulados.

Por otro lado, la temperatura en la zona de medición una vez alcanzado el estado estacionario tuvo un valor 14,75 °C.

Para el Drywall – Ecoterm:

Para el compuesto Drywall – Ecoterm, se definieron los parámetros de la potencia suministrada al anillo de nicrom en la zona de guarda con un valor de 1,066 W y en la zona de medición con un valor de 0,938 W, la temperatura en las placas frías con un valor de – 0,42 °C, un espesor total del compuesto de 0,04526 m, y una conductividad térmica de 0,084 Wm⁻¹C⁻¹.

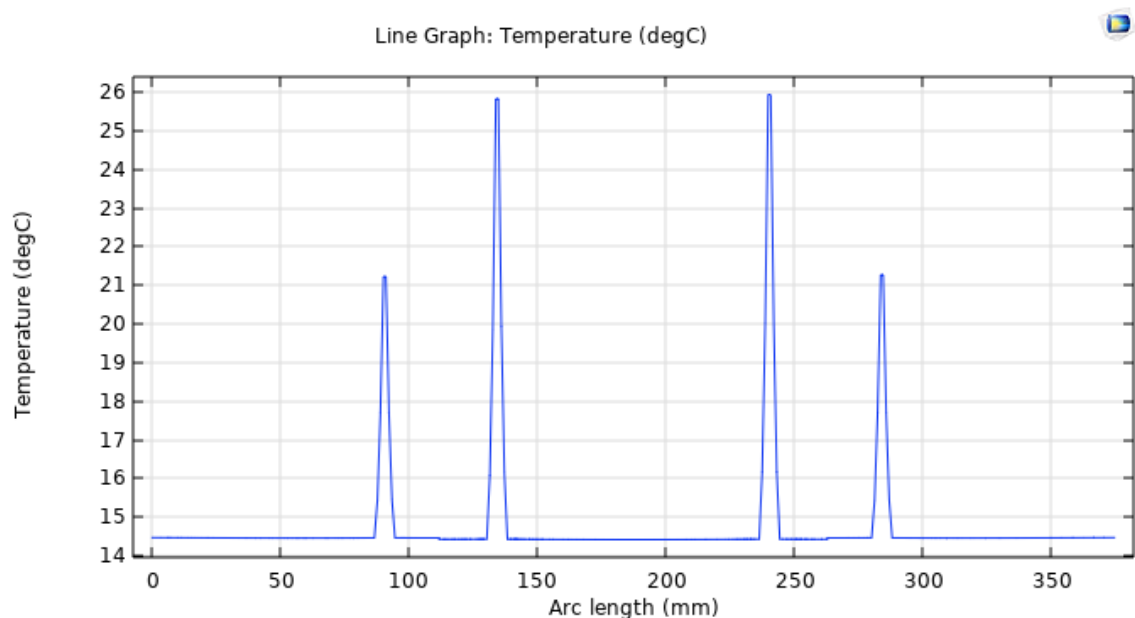


Figura 67. Gráfico de la temperatura en la placa caliente, (a) temperatura en la zona de guarda, (b) temperatura en la zona de medición.

De la Figura 67, la temperatura en la zona de medición una vez alcanzado el estado estacionario tuvo un valor 14,43 °C.

Para el Drywall -PLV:

Para el compuesto Drywall – PLV, se definieron los parámetros de la potencia suministrada al anillo de nicrom en la zona de guarda con un valor de 0,73 W y en la zona de medición con un valor de 0,743 W, la temperatura en las placas frías con un valor de – 0,27 °C, un espesor total del compuesto de 0,04848 m, y una conductividad térmica de 0,0682 Wm⁻¹C⁻¹.

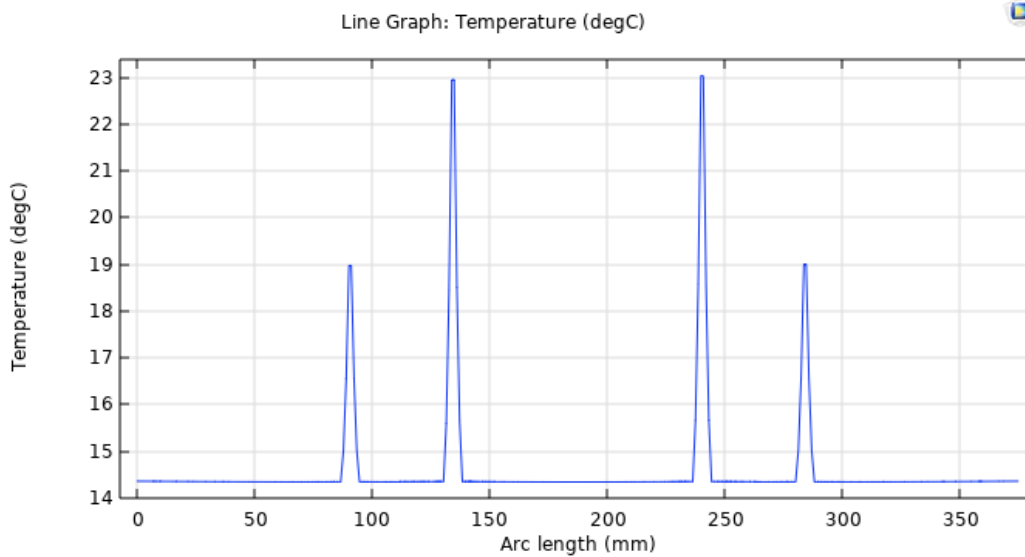


Figura 68. Gráfico de la temperatura en la placa caliente, (a) temperatura en la zona de guarda, (b) temperatura en la zona de medición.

De la Figura 68, la temperatura en la zona de medición una vez alcanzado el estado estacionario tuvo un valor 14,35 °C.

Para el LP -PLEX:

Para el compuesto LP – PLEX, se definieron los parámetros de la potencia suministrada al anillo de nicrom en la zona de guarda con un valor de 1,675 W y en el anillo de nicrom de la zona de medición con un valor de 1,139 W, la temperatura en las placas frías con un valor de – 0,029 °C, un espesor total del compuesto de 0,04 m, y una conductividad térmica de 0,0873 Wm⁻¹°C⁻¹.

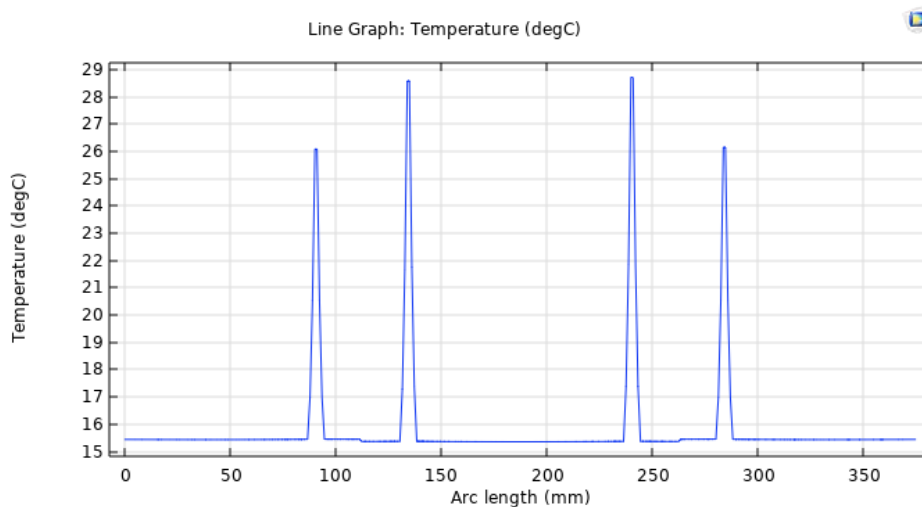


Figura 69. Gráfico de la temperatura en la placa caliente, (a) temperatura en la zona de guarda, (b) temperatura en la zona de medición.

