

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS



TESIS

Caracterización Térmica, Estructural y Mecánica de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO FÍSICO**

Elaborado por:

FRANK SEGUNDO ESPINOZA CASTILLO

Asesora:

Dra. MÓNICA MARCELA GÓMEZ LEÓN

LIMA - PERÚ

2020

Primero agradecer a Dios por cuidar siempre de mi. Quiero dedicar esta tesis a mi madre Constantina, mi padre Rumaldo, mis hermanos y hermanas y resto de familiares quienes siempre me han apoyado, enseñado que con sacrificio y esfuerzo se pueden alcanzar los sueños. El haber culminado esta tesis es uno de ellos.

Agradecimientos

Por la meta cumplida de culminar esta tesis quiero agradecer a la Dra. Mónica Marcela Gómez León, quien me brindó la oportunidad de elaborar esta tesis con su asesoría, brindarme sus consejos, experiencias, crítica y motivación. Agradezco al Dr. José Solís por sus consejos y el apoyo brindado en los ensayos de difracción de rayos X (DRX), desarrollado en el *Center for the Development of Advanced Materials and Nanotechnology* (CEMAT), ubicado en el Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias de la UNI. Además se desarrollaron los ensayos de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y *Energy Dispersive X Ray Spectroscopy* (EDS) a cargo de el Mg. Clemente Luyo y el Ing. Henry Huanca a quienes agradezco por su buena disposición.

Quiero agradecer al Dr. Abel Gutarra por permitir que desarrolle los ensayos de difusividad térmica en el Laboratorio de Materiales Nanoestructurados, por compartir su experiencia, enseñanzas y consejos que aprecio mucho.

Por impartir su conocimiento y siempre estar dispuesto a compartir su opinión en los temas académicos, quiero agradecer al Dr. Manfred Horn quien me ha sido de mucha ayuda.

Agradezco al Ing. Oswaldo Rojas por compartirme su experiencia sobre el equipo medidor de conductividad térmica y el apoyo en el laboratorio.

Gracias al Ing. Mc Joshua Piñas Moya por la oportunidad de invitarme a formar parte del proyecto “Fabricación de un equipo medidor de conductividad térmica basado en la norma ASTM C 177 y ASTM C 1043”, que se desarrolló en la Facultad de Ciencias de la UNI, por su apoyo incondicional, sus consejo y compartir sus experiencias.

Agradezco a los Sres. Víctor Quinde y José Farfán, por el apoyo en la elaboración de los platos fríos y caliente del aparato medidor de placa caliente con guarda en el taller mecánico de la Facultad de Ciencias de la UNI.

Gracias al PhD. Manuel Castillo por permitir que forme parte del equipo de investigación Smart - City y que participe de los distintos proyectos en los que he adquirido conocimientos que me han aportado en el desarrollo de la tesis.

Agradezco al personal del Laboratorio de Ensayo de Rocas de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la UNI, por hacer cortes para la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa.

Agradezco al personal del Laboratorio de Ensayos de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI, por el apoyo del personal durante los ensayos como unidad de albañilería para la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa.

Agradezco a mis compañeros de la carrera Juan Pablo, Marco, Martín, Pedro, Sergio y Michael que estuvieron conmigo intercambiando conocimientos y opiniones.

Gracias a el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT) perteneciente a el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) que ha financiado este proyecto en base a el esquema financiero E041-2018-SENCICO-01 denominado "Proyectos de Investigación Aplicada en Construcción y Saneamiento", cuyo título es: "CARACTERIZACIÓN PETROLÓGICA, ESTRUCTURAL, TÉRMICA Y COMO ADSORBENTE DE DIFERENTES SILLARES (IGNIMBRITAS) DE AREQUIPA PARA SU USO SOSTENIBLE EN APLICACIONES CONSTRUCTIVAS Y AMBIENTALES" correspondiente al Contrato 122-2018-FONDECYT.

Resumen

El presente trabajo de tesis consiste en el estudio de las propiedades térmicas, estructural y mecánicas de la Unidad Blanca de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (UB-IAA), que es una roca volcánica que aflora en los yacimientos de la provincia de Arequipa. Esta roca volcánica ha sido utilizada en el sector de la construcción desde la época colonial hasta la actualidad, y en el ámbito científico se tiene información de su geología, composición química, estudios petrográficos, pero no de sus propiedades térmicas.

En este trabajo de tesis las propiedades térmicas que se determinaron para la UB-IAA, fueron la conductividad térmica y la difusividad térmica. La conductividad térmica se midió empleando el equipo LAMBDA-UNI, ubicado en el Laboratorio de Ingeniería Física en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), que se ha construido cumpliendo las normas ASTM C 177 y ASTM C 1043. Por otro lado, la conductividad térmica obtenido fue de $0,270 \pm 0,045 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. La medición de difusividad térmica se realizó en el Laboratorio de Materiales Nanoestructurados de la Facultad de Ciencias de la UNI y se determinó empleando el Método de Ångström y se obtuvo el valor de $(5,67 \pm 0,46)\times 10^{-7} \text{ (m}^2\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$.

La caracterización estructural de la UB-IAA se realizó por estudios de difracción de rayos X (DRX), los minerales presentes y su contenido fueron la cristobalita 29 %, sanidina 28 %, anortita 22 %, albita 17 % y biotita 4 %. Los principales elementos químicos encontrados en la UB-IAA según espectroscopia de energía dispersiva (EDS) y su % At fueron oxígeno 51,16 %, silicio 26,86 %, sodio 7,12 %, aluminio 6,08 %, cloro 5,42 %, potasio 1,81 %, calcio 1,12 % y hierro 0,46 % en concordancia con los resultados obtenidos por DRX en donde se tiene la presencia mayoritaria de estos elementos. Los resultados de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) mostraron que la UB-IAA tiene

morfología heterogénea y porosa.

En cuanto a la caracterización de las propiedades mecánicas estas se realizaron en el Laboratorio de Ensayo de Materiales (LEM) de la Facultad de Civil de la UNI, y se estudiaron las propiedades mecánicas como unidad de albañilería según el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE E 0.70). Para La resistencia a la compresión uniaxial de la UB-IAA se obtuvo el valor de $91 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$. La UB-IAA no esta presente como unidad de albañilería en el RNE E 0.70, sin embargo, según los resultados de alabeo, variación dimensional y resistencia a la compresión, presenta propiedades similares como unidad de albañilería al ladrillo tipo II. Se determinó el valor de absorción de humedad por saturación de 24 horas y se obtuvo el valor promedio de 17,2 %.

Palabras clave: Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa, DRX, MEB, conductividad térmica, difusividad térmica, resistencia a la compresión.

Abstract

This thesis work consists in the study of the thermal, structural and mechanical properties of the White Unit of the Ignimbrita Arequipa Airport (UB-IAA), a volcanic rock that emerges in the deposits of the province of Arequipa. This volcanic rock has been used in the construction sector from the colonial era to the present, and in the field Scientist has information on its geology, chemical composition, petrographic studies, but not about its thermal properties. The thermal properties that were determined in this thesis work for UB-IAA are thermal conductivity and thermal diffusivity. The thermal conductivity was determined using the LAMBDA-UNI equipment, located in the Physical Engineering Laboratory at the Faculty of Science of the National University of Engineering, which has been built in compliance with ASTM C 177 and ASTM C 104 standards. The value of the The thermal conductivity obtained was $0,270 \pm 0,045 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. The measurement of thermal diffusivity was carried out in the Nanostructured Materials Laboratory of the Faculty of Sciences of the UNI and was determined using the Method of Ångström and the value of $(5,67 \pm 0,46)\times 10^{-7} \text{ (m}^2\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$ was obtained.

The structural characterization of UB-IAA was carried out by X-ray diffraction studies (DRX) and the main phases present and its percentage content which were cristobalite 29 %, sanidine 28 %, anorthite 22 %, albite 17 % and biotite 4 %. The main chemical elements found in the UB-IAA according to dispersive energy spectroscopy (EDS) and % At were oxygen 51,6 %, silicon 26,86 %, aluminum 6,08 %, chlorine 5,42 %, potassium 1,81 %, calcium 1,12 % and iron 0,46 % in accordance with the results obtained by DRX in which there is a majority presence of these elements. Scanning Electron Microscopy (MEB) results showed that UB-IAA has heterogeneous and porous morphology.

Regarding the characterization of the mechanical properties, these were carried

out in the Materials Testing Laboratory (LEM) of the Civil Faculty of the UNI, the mechanical properties were studied as a masonry unit according to the National Building Regulation (RNE E 0.70). For the uniaxial compression resistance of the UB-IAA, the value of $91 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ was obtained. The UB-IAA is not present as a masonry unit in RNE E 0.70. However, according to the results of warping, dimensional variation and compression resistance, it has similar properties as a brick masonry unit type II. The moisture absorption value was determined by 24 hours saturation and the average value of 17,2 %.

Keywords: Arequipa Airport Ignimbrite, DRX, MEB, thermal conductivity, thermal diffusivity, compression resistance.

Prefacio

El presente trabajo de investigación como tesis se debe al interés de aportar en la caracterización integral de la ignimbrita, en particular la Unidad Blanca de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (UB-IAA), abordando algunas propiedades térmicas como conductividad térmica y difusividad térmica, su estructura, morfología y propiedades mecánicas. Principalmente sus propiedades térmicas no han sido abordados en detalle y que se debe tener en cuenta para reforzar las prácticas en la construcción. Se tiene en conocimiento que la ignimbrita aflora en los yacimientos de Arequipa, empleado desde épocas prehispánicas en las construcciones, hoy en día se tiene construcciones a base de esta roca volcánica los puentes, iglesias, casa, teatros, mercados, decoraciones, etc.

En la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), se realizaron estudios en propiedades térmicas de materiales de aislantes y de construcción. Así lo demuestran la tesis de pregrado (1) y postgrado (2), de la Escuela de Ingeniería Física y la Maestría en Energías Renovables y Eficiencia Energética, respectivamente. Esta tesis busca continuar y contribuir con ese esfuerzo. Asimismo, debe señalarse que esta tesis forma parte del proyecto: “Caracterización Petrográfica, Estructural, Térmica y como Adsorbente de diferentes sillares (ignimbritas) de Arequipa para su uso sostenible en aplicaciones constructivas y ambientales” financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT).

(1) M.J. Piñas. Estudio de las Propiedades Térmicas, Mecánicas, Morfológicas y Estructurales del Adobe como Material Biocompuesto, 2018. Grado de Ingeniero Físico.

(2) I. Chino. Propiedades Mecánicas y Térmicas de Adobes Compactados, 2018. Grado de Maestría en Ciencias con mención en Energías Renovables y Eficiencia Energética.

Índice general

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Resumen	IV
Abstract	VI
Prefacio	VIII
Índice general	X
Índice de figuras	XV
Índice de tablas	XVII
Lista de acrónimos y símbolos	XVIII
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Justificación	3
1.4. Antecedentes	4
1.4.1. A nivel internacional	4
1.4.2. En el Perú	4
2. La Ignimbrita en la región de Arequipa	9
2.1. Formación	9
2.2. Yacimientos	10
2.3. Clasificación	11
2.4. Composición	13
2.5. Usos y aplicaciones	14

3. Propiedades térmicas de los materiales	17
4. Caracterización experimental de la Unidad Blanca de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (UB-IAA)	20
4.1. Conductividad térmica empleando el aparato de placa caliente con guarda basado en la norma ASTM C 177 y ASTM C 1043	20
4.1.1. APCG: LAMBDA-UNI	25
4.1.2. Procedimiento para realizar el ensayo	35
4.2. Difusividad térmica empleando el método de Ångström considerando pérdidas por radiación	41
4.3. Estructural, morfológica y elemental	51
4.3.1. Difracción de rayos X (DRX)	51
4.3.2. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	54
4.3.3. Espectroscopía de dispersión de energía	54
4.4. Propiedades mecánicas	56
5. Resultados y discusiones	60
5.1. Conductividad térmica	60
5.2. Difusividad térmica	63
5.3. Caracterización estructural, morfológica y elemental	66
5.4. Propiedades mecánicas	80
6. Conclusiones	87
Referencias	89
Anexos	92
A. Medida intercomparativa de conductividad térmica para la totora	93
B. Aparato portátil para la medición de conductividad térmica	96
C. Medición de conductividad térmica para la UB-IAA empleando el equipo LAMBDA-UNI a distintas condiciones de operación.	97
D. Medición de difusividad térmica para la UB-IAA por el método de Ångström con distintos periodos.	102

Índice de figuras

1.1. Distribución (en %) del material predominante usado en las paredes de viviendas particulares con ocupantes: (a) zonas rural y (b) zonas urbana-año 2017. Otro material comprende triplay, calamina, estera, entre otros.	6
1.2. Distribución (en %) del material predominante usado en las paredes de viviendas particulares con ocupantes: (a) en los años 2007, 2017 y (b) en Arequipa año 2017. 1/ comprende triplay, calamina, estera, entre otros.	7
1.3. Uso de la ignimbrita como material predominante en las paredes exteriores en viviendas particulares con ocupantes presentes según departamento 2017.	8
2.1. Límites aproximados de los cuatro tipos de ignimbrita, imagen tomada por modelo de elevación digital, DEM (de los términos en inglés <i>digital elevation model</i>) basada en mapas digitalizados e interferometría <i>radio detection and ranging</i> (RADAR).	12
2.2. Imágenes de algunas construcciones en Arequipa a base de sillar: (a) Mercado de San Camilo, (b) Los Portales de la Plaza Mayor, (c) Puente Grau, (d) Monasterio de Santa Rosa, (e) Teatro Municipal y (f) Casa el Moral.	15
3.1. Representación esquemática de los termopares: (a) se muestra la diferencia de potencia eléctrica producida por una diferencia de temperatura en el termopar, (b) otra configuración en un termopar y (c) ejemplo de una termopila.	19
4.1. Esquema del aparato de placa caliente con guarda (APCG).	21
4.2. Muestra el error A y B como función del cociente entre el espesor y radio de la zona de medición $\left(\frac{e}{r_{ZM}}\right)$	23
4.3. Esquema del equipo medidor de conductividad térmica, los números indican la ubicación de los termopares, los cuales fueron colocados en (1, 2 y 3) zona de medición, (4, 5 y 6) zona de guarda y (7, 8) placas frías.	26
4.4. Espiral de cobre adosado a la placa fría.	27
4.5. Ubicación de los termopares tomados en 6 direcciones donde se determinó el valor promedio aproximado de la temperatura en la zona de medición y guarda en el estado permanente térmico.	28

4.6. Esquema de la placa caliente vista frontal: (a) zona de medición que presenta ranuras de 5/16 in para el calefactor y la ranura circular donde se encuentran los termopares y (b) zona de guarda que presenta ranuras de 5/16 in para el calefactor y la ranura circular donde se encuentran los termopares.	29
4.7. (a) Placa caliente con los calefactores y termopares y (b) placa caliente tipo <i>sandwich</i> .	29
4.8. Esquema de una vista explosionada de la disposición de los platos caliente, fríos y espiral de cobre, las muestras, y el aislante térmico (poliestireno extruído). . . .	30
4.9. Esquema del equipo ensamblado adicionando una envolvente de aislante térmico como protección secundaria en una cámara de poliestireno expandido. . .	31
4.10. APCG: LAMBDA-UNI.	31
4.11. Esquemático de un <i>shield</i> para una tarjeta Arduino. Para medir (temperatura de termopares $T_{ZM_1}, T_{ZM_2}, T_{ZM_3}$ en la zona de medición, $T_{ZG_1}, T_{ZG_2}, T_{ZG_3}$ en la zona de guarda y $T_{F_{inf}}, T_{F_{sup}}$ con 8 módulos MAX 31856), (corriente eléctrica, voltaje y potencia eléctrica I_{ZM}, V_{ZM}, P_{ZM} en la zona de medida y I_{ZG}, V_{ZG}, P_{ZG} en la zona de guarda con 2 módulos INA 219B) y (temperatura y humedad relativa de la cámara T_a, HR respectivamente con el módulo DHT 22).	38
4.12. Diagrama de flujo para la comunicación Arduino- <i>LabView</i>	39
4.13. Diagrama de flujo de la programación en <i>LabView</i> para el cálculo de conductividad térmica, gráfico y almacenamiento de datos.	40
4.15. En la parte izquierda se muestra las dimensiones en un diseño con apariencia de UB-IAA, y en la derecha se puede observar a la muestra cortado como testigo. . .	48
4.16. En la parte izquierda se observa la muestra UB-IAA con el aislante preformado de lana de roca cubierto con papel de aluminio o <i>foil</i> , y en la derecha se puede observar completamente cubierto y con las salidas de los termopares tipo K que ingresan hasta la mitad del diámetro.	49
4.17. Diagrama de flujo <i>LabView</i> para el monitoreo de datos.	50
4.18. Difracción de rayos X por los planos atómicos (A-A' y B-B').	52
4.19. Ejemplo de la generación de rayos X característicos en el modelo atómico del sodio (Na).	55
4.20. Se muestra una imagen de una cuña de medida para las mediciones de alabeo (concavidad y convexidad) en mm.	57
4.21. Se muestra como medir la concavidad y la convexidad en el ensayo de alabeo. . .	57
4.22. El bosquejo de un equipo para el ensayo de resistencia a la compresión a la unidad.	58

5.1. Comportamiento en el tiempo para (a) temperatura placa fría inferior ($T_{F_{inf}}$) (°C), temperatura placa fría superior ($T_{F_{sup}}$) (°C), temperatura placa zona de medición promedio ($T_{Z_{MPROM}}$) (°C), temperatura placa zona de guarda promedio ($T_{Z_{GPROM}}$) (°C) y (b) potencia eléctrica suministrada a la zona de medición (P_{ZM}) (W), potencia eléctrica suministrada a la zona de guarda (P_{ZG}) (W).	61
5.2. Selección del rango estacionario o permanente térmico en el tiempo tal que se cumple que: $0,0\text{ °C} < T_{Z_{MPROM}} - T_{Z_{GPROM}} < 0,2\text{ °C}$	62
5.3. Comportamiento en el tiempo para (a) temperatura en la posición (T_{X_1}) (°C), temperatura en la posición (T_{X_2}) (°C) para la muestra UB-IAA y (b) selección del rango estacionario donde se muestra el ajuste no lineal del seno para T_{X_1} y T_{X_2}	63
5.4. Difractograma para la UB-IAA, donde se muestran las fases mas representativas: cristobalita (c), biotita (b), sanidina (s) y plagioclasa (p). La anortita y albita presentes en la UB-IAA son plagioclasas.	66
5.5. Cristobalita presente en el patrón de difracción de la muestra UB-IAA.	67
5.6. Biotita presente en el patrón de difracción de la muestra UB-IAA.	68
5.7. Albita presente en el patrón de difracción de la muestra UB-IAA.	69
5.8. Anortita presente en el patrón de difracción de la muestra UB-IAA.	70
5.9. Sanidina presente en el patrón de difracción de la muestra UB-IAA.	71
5.10. celda unitaria de los minerales presentes en el patrón de DRX de la UB-IAA y su contenido aproximado en % de peso.	72
5.11. Imágenes tomadas por MEB, en los cuales se aprecia una morfología heterogénea y los poros.	74
5.12. Imágenes EDS de la muestra UB-IAA donde se aprecian los elementos oxígeno, aluminio, silicio y carbono.	75
5.13. Imágenes EDS de la muestra UB-IAA donde se aprecian los elementos cloro y sodio.	76
5.14. Imágenes EDS de la muestra UB-IAA donde se aprecian los elementos potasio, calcio y hierro.	77
5.15. Imágenes EDS de la muestra UB-IAA donde se aprecian los elementos potasio, calcio y hierro.	78
5.16. Imágenes EDS de la muestra UB-IAA donde se aprecian los elementos potasio, calcio y hierro.	78
5.17. Resultados del estudio de EDS y DRX: Muestra UB-IAA con sus minerales identificados.	79
5.18. Muestras de UB-IAA en el horno secándose a 110 °C.	80

5.19. Máquina de compresión uniaxial, ubicada en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI, ensayo para la UB-IAA.	84
A.1. Comportamiento en el tiempo para: (a) Temperatura placa fría inferior (T_{Finf}) (°C), temperatura placa fría superior (T_{Fsup}) (°C), temperatura placa zona de medición promedio (T_{ZMPROM}) (°C), Temperatura placa zona de guarda promedio (T_{ZGPROM}) (°C) y (b) potencia eléctrica suministrada a la zona de medición (P_{ZM}) (W), potencia eléctrica suministrada a la zona de guarda (P_{ZG}) (W).	94
A.2. Selección del rango estacionario o permanente térmico en el tiempo tal que se cumple que: $0,0\text{ °C} < T_{ZMPROM} - T_{ZGPROM} < 0,2\text{ °C}$	95
B.1. Aparato portátil para medir conductividad térmica de materiales sólidos aislantes.	96
C.1. Comportamiento en el tiempo para (a) temperatura placa fría inferior (T_{Finf}) (°C), temperatura placa fría superior (T_{Fsup}) (°C), temperatura placa zona de medición promedio (T_{ZMPROM}) (°C), temperatura placa zona de guarda promedio (T_{ZGPROM}) (°C) y (b) potencia eléctrica suministrada a la zona de medición (P_{ZM}) (W), potencia eléctrica suministrada a la zona de guarda (P_{ZG}) (W).	98
C.2. Selección del rango estacionario o permanente térmico en el tiempo tal que se cumple que: $0,0\text{ °C} < T_{ZMPROM} - T_{ZGPROM} < 0,2\text{ °C}$	99
C.3. Comportamiento en el tiempo para: (a) Temperatura placa fría inferior (T_{Finf}) (°C), temperatura placa fría superior (T_{Fsup}) (°C), temperatura placa zona de medición promedio (T_{ZMPROM}) (°C), temperatura placa zona de guarda promedio (T_{ZGPROM}) (°C) y (b) potencia eléctrica suministrada a la zona de medición (P_{ZM}) (W), potencia eléctrica suministrada a la zona de guarda (P_{ZG}) (W).	100
C.4. Selección del rango estacionario o permanente térmico en el tiempo tal que se cumple que: $0,0\text{ °C} < T_{ZMPROM} - T_{ZGPROM} < 0,2\text{ °C}$	101
D.1. Comportamiento en el tiempo para (a) temperatura en la posición (T_{X_1}) (°C), temperatura en la posición (T_{X_2}) (°C) para la muestra UB-IAA y (b) selección del rango estacionario donde se muestra el ajuste no lineal del seno para T_{X_1} y T_{X_2}	103
D.2. Comportamiento en el tiempo para (a) temperatura en la posición (T_{X_1}) (°C), temperatura en la posición (T_{X_2}) (°C) para la muestra UB-IAA y (b) selección del rango estacionario donde se muestra el ajuste no lineal del seno para T_{X_1} y T_{X_2}	105

D.3. Comportamiento en el tiempo para (a) temperatura en la posición (T_{X_1}) ($^{\circ}\text{C}$), temperatura en la posición (T_{X_2}) ($^{\circ}\text{C}$) para la muestra UB-IAA y (b) selección del rango estacionario donde se muestra el ajuste no lineal del seno para T_{X_1} y T_{X_2} . 107

Índice de tablas

2.1. Composición química en porcentaje de peso para la IAA unidad blanca y rosada.	13
2.2. Características adicionales de las ignimbritas de Arequipa – traducido y editado de	16
4.1. Condiciones de temperatura para el cálculo de dimensiones para el equipo del CENAM APCG-310: temperatura placa caliente (T_C) (°C), temperatura placa fría (T_F) (°C), temperatura en el interior de la cámara del APCG (T_a) (°C) y la relación de las temperaturas X	23
4.2. Resultados del efecto de borde para distintos valores de espesor (e), cociente entre el espesor y radio de la zona de medición $\left(\frac{e}{r_{ZM}}\right)$ y cociente espesor y radio de la zona de guarda $\left(\frac{e}{r_{ZG}}\right)$ para el equipo del CENAM APCG-310.	23
4.3. Algunas condiciones de trabajo para las temperaturas en el equipo LAMBDA-UNI: temperatura placa caliente (T_C) (°C), temperatura placa fría (T_F) (°C), temperatura en el interior de la cámara del APCG (T_a) (°C) y la relación de las temperaturas X	24
4.4. Resultados a partir de la interpolación de los valores de la tabla 4.2 y tabla 4.3 del efecto de borde X , con $r_{ZM} = 75$ mm, $r_{ZG} = 187,5$ mm y $e = 50$ mm para el equipo LAMBDA-UNI.	24
4.5. Parámetros registrados para la adquisición de datos en el equipo LAMBDA-UNI.	36
4.6. Sensores empleados para la adquisición de datos.	37
4.7. Clase de unidad de albañilería para fines estructurales.	59
5.1. Muestra de UB-IAA para el ensayo de conductividad térmica, dimensiones y masa.	60
5.2. Resultados de la medición de UB-IAA.	62
5.3. Parámetros del ajuste seno para la curva en el rango estacionario.	64
5.4. Valores y errores estándar de los parámetros para el cálculo de difusividad térmica determinados a partir del ajuste no lineal.	64
5.5. Se muestran los resultados de la difusividad térmica para la UB-IAA.	64
5.6. Muestra de UB-IAA para el ensayo de difusividad térmica, dimensiones y masa.	64
5.7. Principales picos de difracción, índices de Miller y distancia interplanar de cristobalita en el patrón de difracción de rayos X de la UB-IAA.	67

5.8. Principales picos de difracción, índices de Miller y distancia interplanar de biotita en el patrón de difracción de rayos X de la UB-IAA.	68
5.9. Principales picos de difracción, índices de Miller y distancia interplanar de albita en el patrón de difracción de rayos X de la UB-IAA.	69
5.10. Principales picos de difracción, índices de Miller y distancia interplanar de anortita en el patrón de difracción de rayos X de la UB-IAA.	70
5.11. Principales picos de difracción, índices de Miller y distancia interplanar de la fase sanidina en el patrón de difracción de rayos X de la UB-IAA.	71
5.12. Dimensionamiento de las 9 muestras de UB-IAA largo, ancho y altura en (cm).	81
5.13. Resultados de la variación dimensional de las 9 muestras de UB-IAA.	81
5.14. Resultados de la medición de concavidad de las 9 muestras de UB-IAA.	82
5.15. Resultados de la medición de convexidad de las 9 muestras de UB-IAA.	83
5.16. Dimensionamiento de las 5 muestras de UB-IAA que fueron escogidos para el ensayo de resistencia a la compresión a la unidad con capeado de yeso y cemento en la relación 1:2 respectivamente.	84
5.17. Resultados de la resistencia a la compresión para la UB-IAA.	85
5.18. Resultados de la absorción saturado 24 h para la UB-IAA.	86
5.19. Clasificación de los resultados para la UB-IAA como clase de unidad de albañilería para fines estructurales.	86
A.1. Resultados del ensayo de medición de la conductividad térmica de la totora medido con el equipo patrón APCG del CENAM.	93
A.2. Resultados del ensayo de la totora empleando el equipo LAMBDA-UNI.	95
A.3. Medida intercomparativa de conductividad térmica para la muestra de totora.	95
C.1. Resultados del ensayo de conductividad térmica Toma 3.	99
C.2. Resultados del ensayo de conductividad térmica Toma 4.	101
D.1. Parámetros del ajuste seno para la curva en el rango estacionario.	103
D.2. Valores y errores estándar de los parámetros para el cálculo de difusividad térmica determinados a partir del ajuste no lineal.	104
D.3. Parámetros del ajuste seno para la curva en el rango estacionario.	106
D.4. Valores y errores estándar de los parámetros para el cálculo de difusividad térmica determinados a partir del ajuste no lineal.	106
D.5. Parámetros del ajuste seno para la curva en el rango estacionario.	108
D.6. Valores y errores estándar de los parámetros para el cálculo de difusividad térmica determinados a partir del ajuste no lineal.	108
D.7. Se muestras los resultados de la difusividad térmica para la UB-IAA a distintas frecuencias de trabajo.	108

Lista de acrónimos y símbolos

APCG Aparato de Placa Caliente con Guarda

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

CENEPRED: Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres

CENAM: Centro Nacional de Metrología (México)

CONCYTEC: Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación

DRX: Difracción de rayos X, de los términos en inglés: *X ray Diffraction*

MEB: Microscopía Electrónica de Barrido

DEM: Modelo de elevación digital, de los términos en inglés: Digital elevation model

DAQ: *Data Acquisition* Tarjeta de adquisición de datos

EDS: *Energy dispersive spectroscopy*

EDX: *Energy dispersive X ray spectroscopy*

EMP: Error máximo permitido

MVCS: Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento

FONDECYT: Fondo Nacional de Desarrollo Científico y de Innovación Tecnológica

IAA: Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa

ILJ: Ignimbrita La Joya

INEI: Instituto Nacional de Estadística e Informática (del Perú)

IRC: Ignimbrita Rio Chili

TY: Tufos Yura

UNI: Universidad Nacional de Ingeniería

UB-IAA: Unidad Blanca de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa

LAMBDA-UNI: Equipo para medir la conductividad térmica fabricado en la UNI según la norma ASTM C 177

GND: *Ground* o generalmente llamado “tierra”

LEM: Laboratorio de Ensayo de Materiales

ININVI: Instituto Nacional de Investigación y Normalización de Vivienda del Perú

NTP: Normas Técnicas Peruanas

PWM: *Pulse width modulation*

RNE: Reglamento Nacional de Edificaciones

RADAR: Detección y Medición de Distancias por Radio de los términos en inglés: *Radio Detection and Ranging*

SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

SENCICO: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción

SPI: *Serial peripheral interface*

TTL: *Transistor transistor logic*

I2C: *Inter integrated circuits*

UNI: Universidad Nacional de Ingeniería

ICP - OES: Espectroscopía de emisión óptica e plasma acoplado por inducción

c: Cristobalita

b: Biotita

s: Sanidina

p: Plagioclasa

pfv: Pómez y fragmentos de vidrio

cl: Cristales libres

faa: Fragmentos accidentales y accesorios

J, K, R, S, T, N, E y B: Tipos de termopares

DHT 22: Sensor de humedad relativa

MAX 31856: Módulo electrónico para lectura de termopares

INA 219B: Módulos electrónicos para medir potencia eléctrica

λ : Conductividad térmica ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

α : Difusividad térmica ($m^2 \cdot s^{-1}$)

β : Efusividad térmica ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)

ρ : Densidad ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

m_{rad} : Coeficiente de pérdidas de calor por radiación

m_{conv} : Coeficiente de pérdidas de calor por convección

h : Coeficiente de pérdidas de calor por radiación y convección

V : Volumen (m^3)

\dot{Q}_{rad} : Razón de conducción de calor por radiación (W)

\dot{Q}_{conv} : Razón de conducción de calor por convección (W)

h_{conv} : Coeficiente de convección ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

σ : Constante de Stephan–Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

ε : Emisividad ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

P_n, Q_n : Coeficientes de la serie de Fourier

c_p : Calor específico del material ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

V : Voltaje (V)

I : Intensidad de corriente eléctrica (A)

A : Área de transferencia de calor (m^2)

A_{ZM} : Área de la zona de medición (m^2)

A_g : Área del gap entre la zona de medida y guarda (m^2)

x_1, x_2 : Posición (m)

Δx : distancia (m)

E_b : Efecto de borde

$T_{ZM_{PROM}}$: Temperatura promedio en la zona de medición ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{ZG_{PROM}}$: Temperatura promedio en la zona de guarda ($^{\circ}\text{C}$)

T_{Finf} : Temperatura en la placa fría inferior ($^{\circ}\text{C}$)

T_{Fsup} : Temperatura en la placa fría superior ($^{\circ}\text{C}$)

T_a : Temperatura en el interior de la cámara del APCG ($^{\circ}\text{C}$)

$T(0, t)$: Temperatura producto de las oscilaciones en la base de la superficie en contacto con el ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