De la Figura 69, la temperatura en la zona de medición una vez alcanzado el estado estacionario tuvo un valor 14,36 °C.

Para el LP -Ecoterm:

Para el compuesto LP – Ecoterm, se definieron los parámetros de la potencia suministrada al anillo de nicrom en la zona de guarda con un valor de 1,432 W y en el anillo de nicrom de la zona de medición con un valor de 1,079 W, la temperatura en las placas frías con un valor de 0,34 °C, un espesor total del compuesto de 0,03646 m, y una conductividad térmica de 0,0714 Wm⁻¹C⁻¹.

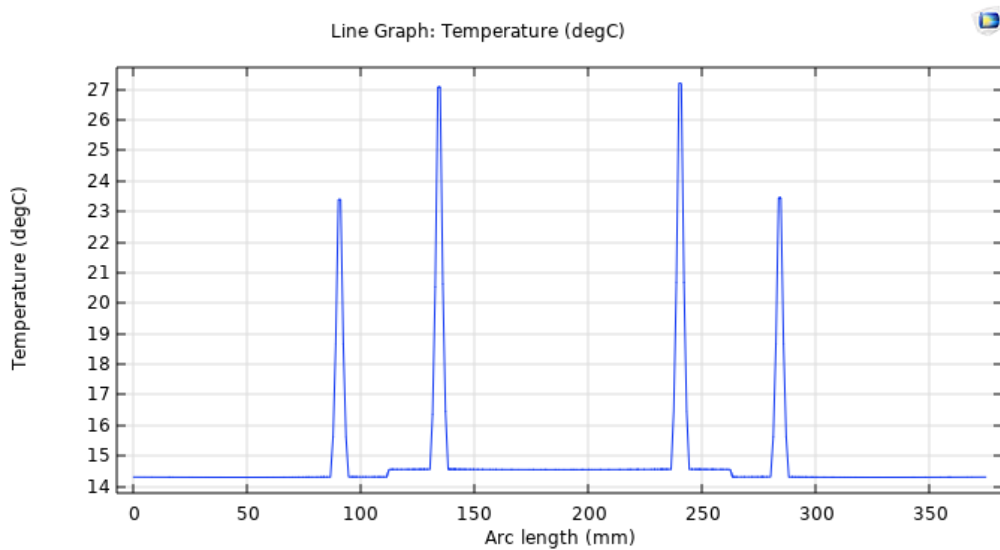


Figura 70. Gráfico de la temperatura en la placa caliente, (a) temperatura en la zona de guarda, (b) temperatura en la zona de medición.

De la Figura 70, la temperatura en la zona de medición una vez alcanzado el estado estacionario tuvo un valor 14,60 °C.

Para el LP - PLV:

Para el compuesto LP – PLV, se definieron los parámetros de la potencia suministrada al anillo de nicrom en la zona de guarda con un valor de 1,978 W y en el anillo de nicrom de la zona de medición con un valor de 0,865 W, la temperatura en las placas frías con un valor de 1,12 °C, un espesor total del compuesto de 0,03646 m, y una conductividad térmica de 0,0607 Wm⁻¹C⁻¹.

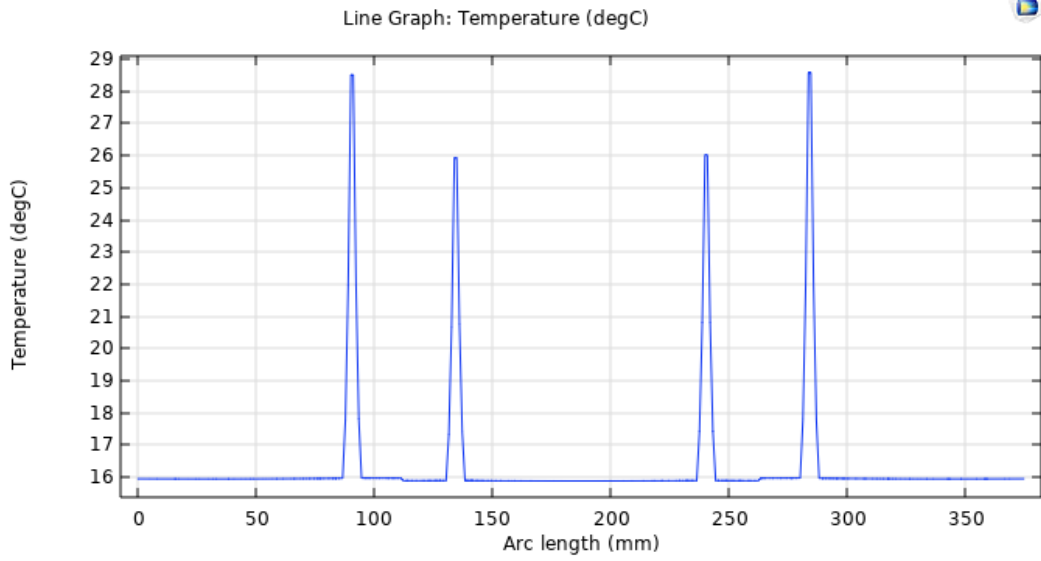


Figura 71. Gráfico de la temperatura en la placa caliente, (a) temperatura en la zona de guarda, (b) temperatura en la zona de medición.

De la Figura 71, la temperatura en la zona de medición una vez alcanzado el estado estacionario tuvo un valor 15,89 °C.

ANEXO 4: ARTÍCULO DESARROLLADO PARA LA PARTICIPACIÓN EN EL XXVII SIMPOSIO PERUANO DE ENERGÍA SOLAR

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH USADOS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

Marco Antonio Mendoza Reyes - marck.182mr@gmail.com

Mc Joshua Miguel Piñas Moya - mcjoshpm7@gmail.com

Manfred Horn Mutschler - mhorn@uni.edu.pe

Mónica Marcela Gómez León - mgomez@uni.edu.pe

Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ciencias, Av. Túpac Amaru 210, Rímac, Lima, Perú.

Resumen. En las últimas décadas los compuestos tipo sándwich han tomado una mayor participación en la industria de la construcción, debido a su bajo costo y propiedades que caracterizan a estos compuestos. Entre las propiedades más importantes de estos resalta la conductividad térmica que se vincula directamente con el confort térmico del individuo en una edificación. En la actualidad el Estado Peruano viene desarrollando proyectos en la lucha contra las heladas y el friaje, donde una de las principales intervenciones se enfoca en la construcción de viviendas sostenibles que pueden ayudar al poblador alto andino afrontar las inclemencias del frío. En ese sentido es necesario contar con materiales de construcción apropiados para las condiciones climáticas del lugar, y es ahí donde radica la importancia de esta investigación. En este trabajo se propone el estudio de la conductividad térmica a condiciones de temperatura cercanas a 0 °C de compuestos tipo sándwich formados a partir de materiales monolíticos más usados en construcción como el drywall, ladrillo, poliestireno expandido, lana de vidrio y lana poliéster. El estudio fue realizado mediante el empleo de un equipo de placa caliente con guarda de doble muestra construido con los lineamientos establecidos por la norma ASTM C177. Las medidas realizadas de los compuestos tipos sándwich drywall-poliestireno expandido-drywall, drywall-lana de vidrio-drywall, drywall-lana poliéster-drywall, ladrillo-poliestireno expandido-ladrillo, ladrillo-lana de vidrio-ladrillo, ladrillo-lana poliéster-ladrillo, dieron los siguientes resultados 0,0953 W.m⁻¹.°C⁻¹, 0,0675 W.m⁻¹.°C⁻¹, 0,0833 W.m⁻¹.°C⁻¹, 0,0891 W.m⁻¹.°C⁻¹, 0,0602 W.m⁻¹.°C⁻¹, 0,0709 W.m⁻¹.°C⁻¹ respectivamente.

Palabras-clave: Compuesto tipo sándwich, Conductividad térmica, Confort térmico, Heladas, viviendas sostenibles.

1. INTRODUCCIÓN

La actual revolución en la construcción ha permitido el desarrollo de nuevos material o compuestos que satisfagan las necesidades de las edificaciones. Entre estas resalta el aislamiento térmico, que esta principalmente realcionada a la demanda energética y al confort térmico. Esta necesidad del aislamiento cobra aun mayor importancia en los lugares donde la temperatura se encuentra por debajo de los 0 °C, como en las regiones altoandinas del Perú que año tras año son afectadas por las heladas. Bajo estas condiciones el calor en el interior de las viviendas se transfiere en gran cantidad al exterior de la misma, provocando un descenso abrupto de la temperatura. Es en ese sentido que, los materiales utilizados para la construcción de viviendas en dichas zonas deben cumplir con determinadas características y propiedades que puedan catalogarla como adecuadas para el lugar. Entre estas podemos considerar el valor de la conductividad térmica, parámetro que nos da a conocer la facilidad con la que un material permite el flujo de calor a través de sí mismo, como un indicador del aislamiento térmico que pueda brindar un determinado material. En el presente estudio se evaluó la conductividad térmica de compuestos tipo sándwich que fueron elaborados a partir de materiales usados convencionalmente en construcción. Estos compuestos se constituyen de la siguiente manera: drywall-poliestireno expandido-drywall, drywall-lana de vidrio-drywall, drywall-lana poliéster-drywall, ladrillo-poliestireno expandido-ladrillo, ladrillo-lana de vidrio-ladrillo, y ladrillo-lana poliéster-ladrillo. Este trabajo se ha realizado mediante el empleo de un equipo de placa caliente con guarda de doble muestra, denominado LAMBDA UNI, que ha sido construido bajo los lineamientos de la norma ASTM C177 [7], y se encuentra ubicado en el Laboratorio de Ingeniería Física de la Facultad de Ciencias

de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Por medio de este equipo se puede determinar el valor de la conductividad térmica como base en la Ec. (1). [55].

$$\lambda = \frac{\dot{Q}L}{A(T_1 - T_2)} \quad (1)$$

donde, λ es la conductividad térmica ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$), \dot{Q} el flujo de calor a través del material (W), A es el área de medición (m^2), L representa el espesor de la material (m), T_1 y T_2 son las temperaturas caliente y fría respectivamente en las superficies opuestas del material (°C), perpendiculares al flujo de calor.

2. MATERIALES COMPUESTO Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Se conoce como material compuesto a cualquier material multifase que presente una proporción significativa, y se constituyan de modo que se obtenga una mejor combinación de propiedades [34]. Estos materiales compuestos se clasifican en base a las propiedades de sus fases constituyentes, de sus propiedades relativas y geometrías correspondientes, en la Fig. 1 se muestra un esquema de esta clasificación.

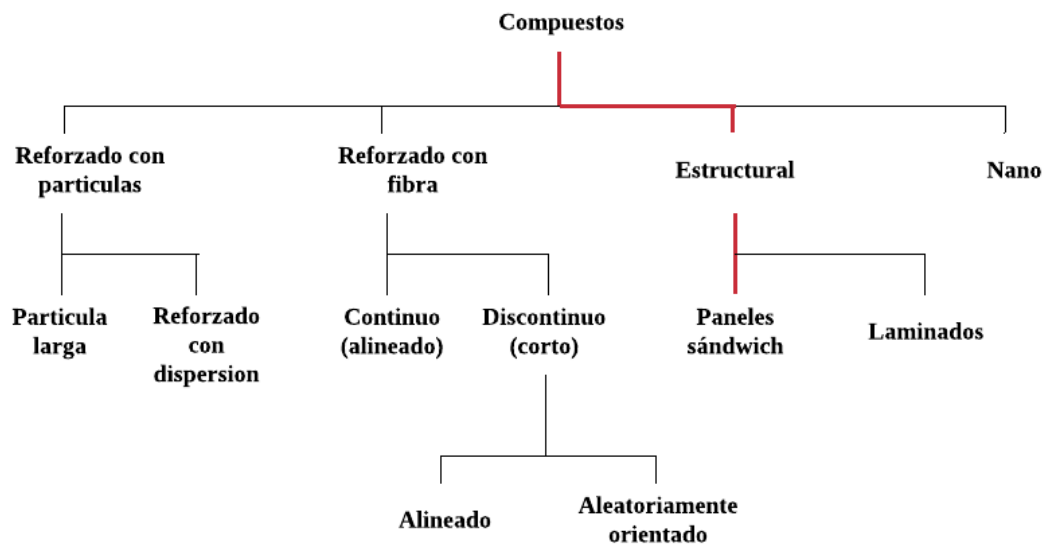


Figura 1- Clasificación de materiales compuestos [34].

De acuerdo a la Fig. 1, los materiales compuestos se clasifican en 4 tipos. De estos los compuestos estructurales de tipo paneles sándwich, más conocidos como compuestos tipo sándwich, son los que se abordan en el presente estudio.

2.1. Compuesto tipo sándwich.

Son compuestos estructurales constituidos por dos hojas externas, llamadas también caras o capas, y unidas de forma adhesiva a un núcleo más grueso, tal como se muestra en la Fig. 2. Las capas exteriores son hechas por lo general de un material rígido y resistente. El material del núcleo suele ser liviano, con una densidad menor a $0,25 \text{ g/cm}^3$. La rigidez del compuesto depende principalmente de las propiedades del material y espesor del núcleo [34].

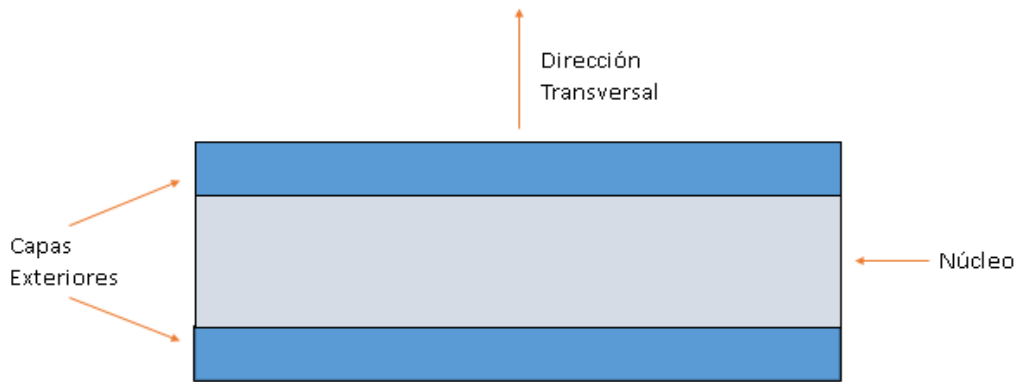


Figura 2- Diagrama esquemático de un compuesto estructural tipo sándwich [34].