$T(L, t)$: Temperatura temperatura en el tiempo de una muestra cilíndrica de longitud L ($^{\circ}\text{C}$)

δt Tiempo L (s)

T_0, T_1, T_2 : Temperatura L ($^{\circ}\text{C}$)

T_{∞} : Temperatura ambiente o de los alrededores ($^{\circ}\text{C}$)

T_S : Temperatura en la superficie de la base superior de la muestra IA para difusividad ($^{\circ}\text{C}$)

P : Periodo (s)

ΔT : Diferencia de temperatura ($^{\circ}\text{C}, \text{K}$)

ΔV : Diferencia de voltaje (V)

V_{ZG} : Voltaje en la zona de guarda (V)

I_{ZM} : Corriente eléctrica en la zona de medición (A)

I_{ZG} : Corriente eléctrica en la zona de guarda (A)

P_{ZG} : Potencia eléctrica en la zona de guarda (W)

P_{ZM} : Potencia eléctrica en la zona de medición (W)

V_{ref} : Voltaje de referencia (V)

$\Delta V, \Delta V_X, V_1, V_2, \dots, V_n$: Voltaje (V)

T_1, T_2, \dots, T_8 : Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

a_1, a_2, \dots, a_n : coeficientes enteros

\dot{Q} : Razón de conducción de calor (W)

t_0, t_1, t_2 : Tiempo (s)

HR : Humedad relativa (%)

$u_{relativa}$: Incertidumbre relativa

u_{tipoA}, u_{tipoB} : Incertidumbre tipo A y B respectivamente

u_{total} : Incertidumbre total

$\frac{u_{\lambda}}{\lambda}$: Incertidumbre relativa de la conductividad térmica

$\frac{u_{\dot{Q}}}{\dot{Q}}$: Incertidumbre relativa de la razón de conducción de calor

$\frac{u_e}{e}$: Incertidumbre relativa de espesor

$\frac{u_A}{A}$: Incertidumbre relativa del área de transferencia de calor

$\frac{u_{\Delta T}}{\Delta T}$: Incertidumbre relativa de la diferencia de temperatura

$\frac{u_{V_{ZM}}}{V_{ZM}}$: Incertidumbre relativa del voltaje en la zona de medición

$\frac{u_{I_{ZM}}}{I_{ZM}}$: Incertidumbre relativa de la corriente eléctrica en la zona de medición

$\frac{u_\alpha}{\alpha}$: Incertidumbre relativa de la difusividad térmica
 $\frac{u_{\Delta x}}{\Delta x}$: Incertidumbre relativa de la magnitud diferencia de posición
 $\frac{u_{\Delta t}}{\Delta t}$: Incertidumbre relativa debido al tiempo
 $\frac{u_N}{N}$: Incertidumbre relativa de la relación de las amplitudes de temperatura
 $\frac{u_{M_1}}{M_1}, \frac{u_{M_2}}{M_2}$: Incertidumbre relativa de las amplitudes de temperatura
y: mesurando
 $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_N$: Magnitudes de entrada
 u_{y_e} : Incertidumbre combinada del mesurando
 k_0 : Factor de cobertura
 u_{y_e} : Incertidumbre expandida
 $u_{resolucion}$: Incertidumbre debido a la resolución del instrumento
 $u_{exactitud}$: Incertidumbre debido a la exactitud del error máximo permitido del instrumento
 σ_x : Desviación estándar de una medida
 $u_{\hat{x}}, u_{\hat{x}_i}$: Incertidumbre de las magnitudes de entrada
i: Valores de números enteros y empieza desde 1
N: Valores entero positivo de una cantidad de datos
cte: Constante cualquiera
 p_1, p_2, p_N : Potencias constantes
 p_0 : Nivel de confianza o probabilidad de cobertura
 γ : Solución de una ecuación característica
 V_d : Variabilidad dimensional (%)
 Mf : Medida especificada por el fabricante (cm)
 Mp : Medida promedio (cm)
 f'_b : Resistencia a la compresión del espécimen ($\text{kg} \cdot \text{f} \cdot \text{cm}^{-2}$)
 W : Carga máxima o de fisuramiento ($\text{kg} \cdot \text{f}$)
 A_b : Área bruta de la sección (cm^2)
 q_g : Flujo de calor en el gap ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
 q_e : Flujo de calor axial de la placa caliente a la placa fría ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
 q_b : Flujo de calor radial en en la muestra ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

q_i : flujo de calor entregado por la placa caliente ($W \cdot m^{-2}$)

EMP: Error máximo permitido

λ_0 : Longitud de onda (Å)

n : Factor de reflexión

E : Energía (keV)

Na: Sodio

K: Potasio

O: Oxígeno

Al: Aluminio

Si: Silicio

Fe: Hierro

Ca: Calcio

Cl: Cloro

θ : Ángulo formado entre los planos paralelos de átomos y la radiación incidente ($^\circ$)

h, k, l : Índices de Miller

d_{hkl} : Distancia interplanar de la familia de planos que producen la interferencia constructiva (Å)

M_1, M_2, A_0, A_1, A_2 : Amplitud de temperatura ($^\circ\text{C}$)

Absorción: Porcentaje de absorción en 24 horas (%)

ω : Frecuencia angular ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)

W_s : Peso del espécimen saturado 24 horas (g)

W_d : Peso seco del espécimen (g)

L_m : Largo (m)

A_m : Ancho (m)

H_m : Altura (m)

Capítulo 1

Introducción

La Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (IAA) es uno de los 4 tipos de ignimbrita que se encuentra en Arequipa: (1) Ignimbrita Río Chili (IRC), (2) Ignimbrita La Joya (ILJ), (3) Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (IAA), (4) Tufo Yura (TY); en particular la unidad blanca de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (UB-IAA) tiene uso como material de construcción y como elemento decorativo desde épocas prehispánicas [1]. Esta roca volcánica aflora en los yacimientos de Arequipa. En la presente tesis se estudiaron sus propiedades térmicas (conductividad térmica y difusividad térmica), composición, estructura y propiedades mecánicas.

Se debe tener presente que el término “sillar” se refiere a las ignimbritas de Arequipa a nivel local. Fenner (1948) introdujo este término por primera vez en la literatura vulcanológica refiriéndose a la ignimbrita blanquecina utilizada en la construcción de edificios coloniales en Arequipa y su definición ha variado según su grado de soldadura y facies [1]. Además, este término es empleado en países como Perú, México, etc [2]. Barker (1996) concluye que el término sillar es inútil para vulcanólogos debido a su significado demasiado amplio y que el término debe ser abandonado. En adelante a la Unidad Blanca de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa se le denominará por su acrónimo UB-IAA.

1.1. Planteamiento del problema

Los estudios realizados en la ignimbrita de Arequipa comprenden sus propiedades mecánicas comparando sus propiedades con las unidades de albañilería según el Reglamento Nacional de Edificaciones E 0.70, presentando características similares a un ladrillo tipo II lo que permite su uso en muros portantes y techado de forma curva [3]. Así como la composición presentando mayor % en contenido de sílice, presenta óxidos alcalinos y férrico. Además su uso es histórico desde épocas coloniales en Arequipa, pero ha perdido vigencia por la aparición de nuevos materiales en la industria de la construcción, como el ladrillo y el bloque de concreto. Pese a que los habitantes de la región reconocen que la ignimbrita funcionaba bien

térmicamente con el clima, el desconocimiento de sus propiedades térmicas han contribuido aún más su abandono. Incluso, en el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) (2016), que solicita una transmitancia térmica específica para la región, no se incluye al sillar o ignimbrita en los materiales enlistados. Hasta ahora sus propiedades térmicas han sido muy poco estudiadas, solo se ha reportado un artículo con respecto a las propiedades térmicas (conductividad térmica, densidad y calor específico), los cuales se midieron fuera del país, llevaron 3 muestras de ignimbrita blanca de Arequipa a México.

Esta tesis pretende aportar a estos estudios, principalmente se busca contribuir en el campo de la construcción para ser usado en zonas altoandinas, resaltando las propiedades térmicas (conductividad térmica y difusividad térmica) que se midieron en el país, en la Facultad de Ciencias de la UNI, dado que a nivel regional la UB-IAA es un material que abunda y aflora en los yacimientos de Arequipa y que también tiene poco uso a nivel nacional, por lo cual su uso debe mantenerse.

Muchas zonas rurales al sur del país presentan temperaturas por debajo de 0 °C descendiendo incluso a temperaturas de -15 °C cada año a causa de las heladas, durante el invierno. Además, la construcción de las viviendas son precarias y rudimentarias. Todos estos factores exponen a sus habitantes a condiciones extremas de vida, especialmente, aquello que se encuentran en pobreza y pobreza extrema.

Algunas consecuencias registradas de esta problemática:

En los departamentos de Junín, Pasco, Ucayali, Ancash, Arequipa, Loreto y Madre de Dios se registraron 182 muertes a causa de las heladas (zonas altoandinas) y friaje (selva) en 2018 [4].

En Puno se registró la muerte del 60 % de ganado en 2018 [5].

Existen propuestas como el “Plan Multisectorial Sectorial ante Heladas y Friajes 2018” [6] por parte del Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgos y Desastres (CENEPRED) en conjunto con el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) y diferentes ministerios como: el Ministerio de Salud, el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS), el Ministerio de Educación, el Ministerio de Agricultura y Riego, el Ministerio de la Mujer y Poblaciones Vulnerables, ha destinado cerca de 335 millones de soles en diversos programas para la población y solo cerca de 12 millones de soles en viviendas mejoradas en 456 casas de Puno y Cuzco por parte del MVCS . Además promueven ayuda con la entrega de frazadas, alimentos de primera necesidad, agua, etc. Este tipo de ayuda debe ir acompañada con el empleo adecuado de materiales para la construcción, conociendo sus propiedades térmicas, mecánicas, entre otros.

Por ende es importante resaltar que la UB-IAA, al presentar buenas propiedades térmicas como material de construcción y ser abundante en nuestro país (región de Arequipa) puede generar un gran aporte e impacto en el campo bioclimático.

1.2. Objetivos

En esta sección se presenta el objetivo general de la tesis, así como los objetivos específicos que se plantearon para el trabajo de investigación.

1.2.1. Objetivo general

Caracterización de las propiedades térmicas, mecánicas, estructural y composición de la UB-IAA.

1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de la presente tesis son:

- Determinar la conductividad térmica de la UB-IAA empleando el aparato medidor de placa caliente y guarda (APCG) construido en la UNI, denominado: "LAMBDA-UNI". El cual cumple las normas americana ASTM C 177 y ASTM C 1043.
- Determinar la difusividad térmica de la UB-IAA empleando el método de Ångström considerando pérdidas por radiación y convección.
- Identificar por DRX los principales componentes cristalinos de la UB-IAA y su contenido en % peso.
- Identificar los principales compuestos químicos presentes en la UB-IAA.
- Estudio de la morfología de la UB-IAA.
- Determinar las propiedades mecánicas de la UB-IAA, como la resistencia a la compresión, variación dimensional y alabeo.
- Determinar el porcentaje de absorción de humedad en 24 h para la muestra de la UB-IAA.

1.3. Justificación

La UB-IAA es un material abundante que aflora en los yacimientos de Arequipa, del que se tiene poco estudio de sus propiedades térmicas por lo que ha perdido vigencia. En esta tesis se estudiaron sus propiedades térmicas, mecánicas, composición y estructura, etc. Para que este material siga vigente y poder brindar un adecuado uso en las diversas aplicaciones.

1.4. Antecedentes

A continuación se presentan los estudios desarrollados a la ignimbrita a nivel internacional y en el Perú.

1.4.1. A nivel internacional

La ignimbrita es un material piroclástico que se presenta en otros países del mundo, tales como España, México, Argentina, Chile, entre otros [7-9].

Un estudio para la *V. Global Stone Congress* en Turquía, se centra principalmente en las ignimbritas que surgen cerca de Gücünkaya, Aksaray, las que son del tipo rosa y gris [10]. En dicho estudio llegan a la conclusión de que La resistencia a la compresión no confinada de las ignimbritas grises es más alta que el grupo rosa. La porosidad de las ignimbritas rosadas es inversamente proporcional a la velocidad de la onda sísmica interna primaria, mientras que las mismas propiedades son proporcionales para las grises. Además, La conductividad térmica de las ignimbritas rosadas varía entre $[0,298 - 0,407 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, mientras que la misma gama se encuentra entre $[0,497 - 0,664 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ para el grupo gris. En Michoacán, México, y en la provincia volcánica Paraná-Etendeka, del sur de Brasil, se realizaron estudios que permiten conocer la composición de las ignimbritas. De sus resultados se tiene que están constituidas principalmente de sílice amorfo, cuarzo, plagioclasa, óxidos de hierro y titanio, entre otros [7,8]. Daniel Meilán en 1980 señalaba, en la Universidad Nacional de Salta (Argentina), que las propiedades físicas de las ignimbritas los hacían útiles en construcción, porque eran livianos y fáciles para transportar y colocar, menciona que por su estructura interna, son un aislante natural de la temperatura. Además, comenta que sus propiedades acústicas disminuyen la transmisión de ruidos entre los distintos ambientes y el exterior [11]. Por ser ignífugas no se ven afectadas por el fuego o un incendio [12].

1.4.2. En el Perú

Arequipa es conocida como la “Ciudad Blanca” por el uso de la UB-IAA en casonas, monumentos históricos, esculturas y templos construidos en Arequipa. La literatura no muestra valores específicos de sus propiedades térmicas.

Se estudiaron sus propiedades mecánicas y sus resultados clasifican a la UB-IAA como ladrillo tipo II con un valor de resistencia a la compresión de $87,86 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ [3]. Se realizaron estudios geológicos en Puno, dirigidos por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, para tener controles litológicos y estructurales en la mina “El Cofre”, se encontró rocas volcánicas del grupo Tacaza y la formación Palca constituido por rocas piroclásticas, con características similares a la ignimbrita [13]. Otros estudios de la ignimbrita blanca realizados por parte del

Capítulo 1. Introducción

Instituto Nacional de Investigación y Normalización de Vivienda del Perú (ININVI) se enfocan exclusivamente en sus propiedades mecánicas, mecánicas y químicas dejando de lado sus propiedades térmicas [11].

En noviembre del año 2019, se publicó el artículo: Evaluación del desempeño térmico del sillar (ignimbrita) de Arequipa, donde se reportaron los resultados de: conductividad térmica $0,16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, densidad $1306,96 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ y calor específico $463,75 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; siendo el primer reporte que se tiene sobre propiedades térmicas de la ignimbrita de Arequipa. Cabe resaltar que se llevaron 3 muestras de ignimbrita de Arequipa a México para hacer las mediciones. Además, en este estudio se determinó que para un espesor de 0,3 m del sillar sogá y un espesor de 0,19 m del sillar canto, cumple con los requerimientos térmicos que demanda el clima de Arequipa, pues tienen $0,78 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ y $1,49 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, respectivamente, puesto que la transmitancia térmica máxima en muros es $2,36 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ requerida por el RNE (2016) en esta zona 4-mesoandino [14].

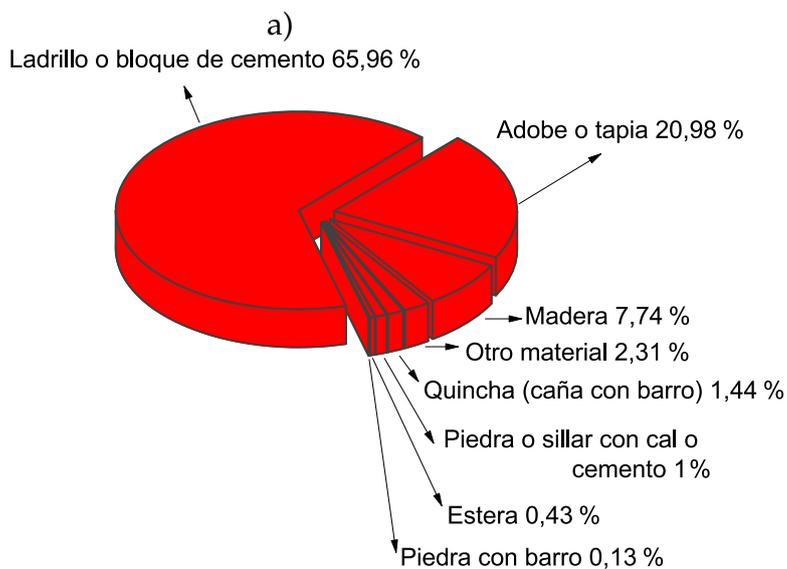
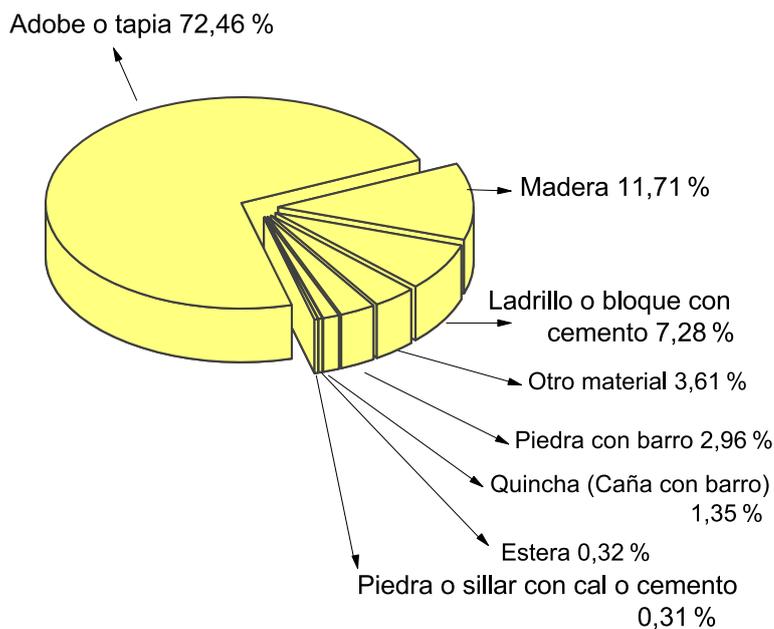


Figura 1.1. Distribución (en%) del material predominante usado en las paredes de viviendas particulares con ocupantes: (a) zonas rural y (b) zonas urbana-año 2017. Otro material comprende triplay, calamina, estera, entre otros. Datos tomados de [15].

Capítulo 1. Introducción

En la figura 1.1, se observó que en las zonas rurales el material más utilizado es el adobe con 72,46 %, y también la madera con 11,71 %. En las zonas urbanas el material más usado es el ladrillo con 65,96 %. La ignimbrita o sillar es más utilizado en la zona urbana que en las zonas rurales, pero apenas presenta el 1 %. En la figura 1.2, se aprecia que el sillar es más usado en Arequipa y con un ligero aumento de 0,1 % del 2007 al 2017 en el Perú, en Arequipa el material más usado es el ladrillo, el adobe luego el sillar.

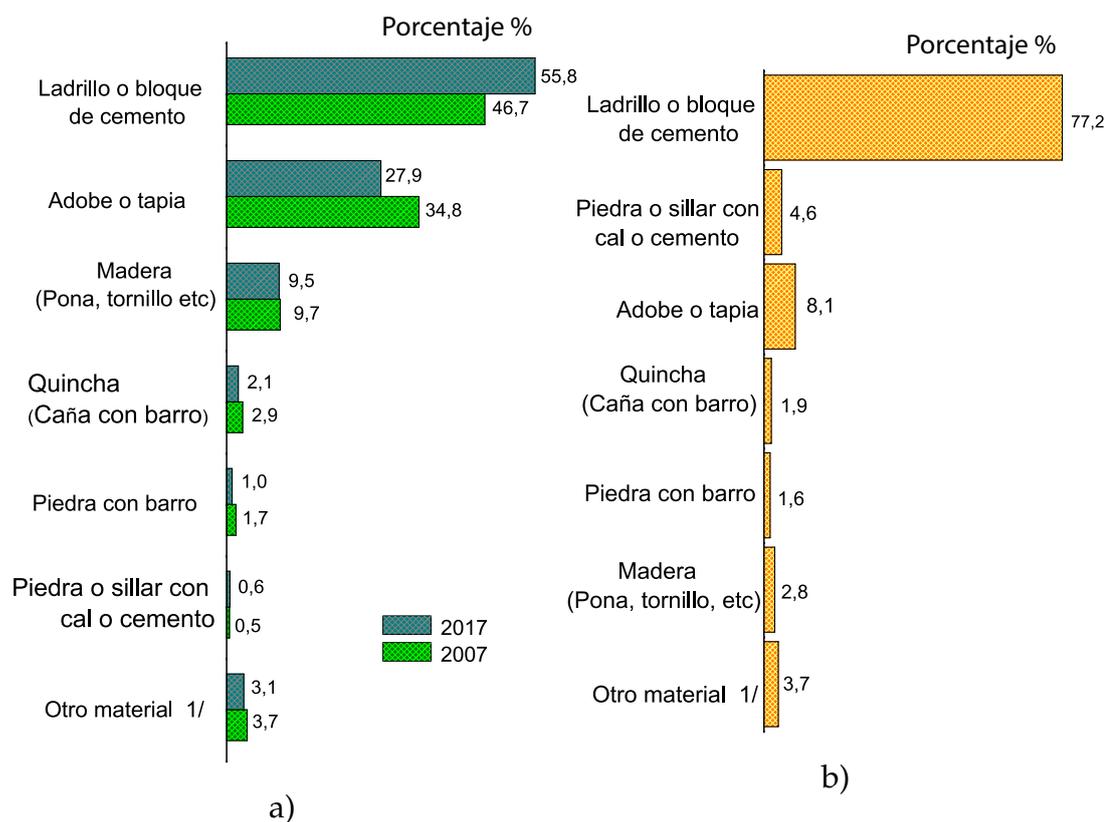


Figura 1.2. Distribución (en %) del material predominante usado en las paredes de viviendas particulares con ocupantes: (a) en los años 2007, 2017 y (b) en Arequipa año 2017. 1/ comprende triplay, calamina, estera, entre otros. Datos tomados de [15].

En la figura 1.3, se muestra el uso de la ignimbrita como material predominante en las paredes exteriores de viviendas particulares con ocupantes presentes según departamento, y se observó que Arequipa presenta el mayor porcentaje con 40,8 %, luego Lambayeque con 27,11 %.

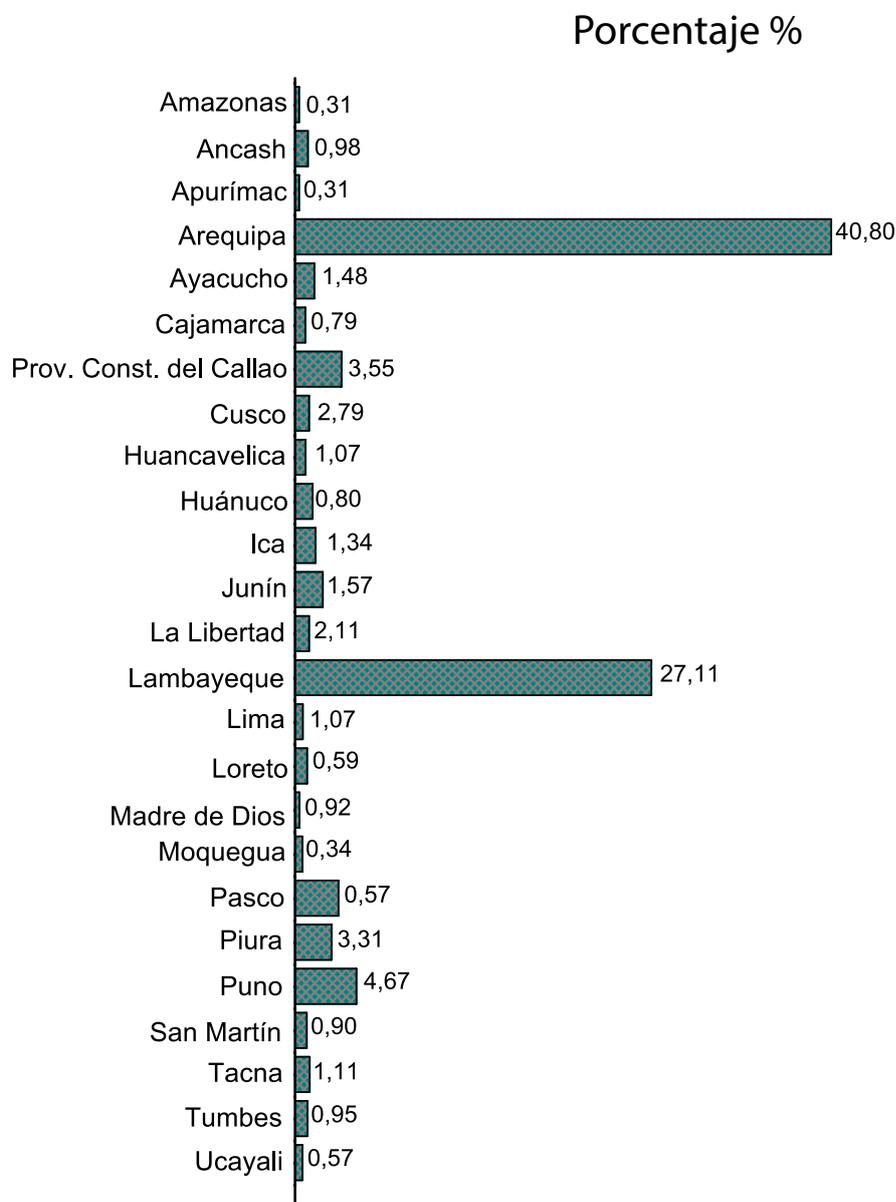


Figura 1.3. Uso de la ignimbrita como material predominante en las paredes exteriores en viviendas particulares con ocupantes presentes según departamento 2017. Datos tomados de [15].

Capítulo 2

La Ignimbrita en la región de Arequipa

A continuación se presenta información correspondiente a la formación, clasificación según su ubicación, yacimientos, composición química, usos y aplicaciones de la ignimbrita que aflora en la región de Arequipa.

2.1. Formación

El Dr. William F. Jenks opina que la ignimbrita es una roca originada por una gran erupción volcánica, hace más de 800 000 años. Menciona que una masa cargada de gas fue empujada por fuerzas enormes hacia el exterior por medio de fisuras sobre las faldas de Chachani, el gas se expandió violentamente y la lava se desmenuzó en pequeñísimos fragmentos vítreos, pero manteniéndose próxima al suelo por estar cargados de partículas rocosas finas, esta mezcla se expandió por todo el valle que hoy ocupa Arequipa y Yura, dejando un material parecido a la ceniza y las partículas rocosas se asentaron y empezaron a consolidarse [16].

El Dr. Clarence N. Fenner, a diferencia de Jenks, señala que el magma parece haber rebalsado por los orificios de la corteza terrestre, en forma de una masa de partículas disgregados por la acción de los gases puestos en libertad, como un derrame incandescente [17].

A diferencia de otros materiales resultantes del derrame lávico en la región como en las lavas en las que predomina las andesitas, en la UB-IAA predomina un material muy silíceo.

2.2. Yacimientos

A continuación se enumera los principales yacimientos de ignimbritas, en la ciudad de Arequipa [18].

- **La Pampa:** Se encuentra situada al norte de Miraflores, debido a sus características salitrosas, pesadas y poco resistentes a la compresión y gran eflorescencia, malogra los tarrajes de yeso. Por estos motivos es desechada, por su mala calidad, pero es la de mayor uso en las antiguas construcciones.
- **La Pampa Chica:** Situada cerca de la anterior, es muy dura, de color amarillento, y presenta dificultad en su extracción.
- **Cantera de Añashuayco:** Situado en el Noroeste de Arequipa, tiene el aspecto de una gran muralla, es de fácil corte. En este yacimiento se puede encontrar la IAA unidad blanca y rosada.
- **Cantera Los Quicos:** Se encuentra cerca de la cantera de Añashuayco y presenta afloramiento de la misma calidad de ignimbrita.
- **Quebrada de Huarangeros y Nacaco:** Presenta afloramiento de ignimbrita blanco y tonos amarillentos
- **Yura, Quishuarani:** Presentan afloramiento de ignimbrita rosado.
- **Otros yacimientos:** Presentan ignimbrita de mala calidad.

2.3. Clasificación

En la región de Arequipa afloran muchas cantidades de ignimbritas. En 2016 se realizó un estudio estratigráfico y petrográfico de la ignimbrita de los periodos Neógeno y Cuaternario en Arequipa [1], clasificando cuatro tipos de ignimbrita: Ignimbrita Río Chili (IRC), Ignimbrita La Joya (ILJ), Ignimbrita aeropuerto de Arequipa (IAA) e Ignimbrita Tufo Yura (ITY), y se describen a continuación.

- **Ignimbrita Río Chili (IRC):** Se desarrolla en la zona alta del cañon superior del Río Chili y abarca una extensión aproximada de 150 km². Algunas muestras han sido datadas $1,03 \pm 0,09$ Ma en (⁴⁰Ar/³⁹Ar) correlacionado en fechas con las Ignimbrita Huaylillas del Mioceno medio en el sur.
- **Ignimbrita La Joya (ILJ):** Surge en la depresión de Arequipa del área del Altiplano hasta 50 km al norte de Arequipa en el valle de Río Sumbay y 50 km al sureste hasta el flanco del Batolito de Arequipa con un volumen estimado de 16 a 24 km³ en base a un mínimo de superficie de 80 km² y sobre un espesor promedio de 5 a 80 m. Algunas muestras tomadas de estos lugares datan de $4,78 \pm 0,21$ Ma y $4,89 \pm 0,02$ Ma en (⁴⁰Ar/³⁹Ar).
- **Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (IAA):** Constituye el relleno mas alto de la depresión de Arequipa entre los valles del Río Yura y Río Chili en elevaciones que van desde los 1700 a 2700 m.s.n.m, una extensión aproximada de 600 km², espesor de 5 a 100 m y un volumen de 18 a 20 km³.
 - **Unidad blanca:** Se extrae en canteras y es la fuente principal de la piedra de construcción blanca en Arequipa. La superficie mínima de la unidad blanca de la IAA es de unos 400 km² y tiene un espesor promedio de 40 m, lo que estima un volumen de 15 a 12 km³.
 - **Unidad rosada:** Forma la mayor parte de la superficie plana de la depresión de Arequipa, y es mas gruesa en el medio de la depresión que se adelgaza hacia oeste - nor - oeste y este - sur -este como se aprecia a la salida del cañón del Río Chili. Probablemente más extendida que la unidad blanca con aproximadamente 600 km², y su espesor oscila desde unos pocos metros a 50 m. Basado en un espesor promedio de 8m, se estima un volumen preservado de 5 km³ y estas datan aproximadamente de $1,65 \pm 0,04$ Ma en (⁴⁰Ar/³⁹Ar).
- **Tufo Yura (TY):** Consta de una serie de depósitos de flujo de piedra pómez no soldados de color grisáceo, han llenado una depresión entre el cerro Nocarani al este y las espcarpas del jurásico “Grupo de Yura” al oeste. Además, han recorrido 50 km por el valle del Río Yura hacia la confluencia del río vitor. Con una extensión de 150

Capítulo 2. La Ignimbrita en la región de Arequipa

km² y un espesor de 10 a 50 m, se estima un volumen preservado de 1,5 km³. Algunas muestras datan de $1,03 \pm 0,09$ Ma en (⁴⁰Ar/³⁹Ar).