Un beneficio del compuesto es principalmente su costo, ya que el núcleo suele ser de mayor espesor y es el de menor valor económico. Otros beneficios relacionados a sus características físicas se mencionan a continuación.

Ligereza. Gracias a la baja densidad y mayor espesor del núcleo en comparación al de las capas, el compuesto reduce en gran medida su densidad.

Rigidez a flexión. En la Tab. 1 se muestran tres arreglos de compuestos, el primero solo formado por dos capas del mismo material y de igual espesor $n/2$, el segundo formado por dos capas de espesor $n/2$ y un núcleo de espesor n , y el tercero formado por dos capas de espesor $n/2$ y un núcleo de espesor $3n$.

Tabla 1. Rigidez a flexión y resistencia relativa de un compuesto estructural tipo sándwich [37].

	Material Sólido	Espesor del Núcleo: n	Espesor del Núcleo: $3n$
Rigidez a Flexión	1	7	37
Resistencia	1	3.5	9.25
Peso	1	1.03	1.06

De la Tab. 1 se observa que, con el aumento del espesor en el núcleo, la rigidez a flexión se incrementa en la segunda y tercera configuración respecto a la primera, de igual modo la resistencia también se incrementa considerablemente. El peso en cambio no sufre un incremento notorio, con lo que el incremento en su volumen conlleva a una disminución en su densidad.

Aislamiento térmico. Los materiales usados para el núcleo son por lo general materiales aislantes, y al ser este de mayor espesor, se consigue que el compuesto también actúe como aislante [36].

2.2. Conductividad térmica.

A principios del siglo XIX. El matemático y físico Fourier estableció la teoría matemática de la conducción de calor en base a sus resultados experimentales. La Fig. 3 muestra un esquema del experimento realizado por Fourier.

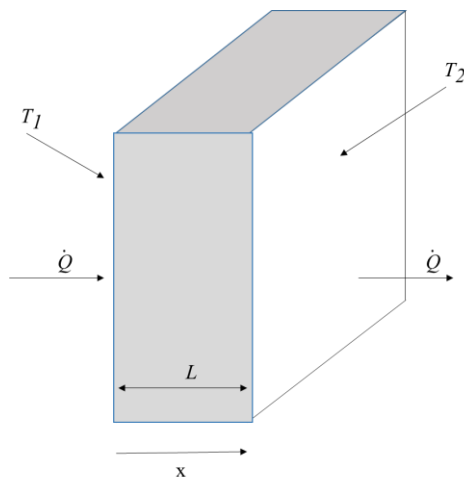


Figura 3- Conducción de calor unidimensional en un sólido [39].

En la Fig. 3, la superficie del lado izquierdo del sólido rectangular se mantiene a una temperatura T_1 mientras la superficie del lado derecho se mantiene a una temperatura T_2 , las demás superficies del sólido se aíslan de modo que se consiga un flujo de calor unidireccional en la dirección x . Bajo estas condiciones se determinó que la razón de transferencia de calor \dot{Q} es directamente proporcional al área de sección transversal A , a través de la cual fluye el calor, a la diferencia de temperatura $(T_1 - T_2)$, e inversamente proporcional al espesor L del material [39]. Es decir:

$$\dot{Q} \propto \frac{A (T_1 - T_2)}{L} \quad (2)$$

Escribiendo esta relación como una igualdad obtenemos:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda A (T_1 - T_2)}{L} \quad (3)$$

Donde λ , es la constante de proporcionalidad llamada conductividad térmica, y se define como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir calor. Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un valor bajo indica que es un mal conductor o que es un aislante [56]. La conductividad térmica de un material depende de la composición química de la sustancia o sustancias que lo componen, de la fase (gaseosa, líquida o sólida) en que se encuentra, de su estructura cristalina si se trata de un sólido, de la temperatura, la humedad y presión a que está sometido y de si es o no un material homogéneo [41]. En la Tab. 2 se dan las conductividades térmicas de algunos materiales más usados en construcción.

Tabla 2. Conductividad térmica de algunos materiales de construcción [42]–[46].

Materiales	Conductividad térmica $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
Poliestireno Expandido (Tecopor)	0,0316 – 0,0354
Panel de Lana de Vidrio	0,0407
Lana Poliéster Ecoterm	0,063
Plancha Drywall Volcanita 1/2'' (yeso y cartón)	0,26
Ladrillo Aislante	0,15
Ladrillo Rojo	0,6

Los valores de conductividad térmica de los materiales descritos en la tabla 2, son valores referenciales que han sido obtenidos bajo determinadas condiciones de medida.

3. EQUIPO DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA LAMBDA UNI

El equipo medidor de conductividad térmica LAMBDA UNI fue diseñado y construido en base a la norma ASTM C-177, en la Fig. 4 se muestra un esquema del diseño del equipo.

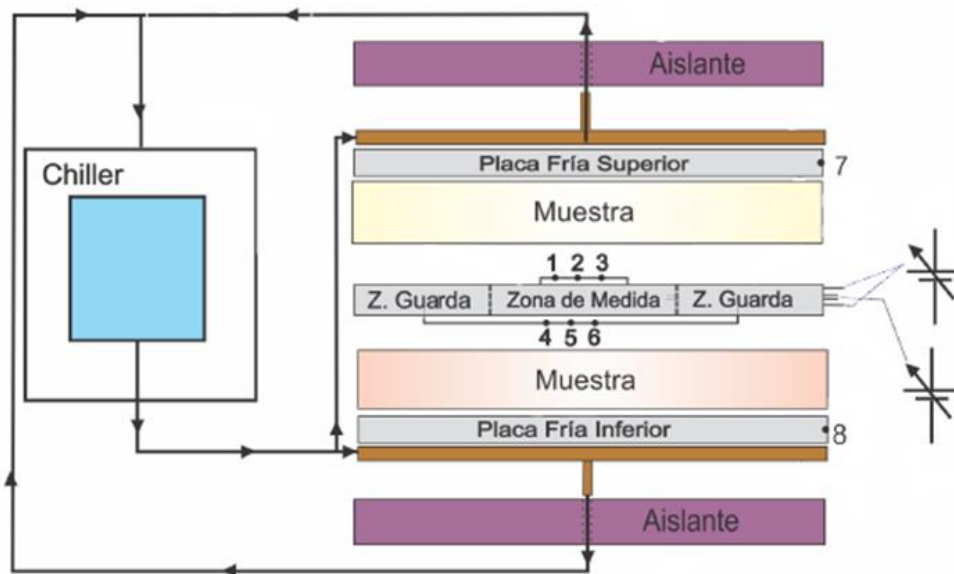


Figura 4- Esquema del equipo de placa caliente con guarda LAMBDA UNI [14].

Este esquema es correspondiente a un equipo de placa caliente con guarda de doble muestra y flujo de calor unidimensional. En esta configuración se realizan ensayos de dos muestras del mismo tipo y en igualdad de condiciones, idealmente se genera un flujo de calor vertical desde la zona de medición hacia las placas frías.

3.1. Componentes del equipo LAMBDA UNI.

A continuación, se da una breve descripción de los componentes del equipo de placa caliente con guarda LAMBDA UNI:

Conjunto de superficies frías. Son dos placas frías, una ubicada en la parte superior de una de las muestras y la otra ubicada en la parte inferior de la otra muestra. Su función es disipar el calor generado en el conjunto de placa caliente y mantener a una temperatura homogénea a las superficies de la muestra que estén en contacto con estos. Estas placas se encuentran conectadas a un sistema de refrigeración, un chiller, que permitan fijar su temperatura a un valor deseado.