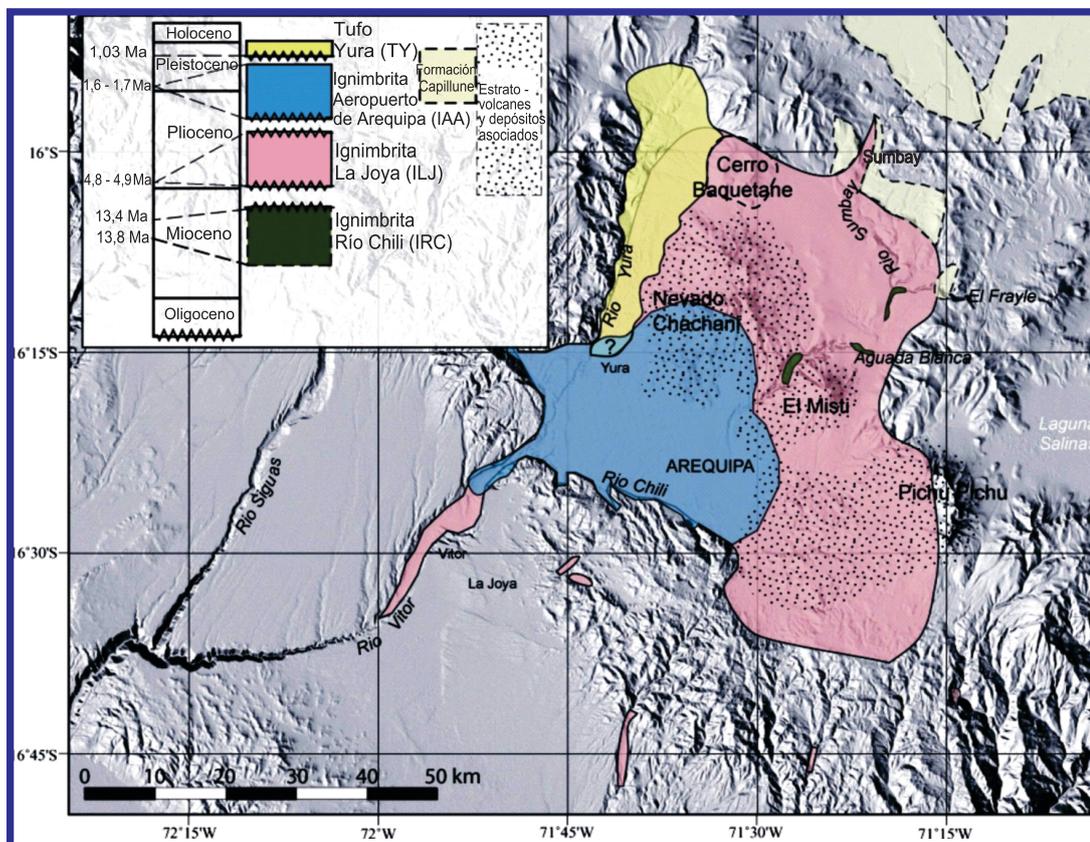


Figura 2.1. Límites aproximados de los cuatro tipos de ignimbrita, imagen tomada por modelo de elevación digital, DEM (de los términos en inglés *digital elevation model*) basada en mapas digitalizados e interferometría *radio detection and ranging* (RADAR) [1].

2.4. Composición

En la tabla 2.1 se presenta la composición química que se determinó mediante las técnicas de espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado por inducción (ICP-OES), fotometría de flama y gravimetría, para una muestra de ignimbrita blanco y rosa. De los resultados de la tabla 2.1 la investigación del artículo concluyó, que por ICP-OES y la espectrometría de emisión de llama (% en peso) indica que el Fe_2O_3 para la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa unidad blanca es 1,41 %, y para la unidad rosada es 1,60 %. El óxido más abundante presente en ambas muestras es SiO_2 (73 % en peso). El contenido de sílice y la cantidad de óxidos alcalinos ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) indica que las muestras podrían fundirse a temperaturas entre 950 °C y 1200 °C.

Tabla 2.1. Composición química en porcentaje de peso para la IAA unidad blanca y rosada. Datos tomados de [19].

Componentes	IAA unidad blanca	IAA unidad rosada	Técnicas
Al_2O_3	13,7	12,4	ICP-OES
CaO	0,74	11,15	ICP-OES
Fe_2O_3	1,41	1,60	ICP-OES
MgO	0,24	0,30	ICP-OES
SiO_2	73,9	72,6	ICP-OES
TiO_2	0,19	0,09	ICP-OES
Na_2O	3,52	4,15	Fotometría de flama
K_2O	4,45	3,80	Fotometría de flama
WL. (1000 °C)	1,02	3,20	Gravimetría

WL: *Weight loss* o peso perdido

2.5. Usos y aplicaciones

La UB-IAA se ha usado desde hace mucho tiempo. Desde épocas prehispánicas y durante la colonia su explotación en las canteras fue una actividad muy importante en los procesos de construcción.

Se ha usado para la construcción de iglesias, basílicas, monasterios, viviendas, puentes, etc.

Algunos ejemplos en el que se ha hecho uso de esta roca volcánica en Arequipa [2]:

- Basílica Catedral de Arequipa
- Iglesia y Convento de Santa Catalina
- Monasterio de Santa Rosa
- Iglesia de Santa Martha
- Iglesia y Convento de Santo Domingo
- Iglesia y Claustro de San Agustín
- Iglesia y Convento de la Merced
- Casa de Iriberry
- Casa del Moral
- Casa Tristán del Pozo
- Los Portales de la Plaza Mayor
- Mercado de San Camilo
- Teatro Municipal
- Puente Grau
- Puente Bolognesi.

Capítulo 2. La Ignimbrita en la región de Arequipa

A continuación se muestran imágenes de algunas construcciones en Arequipa.

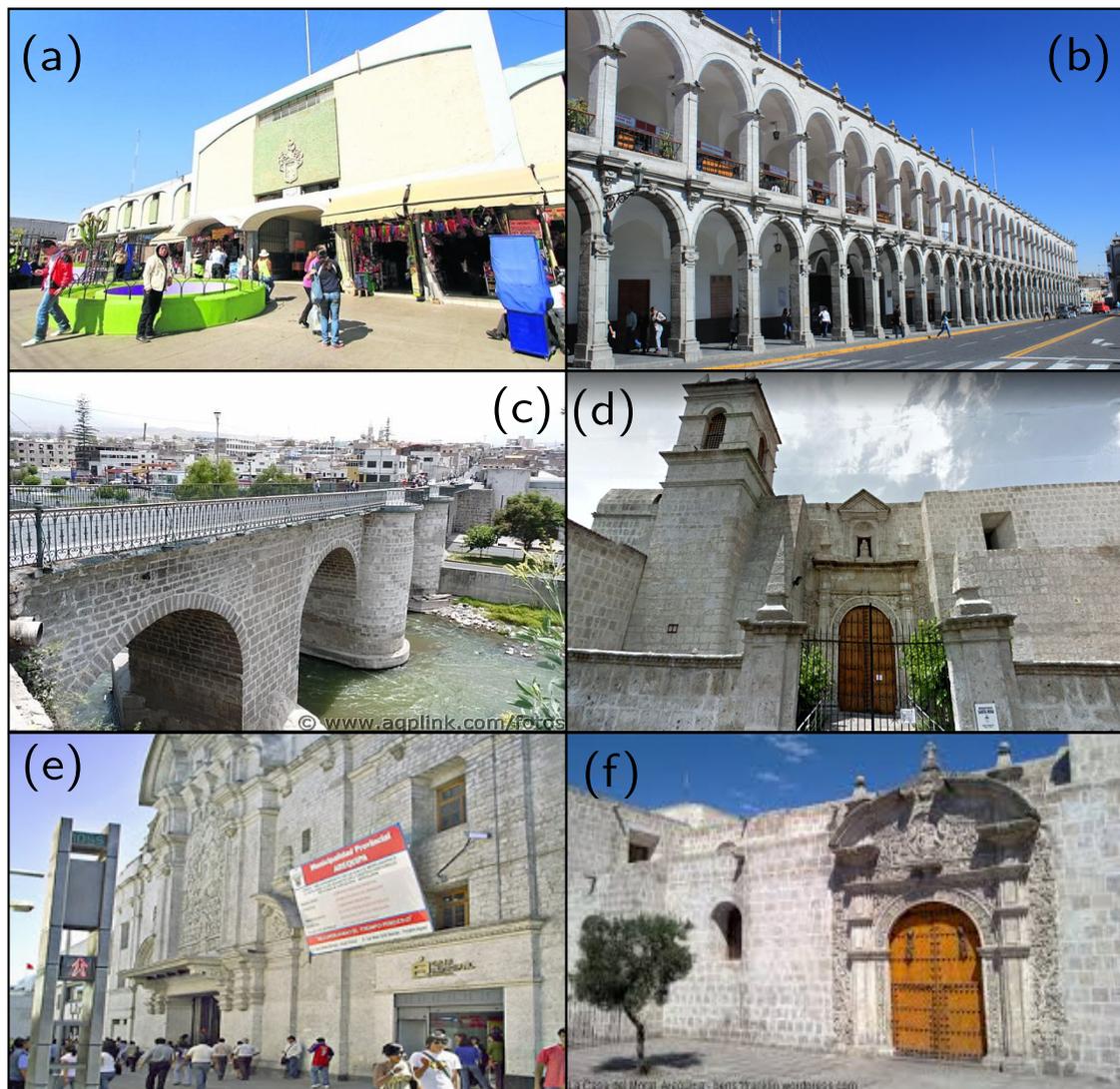


Figura 2.2. Imágenes de algunas construcciones en Arequipa a base de sillar: (a) Mercado de San Camilo [20], (b) Los Portales de la Plaza Mayor [21], (c) Puente Bolognesi [22], (d) Monasterio de Santa Rosa [23], (e) Teatro Municipal [24] y (f) Casa el Moral [25].

Capítulo 2. La Ignimbrita en la región de Arequipa

Tabla 2.2. Características adicionales de las ignimbritas de Arequipa. Datos tomados de [1].

Ignimbritas de Arequipa		Litofacias y componentes de toba vitrea	Conjuntos minerales
IRC		Cristalino (abundante) Tuba-lapilli masiva pfv < 65 % cl > 30 % faa < 5 %	Plagioclasa > anfíbol > biotita > sanidina > cuarzo > ox. Fe-Ti. Desvitrificación de sílice Fases: Cristobalita y tridimita
ILJ		Tuba - Lapilli masiva, unión de columna pfv > 65 % cl > 20 % faa < 15 %	Plagioclasa > sanidina > cuarzo > biotita > ox. Fe-Ti > anfíbol. Desvitrificación de sílice Fases: Cristobalita y tridimita.
IAA	Unidad blanca	Tuba-lapilli masiva, unión de columna pfv > 65 % cl > 20 % faa < 15 %	Plagioclasa > biotita > ox. Fe-Ti > cuarzo > sanidina. Sílice en fase vapor: Cristobalita
	Unidad rosada	Lítico (abundante) Tuba-lapilli masiva pfv > 60 % cl > 15 % faa < 25 % Alto contenido en fragmentos accidentales de lava parda.	Plagioclasa > biotita > ox. Fe-Ti > cuarzo > sanidina >> anfíbol.
TY		Flujos estratificados de ceniza y piedra pómez. pfv > 80 % cl > 15 % faa < 5 %	Plagioclasa > sanidina > cuarzo > biotita > ox. Fe-Ti

→ "UB-IAA"

Donde:

pfv: Pómez y fragmentos de vidrio.

cl: Cristales libres.

faa: Fragmentos accidentales y accesorios.

Capítulo 3

Propiedades térmicas de los materiales

En este capítulo se presenta información correspondiente de algunas propiedades térmicas de los materiales.

- **Conductividad térmica, λ .** Es una medida de la capacidad para conducir el calor de un material. La conductividad térmica puede ser expresada a partir de la ley de Fourier de la conducción del calor, donde la razón de conducción del calor \dot{Q} en (W) esta expresada con la siguiente ecuación en estado estacionario que es una expresión simplificada que toma una dimensión [26].

$$\dot{Q} = \lambda A \left(\frac{\Delta T}{\Delta X} \right) \quad (3.1)$$

Donde, λ es la conductividad térmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), A área de transferencia de calor, que es normal o perpendicular a dicha dirección de transferencia (m^2) y el gradiente de temperatura $\left(\frac{\Delta T}{\Delta X} \right)$ en ($\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$).

Despejando la conductividad térmica se puede expresar de la siguiente manera.

$$\lambda = \frac{\left(\frac{\Delta \dot{Q}}{\Delta A} \right)}{\left(\frac{\Delta T}{\Delta X} \right)} \quad (3.2)$$

Podemos definir según esta ecuación a la conductividad térmica de un material como la razón de transferencia de calor a través de una unidad de área, debido a una gradiente de temperatura.

Donde, $q = \frac{\dot{Q}}{A}$ flujo de calor en ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) y el gradiente de temperatura $\left(\frac{\Delta T}{\Delta X} \right)$ en ($\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$).

- **Densidad, ρ :** Define el cociente entre la masa que caracteriza el material y el volumen unitario ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

- **Calor específico, c_p** : Representa la capacidad de almacenamiento de calor de un material por unidad de masa [26]. Se puede interpretar a partir de sus unidades como la cantidad de calor necesaria para aumentar un grado la temperatura de una unidad de masa ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).
- **Capacidad calorífica, ρc_p** : Representa la capacidad de almacenamiento de calor de un material por unidad de volumen [26]. Se puede interpretar a partir de sus unidades como la cantidad de calor necesaria para aumentar un grado la temperatura de una unidad de volumen ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$).
- **Difusividad térmica, α** : Representa cuán rápido se difunde el calor por el material [26]. Es decir, la capacidad de un material para transmitir una variación de temperatura ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), se asocia con la velocidad de propagación de calor en la superficie del material en condiciones no estacionarios (transitorias) y se define como.:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (3.3)$$

Se puede interpretar como la razón entre el calor conducido y el calor almacenado por unidad de volumen.

- **Efusividad térmica, β** : Representa la capacidad del material para absorber o restituir un flujo de calor o potencial térmico ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$). Se representa de la siguiente manera:

$$\beta = (\lambda c_p)^2 \quad (3.4)$$

Termopares

Los termopares son sensores empleados para medir la temperatura debido a un efecto termoeléctrico. Representado por un circuito que esta formado por la unión de dos metales o aleaciones distintos y en la unión existe una diferencia de temperatura que origina una fuerza electromotriz [27].

Efecto Seebeck

Es el principio de funcionamiento de los sensores termoeléctricos cuando al generarse una diferencia de un potencial eléctrico entre dos puntos distintos de un conductor eléctrico que se encuentra de manera simultánea a diferentes temperaturas. En los termopares, el efecto Seebeck se manifiesta por la aparición de una corriente eléctrica que solo depende de la diferencia de temperaturas entre las uniones [27].

En la figura 3.1, (a) se puede apreciar el esquema de un circuito termopar con un V_{ref} que se produce por el aporte de las salidas del multímetro o dispositivo de medida que forma dos termopares. Generalmente se ubican estos dos termopares dentro de un recipiente a

una temperatura de 0 °C (juntura fría) o a una temperatura conocida, (b) Se aprecia otra configuración, lo que permite tener un solo termopar para la referencia y (c) esquema de una termopila y la relación polinomial de la temperatura y la diferencia de potencial eléctrico.

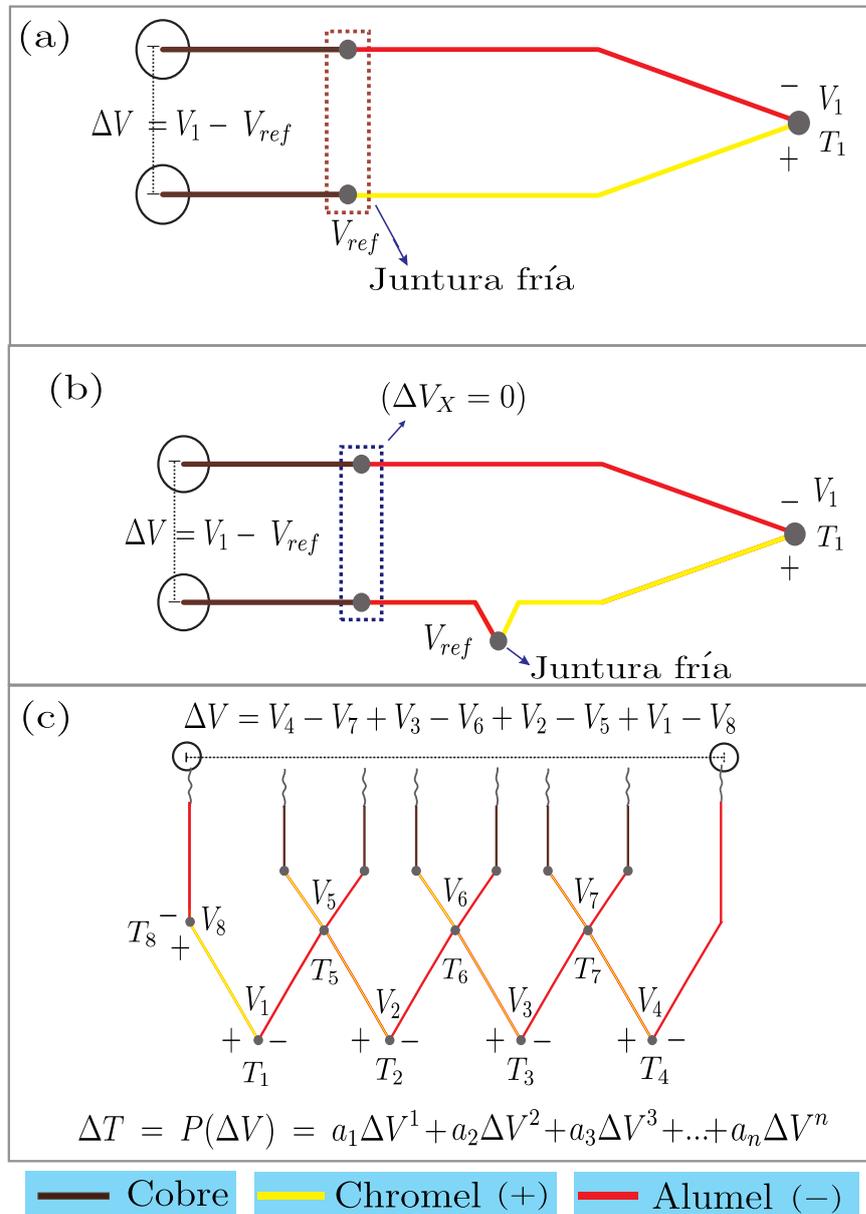


Figura 3.1. Representación esquemática de los termopares: (a) se muestra la diferencia de potencia eléctrica producida por una diferencia de temperatura en el termopar, (b) otra configuración en un termopar y (c) ejemplo de una termopila.

Capítulo 4

Caracterización experimental de la Unidad Blanca de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (UB-IAA)

Se presenta la caracterización experimental de la UB-IAA correspondiente a sus propiedades térmicas de conductividad y difusividad. Además, la composición y estructura con los métodos de difracción de rayos X (método de polvo), Microscopía Electrónica de Barrido y espectroscopía de energía dispersada. Por último, sus propiedades mecánicas.

4.1. Conductividad térmica empleando el aparato de placa caliente con guarda basado en la norma ASTM C 177 y ASTM C 1043

Para determinar la conductividad térmica de materiales aislantes se ha empleado el aparato de placa caliente con guarda (APCG) al cual se le ha dado el nombre de LAMBDA-UNI. Este aparato se ha construido en la Facultad de Ciencias de la UNI y se encuentra ubicado en el Laboratorio de Ingeniería Física. LAMBDA-UNI nace como una propuesta de diseño y construcción presentado en los anexos de la tesis de pregrado de Mc Joshua Piñas Moya [28]. En esta tesis se ha dado continuación a dicha propuesta que ahora cuenta con un sistema de adquisición de datos y un interfaz gráfico.

Aparato de placa caliente con guarda (APCG)

El aparato de placa caliente con guarda (APCG) es una disposición de una placa caliente (tiene una zona o sección de medición y una protección primaria llamada guarda) colocado entre dos placas frías que generan un gradiente de temperatura sobre las dos muestras idénticas colocados entre las placas.

En el esquema de la figura 4.1, se puede apreciar el flujo de calor en el APCG al establecer una ΔT diferencia de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) entre la placa caliente y la fría inferior, lo mismo ocurre con la placa fría superior por ser simétrico. Se generan el q_e flujo de calor axial a la placa caliente ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), q_b flujo de calor del borde de la muestra ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) y el q_g flujo de calor entre la zona de medición y guarda ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Además, en el plato caliente, r_{ZM} radio en la zona de medición (m), r_{ZG} radio en la zona de guarda (m) y e espesor de la muestra (m).

La muestra se encuentra entre la placa caliente y las frías, en caso de que no cubra todo este espacio debe cubrir al menos todo el espacio de la sección de medición y en el espacio de la sección de guarda se puede colocar un material del mismo tipo que la muestra u otro material aislante térmico.

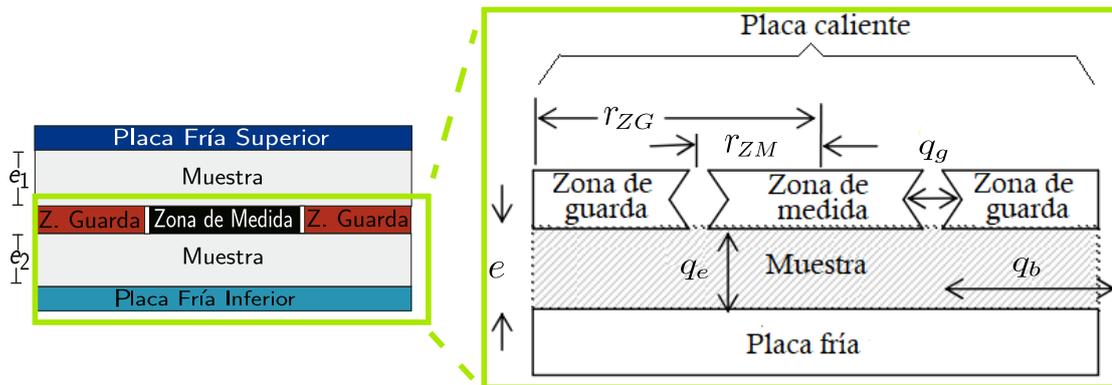


Figura 4.1. Esquema del aparato de placa caliente con guarda (APCG). Editado de [29].

Para el diseño y dimensionamiento del APCG, se estudió los efectos de borde y otras formas de pérdidas de calor, para acercarnos lo más posible a las condiciones ideales según las normas [ASTM C 177](#) y [ASTM C 1043](#).

Efecto de borde

La finalidad de este estudio permite evaluar el límite de error de cualquier APCG en función de sus parámetros geométricos, sus dimensiones y las características de las muestras [30]. En principio, q_i el calor proporcionado por el plato caliente ($W \cdot m^{-2}$) debe ser el mismo que q_e el calor que atraviesa la muestra hacia el plato frío ($W \cdot m^{-2}$), de este modo, tendríamos que no existen pérdidas de calor a los alrededores $q_b = 0$ ($W \cdot m^{-2}$); sin embargo, no ocurre así en los experimentos.

El efecto de borde E_b se expresa como:

$$E_b = \left(\frac{q_i - q_e}{q_i} \right) = \frac{q_b}{q_i} \quad (4.1)$$

E_b depende del diseño del aparato y de la diferencia de temperatura entre la zona de medición y la guarda. El efecto de borde se puede expresar como una ecuación paramétrica que permite diseñar o evaluar un instrumento dentro de ciertos límites de error. Los parámetros son e espesor de la muestra (m), r_{ZM} radio del área de medición (m), r_{ZG} radio de la guarda (m), h_{conv} coeficiente convectivo de transferencia de calor ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), λ_z y λ_r son las conductividades térmicas en las direcciones axial y radial respectivamente ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$).

$$E_b = E_b \left(X, \frac{e}{r_{ZM}}, \frac{r_{ZG}}{r_{ZM}}, \frac{h_{conv}}{\lambda_z}, \frac{\lambda_z}{\lambda_r} \right) \quad (4.2)$$

Donde, X es función de T_C temperatura del plato caliente ($^{\circ}C$), T_F temperatura del plato frío ($^{\circ}C$) y T_a temperatura ambiente ($^{\circ}C$).

$$X = \left(\frac{T_C + T_F - 2T_a}{T_C - T_F} \right) \quad (4.3)$$

De la referencia [29] la ecuación (4.1) se puede escribir como:

$$E_b = A + BX \quad (4.4)$$

Para determinar los errores A y B se hace uso de la figura 4.2, que muestran su dependencia en los parámetros e , r_{ZM} y r_{ZG} [29].

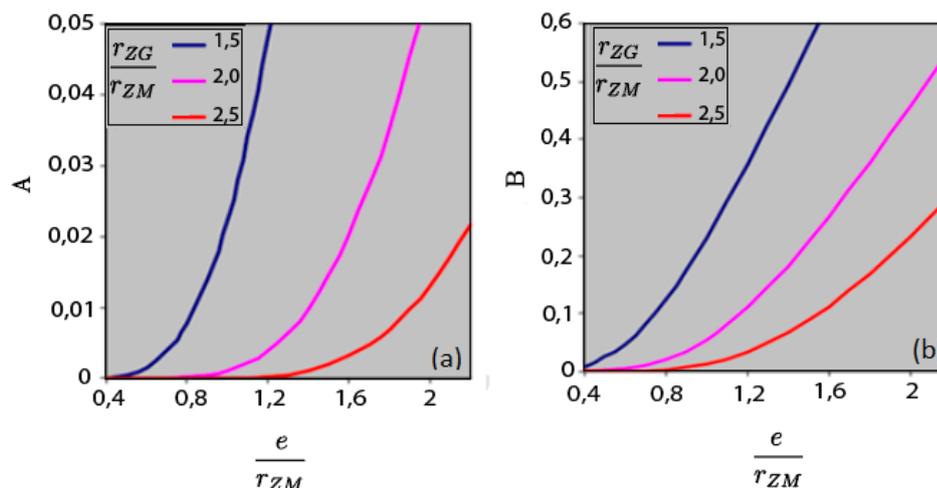


Figura 4.2. Muestra el error A y B como función del cociente entre el espesor y radio de la zona de medición $\left(\frac{e}{r_{ZM}}\right)$. Datos tomados de [29].

A continuación se presentan los resultados de las condiciones de trabajo para las temperaturas, la geometría de las placas, el espesor de la muestra y el efecto de borde para el equipo APCG-310 del Centro Nacional de Metrología (México) (CENAM).

Tabla 4.1. Condiciones de temperatura para el cálculo de dimensiones para el equipo del CENAM APCG-310: temperatura placa caliente (T_C) ($^{\circ}\text{C}$), temperatura placa fría (T_F) ($^{\circ}\text{C}$), temperatura en el interior de la cámara del APCG (T_a) ($^{\circ}\text{C}$) y la relación de las temperaturas X . Datos tomados de [28].

T_C ($^{\circ}\text{C}$)	T_F ($^{\circ}\text{C}$)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	X
34	14	22	0,2

Tabla 4.2. Resultados del efecto de borde para distintos valores de espesor (e), cociente entre el espesor y radio de la zona de medición $\left(\frac{e}{r_{ZM}}\right)$ y cociente espesor y radio de la zona de guarda $\left(\frac{e}{r_{ZG}}\right)$ para el equipo del CENAM APCG-310. Datos tomados de [28].

Condiciones	Espesor (mm)	Radios (mm)				X	Efecto de borde E_b			
		r_{ZM}	r_{ZG}	$\frac{e}{r_{ZM}}$	$\frac{e}{r_{ZG}}$		A	B	E_b	$\%E_b$
1	50	50	100	1	2	0,2	0,001428	0,058	0,013028	1,3028
2	50	75	125	0,666667	1,666667	0,2	0,00357	0,0916	0,02189	2,189
3	50	75	150	0,666667	2	0,2	0,000714	0,025	0,005714	0,5714
4	50	75	187,5	0,666667	2,5	0,2	0	0,00833	0,001666	0,1666
APCG - 310	47	75,8	152,4	0,62005	2,01055	0,2	0	0,00833	0,001666	0,1666

Capítulo 4. Caracterización experimental de la Unidad Blanca de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (UB-IAA)

Tabla 4.3. Algunas condiciones de trabajo para las temperaturas en el equipo LAMBDA-UNI: temperatura placa caliente (T_C) ($^{\circ}\text{C}$), temperatura placa fría (T_F) ($^{\circ}\text{C}$), temperatura en el interior de la cámara del APCG (T_a) ($^{\circ}\text{C}$) y la relación de las temperaturas X .

T_C ($^{\circ}\text{C}$)	T_F ($^{\circ}\text{C}$)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	X
35	15	23	0,2
35	0	20	-0,143
40	20	24	0,6
37	18	22	0,578
45	25	25	1

Al interpolar los resultados de las tablas 4.3, 4.2 con las condiciones de trabajo para LAMBDA-UNI, se obtiene los resultados del efecto de borde.

Tabla 4.4. [Resultados a partir de la interpolación de los valores de la tabla 4.2 y tabla 4.3 del efecto de borde X , con $r_{ZM} = 75$ mm, $r_{ZG} = 187,5$ mm y $e = 50$ mm para el equipo LAMBDA-UNI.

Espesor (mm)	Radios (mm)				X	Efecto de borde E_b			
	r_{ZM}	r_{ZG}	$\frac{e}{r_{ZM}}$	$\frac{e}{r_{ZG}}$		A	B	E_b	$\%E_b$
50	75	187,5	0,666667	2,5	0,2	0	0,00833	0,001666	0,1666
50	75	187,5	0,666667	2,5	-0,143	0	0,00833	0,001191	0,1191
50	75	187,5	0,666667	2,5	0,6	0	0,00833	0,004998	0,4998
50	75	187,5	0,666667	2,5	0,578	0	0,00833	0,004814	0,4814
50	75	187,5	0,666667	2,5	1	0	0,00833	0,00833	0,833

4.1.1. APCG: LAMBDA-UNI

Los componentes del equipo LAMBDA-UNI se describen a continuación.

Placas frías: Tienen un diámetro de 375 mm y un espesor de 5/16 in y son de duraluminio. A cada placa fría en una de sus caras se acopló un serpentín de cobre de 0,25 in de diámetro con un paso de 0,5 in, por donde se hará recircular el refrigerante.

Placa caliente: Está formada por un sistema tipo sandwich fijados con pernos *stove bolt* para dos placas zona de medida o central (de 150 mm de diámetro) y dos placas zona de guarda (concéntrica coplanar a la zona de medida con diámetro interno de 152 mm y diámetro externo de 375 mm) y son de duraluminio, el gap que separa a ambas zonas es de 1 mm, que se fijan con pernos de nylon, de tal manera que en la parte interna de la zona de medida y guarda se tienen canales o ranuras para calefactores y termopares.

Calefactores: Son resistencias eléctricas de nicrom de $7,8 \Omega$, y están aislados eléctricamente de las placas con anillos de asbesto de 8 mm de diámetro que encajan en las ranuras de la parte interna tanto para la zona de medida y guarda. En la referencia se determinó la ubicación del calefactor en función del radio en la zona de medición ($r_{ZM} = 150$ mm) de tal manera que se logra una temperatura superficial promedio. La ubicación del calefactor en la zona de medida es $r_{CZM} = \frac{r_{ZM}}{\sqrt{2}} = 106$ mm y para la zona de guarda $r_{CZG} = 1,29 \frac{r_{ZM}}{\sqrt{2}} = 193,5$ mm

Termopares: Se utilizaron termopares tipo T, compuesto de las uniones de (Cobre (+), Cobre+Níquel) también llamado constantán (-), por su rango de operación (-150 a 350) °C. Para medir la conductividad térmica de la UB-IAA con el equipo LAMBDA-UNI se utilizaron termopares tipo T. Se colocaron tres termopares en la zona de medida y guarda. Su ubicación se realizó de manera tal que en la zona de medición se colocó 8 termopares a lo largo del radio separadas 8,3 mm y otro termopar en la zona de guarda a 8,3 mm del gap y se interpoló la temperatura en el estado estacionario. Se realizó esta prueba para 6 direcciones radiales y se calculó el promedio de las interpolaciones para determinar el radio para los tres termopares, para el radio de los termopares en la zona de medición se obtuvo el valor de ($r_{TZM} = 28,7$ mm). De manera análoga para la zona de guarda pero con los termopares separados 1,2 mm, el valor del radio de los termopares en la zona de guarda zona fue ($r_{TZG} = 11,45$ mm).