Conjunto de superficies calientes. Son dos placas calientes, una ubicada en la zona de medición, y que se encuentra aislada térmicamente por un gap de la otra placa concéntrica, zona de guarda. Estas cumplen un rol importante de acuerdo a su ubicación.

La placa en la zona de medición, tiene como función proporcionar la potencia (flujo de calor por unidad de tiempo) para la medición mediante un calentador intercalado entre sus caras. El tamaño de la zona de medición define el volumen real de la prueba.

La placa en la zona de guarda, tiene como función brindar las condiciones térmicas apropiadas dentro del volumen de prueba con el fin de reducir el flujo lateral de calor dentro del equipo y está ubicado concéntrica y alrededor de la placa caliente de la zona de medición. Se compone de uno o más calentadores intercalados entre sus caras.

Las muestras, deben cumplir con las recomendaciones establecidas en la Norma ASTM C177. Entre ellas, el espesor máximo que debe ser un tercio de la dimensión lineal máxima de la zona de medición, las dimensiones de la muestra deben ser tal que cubran toda la zona de medición (siendo deseable que incluya el gap y el área de la zona de guarda). Ambas muestras deben ser tan similares en espesor y características térmicas como sea posible. De igual modo, si lo requieren, las muestras deben contar con un aislamiento que limite el flujo de calor en su borde lateral.

3.2. Ecuaciones para el cálculo de la conductividad térmica

En un equipo de placa caliente con guarda ideal y de doble muestra, cuando se tienen dos muestras homogéneas e isotrópicas, del mismo material y dimensiones, además, considerando que las superficies isotérmicas frías y calientes presentan contacto perfecto con las muestras, entonces el flujo de calor a través de las muestras es unidimensional (flujo de calor unidireccional) e independiente del tiempo (estado estacionario). Bajo estas condiciones la conductividad térmica λ de las muestras se puede determinar a partir del flujo de calor, \dot{Q} , que atraviesa el área total de medición, $2A$; el gradiente de temperaturas entre la zona de medición y el promedio de temperaturas de las placas frías, ΔT ; y el espesor promedio de las muestras, e , en base a la ley de Fourier mediante la Ec. (4). [55].

$$\lambda = \frac{\dot{Q}e}{2A(\Delta T)} \quad (4)$$

Los equipos de placa caliente con guarda como cualquier otro equipo de medición están propensos errores en su medición. Para un equipo de palca caliente con guarda, los errores en las mediciones son la incertidumbre en: el flujo de calor, la diferencia de temperaturas, el área de medición, y el espesor de la muestra. De este modo la incertidumbre se determina mediante la Ec. (5) de propagación de errores como se muestra a continuación [7]:

$$\frac{\mu_\lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{\mu_{\dot{Q}}}{\dot{Q}}\right)^2 + \left(\frac{\mu_e}{e}\right)^2 + \left(\frac{\mu_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{\Delta T}}{\Delta T}\right)^2} \quad (5)$$

Donde, μ_λ es la incertidumbre en el valor de la conductividad térmica, $\mu_{\dot{Q}}$ es la incertidumbre del flujo de calor (W), μ_e es la incertidumbre del espesor (m), μ_A es la incertidumbre del área total de medición(m²), $\mu_{\Delta T}$ es la incertidumbre de la diferencia de temperatura entre la placa caliente y la placa fría (°C).

Además, el valor del flujo de calor resulta del producto de la corriente y el voltaje suministrado de la fuente a la placa caliente. Su incertidumbre queda determinada por la Ec. (6).

$$\frac{\mu_{\dot{Q}}}{\dot{Q}} = \sqrt{\left(\frac{\mu_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\mu_I}{I}\right)^2} \quad (6)$$

Donde, μ_V y μ_I son las incertidumbre de voltaje (V) y corriente (A) respectivamente.

A fin de brindar mayor confiabilidad a los resultados, se aplica un factor de cobertura (k) igual a 2 a la incertidumbre con el que se obtendrá una incertidumbre expandida (U_λ) a un nivel de confianza del 95 %. El valor de la de la incertidumbre expandida queda definida como se indica en la Ec. (7).

$$U_\lambda = 2\mu_\lambda \quad (7)$$

4. ELABORACIÓN DE MUESTRAS TIPO SÁNDWICH

En la Fig. 5 se muestran los materiales compuestos que se elaboraron para los ensayos de análisis de conductividad térmica.

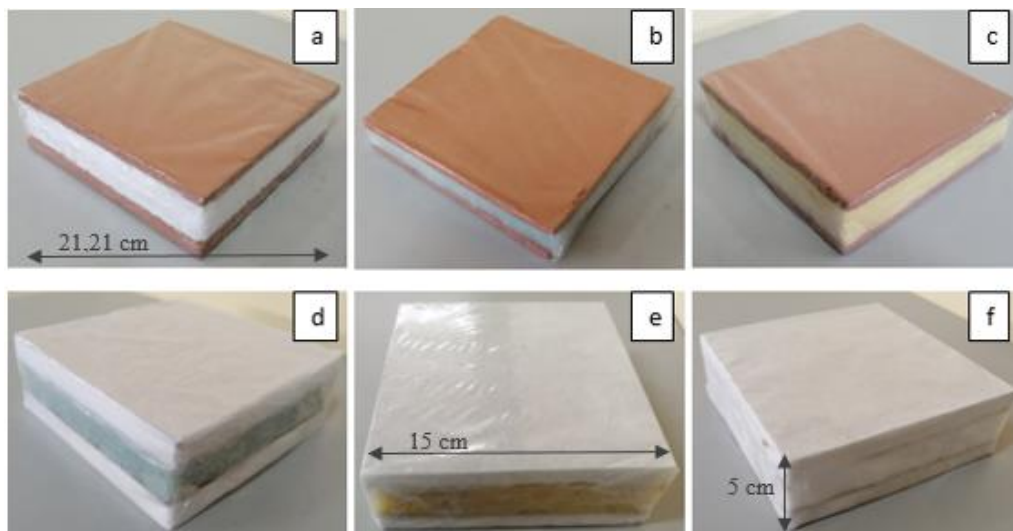


Figura 5- Muestras tipo sándwich: (a) Ladrillo-poliestireno expandido-ladrillo (LP-PLEX-LP), (b) Ladrillo-lana poliéster-ladrillo (LP-ECOTERM-LP), (c) Ladrillo-lana de vidrio-ladrillo (LP-LV-LP), (d) Drywall-lana poliéster-drywall (DW-ECOTERM-DRY), (e) Drywall-lana de vidrio-drywall (DRY-LV-DRY), (f) Drywall-poliestireno expandido-drywall (DRY-PLEX-DRY).

Como se puede observar estos compuestos tienen una forma paralelepípedo, de base cuadrada de 15 cm de lado y una altura que varía de acuerdo al espesor de sus materiales constituyentes, esta altura máxima no debe superar los 5 cm por recomendación de la Norma ASTM C177.

Dada las dimensiones de la muestra ha sido necesario la elaboración de aislantes de borde para cada una de ellas. En la Fig. 6 se muestra el aislante de borde de la muestra de ladrillo-lana de vidrio-ladrillo.