Sistema de recirculación y refrigeración: Es un chiller modelo CHSE5L, con una capacidad de almacenamiento de 6 Litros, tipo de gas refrigerante R-134a y un rango de temperatura de [-15 a + 50] (°C) conectado a las entradas y salidas de los serpentines de cobre acoplados a las placas frías utilizando mangueras aisladas con *foam*.

Fuentes de alimentación: Se emplearon 2 fuentes de corriente continua con un rango de voltaje de 0 a 30 V y corriente eléctrica de 0 a 10 A, una para la suministrar corriente eléctrica a la resistencia de nicrom en la zona de medida y otra para la zona de guarda.

En la figura 4.3 se muestra el esquema del APCI LAMBDA-UNI construido en la Facultad de Ciencias de la UNI. Los números (1, 2 y 3) indican los termopares dispuestos en la zona de medición, (4, 5 y 6) termopares en la zona de guarda, (7, 8) Placas frías inferior y superior respectivamente. Además de las muestras idénticas, el aislante térmico, el serpentín de cobre acoplado a la placa fría, el chiller y las fuentes de voltaje y corriente continua.

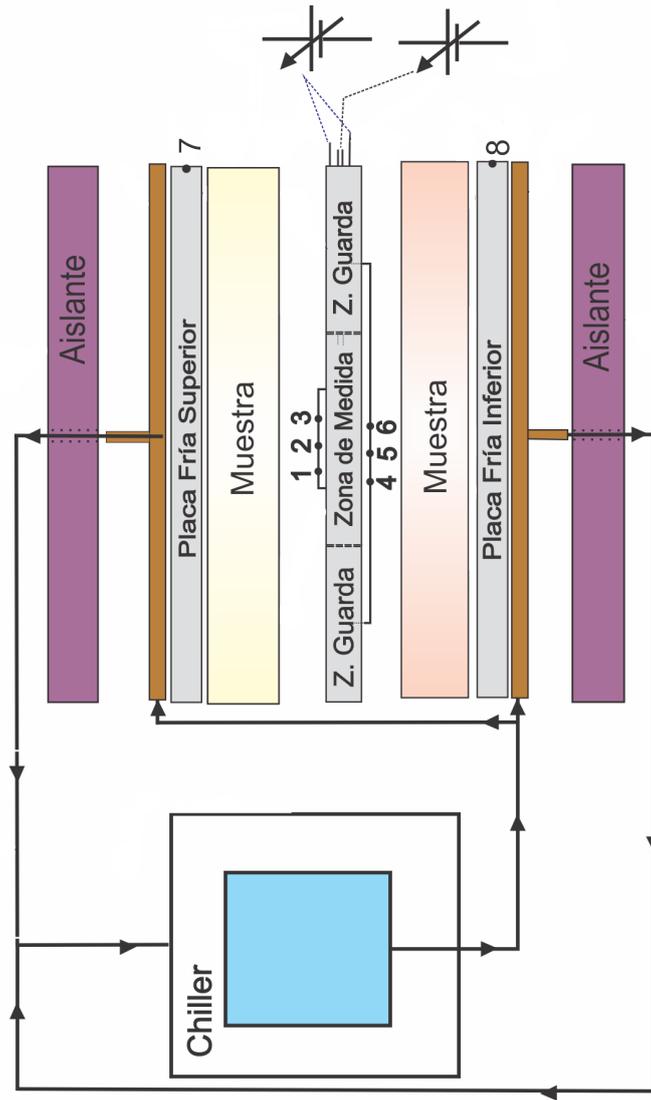


Figura 4.3. Esquema del equipo medidor de conductividad térmica, los números indican la ubicación de los termopares, los cuales fueron colocados en (1, 2 y 3) zona de medición, (4, 5 y 6) zona de guarda y (7, 8) placas frías.

En la figura 4.4, se muestra el esquema con vista frontal de la placa fría acoplado con el espiral de cobre, por donde circula el refrigerante que se encuentra en el chiller, de esta manera con la unidad de control del chiller se puede mantener la placa fría a temperaturas en el rango de -15 a 50 °C.

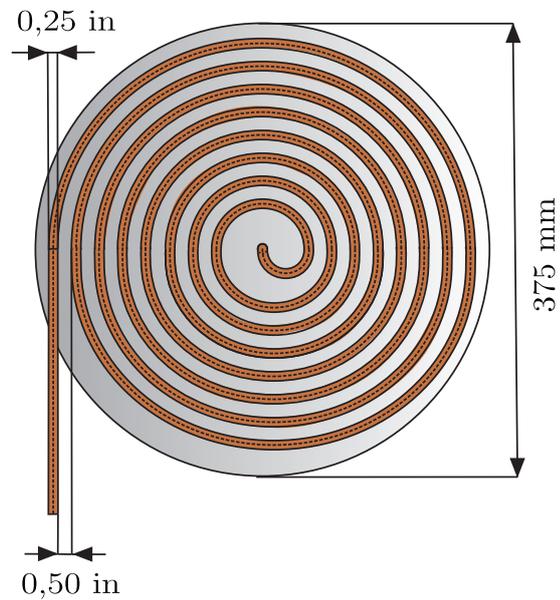


Figura 4.4. Espiral de cobre adosado a la placa fría.

Capítulo 4. Caracterización experimental de la Unidad Blanca de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (UB-IAA)

La figura 4.5 muestra la ubicación de los termopares en la zona de medición y guarda, para encontrar la ubicación de los termopares en la zona de medición se colocaron 8 termopares con una separación entre sí de 8,3 mm en las 6 direcciones, y un termopar en la zona de guarda con una separación 8,3 mm del radio interior, suministrando corriente eléctrica a ambas zonas hasta establecer (el estado permanente térmico o estacionario), es decir, las temperaturas se mantienen invariantes, de tal manera que la temperatura promedio en la zona de medición difiere de $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a la temperatura de la zona de guarda, se interpoló los valores de temperatura y el valor de la ubicación de sus radios de tal manera que se encuentra el radio que corresponde a la temperatura promedio en la zona de medición. De manera análoga para la zona de guarda, la separación de la ubicación de los termopares en la zona de guarda es 12,0 mm a partir de su radio interior, y la ubicación del termopar en la zona de medición es de 12,0 mm menos del radio de esta zona, para el valor del radio que corresponde a la temperatura promedio se obtuvo 14,5 cm.

- Zona de medición
- Zona guarda
- Promedio en la zona de medición (radio: 2,87 cm)
- Promedio en la zona de guarda (radio: 11,45 cm)

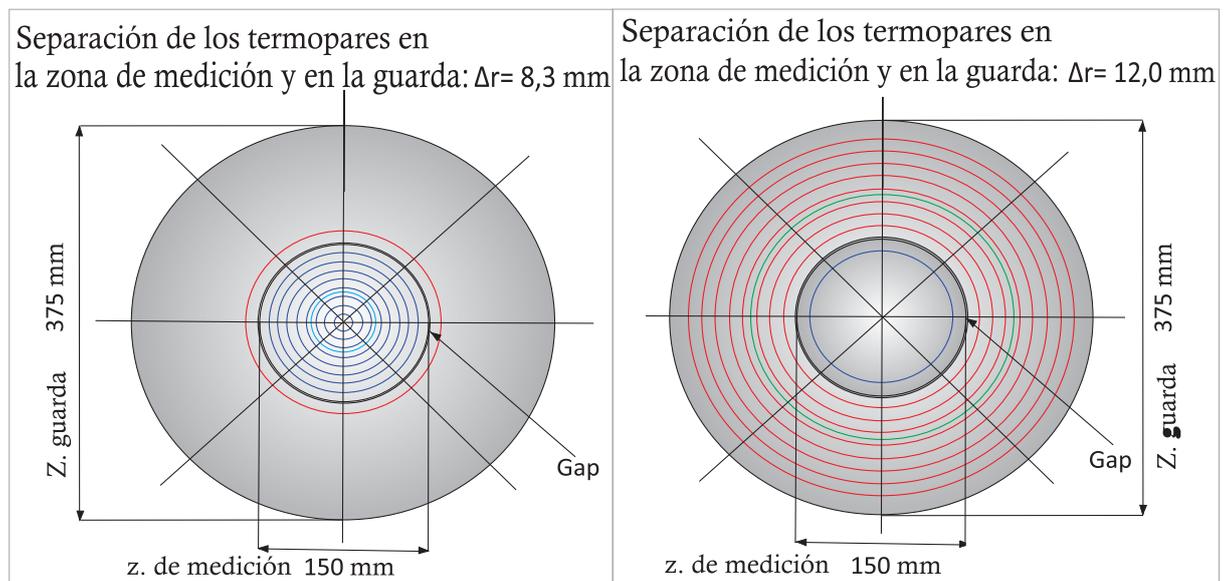


Figura 4.5. Ubicación de los termopares donde se determinó el valor promedio aproximado de la temperatura en la zona de medición y guarda en el estado permanente térmico (estacionario).

Las figuras 4.6 y 4.7 muestran las dimensiones de las placas frías y caliente.

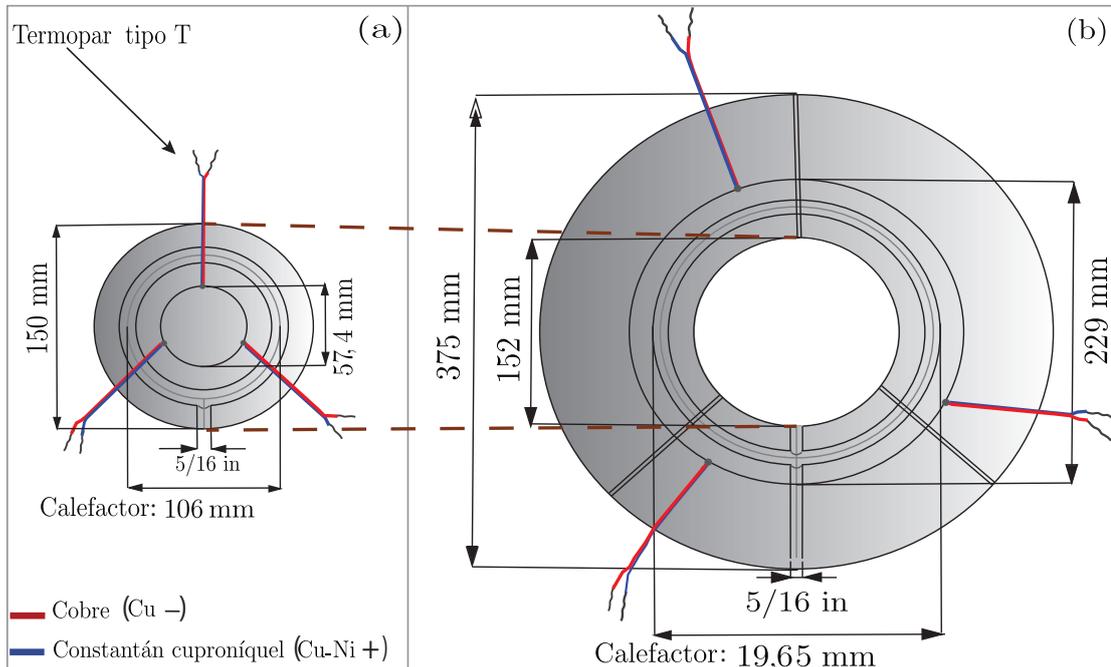


Figura 4.6. Esquema de la placa caliente vista frontal: (a) zona de medición que presenta ranuras de 5/16 in para el calefactor y la ranura circular donde se encuentran los termopares y (b) zona de guarda que presenta ranuras de 5/16 in para el calefactor y la ranura circular donde se encuentran los termopares.

A continuación se muestra el esquema ensamblado del equipo medidor de conductividad térmica: LAMBDA-UNI.

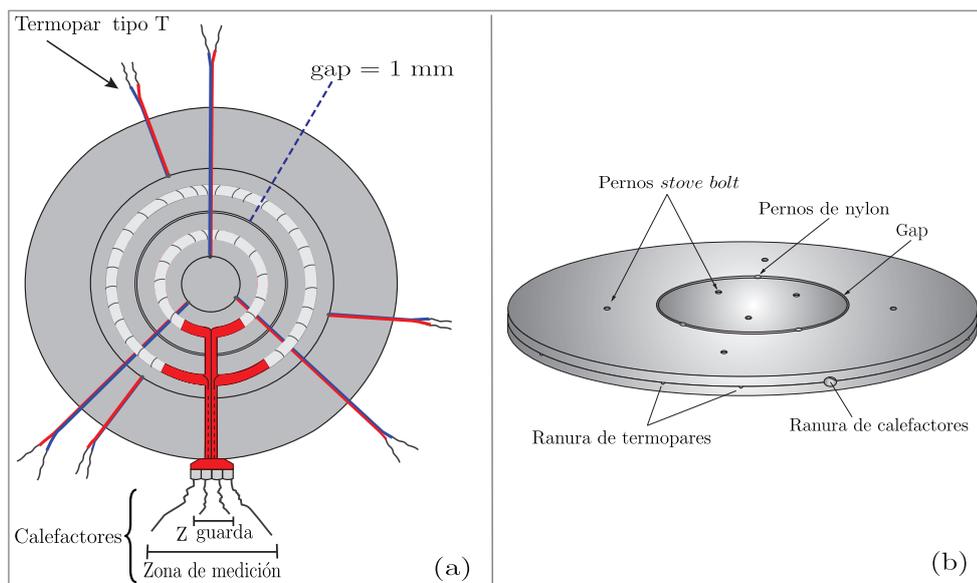


Figura 4.7. (a) Placa caliente con los calefactores y termopares y (b) placa caliente tipo sandwich.

Se muestra la vista explosionada de la disposición de las placas caliente, frías con el espiral de cobre, las muestras y el aislante.

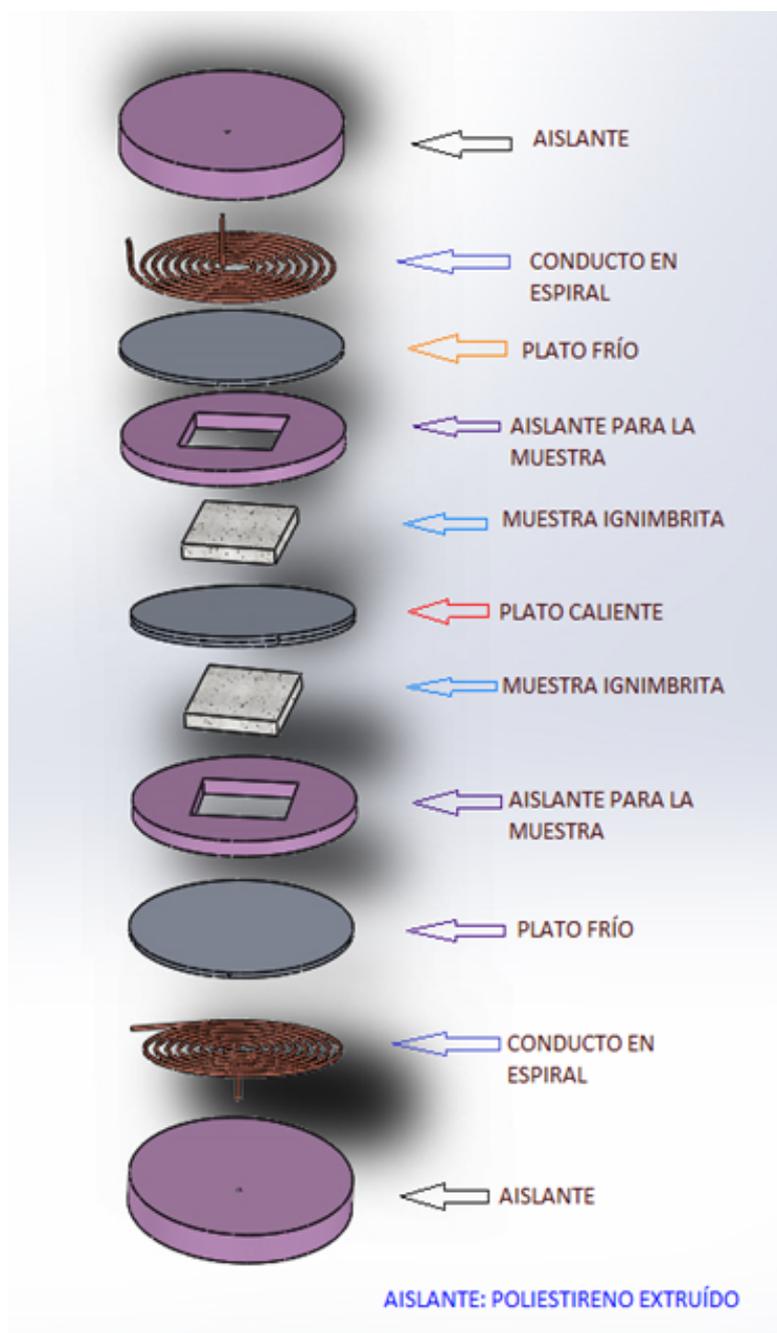


Figura 4.8. Esquema de una vista explosionada se la disposición de los platos caliente, fríos y espiral de cobre, las muestras, y el aislante térmico (poliestireno extruído).

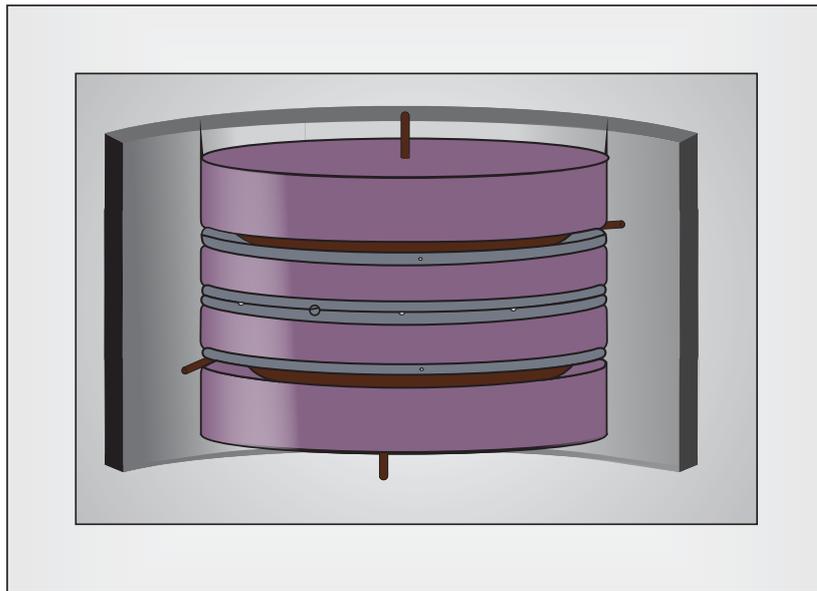


Figura 4.9. Esquema del equipo ensamblado adicionando una envolvente de aislante térmico como protección secundaria en una cámara de poliestireno expandido.

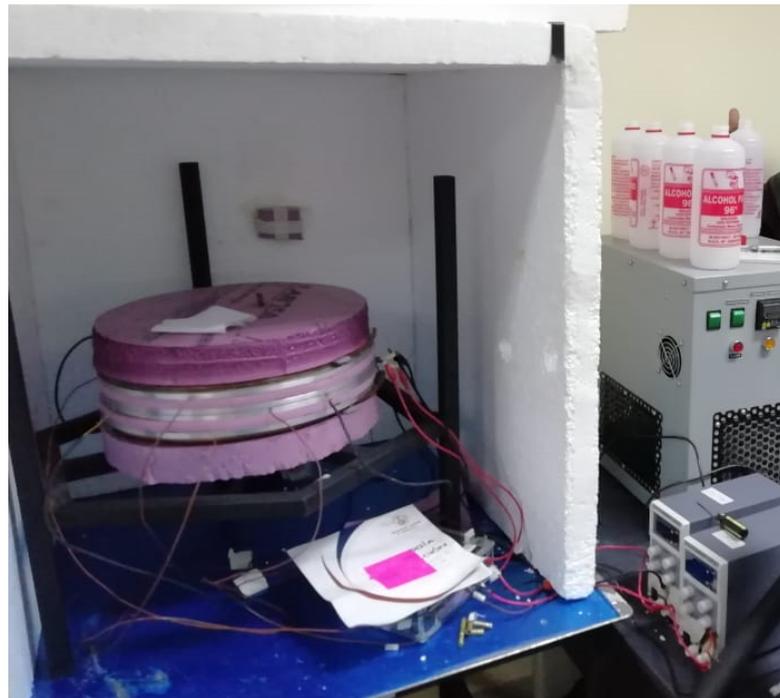


Figura 4.10. APCI: LAMBDA-UNI.

Cálculo de conductividad térmica

De la Ley de Fourier (estado estacionario) para el equipo LAMBDA-UNI.

$$\lambda = \frac{\left(\frac{\dot{Q}}{A}\right)}{\left(\frac{\Delta T}{\Delta X}\right)} \quad (4.5)$$

Donde \dot{Q} es la transferencia de calor, ΔX espesor promedio de las 2 muestras, A área de la zona de medición y ΔT diferencia del promedio de temperaturas entre la placa caliente en la zona de medición y placas frías.

El valor de la transferencia de calor está dado por la potencia eléctrica suministrada de la fuente en la zona de medición (P_{ZM}), teniendo en cuenta que el flujo de calor se da hacia ambas muestras, se toma la mitad de la potencia eléctrica que es el producto de la corriente eléctrica (I_{ZM}) y el voltaje suministrado al nicrom en la zona de medición (V_{ZM}).

$$\dot{Q} = \frac{P_{ZM}}{2} = \frac{I_{ZM}V_{ZM}}{2} \quad (4.6)$$

El área de transferencia 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.

$$A = A_{ZM} + \frac{A_g}{2} \quad (4.7)$$

El espesor está dado por el promedio de los espesores de las dos muestras idénticas e_{prom} .

$$\Delta X = e_{prom} = \frac{e_1 + e_2}{2} \quad (4.8)$$

La diferencia de la temperatura en la medición esta dado por,

$$\Delta T = \frac{(T_{ZM} - T_{Finf}) + (T_{ZM} - T_{Fsup})}{2} \quad (4.9)$$

Donde, T_{ZM} es la temperatura en la zona de medición (°C), T_{Finf} temperatura fría inferior (°C) y T_{Fsup} temperatura fría superior (°C).

Análisis de la incertidumbre

Si se tiene el mesurando y representado de la siguiente manera,

$$y = f(\hat{x}_1; \hat{x}_2; \dots; \hat{x}_N) \quad (4.10)$$

con $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_N$ magnitudes de entrada.

La incertidumbre combinada u_{y_c} de la ley de propagación de la incertidumbre en forma de sumatoria esta dada por.

$$u_{y_c}^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial \hat{x}_i} \right]^2 u_{\hat{x}_i}^2 \quad (4.11)$$

Si f esta dado por productos o divisiones con potencias, como se presenta a continuación.

$$y = cte \hat{x}_1^{p_1} \hat{x}_2^{p_2} \dots \hat{x}_N^{p_N} \quad (4.12)$$

con cte una constante y las p_i son las potencias (constantes) a las que se eleva cada \hat{x}_i entonces:

$$\left[\frac{u_{y_c}}{y} \right]^2 = \left[p_1 \underbrace{\frac{u_{\hat{x}_1}}{\hat{x}_1}}_{u_{relativa}} \right]^2 + \left[p_2 \underbrace{\frac{u_{\hat{x}_2}}{\hat{x}_2}}_{u_{relativa}} \right]^2 + \dots + \left[p_N \underbrace{\frac{u_{\hat{x}_N}}{\hat{x}_N}}_{u_{relativa}} \right]^2 \quad (4.13)$$

Cada incertidumbre relativa considera lo siguiente.

$$u_{relativa} = \frac{u_{total}}{Valor\ experimental} \quad (4.14)$$

Donde,

$$u_{total} = \sqrt{(u_{tipo\ A})^2 + (u_{tipo\ B})^2} \quad (4.15)$$

$u_{tipo\ A}$ es la incertidumbre tipo A que evalúa la incertidumbre a través de un análisis estadístico de una serie de observaciones (desviación estándar σ_x , de una cantidad N de datos) y $u_{tipo\ B}$ incertidumbre tipo B que evalúa la incertidumbre a través de medios diferentes al análisis estadístico de una serie de observaciones, algunos son debido a la resolución ($u_{resolución}$) lectura mínima de un instrumento, exactitud ($u_{exactitud}$) es el error máximo permitido EMP del instrumento, tomados en las especificaciones de las hojas técnicas de los instrumentos de medición, otras contribuciones se deben a los certificados de calibración, pero estos no se tendrán en cuenta en los cálculos realizados en la presente tesis.

$$u_{tipo\ A} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} \quad (4.16)$$

Capítulo 4. Caracterización experimental de la Unidad Blanca de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (UB-IAA)

$$u_{\text{tipo B}} = u_{\text{resolución}} + u_{\text{exactitud}} \quad (4.17)$$

Donde,

$$u_{\text{resolución}} = \frac{\text{resolución}}{2\sqrt{3}} \quad (4.18)$$

$$u_{\text{exactitud}} = \frac{EMP}{\sqrt{3}} \quad (4.19)$$

Una característica o requisito en la industria es que la medida de incertidumbre se defina en un intervalo alrededor del resultado de medición que se espera abarque una fracción suficientemente grande de la distribución de valores que se puede atribuir razonablemente al mensurando (un intervalo con un nivel de confianza suficientemente alto o probabilidad de cobertura p_0). La incertidumbre expandida del mesurando cumple con estos requisitos y es denotada como.

$$u_{y_e} = k_0 u_{y_c} \quad (4.20)$$

El valor del factor de cobertura (k_0) depende del valor que se escoge para la probabilidad de cobertura (p_0). Cuando la distribución de u_{y_c} es casi normal y que prácticamente no se puede distinguir entre intervalos que difieren en 1 % o 2 % en el valor de p_0 . Bajo estas circunstancias se puede asumir que con $k_0 = 2$ se tiene un nivel de confianza $p_0 = 95\%$ y que con $k_0 = 3$ se tiene un nivel de confianza aproximadamente de $p_0 = 99\%$. El resultado de la medición se expresa como:

$$y = y \pm u_{y_e} \quad (4.21)$$

A partir de la ley de propagación de la incertidumbre aplicado a la ecuación de la ley de Fourier de conducción de calor se tiene,

$$u_{\lambda} = \lambda \sqrt{\left[\frac{u_{\dot{Q}}}{\dot{Q}}\right]^2 + \left[\frac{u_e}{e}\right]^2 + \left[\frac{u_A}{A}\right]^2 + \left[\frac{u_{\Delta T}}{\Delta T}\right]^2} \quad (4.22)$$

Donde u_{λ} es la incertidumbre combinada de la de la conductividad térmica, $u_{\dot{Q}}$ incertidumbre del flujo de calor, u_e incertidumbre del espesor, u_A incertidumbre del área de medición y $u_{\Delta T}$ incertidumbre de la diferencia de temperatura entre la placa caliente y la placa fría.

La razón de conducción de calor \dot{Q} dado por la potencia eléctrica suministrados por la fuente de corriente eléctrica continua está relacionado con el voltaje V_{ZM} y con la intensidad de corriente I_{ZM} , según la ecuación 4.6. Por ende, La incertidumbre de la potencia o calor transmitido $u_{\dot{Q}}$

está dado por.

$$\frac{u_{\dot{Q}}}{\dot{Q}} = \sqrt{\left[\frac{u_{V_{ZM}}}{V_{ZM}}\right]^2 + \left[\frac{u_{I_{ZM}}}{I_{ZM}}\right]^2} \quad (4.23)$$

Donde $u_{V_{ZM}}$ y $u_{I_{ZM}}$ es la incertidumbre del voltaje y corriente suministrado por el equipo en la zona de medición respectivamente.

4.1.2. Procedimiento para realizar el ensayo

Para realizar el ensayo se debe tener en cuenta los siguientes procedimientos.

- Preparación de la muestra
- Establecer el estado permanente térmico (estacionario).
- Adquisición de los datos
- Análisis de los resultados

A continuación se tiene la descripción del procedimiento.

Preparación de la muestra

La muestra se debe seleccionar a partir de las siguientes condiciones.

- Diámetro: Debe cubrir el área de la placa caliente que tiene un diámetro de 37,5 cm o por lo menos el área de la zona de medición que tiene un diámetro de 15,0 cm.
- Espesor: La norma ASTM C 177 menciona que el espesor máximo recomendado de la muestra es 1/3 de la dimensión lineal máxima de la sección de medida. Del análisis del efecto de borde se ha considerado 5,0 cm
- planicidad y paralelismo: Se debe preparar la muestra de tal manera que deben ser planas y paralelas, para asegurar el contacto térmico con las placas.

La muestra debe secarse en el horno a una temperatura de [80-100]°C por 24 horas, debido a que una muestra húmeda afectará el cálculo de la conductividad térmica. Se recomienda envolver a la muestra en una capa delgada de papel *philips* para proteger a la muestra de la humedad durante el ensayo. Se debe registrar el porcentaje en peso de la muestra antes y después del ensayo, espesor y demás dimensiones. se cubre los extremos libres de la muestra con un material similar o un aislante térmico (guarda de material aislante).

Establecer el estado permanente térmico (Estacionario)

Después de colocar las muestras en la zona de medición entre la placa caliente y las placas frías, el material entre la sección de guarda y las placas frías (un material similar o un aislante) y el aislante necesario para poder minimizar los efectos producidos por las condiciones ambientales. Se debe poner el aparato en funcionamiento y ajustar la potencia eléctrica a cada fuente que suministrara de corriente eléctrica continua a las resistencias de nicrom ubicadas en la zona de medición y otra en la guarda. Se recomienda inicialmente ajustar la potencia eléctrica a suministrada a valores tales que calienten rápido la zona de medición y la guarda, luego disminuir a valores con los cuales la placa caliente tiende a a la temperatura deseada (esta parte es un ensayo de prueba y error para posteriormente poder alcanzar el estado térmico permanente en menor tiempo).

Adquisición de datos

Los datos registrados, sensores y tarjeta programable y el diagrama de flujo para nuestra *Data Acquisition* o del español tarjeta de adquisición de datos (DAQ) se presentan a continuación.

Tabla 4.5. Parámetros requeridos para la adquisición de datos en el equipo LAMBDA-UNI.

Parámetros	
Símbolo	Descripción
$T_{ZM_{PROM}}$	Temperatura promedio en la zona de medición (Promedio de los 3 termopares en la zona de medición) °C
$T_{ZG_{PROM}}$	Temperatura promedio en la zona de guarda (Promedio de los 3 termopares en la zona de guarda) °C
$T_{F_{inf}}$	Temperatura placa fría inferior °C
$T_{F_{sup}}$	Temperatura placa fría superior °C
V_{ZM}	Voltaje suministrado en la zona de medición V
I_{ZM}	Corriente eléctrica suministrada en la zona de medición A
P_{ZM}	Potencia eléctrica suministrada en la zona de medición W
V_{ZG}	voltaje suministrado en la zona de guarda V
I_{ZG}	Corriente eléctrica suministrada en la zona de guarda A
P_{ZG}	Potencia eléctrica suministrada en la zona de guarda W
T_a	Temperatura en la cámara °C
HR	Humedad relativa %
A	Área de transferencia m ²
e_{prom}	Espesor promedio de las muestras idénticas a ensayar m

Tabla 4.6. Sensores empleados para la adquisición de datos.

#	Sensores	Descripción
8	MAX 31856	<p>Mide la señal de un termopar del tipo (J,K,R,S,T,N,E y B) Rango: [-210 a +1800] °C (depende del termopar) Resolución: 0,0078125 °C. Exactitud: 0,15 % [-20a +80] °C</p> <p>Los termopares usualmente tienen una exactitud de ± 2 °C, ± 6 °C o más dependiendo del tipo de termopar, así la resolución es mucho menor que la exactitud</p> <p>Rango junta fría: [-20 a +80] °C. Exactitud: 0,7 °C</p> <p>Protocolo de comunicación <i>Serial Peripheral Interface</i> (SPI)</p>
2	INA 219B	<p>Mide energía. Voltaje Rango: 0 a 26 V. Resolución: 6,34 mV. Exactitud: 0,5 %</p> <p>Corriente eléctrica (Rango ajustable) Rango: -3,2 a 3,2 A, resolución: 0,8mA Rango: -0,4 a 0,4 A, resolución: 0,1 mA</p> <p>Exactitud: 0,5 %</p> <p>Resistencia <i>shunt</i>: 0,1 Ω. Exactitud: 1 %</p> <p>Protocolo de comunicación <i>Inter Integrated Circuits</i> (I2C)</p>
1	DHT 22	<p>Temperatura: Rango: [-40 a +80] °C. Exactitud 0,5</p> <p>Humedad: Rango: 0 a 100 %. Exactitud: 2 %</p> <p>Aparte de alimentación ground o tierra (GND) y 5 V se emplea 1 pin digital para la lectura de datos</p>

Tarjeta Arduino Mega

Es una tarjeta programable de código abierto que emplea el microcontrolador Atmega 2560. Se utilizó esta tarjeta debido a que se tenía disponible en el laboratorio. Buses de comunicación a nivel *Transistor Transistor Logic* (TTL) como: *Serial Peripheral Interface* (SPI), *Inter Integrated Circuits* (I2C), *Pulse Width Modulation* (PWM), Serial. Tiene 16 pines analógicos, 54 pines digitales de entrada y salida con 15 salidas PWM, 4 puertos seriales, 256 KB de memoria flash, voltaje de operación con 5 V y voltaje de entrada de [7 a 12] V. Se diseñó un *shield* para la tarjeta Arduino Mega y los sensores, el esquemático se muestra en la figura 4.11.

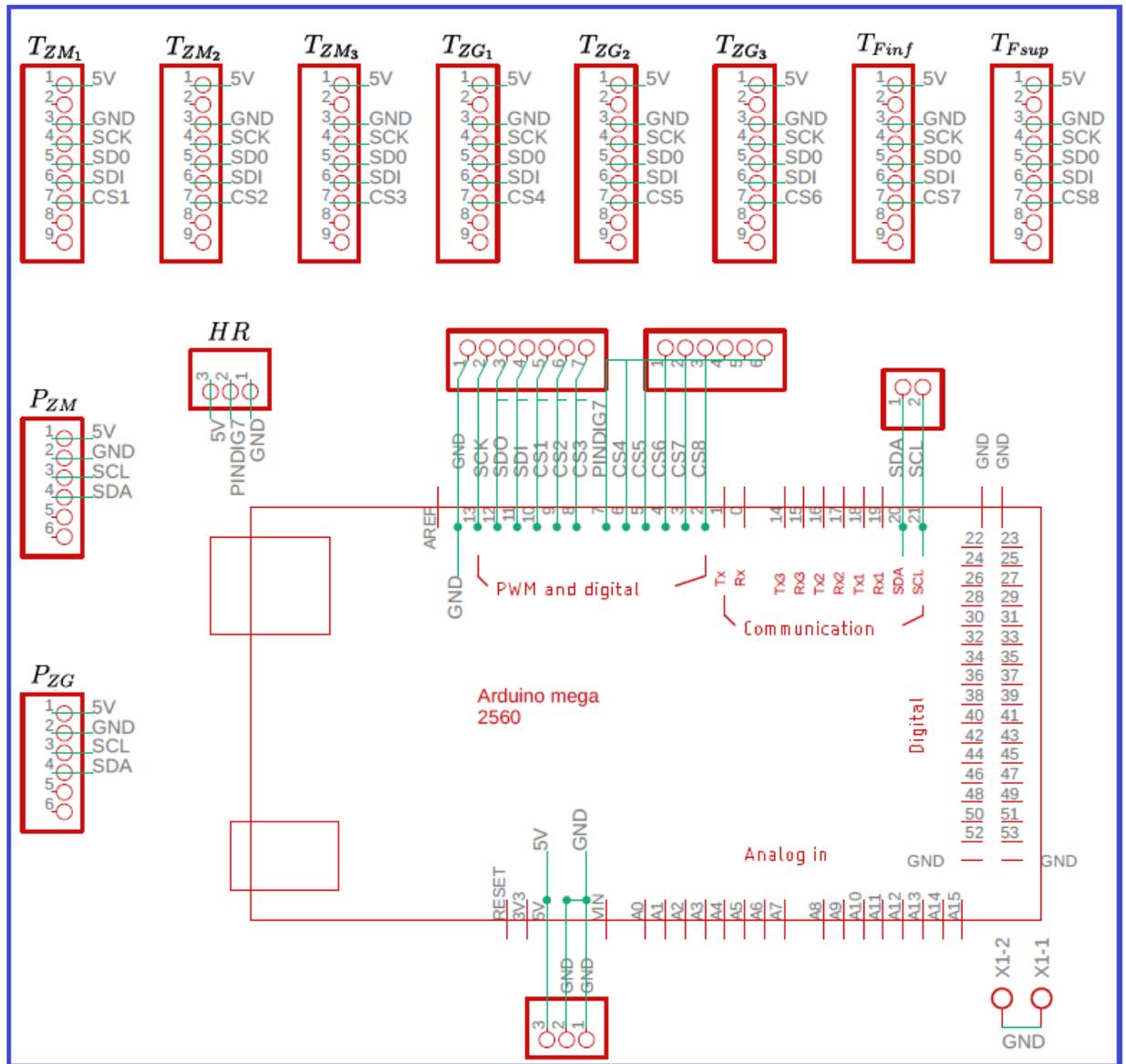


Figura 4.11. Esquemático de un *shield* para una tarjeta Arduino. Para medir (temperatura de termopares $T_{ZM_1}, T_{ZM_2}, T_{ZM_3}$ en la zona de medición, $T_{ZG_1}, T_{ZG_2}, T_{ZG_3}$ en la zona de guarda y $T_{F_{inf}}, T_{F_{sup}}$ con 8 módulos MAX 31856), (corriente eléctrica, voltaje y potencia eléctrica I_{ZM}, V_{ZM}, P_{ZM} en la zona de medida y I_{ZG}, V_{ZG}, P_{ZG} en la zona de guarda con 2 módulos INA 219B) y (temperatura y humedad relativa de la cámara T_a, HR respectivamente con el módulo DHT 22).

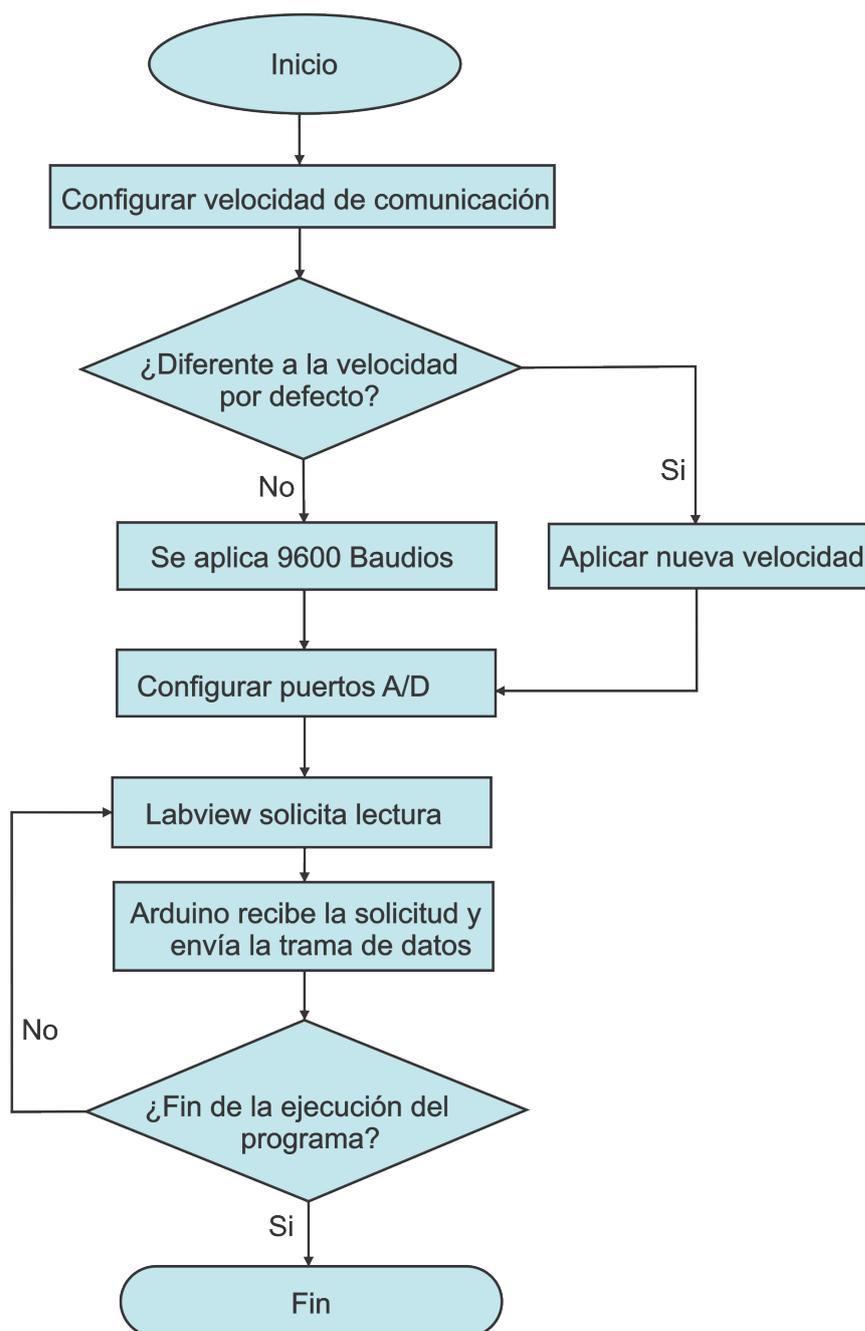


Figura 4.12. Diagrama de flujo para la comunicación Arduino-LabView.

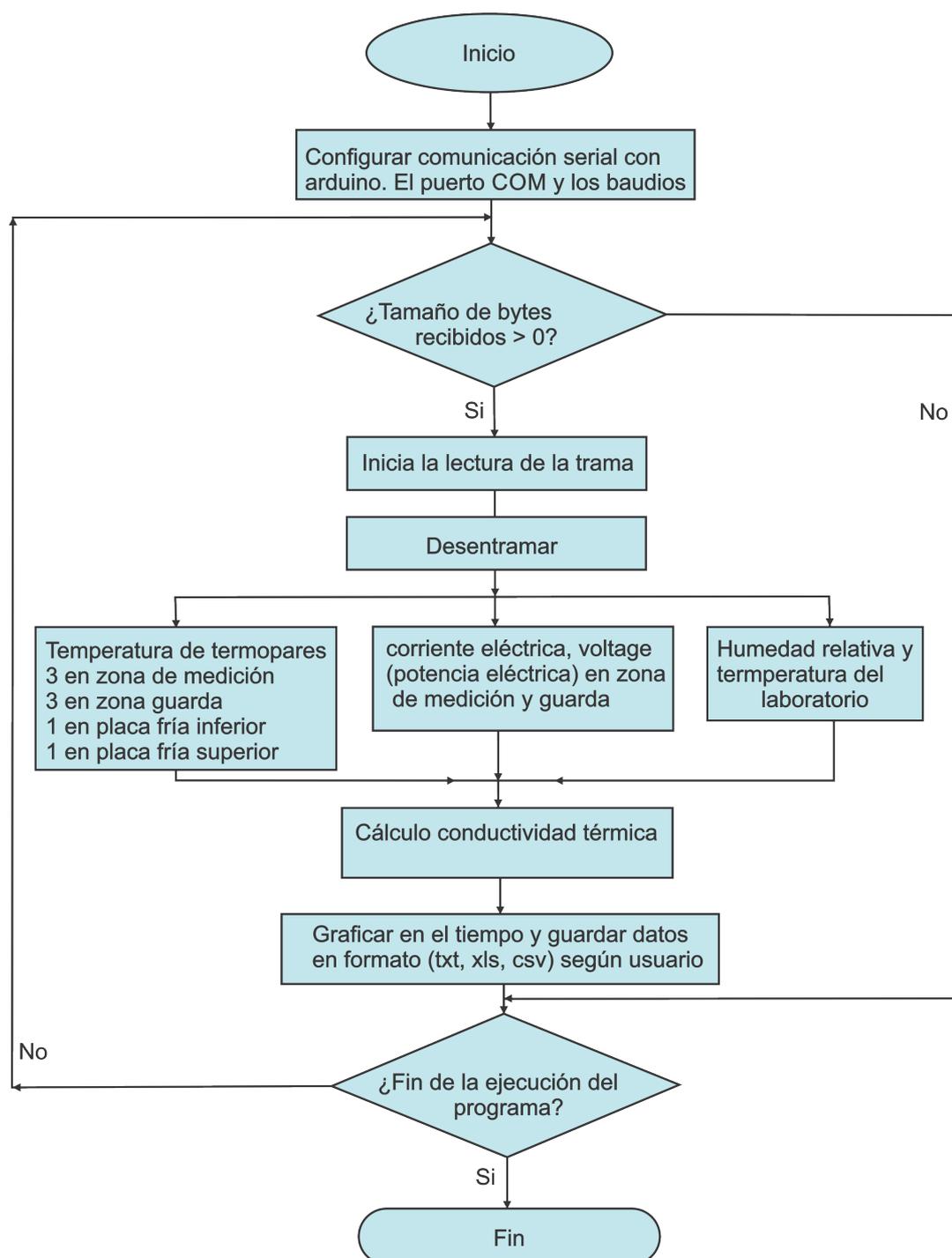


Figura 4.13. Diagrama de flujo de la programación en *LabView* para el cálculo de conductividad térmica, gráfico y almacenamiento de datos.

4.2. Difusividad térmica empleando el método de Ångström considerando pérdidas por radiación

Este método nos permite determinar la difusividad térmica en estado no estacionario considerando las pérdidas por radiación [31]. La ecuación para la temperatura de un cuerpo que está conduciendo y el calor que irradia a su entorno en condiciones de estado no estacionario, que incluye las pérdidas de calor h y que toma una dimensión en x , esta dado por,

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} + hT = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4.24)$$

Donde h es el coeficiente de pérdida de calor superficial. La pérdida de calor en función de la temperatura incluye conducción (T), convección (T) y radiación (T^4). Sin embargo, solo usamos el término T -lineal homogéneo hT como una aproximación para la conveniencia matemática.

A continuación se demuestra esta aproximación [32]

Expresando la ecuación 4.24 en función de la conductividad térmica,

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \lambda h T \quad (4.25)$$

Las pérdidas de calor se deben a la (convección y radiación), puede ser expresado de la siguiente manera,

$$\lambda h T = \frac{\dot{Q}_{rad}(x, T) + \dot{Q}_{conv}(x, T)}{V} \quad (4.26)$$

Donde \dot{Q} es la pérdida de la razón de conducción del calor y $V = Ae$, V es volumen, A área superficial de la base, e espesor, despejando h se tiene,

$$h = \frac{\dot{Q}_{rad}(x, T)}{VT\lambda} + \frac{\dot{Q}_{conv}(x, T)}{VT\lambda} = m_{rad} + m_{conv} \quad (4.27)$$

Con m_{rad} , m_{conv} coeficientes de pérdida de calor por radiación y conducción respectivamente. Considerando la muestra a analizar una varilla cilíndrica, semi-infinita, delgada, radiante y envuelto con un material aislante en la parte lateral.

$$\dot{Q}_{rad} = A\sigma\varepsilon(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (4.28)$$

Donde A es el área superficial, σ es la constante ($5,67 \times 10^{-8} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$), de Stephan-Boltzmann, ε emisividad, T_∞ temperatura en los alrededores y T_s es la temperatura

en la superficie del cuerpo,

$$\dot{Q}_{rad} = A\sigma\varepsilon \left((T_0 + T_s)^4 - T_\infty^4 \right) \quad (4.29)$$

T son las oscilaciones de la amplitud de la temperatura que es muy pequeño en comparación a la temperatura de los alrededores T_∞ y T_0 en la temperatura producto de las oscilaciones en la base de la superficie en contacto con el ambiente que según las condiciones expuestas, idealmente debe ser igual a T_∞ , debido a estas condiciones se puede aplicar la expansión de Taylor y en segundo orden resulta,

$$\dot{Q}_{rad} = A\sigma\varepsilon (4T_0^3T + 6T_0^2T^2) \quad (4.30)$$

$$m_{rad} = \frac{\dot{Q}_{rad}(x, T)}{VT\lambda} \approx \frac{2\sigma\varepsilon (4T_0^3 + 6T_0^2T)}{e\lambda} \quad (4.31)$$

Como T es pequeño, la ecuación 4.31 se simplifica,

$$m_{rad} = \frac{\dot{Q}_{rad}(x, T)}{VT\lambda} \approx \frac{8\sigma\varepsilon (T_0^3)}{e\lambda} \quad (4.32)$$

En las pérdidas de calor por convección se tiene,

$$\dot{Q}_{conv} = h_{conv}A\Delta T \quad (4.33)$$

Donde h_{conv} es el coeficiente de convección, A área superficial de la base, ΔT diferencia de temperatura entre la muestra y el ambiente físicamente igual a $T(x, t)$.

$$\dot{Q}_{conv} = h_{conv}AT(x, t) \quad (4.34)$$

El coeficiente de pérdidas por convección queda expresado como,

$$m_{conv} = \frac{\dot{Q}_{conv}(x, T)}{VT\lambda} \approx \frac{2h_{conv}}{e\lambda} \quad (4.35)$$

debido a que h_{conv} suele variar de 5 a 20 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ y si T_0 es mayor a T_∞ , pueden influir en las pérdidas de calor y por ende en la medición de difusividad térmica.

El siguiente desarrollo está basado en [31, 33, 34]. Si nuestra fuente de calor cuya temperatura varía periódicamente con el tiempo se aplica a un extremo de la barra semi-infinita, las condiciones de contorno son,

En $x = 0$, T es periódico

Capítulo 4. Caracterización experimental de la Unidad Blanca de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (UB-IAA)

$T(L, t) = T_\infty$, con $T(L, t)$: La temperatura en el tiempo de una muestra cilíndrica de longitud L .

En cualquier valor de posición x la temperatura será periódico con un periodo similar a $P = \frac{2\pi}{n\omega}$, por lo tanto la temperatura en $x = 0$ puede expresarse como una suma de Fourier,

$$T(x, t) = \sum P_n(x) \cos \omega t + Q_n(x) \sin \omega t \quad (4.36)$$

Reemplazando la ecuación 4.36 en 4.24,

$$\begin{aligned} \sum \alpha \frac{\partial^2 P_n(x)}{\partial x^2} \cos \omega t + \alpha \frac{\partial^2 P_n(x)}{\partial x^2} \sin \omega t - h P_n(x) \cos \omega t - h Q_n(x) \sin \omega t &= \\ \sum -n\omega P_n(x) \sin \omega t + n\omega Q_n(x) \cos \omega t & \end{aligned} \quad (4.37)$$

Al igualar los términos que multiplican por $\sin \omega t$ y $\cos \omega t$, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones,

$$\alpha \frac{\partial^2 P_n(x)}{\partial x^2} - h P_n(x) = n\omega Q_n(x) \quad (4.38)$$

$$\alpha \frac{\partial^2 Q_n(x)}{\partial x^2} - h Q_n(x) = -n\omega P_n(x) \quad (4.39)$$

Derivando 2 veces la ecuación 4.38,

$$\alpha \frac{\partial^4 P_n(x)}{\partial x^4} - h \frac{\partial^2 P_n(x)}{\partial x^2} = n\omega \frac{\partial^2 Q_n(x)}{\partial x^2} \quad (4.40)$$

De la ecuación 4.38 en 4.39,

$$\alpha \frac{\partial^4 P_n(x)}{\partial x^4} - h \frac{\partial^2 P_n(x)}{\partial x^2} = \frac{n\omega}{\alpha} (h Q_n(x) - n\omega P_n(x)) \quad (4.41)$$

$$\alpha \frac{\partial^4 P_n(x)}{\partial x^4} - h \frac{\partial^2 P_n(x)}{\partial x^2} + \frac{n^2 \omega^2 P_n(x)}{\alpha} - \frac{n\omega h Q_n(x)}{\alpha} = 0 \quad (4.42)$$

De la ecuación 4.42 en 4.39,

$$\alpha \frac{\partial^4 P_n(x)}{\partial x^4} - 2h \frac{\partial^2 P_n(x)}{\partial x^2} + \left(\frac{n^2 \omega^2 P_n(x)}{\alpha} + \frac{h^2}{\alpha} \right) P_n(x) = 0 \quad (4.43)$$

De lo análogo para $Q_n(x)$ se obtiene,

$$\alpha \frac{\partial^4 Q_n(x)}{\partial x^4} - 2h \frac{\partial^2 Q_n(x)}{\partial x^2} + \left(\frac{n^2 \omega^2 P_n(x)}{\alpha} + \frac{h^2}{\alpha} \right) Q_n(x) = 0 \quad (4.44)$$

La ecuación 4.43 es una ecuación diferencial de segundo orden, homogénea y de coeficientes constantes. Cuya ecuación característica es.

$$\alpha \gamma^4 - 2h \gamma^2 + \left(\frac{n^2 \omega^2}{\alpha} + \frac{h^2}{\alpha} \right) \gamma = 0 \quad (4.45)$$

De la ecuación 4.45 las soluciones para γ^2 ,

$$\gamma^2 = \frac{h}{\alpha} \pm i \frac{n\omega}{\alpha} \quad (4.46)$$

Las soluciones para γ ,

$$\begin{aligned} \gamma &= \pm \left(\frac{1}{2\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\left(\sqrt{h^2 + n^2 \omega^2} + h \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\sqrt{h^2 + n^2 \omega^2} - h \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \pm [\sigma_n \pm i \beta_n] \end{aligned} \quad (4.47)$$

Donde:

$$\sigma_n = \left(\frac{1}{2\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sqrt{h^2 + n^2 \omega^2} + h \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.48)$$

$$\beta_n = \left(\frac{1}{2\alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sqrt{h^2 + n^2 \omega^2} - h \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.49)$$

Así, las soluciones de la ecuación 4.43.

$$\begin{aligned} P_n(x) &= \exp(\sigma_n x) [A_n x \cos \beta_n x + B_n x \sin \beta_n x] \\ &+ \exp(-\sigma_n x) [A_n x \cos \beta_n x + B_n x \sin \beta_n x] \end{aligned} \quad (4.50)$$

Debido a que en la ecuación 4.36 la solución debe converger para $x \rightarrow \infty$, el primer término se descarta,

$$\rightarrow P_n(x) = A_n \exp(-\sigma_n x) \cos(\beta_n x - \varphi_n) \quad (4.51)$$

Capítulo 4. Caracterización experimental de la Unidad Blanca de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (UB-IAA)

Reemplazando la ecuación 4.51 en 4.38 para obtener la solución $Q_n(x)$,

$$T(x, t) = \sum A_n \exp(-\sigma_n x) \cos(\beta_n x - \varphi_n - n\omega t) \quad (4.52)$$

Expandiendo la sumatoria,

$$T(x, t) = A_0 \cos(-\varphi_0) + A_1 \exp(-\sigma_1 x) \cos(\beta_1 x - \varphi_1 - \omega t) + \dots \quad (4.53)$$

para $x = 0$,

$$T(0, t) = A_0 \cos(-\varphi_0) + A_1 \cos(-\varphi_1 - \omega t) + \dots \quad (4.54)$$

Como uno de los extremos se calienta con una onda de calor sinusoidal con frecuencia ω , y que la función cos es par se tiene,

$$\begin{aligned} T(0, t) &= A_0 + A_1 \cos(\varphi_1 + \omega t) \\ &= A_0 + A_1 \cos(-\varphi_1 - \omega t) \end{aligned} \quad (4.55)$$

Para todo x nos queda,

$$T(x, t) = A_0 + A_1 \exp(-\sigma_1 x) \cos(-\beta_1 x - \varphi_1 - \omega t) \quad (4.56)$$

$$\sigma_1 = \left(\frac{1}{2\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\sqrt{h^2 + \omega^2} + h\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.57)$$

$$\beta_1 = \left(\frac{1}{2\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\sqrt{h^2 + \omega^2} - h\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.58)$$

Sea x_1, x_2 las posiciones de dos termopares que miden los valores de temperatura, y M_1, M_2 los decaimiento exponencial,

$$M_1 = A_1 \exp(-\sigma_1 x_1) \quad (4.59)$$

$$M_2 = A_1 \exp(-\sigma_1 x_2) \quad (4.60)$$

Dividiendo la ecuación 4.59 entre 4.60,

$$\frac{M_1}{M_2} = \exp(-\sigma_1(x_2 - x_1)) \quad (4.61)$$

$$\sigma_1 = \frac{\ln\left(\frac{M_1}{M_2}\right)}{(x_2 - x_1)} \quad (4.62)$$

Según la ecuación 4.56 la velocidad de fase o propagación es,

$$v_p = \frac{\omega}{\beta_1} \quad (4.63)$$

Además; la velocidad de propagación entre dos posiciones x_1, x_2 ,

$$v_p = \frac{(x_2 - x_1)}{\Delta t} \quad (4.64)$$

Multiplicando la ecuación 4.57 con 4.58,

$$\sigma_1 \beta_1 = \frac{\omega}{2\alpha} \quad (4.65)$$

De la ecuación 4.62, 4.63, 4.64 y 4.65 se tiene,

$$\alpha = \frac{(x_2 - x_1)^2}{2\Delta t} \left[\frac{1}{\ln\left(\frac{M_1}{M_2}\right)} \right] \quad (4.66)$$

Análisis de las incertidumbres

Sea $N = \frac{M_1}{M_2}$, y de la ecuación de la incertidumbre combinada,

$$u_\alpha = \sqrt{\left[\frac{\partial \alpha}{\partial \Delta x} u_{\Delta x} \right]^2 + \left[\frac{\partial \alpha}{\partial N} u_N \right]^2 + \left[\frac{\partial \alpha}{\partial \Delta t} u_{\Delta t} \right]^2} \quad (4.67)$$

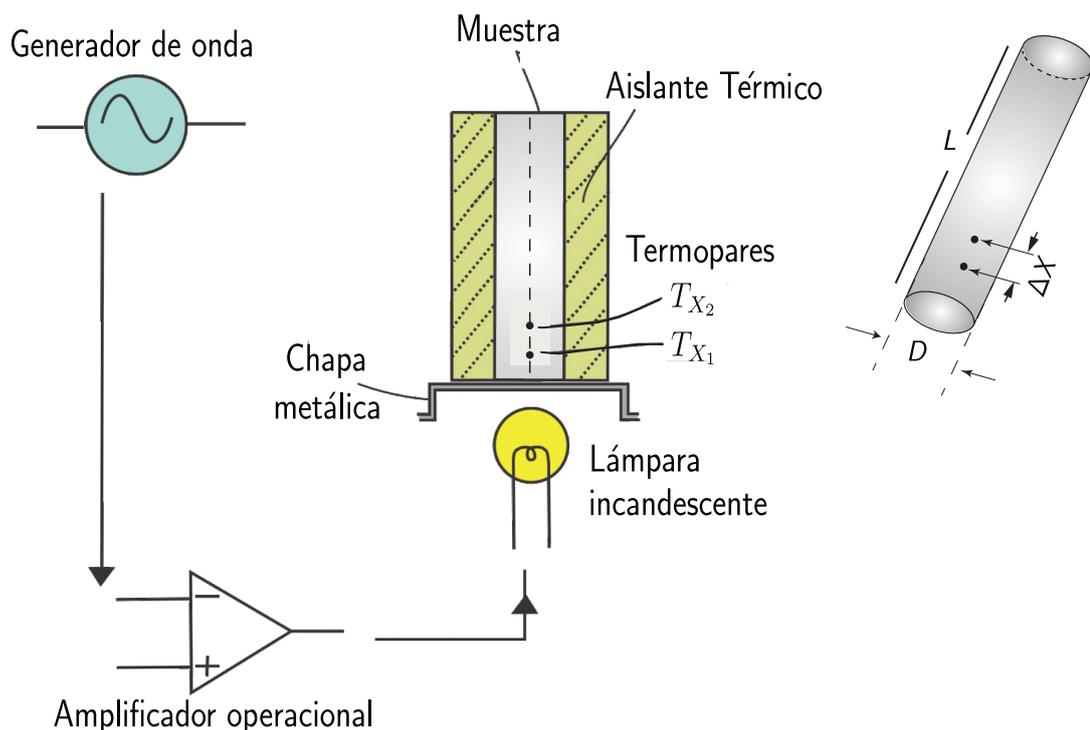
La incertidumbre de N (u_N), se expresa en función de M_1, M_2 ,

$$u_N = \sqrt{\left[\frac{1}{M_2} u_{M_1} \right]^2 + \left[-\frac{M_1}{(M_2)^2} u_{M_2} \right]^2} \quad (4.68)$$

A continuación veremos la configuración experimental.

Configuración experimental

La Figura 4.2. muestra el esquema del sistema de medición de difusividad térmica donde T_{X_1} y T_{X_2} , on los canales donde se colocaron los termopares tipo K, aislante térmico, muestra UB-IAA en forma de testigo, generador de ondas sinusoidal, amplificador operacional de voltaje - corriente eléctrica, base o chapa metálica donde reposa la base inferior de la muestra y (8) lámpara incandescente



Los siguientes instrumentos se emplearon para el sistema de medición .

Generador de funciones. Es de la marca *SINGLE* modelo SDG1020, cuenta con dos canales de salida, en nuestro caso particular emplearemos la función de onda sinusoidal.

Fuente de alimentación operacional. u *Operational power supply Kepko* BOP 50-80 ML, con un voltaje de operación de $[-50, 50]$ V, y de corriente eléctrica de $[-8, 8]$ A. Se utilizó en modo voltaje y amplificará la señal del generador de ondas.

Thermomether HH6R. Es un termómetro digital portátil que emplea el protocolo e comunicación RS 232 y un *software* para PC. Cuenta con dos canale de salida para termopares tipo K.

Módulo MAX 31856. Este módulo de Adafruit para termopares de distintos tipos.En este se dispuso de termopares del tipo K.

Preparación de la muestra

Se realizó un corte en forma de testigo o barra cilíndrica con longitud $L = 20$ cm y diámetro $D = 4,3$ cm a un bloque de UB-IAA de 18 cm x 30 cm x 54 cm. Así la relación $\frac{D}{L} = \frac{1}{5}$ aproximadamente. se cubrió con una guarda aislante de fibra de roca y luego con papel de aluminio para evitar al absorción de humedad y reflejar la radiación externa.