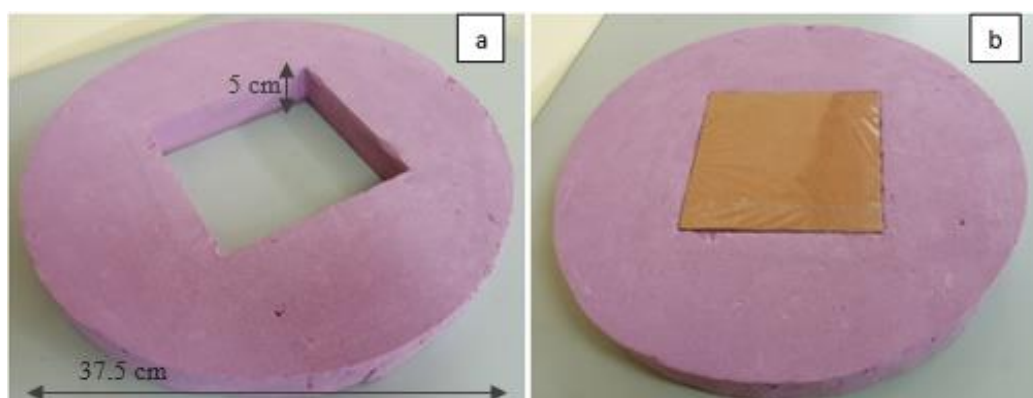


Figura 6- (a) Aislante de borde, (b) Muestra de ladrillo-lana de vidrio-ladrillo con aislante de borde.

5. DATOS Y RESULTADOS

El valor de la conductividad térmica determinado en cada ensayo, proviene de una recopilación y análisis de datos obtenidos del equipo LAMBDA UNI. Estos datos son exportados a una hoja de cálculo, donde son sintetizados para su análisis gráfico en Origin. Una vez determinado el rango total donde se evaluó el valor de la conductividad térmica, donde la diferencia de temperaturas entre la zona de medición y la zona de guarda no difieran en más de 0,2 °C en estado estacionario durante al menos 1 hora y media, se procede con el cálculo correspondiente de acuerdo a la Ec. (4).

5.1. Datos gráficos.

Los ensayos pueden durar de uno a dos días en una primera prueba a fin de asegurar el estado estacionario para determinadas condiciones de temperaturas en las que se requieran realizar dicho ensayo. A continuación, en la Fig. 12 se muestra el comportamiento de las de temperaturas y las potencias

suministradas en los componentes del equipo LAMBDA UNI, para el ensayo del ladrillo-lana de vidrio-ladrillo.

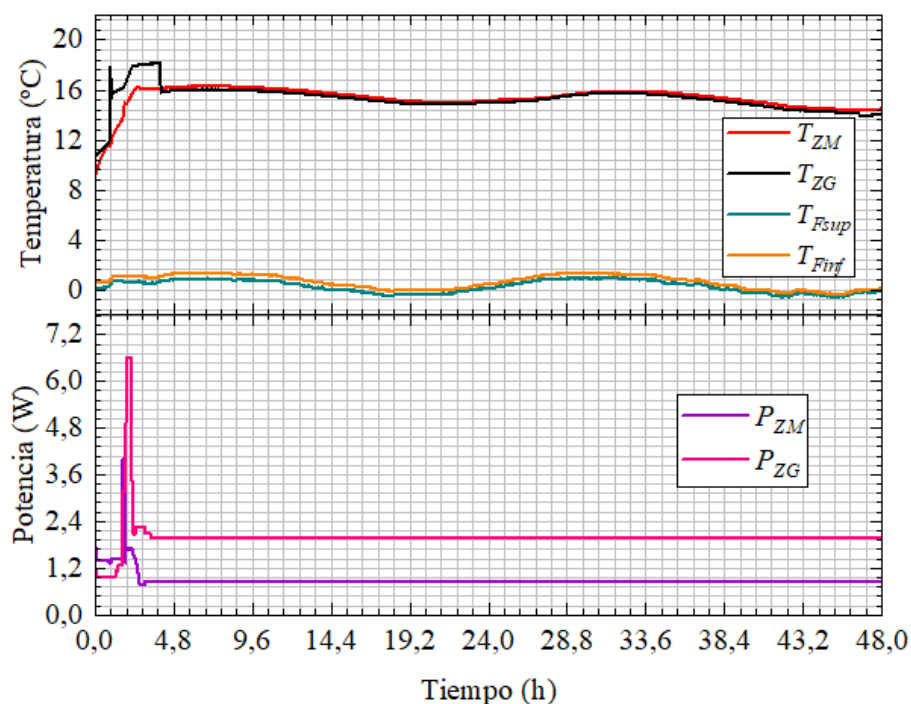


Figura 12. Comportamiento en el tiempo para el ensayo de conductividad térmica del ladrillo-lana de vidrio-ladrillo, (a) muestra el comportamiento térmico de las placas frías y la placa caliente y (b) muestra las variaciones realizadas a las potencias suministradas a la zona de guarda (P_{ZG}) y zona de medición (P_{ZM}).

De acuerdo a los valores de temperatura observados en la Fig. 12 y al tratamiento de datos realizado, se consideró para la evaluación de la conductividad térmica los datos encapsulados desde las 28,87 horas hasta las 30,37 horas. En la Fig. 13 se observa el comportamiento térmico del valor absoluto de la diferencia de temperatura entre la zona de guarda y zona de medición en el rango de tiempo seleccionado.

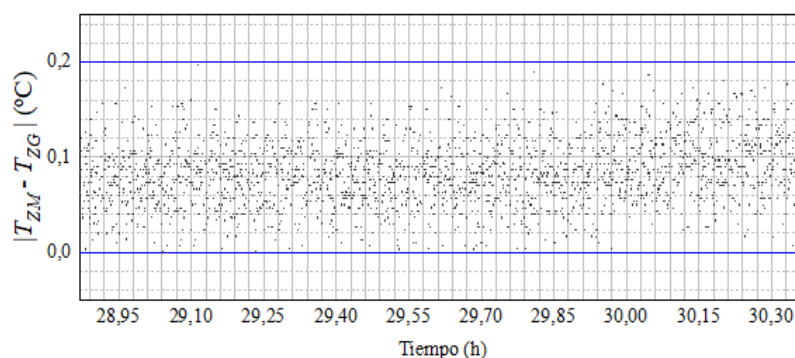


Figura 13. Comportamiento térmico del valor absoluto de la diferencia de temperatura entre la zona de guarda y zona de medición entre las 28.87 horas hasta las 30,37 horas.

De la Fig. 13 la diferencia de temperatura entre la zona de medición y zona de guarda es menor a $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que se cumple el criterio establecido en la Norma ASTM-C177.

De modo similar se realizó el análisis de datos para los compuestos de ladrillo-poliestireno expandido-ladrillo, ladrillo-ecoterm-ladrillo, drywall-ecoterm-drywall, drywall-lana de vidrio-drywall, y drywall-poliestireno expandido-drywall.

5.2. Resultados Experimentales

Después de considerar la información gráfica y realizar el análisis de datos correspondientes a cada ensayo, en la Tab. 6 se presentan los valores encontrados para cada parámetro en el cálculo de la conductividad térmica, así como el valor de la conductividad térmica y su correspondiente incertidumbre.

Tabla 6. Datos y Resultados de conductividad térmica en cada ensayo

MUESTRAS	P_{ZM} (W)	e (m)	$2A$ (m ²)	ΔT (°C)	λ (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)	U_{λ} (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)
(a) LP-PLEX-LP	1,14	0,04116	0,03590	14,67	0,0891	0,0102
(b) LP-ECOTERM-LP	1,08	0,03648	0,03590	15,48	0,0709	0,0077
(c) LP-PLV-LP	0,865	0,03648	0,03590	14,60	0,0602	0,0069
(d) DW-ECOTERM-DW	0,983	0,04528	0,03590	14,88	0,0833	0,0094
(e) DW-PLV-DW	0,743	0,04841	0,03590	14,85	0,0675	0,0076
(f) DW-PLEX-DW	1,00	0,05034	0,03590	14,72	0,0953	0,0107

6. CONCLUSIONES

Se logró determinar el valor de conductividad térmica de los compuestos ladrillo-poliestireno expandido-ladrillo, ladrillo-ecoterm-ladrillo, ladrillo-lana de vidrio-ladrillo, siendo el compuesto con menor conductividad térmica el que tiene como núcleo a la lana de vidrio con un valor de $0,0602 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1} \pm 0,0069 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, seguido del compuesto con el núcleo lana poliéster con un valor de $0,0709 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1} \pm 0,0077 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, y finalmente el compuesto con núcleo de poliestireno expandido con un valor de $0,0891 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1} \pm 0,0102 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.

De igual manera se logró determinar el valor de conductividad térmica de los compuestos drywall-ecoterm-drywall, drywall-lana de vidrio-drywall, y drywall-poliestireno expandido-drywall, siendo el compuesto con menor conductividad térmica el que tiene como núcleo a la lana de vidrio con un valor de $0,0675 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1} \pm 0,0076 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, seguido del compuesto con el núcleo lana poliéster con un valor de $0,0833 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1} \pm 0,0094 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, y finalmente el compuesto con núcleo de poliestireno expandido con un valor de $0,0953 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1} \pm 0,0107 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.

El valor de la incertidumbre para la conductividad térmica de cada compuesto tiene como factores porcentuales 6,46 % debido a la potencia suministrada, 4,02 % debido al espesor, 0,86 % debido al área de medición y 88,66 % debido al gradiente de temperatura.

Los resultados encontrados para cada compuesto son menores de $0,1 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ e incertidumbre menor al 11,5 % del valor de la conductividad térmica en cada ensayo.

Estos valores bajos en conductividad térmica dan pase a la posibilidad de considerar estos compuestos como alternativas viables para la construcción en las zonas afectadas por las heladas.

Los ensayos pueden durar de uno a dos días en una primera prueba a fin de asegurar el estado estacionario para determinadas condiciones de temperaturas en las que se requieran realizar.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo bajo el auspicio del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del Perú (CONCYTEC) bajo el contacto N ° 024-2016-FONDECYT, al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería (VRI-UNI) bajo proyecto MF-FC-4-2019, y la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

REFERENCIAS

- [1] M. Vatan, "Evolution of Construction Systems," in *Cultural Influences on Architecture*, A. Board, Ed. IGI GLOBAL, 2017, pp. 35–57.
- [2] SENAMHI, "Heladas," 2018. <https://www.senamhi.gob.pe/public/images/senamhi-2018-helada.jpg> (accessed Sep. 27, 2019).
- [3] SENAMHI, "Heladas y Frijaje/ Preguntas Frecuentes." <https://www.senamhi.gob.pe/?p=heladas-y-frijajes-preguntas> (accessed May 05, 2020).
- [4] Global Soalr Atlas, "Mapa de Irradiacion Global Horizontal Perú." SOLARGIS, 2018, [Online]. Available: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/peru>.
- [5] C. P. Lozano Ramón, "Aplicación de sistemas de ventilación para el confort térmico de las habitaciones en un conjunto de viviendas multifamiliares - distrito de Pichanaki," Universidad Nacional del Centro del Perú, 2010.
- [6] M. J. M. P. Moya, "Estudio de las Propiedades Térmicas, Morfológicas y Estructurales del Adobe como Material Biocomposito," Universidad Nacional de Ingeniería, 2018.
- [7] ASTM, "ASTM C177: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot-Plate Apparatus." Whashington D.C., 2004, [Online]. Available: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C177-04.htm>.
- [8] Dirección Regional de Salud Cusco, "BOLETÍN EPIDEMIOLÓGICO POR TEMPORADA DE BAJAS TEMPERATURAS N° 02 – 2020," *Gobierno Regional Cusco*, vol. 2. Lima, pp. 6–7, 2020.
- [9] M. Horn Mutschler, "Aprovechamiento descentralizado de fuentes renovables de energía," in *Matriz energética en el Perú y energías renovables*, Lima: Fundación Friedrich Ebert, 2010, p. 34.
- [10] R. Espinoza, "Evaluación Experimental de La Performance de dos Componentes Bioclimáticas de Calentamiento Aplicadas en un Módulo de Vivienda de San Francisco de Raymina-Ayacucho con el Propósito de Validarlas Como Técnicas de Estrategias Bioclimáticas Para Viviendas Ru," Universidad Nacional de Ingeniería, 2014.
- [11] J. R. Molina Castillo, "Evaluación Bioclimática de una Vivienda Rural Alto Andina de La Comunidad de San Francisco de Raymina de Ayacucho," Universidad Nacional de Ingeniería, 2016.
- [12] J. O. Molina Fuertes, "EVALUACIÓN SISTEMÁTICA DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE UN MÓDULO EXPERIMENTAL DE VIVIENDA ALTO ANDINA PARA LOGRAR EL CONFORT TÉRMICO CON ENERGÍA SOLAR," Universidad Nacional de Ingeniería, 2017.
- [13] J. O. Molina Fuertes, "USO DEL PROGRAMA ENERGYPLUS PARA LA SIMULACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE UN MÓDULO BIOCLIMÁTICO UBICADO EN IMATA, AREQUIPA A 4519 MSNM," Universidad Nacional de Ingeniería, 2018.
- [14] F. S. Espinoza Castillo, "Caracterización Térmica, Estructural y Mecánica de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa," Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2020.
- [15] K. Janampa Quispe, "Conductividad Térmica de Materiales Utilizados en Edificaciones de la Región de Ayacucho," 2014. https://dina.concytec.gob.pe/appDirectorioCTI/VerDatosInvestigador.do?id_investigador=17520 (accessed May 24, 2020).
- [16] K. Janampa, O. Cerón, O. Morales, and J. Oré, "Thermal characterization of materials used in rural housing constructions in Ayacucho, Peru," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1433, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1433/1/012004.
- [17] J. Noel *et al.*, "Assessment of Ichu Fibers as Non Expensive Thermal Insulation System for the Andean Regions," 2015, [Online]. Available: <https://repositorio.utec.edu.pe/handle/UTEC/28?mode=full>.
- [18] Viceministerio de Ordenanza Territorial, "Plan multisectorial ante heladas y friaje 2019-2021." 2019, [Online]. Available: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/350878/Plan_Multisectorial_ante_Heladas_y_Friaje_2019_COMPLETO_FINAL_TRIMBOX.pdf.
- [19] Presidencia de Consejo de Ministros, "Plan Nacional De Intervencion Para Enfrentar Los Efectos De La Temporada De Heladas Y Frijaje 2012." 2012, [Online]. Available: https://www.mef.gob.pe/contenidos/archivos-descarga/Plan_Heladas_y_Frijaje_2012.pdf.
- [20] Global Humanitaria, "Se entregó ropa de abrigo a niños Y niñas de escuelas en Puno," 2015. <http://globalhumanitariaperu.org/2015/08/14/se-entrego-ropa-de-abrigo-a-ninos-y-ninas-de-escuelas-en-puno/>.