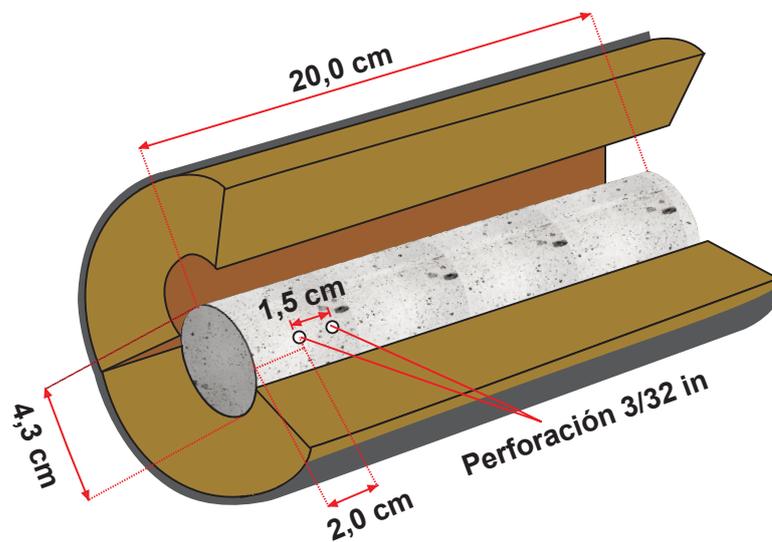


Figura 4.15. En la parte izquierda se muestra las dimensiones en un diseño con apariencia de UB-IAA, y en la derecha se puede observar a la muestra cortado como testigo.



Figura 4.16. En la parte izquierda se observa la muestra UB-IAA con el aislante preformado de lana de roca cubierto con papel de aluminio o *foil*, y en la derecha se puede observar completamente cubierto y con las salidas de los termopares tipo K que ingresan hasta la mitad del diámetro.

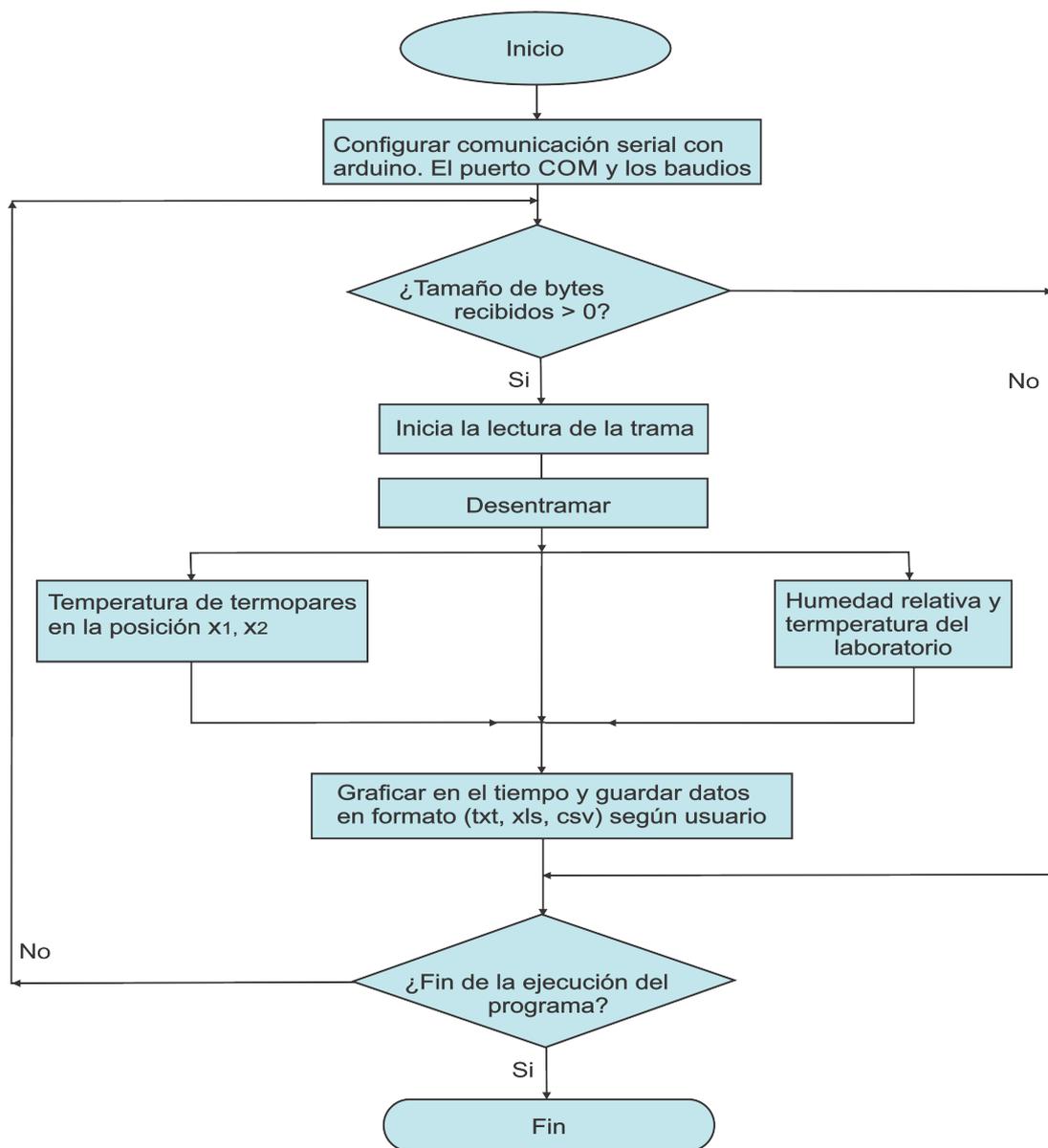


Figura 4.17. Diagrama de flujo *LabView* para el monitoreo de datos.

4.3. Estructural, morfológica y elemental

La ignimbrita contiene diversos minerales y compuestos en diversas fases, A partir de los métodos de Difracción de rayos X (DRX - Método de polvo), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), se presentará los patrones de difracción identificando las fases que permitan conocer de manera general sus principales compuestos y estructuras cristalinas.

4.3.1. Difracción de rayos X (DRX)

Esta técnica no destructiva es comunmente empleada en la caracterización de materiales, que cumplen la condición de tener una estructura cristalográfica definida, debido a que la información obtenida de la interacción de los rayos X y los cristales se sustenta en la difracción producida por un conjunto de átomos en un arreglo ordenado.

La Difracción de rayos X (DRX) o de los términos en inglés X rays Diffraction que ocurre en materiales cristalinos es un proceso de dispersión de radiación coherente que se origina por el choque de los fotones incidentes contra los electrones firmemente ligados a los átomos, así cada átomo irradiado del material dispersa de manera individual en todas las direcciones [35]. Como un material está formado por muchos átomos y cada uno de ellos es una fuente de radiación coherente, ocurren fenómenos de interferencia constructiva o destructiva entre los rayos X dispersados.

los rayos dispersos están en fase y producen interferencia constructiva de ondas en determinadas direcciones del espacio en donde se observan máximos de intensidad en la difracción [36]. La ley de Bragg nos da una descripción simple del proceso de difracción, y nos dice que la coincidencia en la fase requiere que la diferencia del camino recorrido por los haces que interfieren constructivamente, sea un múltiple entero de la longitud de onda de la radiación incidente.

En la figura 4.18 un haz paralelo, monocromático y coherente (en fase) de rayos X de longitud de onda λ_0 incide en los planos paralelos de átomos A- A' y B-B' con los mismos índices de Miller h, k y l separados por una distancia interplanar $d_{h,k,l}$ según el ángulo θ . Los rayos 1 y 2 son dispersados por lo átomos P y Q. De un ángulo θ con los planos, ocurre una interferencia constructiva de los rayos dispersados 1' y 2', siempre que las diferencias de recorrido entre 1-P-1' y 2-Q-2', en este caso $\overline{SQ} + \overline{QT}$ equivalgan un número entero n, de longitud de onda [37].

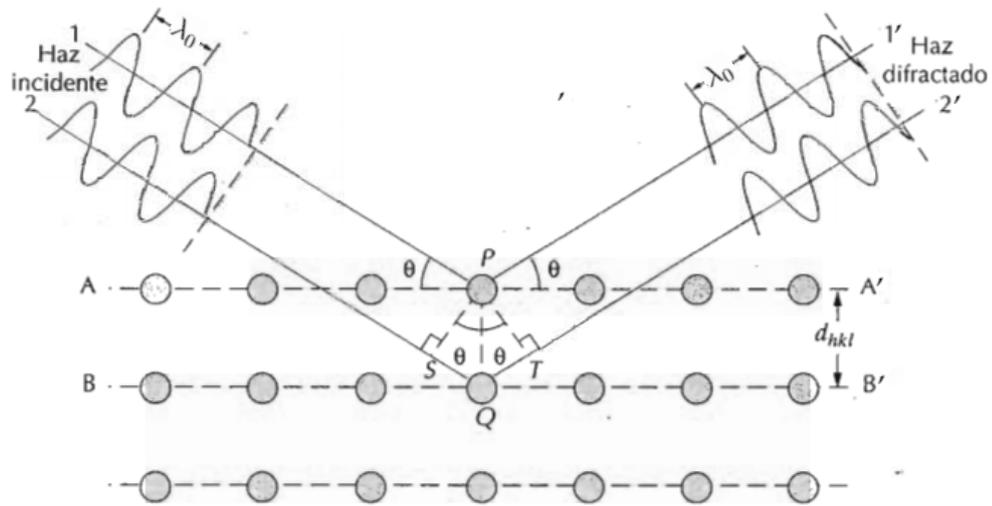


Figura 4.18. Difracción de rayos X por los planos atómicos (A- A' y B-B') [37].

$$n\lambda_0 = \overline{SQ} + \overline{QT} \quad (4.69)$$

$$n\lambda_0 = d_{hkl}\text{sen}\theta + d_{hkl}\text{sen}\theta \quad (4.70)$$

$$n\lambda_0 = 2d_{hkl}\text{sen}\theta \quad (4.71)$$

Donde:

n : Factor de reflexión y puede tomar cualquier valor entero compatible con $\text{sen}\theta$.

θ : Ángulo formado entre los planos paralelos de átomos y la radiación incidente.

λ_0 : Longitud de onda (Å).

d_{hkl} : Distancia interplanar de la familia de planos que producen la interferencia constructiva (Å).

Equipo de DRX: Difractómetro

El difractómetro de polvo es un sistema electrónico que permite la detección de rayos X difractados por una muestra y analizados para mostrar un patrón de difracción. Consiste en la cámara principal, un contador electrónico, que convierte los rayos X difractados en pulsos de corriente eléctrica en un circuito conectado al contador, el goniómetro que permite el movimiento del tubo de rayos X y el contador y el portamuestras. En la Figura 10, se muestra un esquema general de un difractómetro de rayos X. Para la medición de Difracción de rayos X presentado en esta Tesis se empleó un difractómetro *Bruker D8 ADVANCE*, con goniómetro vertical que permite el movimiento del tubo de rayos X, un contador electrónico que convierte los rayos X difractados en pulsos de corriente eléctrica en un circuito conectado al contador, el portamuestras, tubo con filamento de tungsteno y ánodo Cu con emisión más $k\alpha$ intensa y $k\beta$, de menor intensidad que la anterior, se elimina mediante un filtro de níquel Ni. Un monocromador a la entrada del detector, que elimina la radiación $k\beta$ que no ha sido eliminada por el filtro Ni.

El sistema D8 permite diferentes configuraciones para acoplar ángulo de incidencia y de detección. La configuración empleada para medir las muestras en polvo fue (Bragg-Brentano $\theta - 2\theta$).

Preparación de las muestras

Se empleó un mortero de ágata para moler un fragmento de UB-IAA, y luego se colocó el polvo de un tamiz de malla 200 (75 μm). Se utilizó el agitador de tamices por 5 min y el polvo resultante del tamizado se colocó en un recipiente.

4.3.2. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Al incidir un haz electrónico sobre un sólido puede generar varios procesos como lo indica la Figura . Cada una de las señales pueden ser detectadas y amplificadas de manera conveniente con detectores apropiados en cada caso, dando información valiosa del material en estudio. En el MEB se detectan los electrones secundarios. La forma en que se produce la imagen por esta técnica es enfocando el haz de electrones sobre un área muy reducida de la muestra y barrer la superficie de la misma, detectando en cada punto o localización temporal del haz una intensidad promedio de los electrones secundarios con el cual se alimenta el filamento de los rayos catódicos, dando lugar a una imagen de la muestra en la pantalla. Además, se usa comunmente para obtener imágenes morfológicas de la superficie de la muestra. El equipo empleado en este trabajo es un Hitachi modelo SU8230.

4.3.3. Espectroscopía de dispersión de energía

La espectroscopía de dispersión de energía o de los términos en inglés *Energy Dispersive X ray Spectroscopy* (EDS) o también conocida como espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDX) es una de la formas para detectar los elementos en un espécimen (Análisis elemental), Se basa en la generación de rayos X característicos en los átomos del espécimen por los electrones del haz incidente.

Los rayos X se generan cuando un electrón incidente dispersado inelásticamente colisiona y excita un electrón orbital en un átomo de la muestra (un átomo se ioniza), la envoltura electrónica vacía vuelve a su estado estático cuando el electrón desplazado es reemplazado por un electrón de otra trayectoria de electrones. Este fenómeno se llama transición. El exceso de energía generado durante la transición se libera como rayos X. Como la diferencia en las dos energías orbitales de los electrones excitados tiene un valor específico que depende del elemento, la energía que emite los rayos X también es específica de los elementos [38]. esto se llama radiografía característica, y se usa en análisis elemental. Para generar una cierta radiografía característica, necesitas entregar electrones que tengan mayor energía que esa radiografía característica. La relación entre la energía E (keV) de la radiografía característica y la longitud de onda λ_0 (Å) es expresado por $E=123.96/\lambda_0$.

La emisión de rayos X a diferentes longitudes de onda se puede medir con un detector sensible a la energía de los fotones. Los rayos X son característicos del elemento del que se originan y contienen información sobre los elementos que están presentes en la muestra [39]. de hecho, la energía depende del número atómico del elemento en el que se produce la interacción.

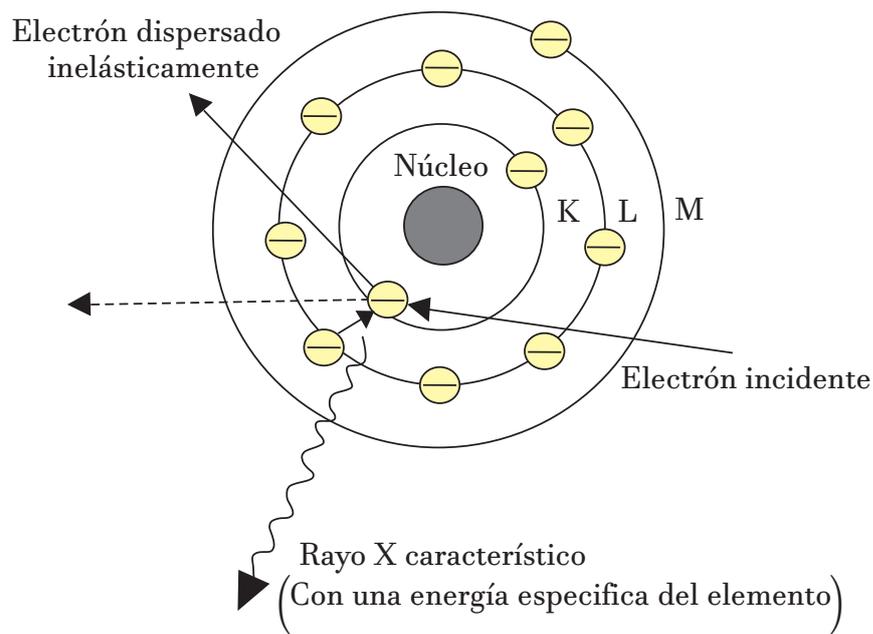


Figura 4.19. Ejemplo de la generación de rayos X característicos en el modelo atómico del sodio (Na).

Previo a el ensayo de EDS, se realizó la técnica de evaporación de carbono que consiste en el uso de dos electrodos conectados a una fuente de corriente alterna de alta intensidad y bajo voltaje, entre los que se coloca el grafito. El sistema está confinado en vacío para favorecer la deposición de la película. Al hacer pasar corriente, el grafito se sublima, rociando la muestra con una capa delgada de carbono. Esto para evitar la carga de la muestra y desvié el haz de electrones provocando distorsiones en la imagen.

4.4. Propiedades mecánicas

Unidad de albañilería

Según la norma técnica peruana E 0.70, 2006 se conoce como unidad de albañilería al ladrillo de arcilla calcina, ladrillo sillico calcáreo y bloque de concreto [40]. Según el proceso de fabricación se clasifican en unidades mecanizadas (industrial) y artesanales diferenciándose en la calidad. En el Perú en la actualidad, las ignimbritas no están presentes en alguna norma como unidad de albañilería. Sin embargo, Se realizarán algunos ensayos de unidad de albañilería como, variación dimensional, alabeo, resistencia a la compresión y absorción como valores de referencia para la UB-IAA.

Ensayos de unidad de albañilería

Los ensayos que se detallan a continuación se realizaron en el Laboratorio de Ensayo de Materiales (LEM) de la Facultad de Ingeniería Civil [41].

Variación dimensional

En este ensayo se determina que tanto varían las dimensiones de las unidades en largo, ancho y altura. Esta propiedad define la altura de las hiladas, ya que si la dimensión de las unidades es variada ocasionaría juntas mas gruesas mayor a 1,5 cm, esto según la norma técnica E.070.

La variabilidad dimensional expresada en porcentaje se determinará como el cociente entre la medida especificada por el fabricante y las dimensiones promedios obtenidas de los ensayos multiplicados por 100, como se indica en la siguiente ecuación.

$$V_d = \frac{(Mf - Mp)}{Mf} \times 100 \% \quad (4.72)$$

Dónde:

V_d = Variabilidad dimensional expresada, en %.

Mf = Medida especificada por el fabricante, en cm .

Mp = Medida promedio, en cm.

Alabeo

Este ensayo determina la concavidad o convexidad que presentan las caras de asiento de la unidad de albañilería. La presencia de alabeo puede afectar el espesor de la junta horizontal [41]. En este ensayo las 9 muestras de UB-IAA son las mismas que se emplearon en el ensayo de variación dimensional. Se usa una cuña para mediciones de alabeo (concavidad y convexidad) como se muestra en la imagen.

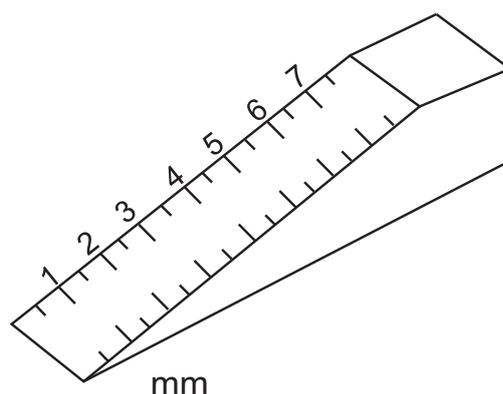


Figura 4.20. Se muestra una imagen de una cuña de medida para las mediciones de alabeo (concavidad y convexidad) en mm.

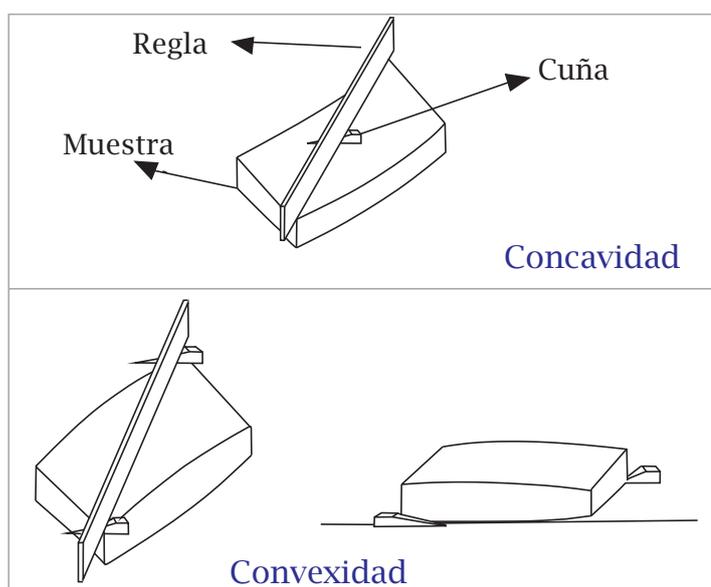


Figura 4.21. Se muestra como medir la concavidad y la convexidad en el ensayo de alabeo.

Resistencia a la compresión

Este ensayo nos indica el esfuerzo máximo que puede soportar la unidad de albañilería, a mayor resistencia brinda una mayor durabilidad y tendrá un mejor comportamiento estructural.

Para el ensayo se empleó de 5 muestras de UB-IAA como se muestra en la tabla se secaron en un horno a 100 °C. El siguiente procedimiento es el capeado, consiste en elaborar una capa, mezcla de yeso, cemento y agua, en este caso con una relación de yeso - cemento de 1:2 respectivamente que se aplica sobre las áreas de compresión y con un nivel mejorar el paralelismo y planitud entre ambas caras y se deja secar al ambiente durante 24 h como mínimo.

La resistencia a compresión axial se calcula con la siguiente ecuación [41].

$$f'_b = \frac{W}{A_b} \quad (4.73)$$

Dónde:

f'_b = Resistencia a la compresión del espécimen, en $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$.

W = Carga máxima o de fisuramiento, en kg .

A_b = Área bruta de la sección, en cm^2 .



Figura 4.22. El bosquejo de un equipo para el ensayo de resistencia a la compresión a la unidad.

Tabla 4.7. Clase de unidad de albañilería para fines estructurales [41].

Clase	Variación de la dimensión (máxima en porcentajes)			Alabeo (máximo en mm)	Resistencia a la Compresión f'_b mínimo en Mpa ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$) sobre área bruta
	Hasta 100 mm	Hasta 150 mm	Más de 150 mm		
Ladrillo I	+8	+6	+4	10	4,9 (50)
Ladrillo II	+7	+6	+4	8	6,8 (70)
Ladrillo III	+5	+4	+3	6	9,3 (95)
Ladrillo IV	+4	+3	+2	4	12,7 (130)
Ladrillo V	+3	+2	+1	2	17,6 (180)
Bloque P (1)	+4	+3	+2	4	4,9 (50)
Bloque NP (2)	+7	+6	+4	8	2,0 (20)

(1) Bloque usado en la construcción de muro portantes

(2) Bloque usado en la construcción de muro no portantes

Absorción de humedad en 24 h

Este ensayo nos indica la capacidad de absorción de las muestras cuando alcanzan un estado de saturación, es decir 24 h de inmersión en agua según la NTP 399.613.

Se ensayan una cantidad de 5 muestras que serán sometidas a un secado en el horno a 110 °C durante un tiempo de 24 h, luego se pesan las muestras en una balanza con una precisión de 0,5 g a 1 g, las muestras vuelven al secado por un par de horas, después se vuelven a pesar y se repite el procedimiento hasta que la variación en el peso de cada respectiva muestra es nulo.

Se procede a sumergir las muestras en un recipiente con agua destilada a temperatura ambiente durante un tiempo de 24 h. Después de este lapso de tiempo se retira cada muestra, se limpia el agua superficial con un paño y se pesa en una balanza con una precisión de 0,5 g a 1 g. Las muestras se deben pesar dentro de los próximos 5 minutos de ser retirados del agua.

Se calcula la absorción de cada muestra con la siguiente ecuación.

$$\text{Absorción \%} = 100 \left(\frac{W_b - W_d}{W_d} \right) \quad (4.74)$$

Donde, W_d peso seco constante (g), W_b peso saturado 24 h (g)

Capítulo 5

Resultados y discusiones

Se presenta los resultados y discusiones de la caracterización de la UB-IAA para los ensayos de conductividad y difusividad térmica, Difracción de rayos x (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), y propiedades mecánicas como unidad de albañilería .

5.1. Conductividad térmica

Se realizó el ensayo de conductividad térmica para la UB-IAA empleando el equipo LAMBDA-UNI en el Laboratorio de Ingeniería Física de la Facultad de Ciencias de la UNI.

Tabla 5.1. Muestra de UB-IAA para el ensayo de conductividad térmica, dimensiones y masa.

Muestra IAA unidad blanca	Área (Lado cm x Ancho cm)	Espesor promedio (cm)	Masa antes del ensayo (kg)	Masa después del ensayo (kg)	Ganancia de masa %
Bloque 1	16,35 x 16,8	5,62	1,910	1,913	0,15
bloque 2	16,29 x 17,06	5,35	2,030	2,034	0,2

De los resultados de la tabla 5.6 se tiene una ganancia en porcentaje de masa para los dos bloques de UB-IAA menores a 0,2% que se debe al contenido de humedad en la muestra por la condensación que ocurre en las placas frías al estar a 16 °C aproximadamente y al ambiente húmedo en el interior de la cámara.

En la figura 5.1 se muestra un gráfico del comportamiento de la temperatura promedio de la placa caliente en la zona de medición, de guarda, frías y potencia eléctrica suministrada a la placa caliente vs el tiempo. El ensayo se realizó en un intervalo de tiempo de (45 h 51 min 30). Con previos ensayos se estimó la potencia en la placa caliente en la zona de medida y guarda. Para calentar más rápido cada zona se entregó más potencia de tal manera que el valor es cercano o un par de °C por debajo de la temperatura deseada, luego se disminuyó la potencia eléctrica en ambas zonas a los valores que previamente se ensayaron .

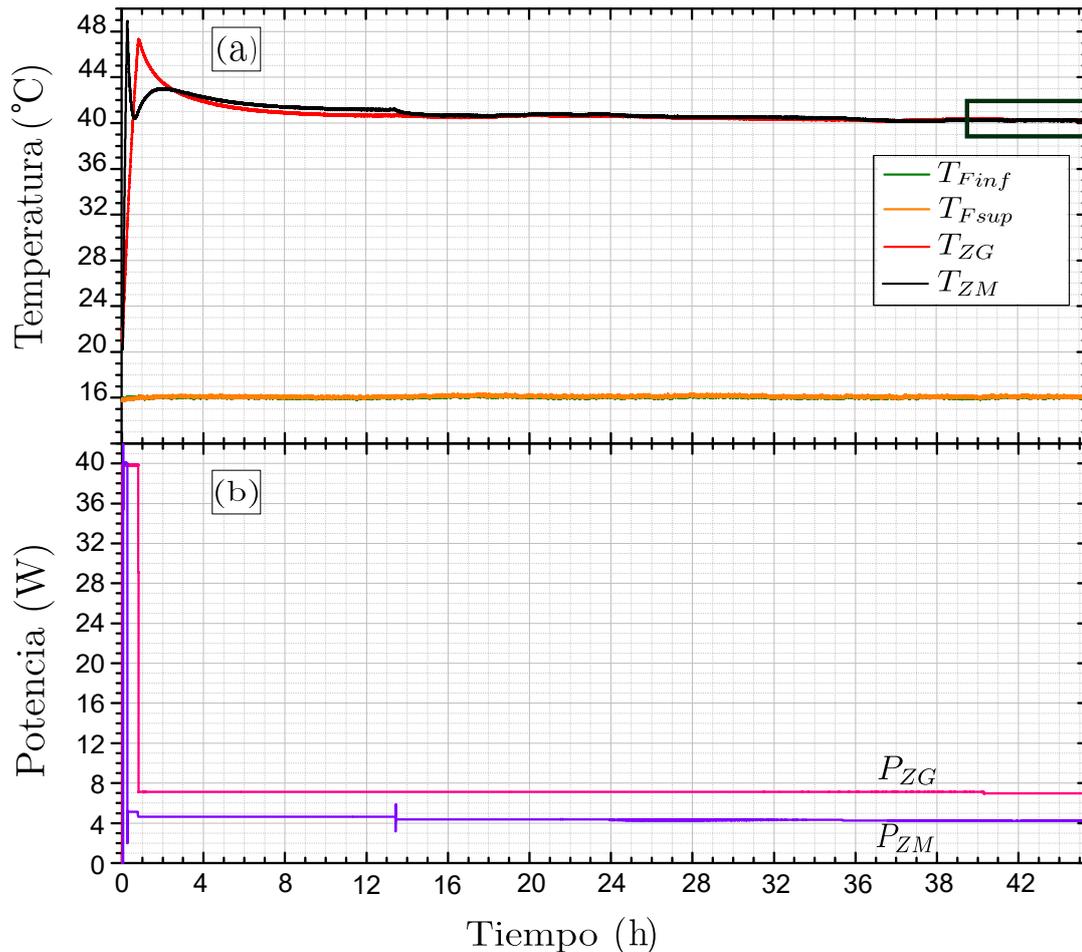


Figura 5.1. Comportamiento en el tiempo para (a) temperatura placa fría inferior (T_{Finf}) (°C), temperatura placa fría superior (T_{Fsup}) (°C), temperatura placa zona de medición promedio ($T_{ZM_{PROM}}$) (°C), temperatura placa zona de guarda promedio ($T_{ZG_{PROM}}$) (°C) y (b) potencia eléctrica suministrada a la zona de medición (P_{ZM}) (W), potencia eléctrica suministrada a la zona de guarda (P_{ZG}) (W).

Capítulo 5. Resultados y discusiones

Se escogió el rango estacionario o permanente térmico aparente en un intervalo de tiempo de 05 h 20 min 20. De tal manera que la diferencia de la temperatura promedio de la zona de medida y guarda cumple con la condición de estar en el rango de $[0,0 \text{ a } 0,2] \text{ } ^\circ\text{C}$ según lo indica la norma ASTM C-177.

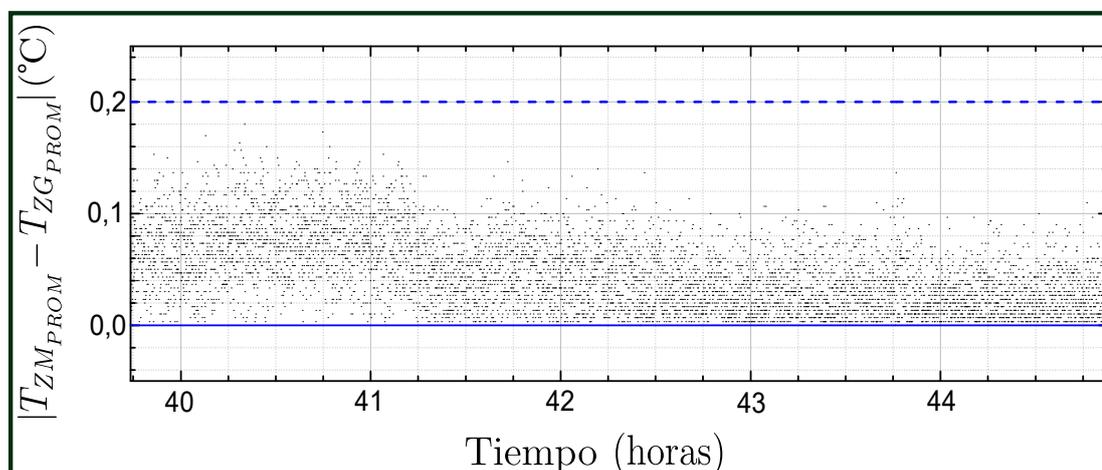


Figura 5.2. Selección del rango estacionario o permanente térmico en el tiempo tal que se cumple que: $0,0 \text{ } ^\circ\text{C} < |T_{ZM_{PROM}} - T_{ZG_{PROM}}| < 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Tabla 5.2. Resultados de la medición de UB-IAA. $T_{F_{PROM}} = 16,06 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{ZM_{PROM}} = 40,19 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Parámetro Físico	Q (W)	A (10^{-2}m^2)	e (10^{-2}m)	ΔT (K)	λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Magnitud	2,13	1,791	5,49	24,13	0,270
Incertidumbre	0,008	0,008	0,02	1,29	0,029

Los valores de corriente eléctrica y voltaje aplicados que se considero finalmente para el estado permanente térmico son 0,73 A 5,83 V para la zona de medición y para la guarda 0,94 A y 7,50 V respectivamente, con lo cual resulto un valor de conductividad térmica: $0,270 \pm 0,029$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), la temperatura en el interior de la cámara fue $26,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ y la humedad relativa 65,6 %.