- [21] INEI, “Viviendas particulares con paredes de adobe o tapia,” *Sistema de Información Regional para la Toma de Decisiones*. <http://censos2017.inei.gob.pe/redatam/> (accessed May 11, 2020).
- [22] B. Aguilar Prieto, *Construir con adobe : Fundamentos, reparación de daños y diseño contemporáneo*. Mexico DF: Trillas, 2008.
- [23] G. A. Abanto, M. Karkri, G. Lefebvre, M. Horn, J. L. Solis, and M. M. Gómez, “Thermal properties of adobe employed in Peruvian rural areas: Experimental results and numerical simulation of a traditional bio-composite material,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 6, pp. 177–191, 2017, doi: 10.1016/j.cscm.2017.02.001.
- [24] PNUD-Perú, “El reto de la igualdad,” 2019. [Online]. Available: <https://www.pe.undp.org/content/peru/es/home/library/poverty/el-reto-de-la-igualdad.html>.
- [25] B. P. Jelle, “Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - Properties, requirements and possibilities,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 10, pp. 2549–2563, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015.
- [26] J. Zagorskis, E. K. Zavadskas, Z. Turskis, M. Burinskiene, A. Blumberga, and D. Blumberga, “Thermal insulation alternatives of historic brick buildings in Baltic Sea Region,” *Energy Build.*, vol. 78, pp. 35–42, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.04.010.
- [27] M. Reif, J. Zach, and J. Hroudová, “Studying the Properties of Particulate Insulating Materials on Natural Basis,” *Procedia Eng.*, vol. 151, pp. 368–374, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.390.
- [28] W. Zhou, C. Zhao, X. Liu, X. Chang, and C. Feng, “Mesoscopic simulation of thermo-mechanical behaviors in concrete under frost action,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 117–131, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.009.
- [29] C. Feng, S. Roels, and H. Janssen, “Towards a more representative assessment of frost damage to porous building materials,” *Build. Environ.*, vol. 164, no. August, p. 106343, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106343.
- [30] M. M. Santiago Daga, “Resistencia térmica y mecánica de mortero con cemento sustituido 5% y 10% por cenizas de ichu,” Universidad San Pedro, 2018.
- [31] M. H. Cuenca Mallma, “Diseño y Construcción de un Aparato Medidor de Conductividad Térmica de Materiales Sólidos,” Universidad Nacional de Ingeniería, 2020.
- [32] W. Callister y D. Rethwisch, *Composites*, 9th ed. United States of America: Wiley, 2013.
- [33] D. D. S. Guangping Han, Qinglin Han, *Introduction to Wood and Natural Fiber Composites*, 1st ed. United States of America: Wiley, 2013.
- [34] J. M. Malavia Otero, “Caracterización de paneles sandwich híbridos frp con alma de nido de abeja de aluminio,” Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [35] HexCel Composites, “Honeycomb sandwich design technology,” *HexWeb Honeycomb Sandw. Des. Technol.*, no. AGU 075b, pp. 1–28, 2000, [Online]. Available: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf.
- [36] P. P. Urone and R. Hinrichs, “Heat Transfer Methods,” in *College Physics*, Houston, Texas: OpenStax, 2012, pp. 517–556.
- [37] R. W. Serth and L. Thomas, “Heat Conduction,” in *Process Heat Transfer*, 2nd ed., Texas: Academic Press, 2014, pp. 1–30.
- [38] A. Martín Domingo, “Apuntes de transferencia de calor,” *Univerisidad Politecnica de Madrid*. Departamento de Física e Instalaciones, Madrid, 2011, [Online]. Available: <http://oa.upm.es/37245/1/amd-apuntes-transmision-calor-v2.6.pdf>.
- [39] A. J. Chapman, *Transmision del Calor*, 3rd ed. Madrid: McMILLAN PUBLISHING COMPANY, 1990.
- [40] A. L. P. Robert R. Zarr, “Expanded Polystyrene Board, for Thermal Conductivity from 281 K to 313 K,” 2012. [Online]. Available: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.260-175.pdf>.
- [41] AAISLACORP 2000, “Panel lana de vidrio.” 2018, [Online]. Available: <https://www.aaislacorp.com/producto/panel-de-lana-de-vidrio/>.
- [42] Texeco, “Aislante Térmico y Absorbente Acústico (Ecoterm).” p. 1, 2016, [Online]. Available: http://www.texecoperu.com.pe/assets/docs/FICHA_ECOTERM.pdf.
- [43] VOLCAN, “Planchas de Yeso Cartón - Volcanita ST.” pp. 1–8, [Online]. Available: <http://www.especificar.cl/fichas/planchas-de-yeso-carton-volcanita-st>.
- [44] H. D. Young and R. A. Freedman, *Temperatura y Calor*, 12th ed. México.: Pearson, 2009.
- [45] G. M. Betancourt, “Diseño, construcción y caracterización de un instrumento de placas planas paralelas con guarda con doble lado de medición y con cámara de ambiente controlado para determinar la conductividad térmica de materiales sólidos,” Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2005.

- [46] MAESTRO, “Plancha de drywall volcanita 1/2”.”
<https://www.maestro.com.pe/cart/search/0c83093a8257df127340b20b9cd1c9d9?rel=page&page=2>.
- [47] PROMART, “Ladrillo Pastelero.” <https://www.promart.pe/ladrillo-pastelero/p>.
- [48] JARA RESISTENCIAS SRL, “Aislamiento para el frio y calor.”
<http://www.jararesistencias.com/index2#contacto>.
- [49] SODIMAC, “Lana Poliester Ecoterm.” <https://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/product/2225638/lana-poliester-ecoterm>.
- [50] PROMART, “Poliestireno expandido de 1" 1.20 x 2.40 metros.”
<https://www.promart.pe/poliestireno-expandido-de-1--1-20-x-2-40m/p>.
- [51] ASTM, “Standard Practice for Calculating Thermal Transmission Properties Under Steady-,”
Annu. B. ASTM Stand., vol. 14, no. June, pp. 1–13, 2012, doi: 10.1520/C1045-07R13. Copyright.
- [52] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Transferencia de Calor y Masa*, 4th ed. Mexico DF, 2011.

ANEXO 5: PARTICIPACIÓN EN EL PROGRAMA PATENTA Y EN EXPOPATENTA 2019

Patenta – Modalidad Centros Académicos y de Investigación es un programa de la Subdirección de Promoción al Patentamiento (SPP) de la Dirección de Invenções y Nuevas Tecnologías del Indecopi cuyo principal objetivo es apoyar, asesorar y acompañar a las universidades y otros centros de enseñanza superior, así como a centros de investigación nacionales, públicos o privados, en la protección de sus proyectos o resultados de investigación, de manera que puedan aprovechar los instrumentos que ofrece la propiedad industrial para generar activos de valor para su institución.

En tal sentido en el 2019 se presenta la propuesta de un APARATO PORTÁTIL PARA LA MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE MATERIALES SÓLIDOS como modelo de utilidad, para lo cual se envió una solicitud cuyo expediente es 002181-2019/DIN. Este aparato fue nombrado Lambda portátil UNI y expuesto durante 4 días en la feria del XVIII concurso nacional de invenciones y diseños industriales 2019 organizado por INDECOPI.



Figura 72. Participación en Feria Expo patenta 2019 INDECOPI [33].



Figura 73. Aparato Lambda portátil UNI para la medición de la conductividad térmica de materiales sólidos.