5.2. Difusividad térmica

Se realizó el ensayo para determinar el valor de difusividad térmica de la UB-IAA de diámetro 4,3 cm y espesor 20 cm en el Laboratorio de Materiales Nanoestructurados de la Facultad de Ciencias e la Universidad Nacional de Ingeniería. En la figura 5.3 se muestra un gráfico del comportamiento de la temperatura en la posición x_1 y x_2 en la muestra UB-IAA vs el tiempo. El ensayo se realizó en 05 h 10, y se seleccionó el rango estacionario en un intervalo de tiempo de 01 h 58, y se muestra el rango estacionario para el ajuste no lineal seno.

$|x_1 - x_2| = 1,5$ cm; Periodo: 15 min.

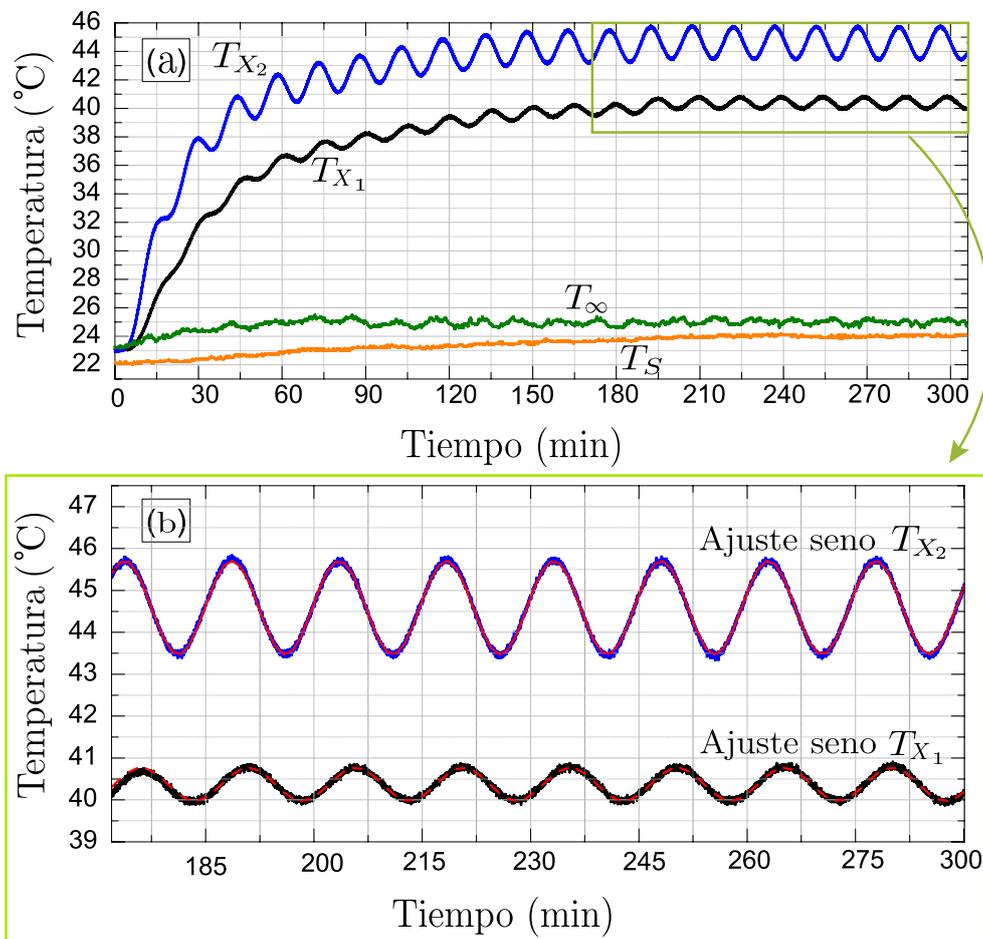


Figura 5.3. Comportamiento en el tiempo para (a) temperatura en la posición (T_{X_1}) (°C), temperatura en la posición (T_{X_2}) (°C) para la muestra UB-IAA y (b) selección del rango estacionario donde se muestra el ajuste no lineal del seno para T_{X_1} y T_{X_2} .

Capítulo 5. Resultados y discusiones

La tabla 5.3 muestra los valores de los parámetros de ajuste no lineal sinusoidal de temperatura vs tiempo mediante el programa Origin Pro 8 para el rango en el estado estacionario o permanente térmico.

Tabla 5.3. Parámetros del ajuste seno para la curva en el rango estacionario.

Ecuación	$T = T_0 + M_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi(t - t_0)}{P} \right)$		
Adj. R-Square	0,967	0,997	
Temperatura	Parámetros	Valor	Error estándar
T_{X_1}	t_1	292,71	2,13
	P	445,53	0,07
	M_1	0,39	0,001
	T_1	40,37	0,001
T_{X_2}	t_2	103,13	0,67
	P	445,83	0,02
	M_2	1,11	0,001
	T_2	44,58	0,001

Tabla 5.4. Valores y errores estándar de los parámetros para el cálculo de difusividad térmica determinados a partir del ajuste no lineal.

Parámetro	A_1 (°C)	A_2 (°C)	Δt (s)	$ x_1 - x_2 $ (m)	R
Magnitud	0,39	1,12	189,56	0,015	2,84
iIncertidumbre	0,001	0,001	7,13	0,0001	0,006

Tabla 5.5. Se muestran los resultados de la difusividad térmica para la UB-IAA.

Frecuencia (μHz)	Periodo (min)	$\alpha \times 10^{-7}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$\pm u_\alpha \times 10^{-7}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
1111,1	15	5,67	0,46

Tabla 5.6. Muestra de UB-IAA para el ensayo de difusividad térmica, dimensiones y masa.

Muestra IAA unidad blanca	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Masa antes del ensayo (kg)	Masa después del ensayo (kg)	Ganancia de masa %
Bloque 1	4,3	20	0,370	0,372	0,54

Capítulo 5. Resultados y discusiones

Con respecto al ensayo, se debe tener presente que el laboratorio debe estar aislado del exterior, no abrir las ventanas para mejorar las condiciones en las mediciones, debido a que la temperatura en la base superior de la muestra debe ser aproximadamente igual a la temperatura en las cercanías del laboratorio.

Si se cuentan con más sensores de temperatura (termopares), se puede medir la temperatura en varios puntos y se puede medir la difusividad térmica en una mayor distribución de la muestra.

5.3. Caracterización estructural, morfológica y elemental

A continuación se tienen los resultados del difractograma para la UB-IAA.

DRX

La Figura 5.4. muestra el difractograma para la UB-IAA, donde se puede apreciar en los picos sus fases mas notorias. El valor del voltaje aplicado para acelerar los electrones y producir la emisión de rayos X fue de 40 KV y la corriente de 40 mA. El difractograma tomado en la muestra UB-IAA se realizó en un rango de 5° a 80° con un paso de $0,02^{\circ}$ y una duración de 20 min para todo el rango.

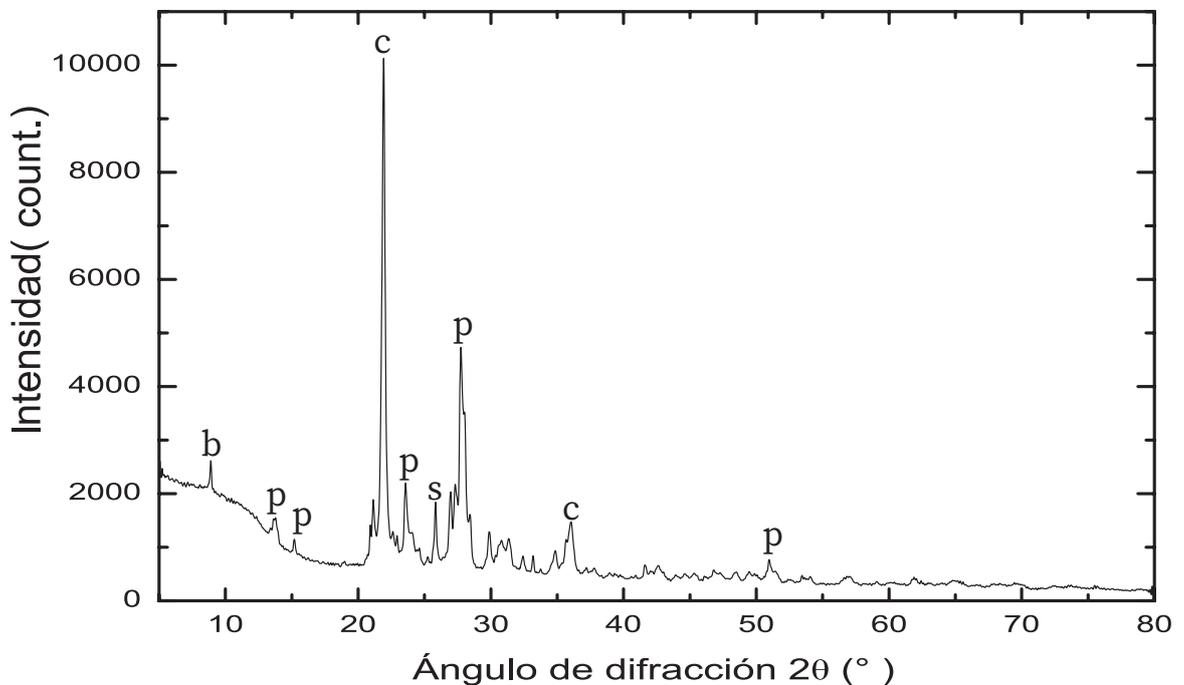


Figura 5.4. Difractograma para la UB-IAA, donde se muestran las fases mas representativas: cristobalita (c), biotita (b), sanidina (s) y plagioclasa (p). La anortita y albita presentes en la UB-IAA son plagioclasas.

Los ángulos de los principales picos de difracción, los índices de Miller y la distancia interplanar de los minerales presentes en el patrón de difracción de la UB-IAA se mostrarán a continuación.

Cristobalita presente en el patrón de Difracción de rayos X en la muestra de UB-IAA

A continuación se muestra la figura 5.5 que muestra el patrón de Difracción de rayos X de la UB-IAA analizado con el *software* Match 3! DRX y se encontró la cristobalita como uno de las fases, mineral óxido. Además, se muestra la tabla 5.7 con los principales picos de difracción, índices de Miller y distancia interplanar.

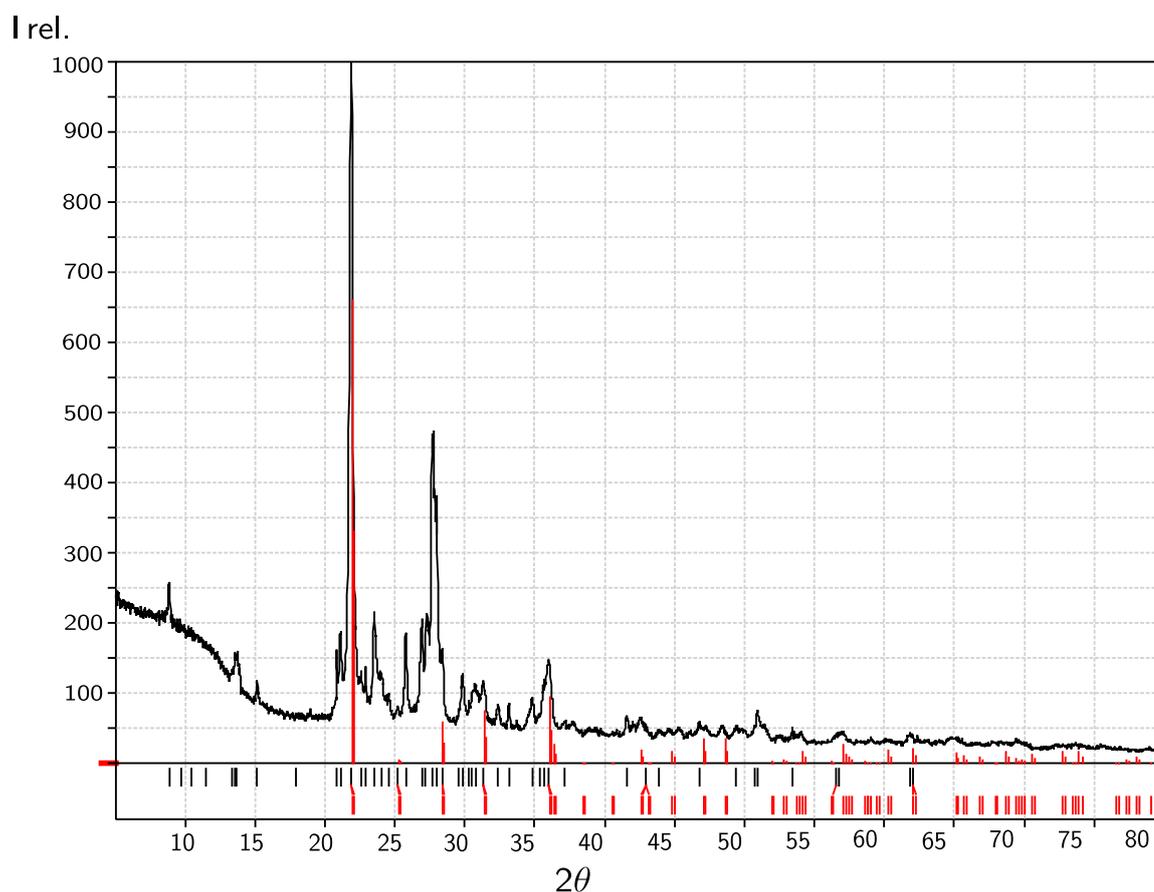


Figura 5.5. Cristobalita presente en el patrón de difracción de la muestra UB-IAA.

Tabla 5.7. Principales picos de difracción, índices de Miller y distancia interplanar de cristobalita en el patrón de difracción de rayos X de la UB-IAA.

2θ	21,90°	28,49°	31,46°	36,10°	47,07°	48,63°
hkl	101	111	012	200	113	212
d_{hkl}	4,04	3,13	2,84	2,49	1,93	1,87

Biotita presente en el patrón de difracción en la muestra de UB-IAA

A continuación se muestra la figura 5.6 que muestra el patrón de Difracción de rayos X de la UB-IAA analizado con el *software* Match 3! DRX y se encontró la biotita como uno de las fases, mineral filosilicato. Además, se muestra la tabla 5.8 con los principales picos de difracción, índices de Miller y distancia interplanar.

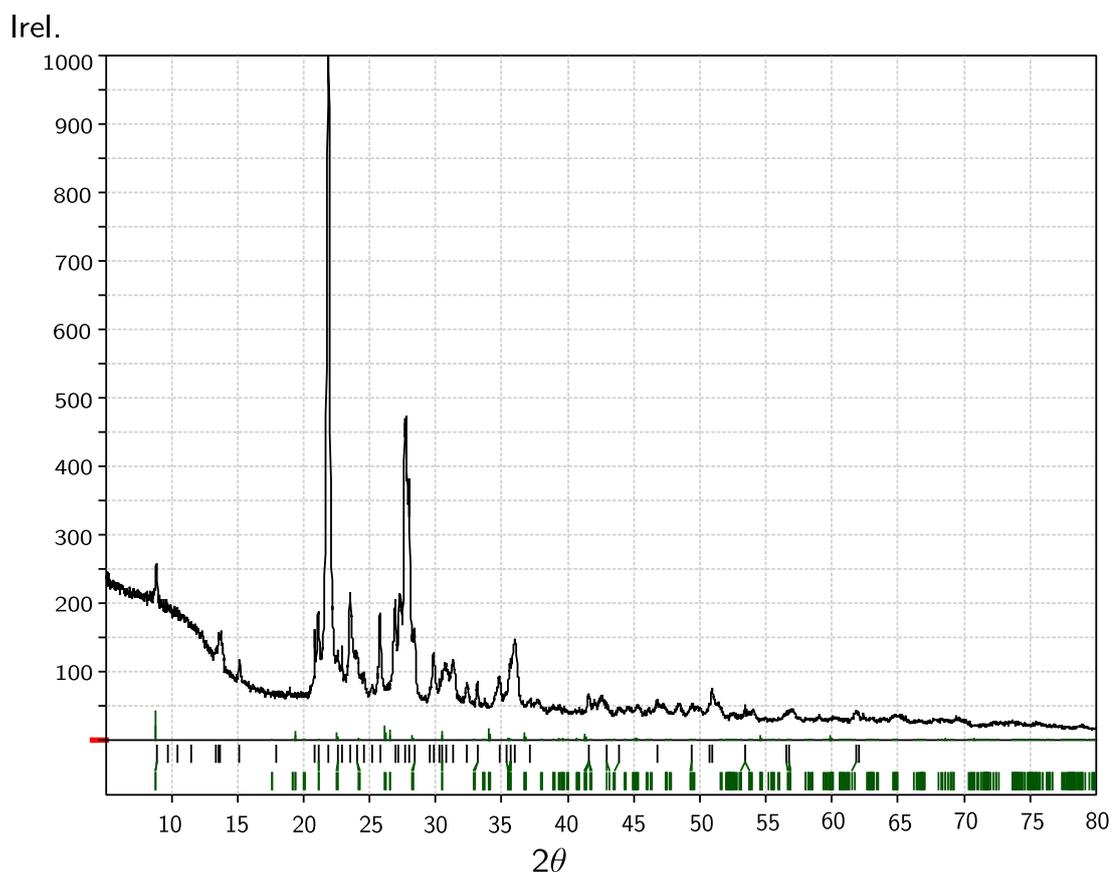


Figura 5.6. Biotita presente en el patrón de difracción de la muestra UB-IAA.

Tabla 5.8. Principales picos de difracción, índices de Miller y distancia interplanar de biotita en el patrón de difracción de rayos X de la UB-IAA.

2θ	8,81°	26,12°	26,55°	30,45°
hkl	001	113	022	003
d_{hkl}	10,02	2,93	3,41	3,36

Albita presente en el patrón de difracción en la muestra de UB-IAA

A continuación se muestra la figura 5.7 que muestra el patrón de Difracción de rayos X de la UB-IAA analizado con el *software* Match 3! DRX y se encontró la albita como uno de las fases, mineral tectosilicato. Además, se muestra la tabla 5.9 con los principales picos de difracción, índices de Miller y distancia interplanar.

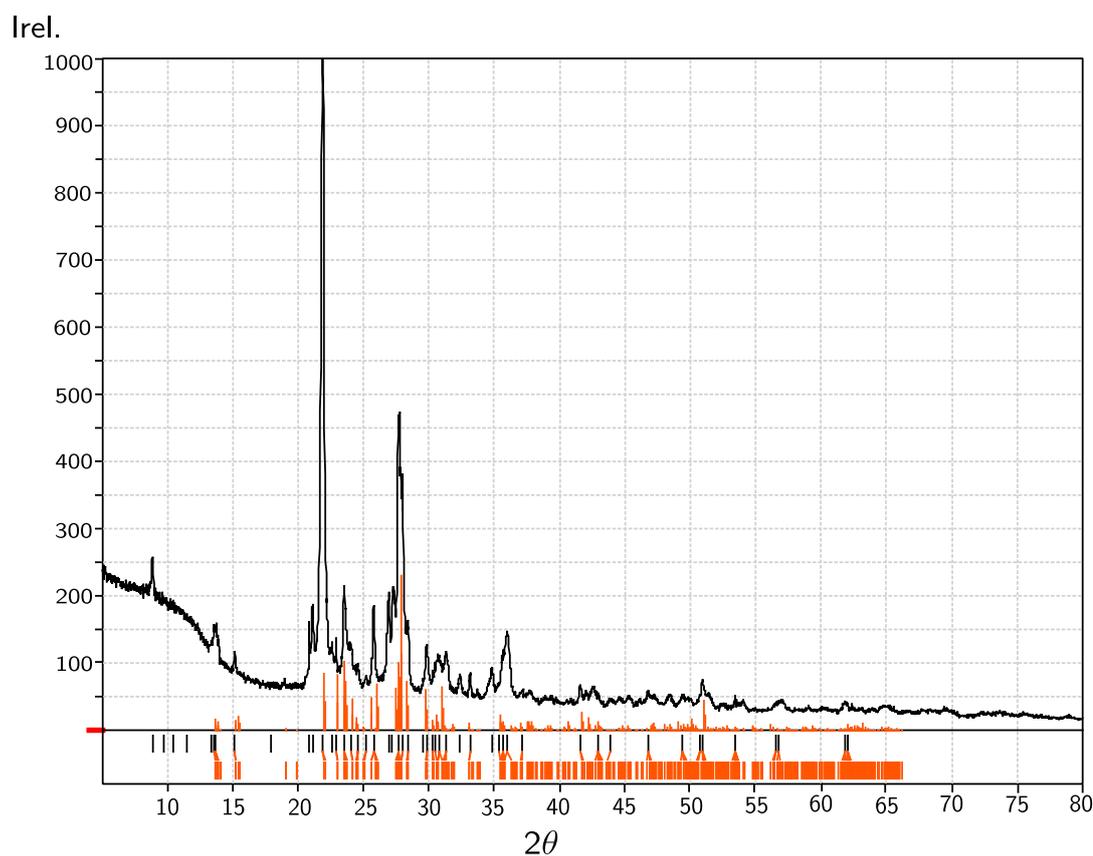


Figura 5.7. Albita presente en el patrón de difracción de la muestra UB-IAA.

Tabla 5.9. Principales picos de difracción, índices de Miller y distancia interplanar de albita en el patrón de difracción de rayos X de la UB-IAA.

2θ	22,01°	22,98°	23,51°	27,87°	29,87°	41,73°	51,02°
hkl	20-1	1-11	111	2-20	-13-1	060	17-1
d_{hkl}	4,03	3,87	3,78	3,20	3,00	2,16	1,79

Anortita presente en el patrón de difracción en la muestra de UB-IAA

A continuación se muestra la figura 5.8 que muestra el patrón de Difracción de rayos X de la UB-IAA analizado con el *software* Match 3! DRX y se encontró la anortita como uno de las fases, mineral tectosilicato. Además, se muestra la tabla 5.10 con los principales picos de difracción, índices de Miller y distancia interplanar.

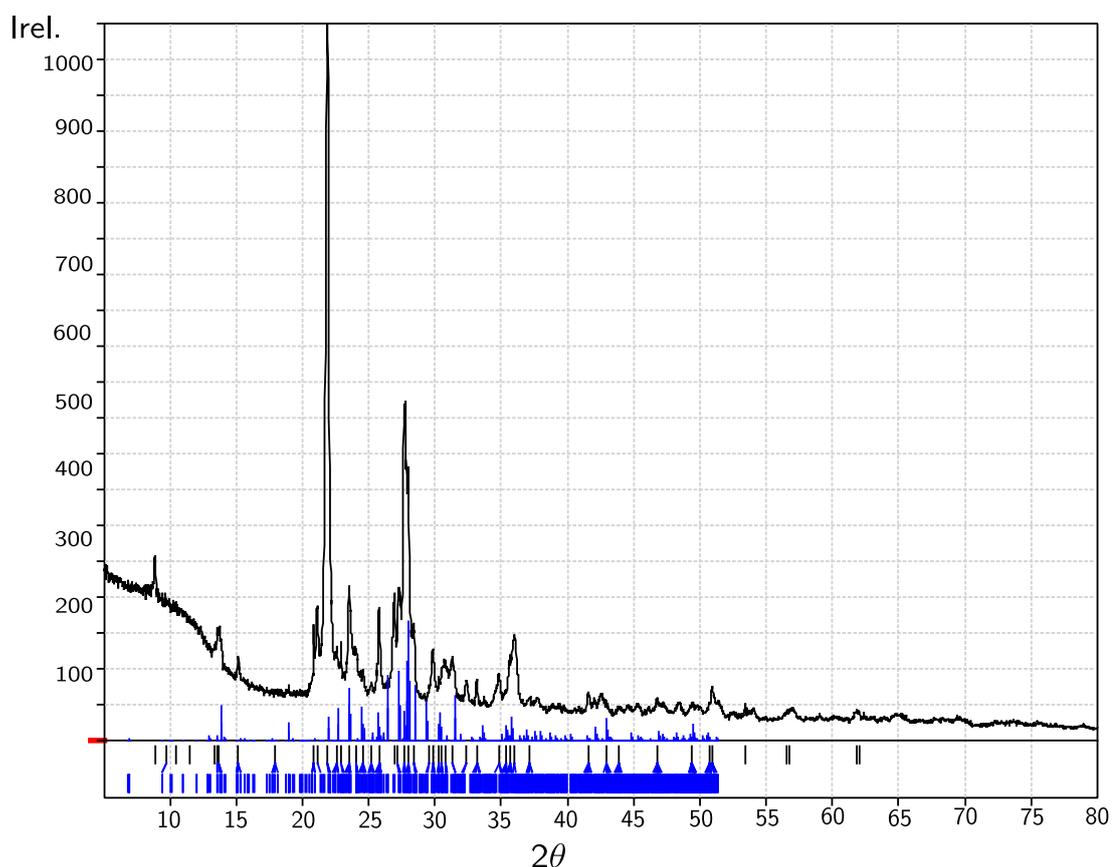


Figura 5.8. Anortita presente en el patrón de difracción de la muestra UB-IAA.

Tabla 5.10. Principales picos de difracción, índices de Miller y distancia interplanar de anortita en el patrón de dirección de rayos X de la UB-IAA.

2θ	13,88°	21,95°	22,66°	24,49°	27,30°	27,98°	31,47°
hkl	002	20-2	1-12	130	131	201	-142
d_{hkl}	6,37	4,05	3,90	3,63	3,26	3,19	2,84

Sanidina presente en el patrón de difracción en la muestra de UB-IAA

A continuación se muestra la figura 5.9 que muestra el patrón de Difracción de rayos X de la UB-IAA analizado con el *software* Match 3! DRX y se encontró la sanidina como uno de las fases, mineral tectosilicato. Además, se muestra la tabla 5.11 con los principales picos de difracción, índices de Miller y distancia interplanar.

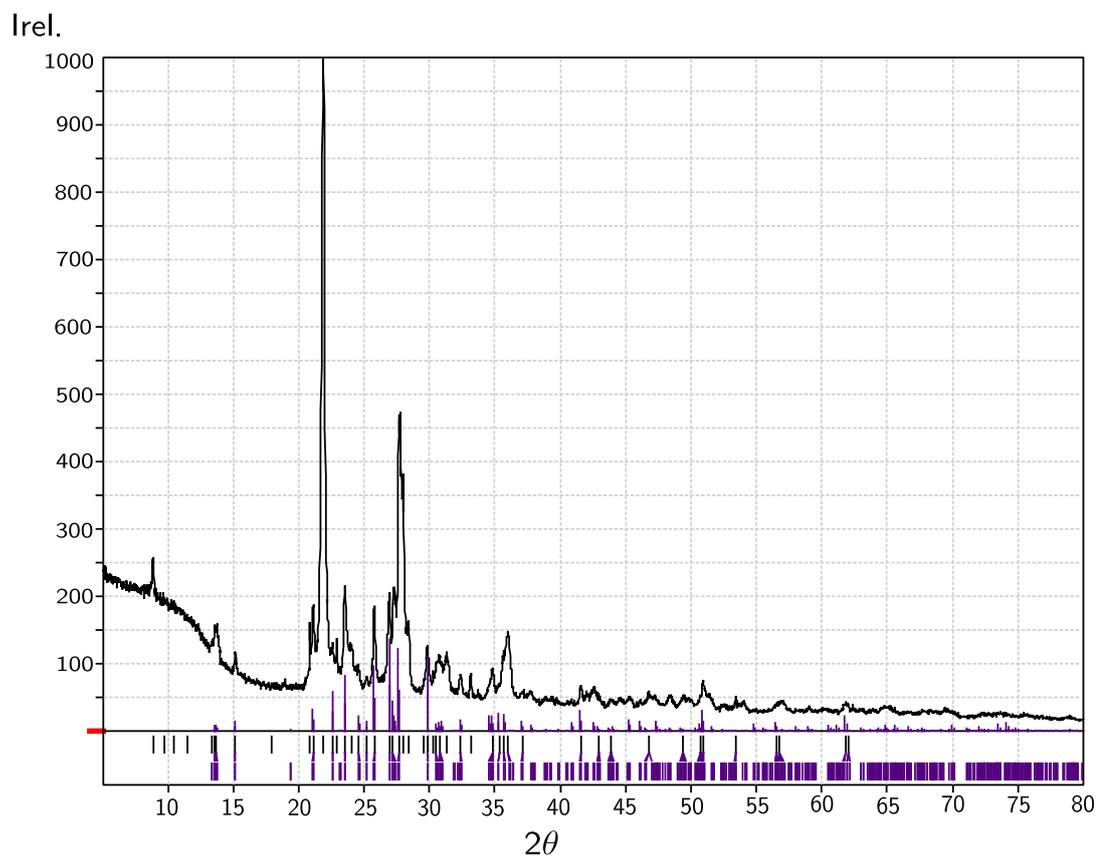


Figura 5.9. Sanidina presente en el patrón de difracción de la muestra UB-IAA.

Tabla 5.11. Principales picos de difracción, índices de Miller y distancia interplanar de sanidina en el patrón de difracción de rayos X de la UB-IAA.

2θ	22,62°	25,80°	29,90°	41,53°
hkl	111	-112	131	060
d_{hkl}	3,94	3,46	2,99	2,17

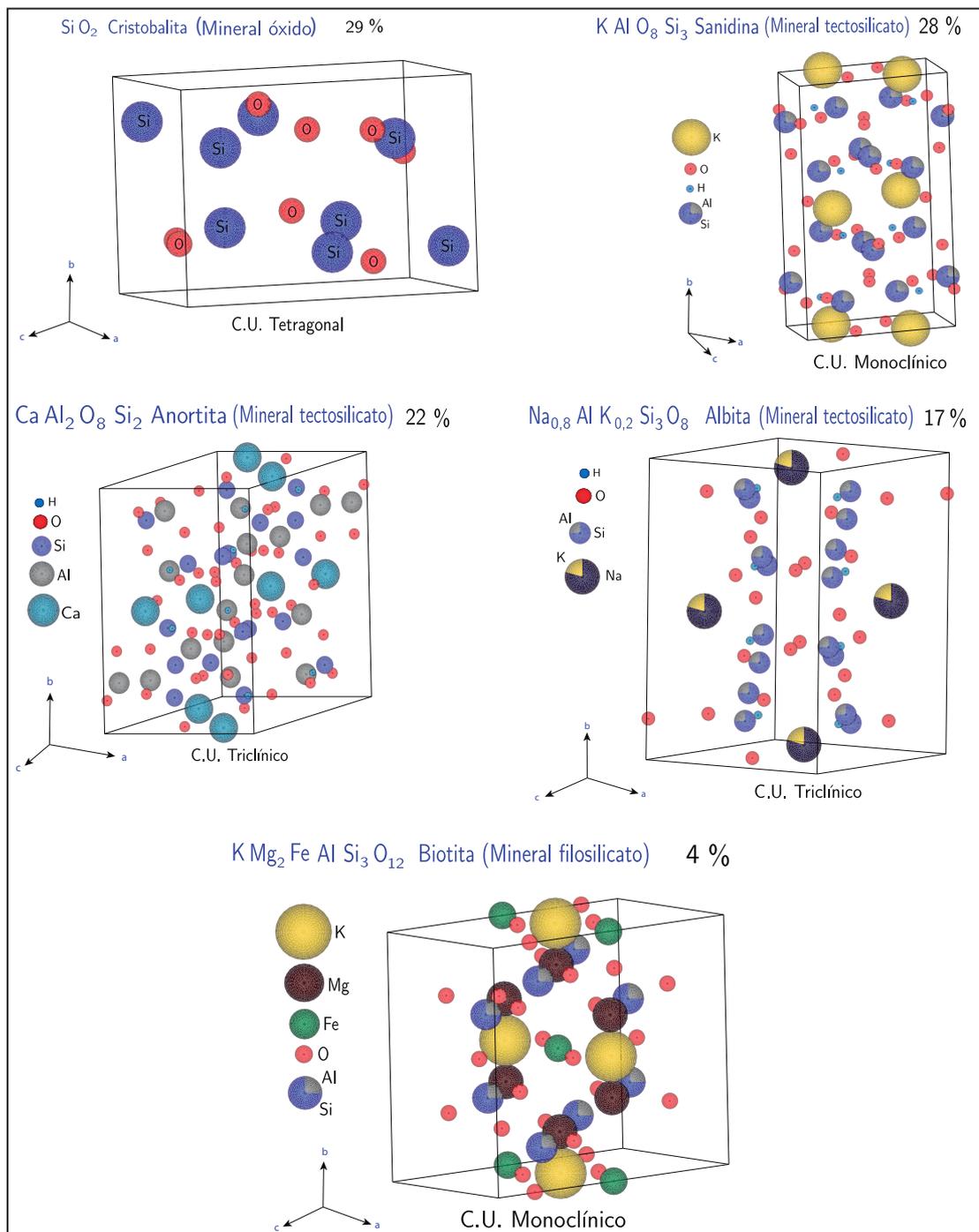


Figura 5.10. celda unitaria de los minerales presentes en el patrón de DRX de la UB-IAA y su contenido aproximado en % de peso.

Se identificaron con la base de datos del Match! los minerales: cristobalita, biotita, albita, anortita, sanidina. El componente prominente que presenta mayor intensidad en el patrón de difracción de la UB-IAA es la Plagioclasa, que es la albita y anortita. La plagioclasa se identificó de los dos minerales que lo conforman: Albita y anortita, que dependiendo del porcentaje en peso de los elementos en la plagioclasa tendrá su nombre respectivo. La albita es un feldespato que se encuentra dentro del grupo de los tectosilicatos al igual que la anortita, ambos compuestos por aluminio, silicio y oxígeno; la diferencia entre ambos es uno de sus componentes, la albita tiene sodio y la anortita, calcio, mas adelante con el ensayo de EDS se analizará el porcentaje en peso de los componentes. La albita y anortita (plagioclasa) presentan su pico de mayor intensidad en $2\theta = 27,87^\circ$, $2\theta = 27,98^\circ$ respectivamente, y se presentan en mayor o menor proporción como se indicó anteriormente.

La biotita es un mineral filosilicato compuesto por potasio, magnesio, hierro, aluminio, silicio y oxígeno; el pico de mayor intensidad que presenta en el patrón de difracción de la UB-IAA es $2\theta = 8,81^\circ$.

La cristobalita es un mineral óxido, y es una fase del óxido del silicio (SiO_2), dependiendo de su estructura puede ser cristobalita baja (tetragonal) y cristobalita alta (cúbico). En el patrón de difracción que se identificó en la base de datos, la UB-IAA contiene cristobalita baja (tetragonal) ya que es el pico que coincide con la base de datos. su pico de mayor intensidad que presenta es $2\theta = 21,90^\circ$.

La sanidina es un mineral tectosilicato compuesto por potasio, sodio, silicio, aluminio y oxígeno; el pico de mayor intensidad se presenta en $2\theta = 25,8^\circ$. Además, la dureza de todos estos minerales presentes tiene un valor en el rango de [2,5 a 7] en la escala de Mohs, lo que hace a la UB-IAA, un material de dureza media alta, lo que ha sido útil para las construcciones en la historia de Arequipa. Con el uso del *software* TOPAS se encontraron de los principales componentes (minerales) presentes su contenido en peso en la UB-IAA, los cuales fueron: : cristobalita 29 %, sanidina 28 %, anortita 22 %, albita 17 % y biotita 4 %.

MEB

A continuación se presentan las imágenes tomadas en el Microscopio Electrónico de Barrido y los resultados del área de los poros para una muestra UB-IAA. La muestra es de 1 cm x 1 cm. En su estructura interna se aprecian formas cristalinas debido a los minerales antes mencionados que lo conforman y se pueden observar los poros.

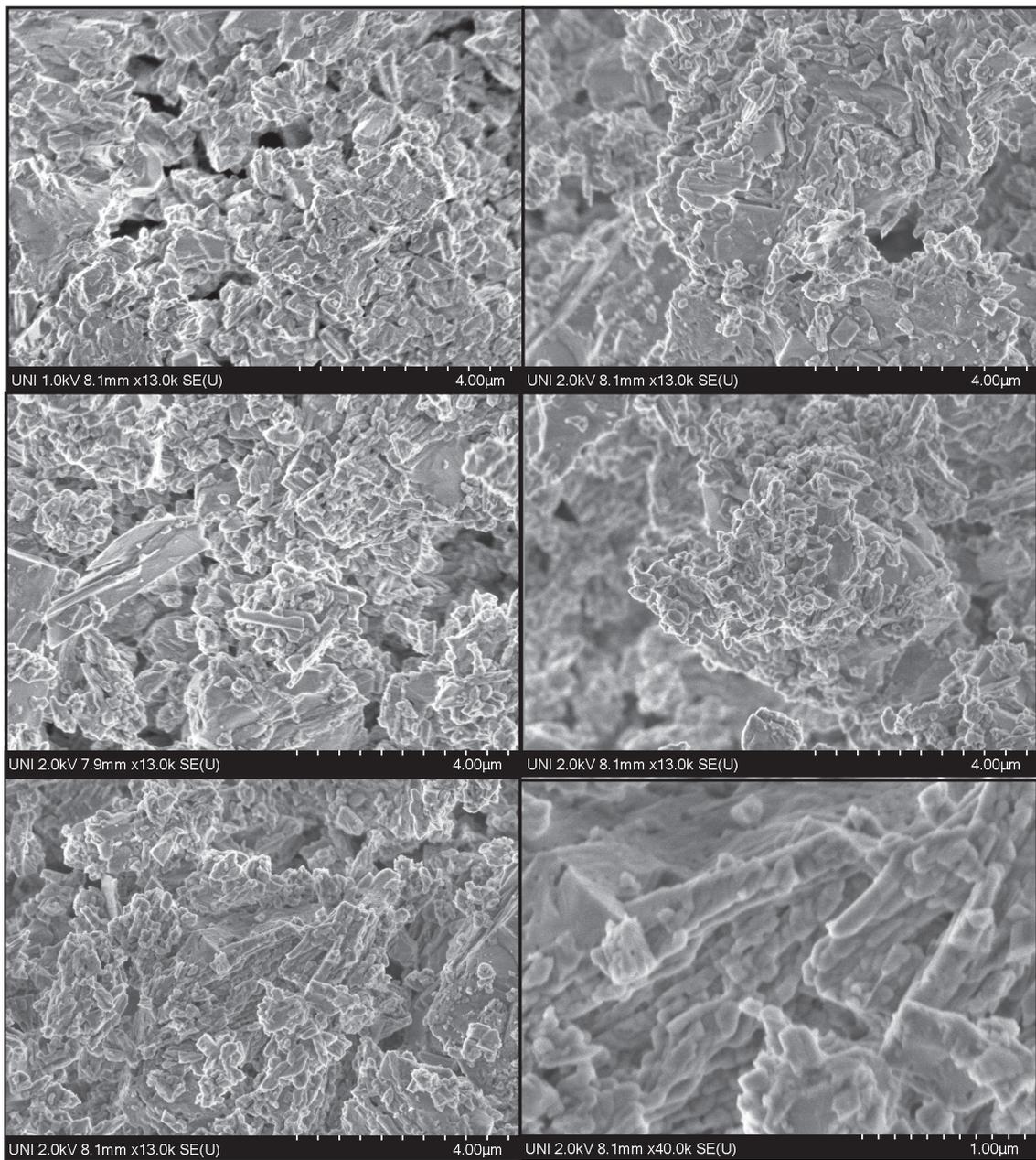


Figura 5.11. Imágenes tomadas por MEB, en las cuales se aprecia una morfología heterogénea y los poros.

Capítulo 5. Resultados y discusiones

A continuación se presentan las imágenes del ensayo elemental EDS de los elementos presentes en la muestra UB-IAA. En la figura 5.12 se aprecia que las imágenes EDS de los elementos oxígeno, aluminio y silicio coinciden, por lo que es muy probable que formen parte de un compuesto, en este caso un mineral por tratarse de la UB-IAA, de los resultados de los minerales identificados en el patrón de difracción de la UB-IAA, se concluyó que estos elementos pueden formar parte de la albita, anortita, biotita o sanidina.

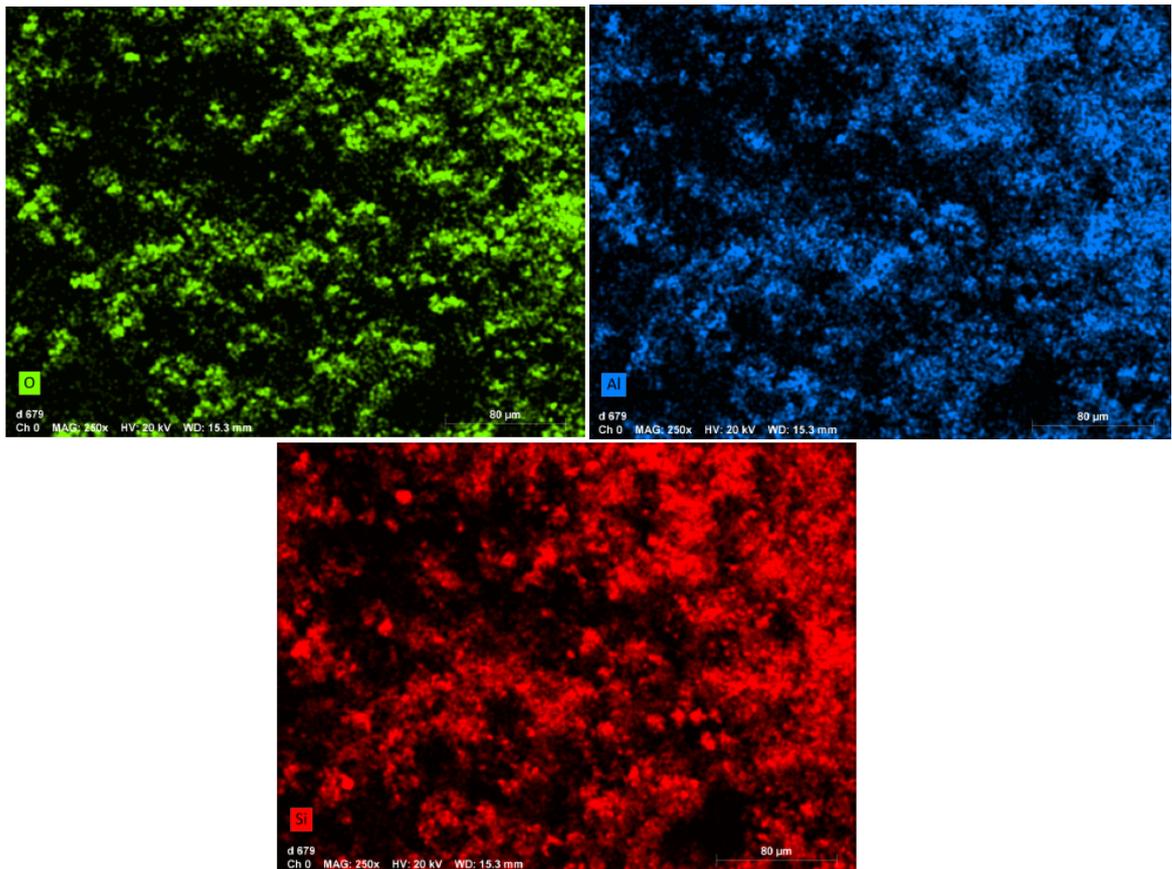


Figura 5.12. Imágenes EDS de la muestra UB-IAA donde se aprecian los elementos oxígeno, aluminio, silicio y carbono.

En la figura 5.13, de las imágenes EDS se aprecia que los elementos cloro y sodio presentan cierta coincidencia, por lo que es probable que formen parte de un compuesto (mineral), esto puede ser debido a que la UB-IAA es un adsorbente de líquidos y soluciones salinas o formar parte de la albita.

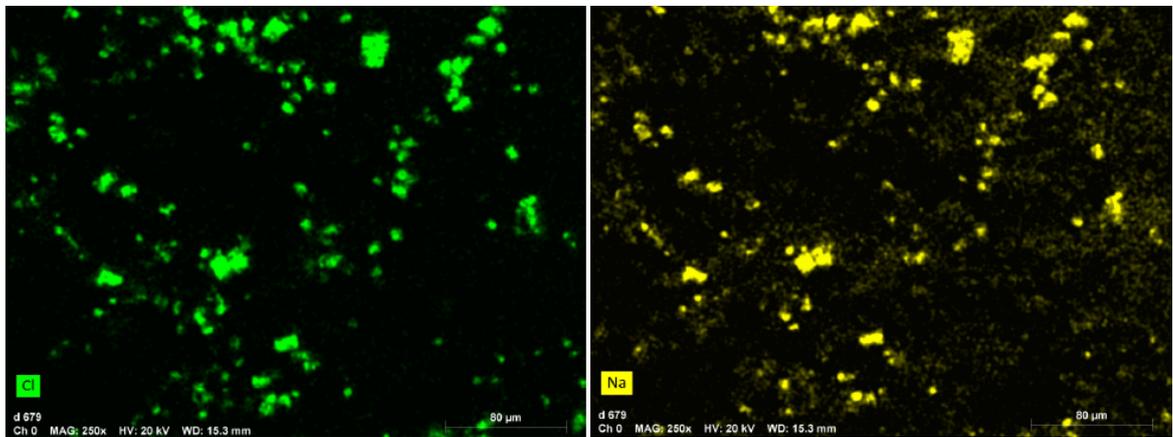


Figura 5.13. Imágenes EDS de la muestra UB-IAA donde se aprecian los elementos cloro y sodio.

Capítulo 5. Resultados y discusiones

En la figura 5.14, de las imágenes se aprecia cierta coincidencia de los elementos potasio, calcio y hierro, por lo que estos puede ser parte de un mineral; de los resultados de los minerales identificados en el patrón de difracción de la UB-IAA, se concluyó que estos elementos pueden formar parte de la biotita.

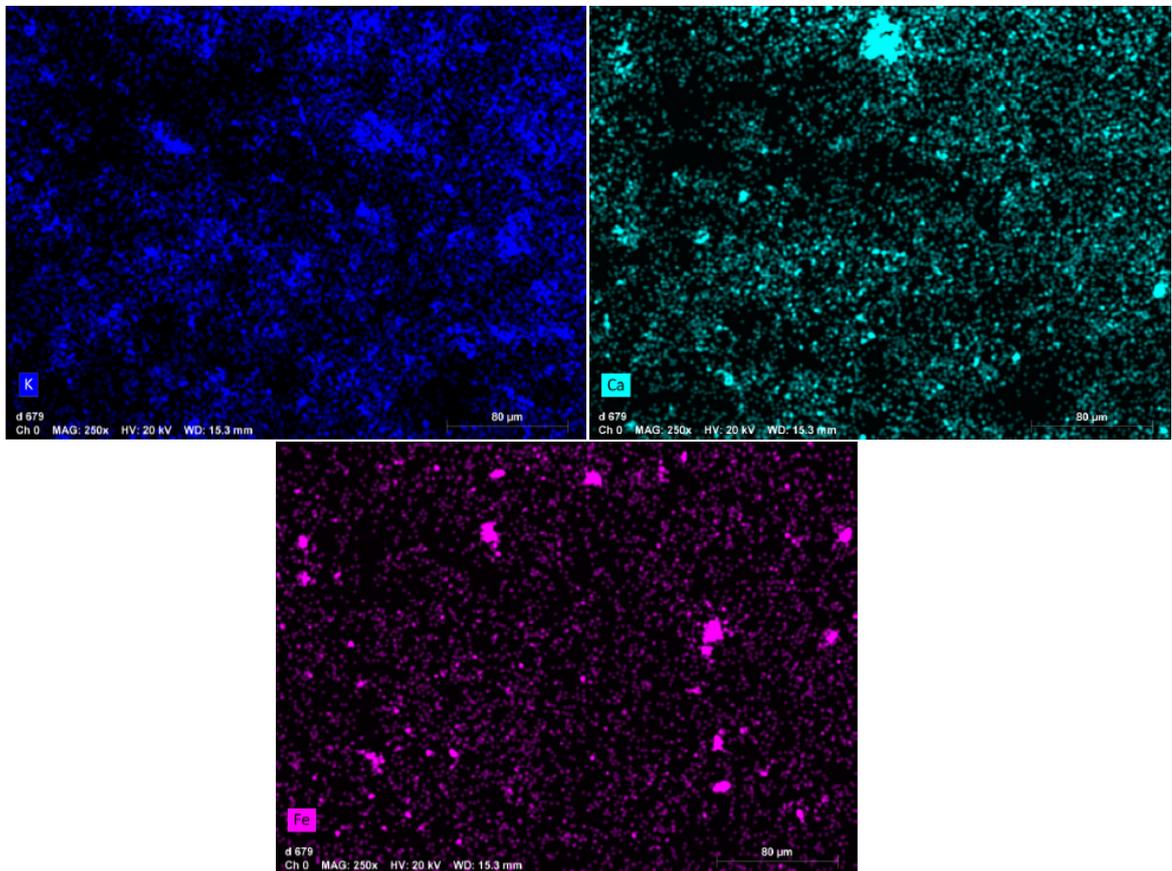


Figura 5.14. Imágenes EDS de la muestra UB-IAA donde se aprecian los elementos potasio, calcio y hierro.

En la figura 5.15, de las imágenes se aprecia cierta coincidencia de los elementos potasio, aluminio, oxígeno y silicio, por lo que estos puede ser parte de un mineral, como cristobalita y bitotita según los resultados de difracción. Por último en la figura 5.16 de las imágenes se aprecia cierta coincidencia de los elementos cloro, sodio (adsorción de soluciones salinas) o formar parte de la albita, y la imagen de la derecha presenta coincidencia de oxígeno, hierro que pueden formar parte de la biotita según los resultados de difracción.

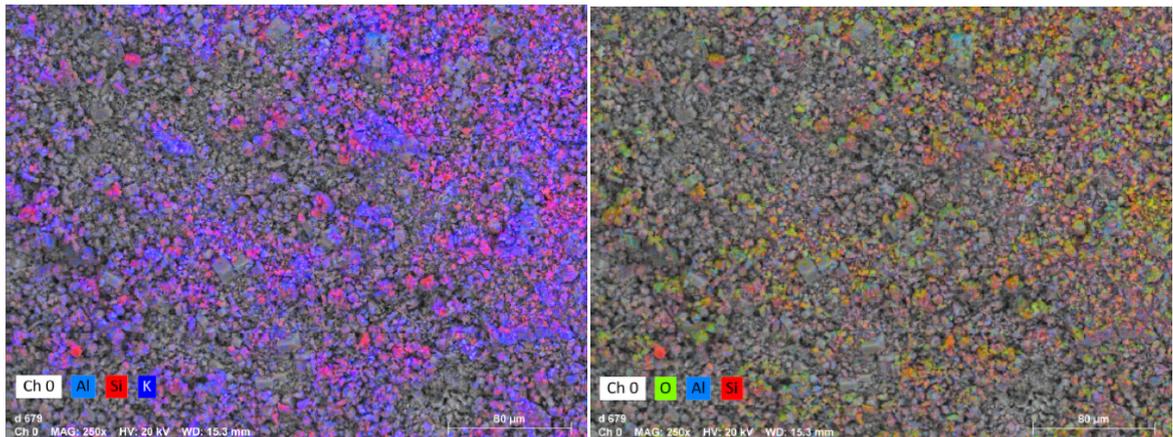


Figura 5.15. Imágenes EDS de la muestra UB-IAA donde se aprecian los elementos potasio, calcio y hierro.

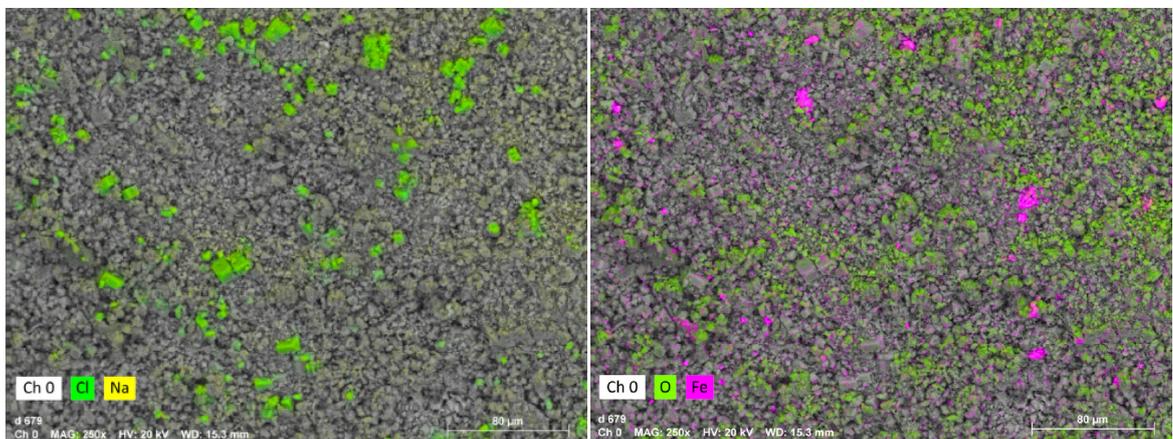


Figura 5.16. Imágenes EDS de la muestra UB-IAA donde se aprecian los elementos potasio, calcio y hierro.

EDS		DRX		
Elemento	~ % At	Mineral	~ % Peso	
O	51,16	Cristobalita SiO_2	29%	
Si	26,83	Sanidina KAlO_8Si_3	28%	
Na	7,12	Anortita $\text{CaAl}_2\text{O}_8\text{Si}_2$	22%	Plagioclasa 37%
Al	6,08	Albita $\text{Na}_{0,8}\text{AlK}_{0,2}\text{Si}_3\text{O}_8$	17%	
Cl	5,42			
K	1,81			
Ca	1,12	Biotita $\text{KMg}_2\text{FeAlSi}_3\text{O}_{12}$	4%	
Fe	0,46			

Figura 5.17. Resultados del estudio de EDS y DRX: Muestra UB-IAA con sus minerales identificados.

De los resultados de la figura 5.17, se observó que el mayor contenido en % de peso lo presenta la Plagioclasa. EL hierro se encuentra distribuido principalmente en óxidos y silicatos. Todos los elementos identificados en el EDS forman parte de los minerales identificados en el patrón de difracción de la UB-IAA.

5.4. Propiedades mecánicas

A continuación los resultados obtenidos de los ensayos clasificatorios para la UB-IAA, serán clasificados de acuerdo al RNE E 0.70. Albañilería.



Figura 5.18. Muestras de UB-IAA en el horno secándose a 110 °C.

Variación dimensional

Se realizó este ensayo de acuerdo a lo indicado en la NTP 399.613.

Se cortaron 9 muestras de UB-IAA en forma de paralelepípedo en el Laboratorio de Ensayos de Materiales (LEM) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de ingeniería utilizando un cortador con disco diamantado. Se midió el largo, ancho y la altura de las 9 muestras de UB-IAA desde los puntos medios empleando una regla milimétrica calibrada, se registró un total de 4 medidas por cada dimensión tomadas en caras distintas. se muestran en la tabla 5.12 los resultados de la medición de sus dimensiones, y los resultados de la variación dimensional en la tabla 5.13.

Tabla 5.12. Dimensionamiento de las 9 muestras de UB-IAA largo, ancho y altura en (cm).

N	Largo (cm)				Ancho (cm)				Altura (cm)			
	L_{m1}	L_{m2}	L_{m3}	L_{m4}	A_{m1}	A_{m2}	A_{m3}	A_{m4}	H_{m1}	H_{m2}	H_{m3}	H_{m4}
1	26,2	26,3	26,5	26,4	16,6	16,2	16,1	16,4	15,3	15,5	15,7	15,2
2	26,6	26,3	26,3	26,4	16,3	16,2	16,3	16,3	15,1	15,4	15,5	15,1
3	27,1	27,4	27,3	27,1	16	16,7	16,8	16,2	15,8	15,4	15,5	15,6
4	26,3	26,3	26,7	26,7	16,6	16,3	16,5	16,4	15,6	16	15,8	15,8
5	26,2	26,4	26,1	26,1	16,5	16,6	16,7	16,3	15,5	15,7	15,5	15,6
6	26,3	26,2	26,5	26,5	16,5	16,5	16,1	16,3	15,8	15,7	15,8	15,9
7	26,4	26,6	26,5	26,5	16,4	16,3	16,2	16,5	15,8	15,9	15,7	15,8
8	26,6	26,5	26,5	26,5	16,2	16,3	16,2	16,1	15,8	15,6	15,5	15,9
9	26,4	26,4	26,8	26,8	16,1	16,1	16	16,1	15,5	15,9	15,1	16

Tabla 5.13. Resultados de la variación dimensional de las 9 muestras de UB-IAA.

Nº	L_{mprom} (cm)	V_d %	A_{mprom} (cm)	V_d %	H_{mprom} (cm)	V_d %
1	26,4	0,57	16,3	1,06	15,4	0,48
2	26,4	0,38	16,3	1,36	15,3	1,45
3	27,2	2,74	16,4	0,45	15,6	0,48
4	26,5	0,00	16,5	0,30	15,8	1,94
5	26,2	1,13	16,5	0,15	15,6	0,48
6	26,4	0,47	16,4	0,91	15,8	1,94
7	26,5	0,00	16,4	0,91	15,8	1,94
8	26,5	0,09	16,2	1,82	15,7	1,29
9	26,6	0,38	16,1	2,58	15,6	0,81
		0,64		1,06		1,20

Alabeo

Se realizó este ensayo de acuerdo a lo indicado en la NTP 399.613. Para las caras con mayor alabeo, es decir, mayor grado de concavidad y alabeo. Se midieron la concavidad y convexidad para las 9 muestras de UB-IAA que se emplearon para la medición de variación dimensional. Para medir la concavidad colocando la regla milimétrica en las diagonales e introduciendo la cuña se obtuvo mayor concavidad con respecto a la longitudinal. Para medir la convexidad se acomodó la regla hasta que las medidas de los extremos sean iguales y se midió cerca a los dos extremos de cada diagonal, introduciendo luego la cuña. Los resultados de la medición de alabeo para la concavidad y convexidad de las unidades de UB-IAA se muestran en las tablas 5.14, 5.15 respectivamente.

Tabla 5.14. Resultados de la medición de concavidad de las 9 muestras de UB-IAA.

N°	Concavidad del plano superior (mm)		Máx (mm)	Concavidad del plano inferior (mm)		Máx (mm)
	d_1	d_2		d_3	d_4	
1	0	1	1	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	1	1	1	1	0	1
4	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	1	1	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	1	1	0	0	0
	Promedio		0,56	Promedio		0,33

Tabla 5.15. Resultados de la medición de convexidad de las 9 muestras de UB-IAA.

N°	Convexidad del plano superior (mm)				Máx (mm)	Convexidad del plano inferior (mm)				Máx (mm)
	d_{11}	d_{12}	d_{21}	d_{22}		d_{31}	d_{32}	d_{41}	d_{42}	
1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
3	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1
4	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
5	0	0	2	2	2	0	1	1	0	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1
8	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1
9	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1
	Promedio				1	Promedio				0,67

Resistencia a la compresión

Se realizó este ensayo de acuerdo a lo indicado en la NTP 399.613 y 339.064 para determinar la máxima carga que puede soportar una unidad albañilería. Se ensayaron 4 muestras de UB-IAA para estudiar las características que presenta en comparación a las unidades de albañilería. Las 47 muestras se secaron en el horno a una temperatura 110 °C, luego se realizó el capeado o refrentado a las caras se escogieron par estar en contacto con las cargas, el capeado se realizó con una mezcla de yeso cemento con una relación de 1 : 2 y suficiente agua, se dejó secar más de 24 h y se colocó el espécimen en la máquina de compresión y se registró la carga que produjo el fisuramiento. En las tablas 5.16 y 5.17 se registraron los resultados de las dimensiones de las muestras con capeado y el resultado de resistencia a la compresión.

Tabla 5.16. Dimensionamiento de las 5 muestras de UB-IAA que fueron escogidos para el ensayo de resistencia a la compresión a la unidad y con capeado de yeso y cemento en la relación 1:2 respectivamente.

N°	Dimensionamiento					
	Cara superior (cm)		Cara inferior (cm)		Altura (cm)	
	L_{m1}	A_{m1}	L_{m2}	A_{m2}	H_{m1}	H_{m2}
1	26,5	16,3	26,3	16,2	15,3	15,4
2	26,4	16,4	26,4	16,2	15,4	15,4
3	27,1	16,4	27,2	16,4	15,6	15,5
4	26,4	16,5	26,5	16,4	15,6	15,6
5	26,3	16,4	26,2	16,5	15,6	15,5



Figura 5.19. Máquina de compresión uniaxial, ubicada en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI, ensayo para la UB-IAA.

Tabla 5.17. Resultados de la resistencia a la compresión para la UB-IAA.

N°	L_{mprom} (cm)	A_{mprom} (cm)	H_{mprom} (cm)	Área bruta A_b (cm ²)	Carga máx W		f'_b	
					kg	N	kg·cm ⁻²	MPa
1	26,4	16,3	15,4	430,32	35906	352238	90,7	9,1
2	26,4	16,3	15,4	430,32	37884	371642	95,7	9,6
3	27,2	16,4	15,6	446,08	35067	344007	85,4	8,5
4	26,5	16,5	15,6	437,25	31773	311693	79	7,9
5	26,3	16,5	15,6	433,95	41687	408949	104,4	10,4
Promedio							91	9,1

- Para la variación dimensional en la altura de la UB-IAA se obtuvo el valor de 1,20 %, según la tabla 4.7 presenta una característica similar a la clase de ladrillo tipo V.
- Para la variación dimensional en el ancho de la UB-IAA se obtuvo el valor de 1,06 %, según la tabla 4.7 presenta una característica similar a la clase de ladrillo tipo V
- Para la variación dimensional en la altura de la UB-IAA se obtuvo el valor de 0,64 %, según la tabla 4.7 presenta una característica similar a la clase de ladrillo tipo V
- El valor máximo de alabeo que se obtuvo es de 1 mm, según la tabla 4.7 presenta una característica similar a la clase de ladrillo tipo V.
- En la medición de la resistencia a la compresión de la UB-IAA se obtuvo el valor de 91 kg·cm⁻², según la tabla 4.7 presenta una característica similar a la clase de ladrillo tipo II.

Absorción de humedad en 24 h

Se realizó este ensayo de acuerdo a la NTP 339.613. Se secaron 4 muestras de UB-IAA en el horno a 110 °C y se registró el peso, se sumergieron parcialmente (inmersión) en un recipiente con agua destilada hasta la mitad de la altura del espécimen durante 24 h, se retiró cada muestra y se eliminó el agua superficial utilizando un paño y luego se registró el peso de cada espécimen. En la tabla 5.18 se registró la absorción en 24 h promedio de la UB-IAA.

Tabla 5.18. Resultados de la absorción saturado 24 h para la UB-IAA.

N°	Pesos de los especímenes			Absorción %
	Peso 24 h (g)	W_s Peso seco constante (g)	W_d Peso saturado 24 h (g)	
1	9370.3	9370,2	11368,7	21,3
2	9864.3	9864,2	11502,0	16,6
3	10135.6	10135,6	11454,0	13,0
4	9439.5	9439,4	11115,3	17,8
			Promedio	17,2

En la tabla 5.18, se obtuvo que el valor promedio de absorción es 17,2% inferior a 22%, valor máximo para unidades de arcilla y unidades sílico - calcáreas, con lo cual presenta características similares a las unidades de albañilería resistentes al intemperismo [41].

Tabla 5.19. Clasificación de los resultados para la UB-IAA como clase de unidad de albañilería para fines estructurales.

Ensayo		Clase						
		Ladrillo					Bloque	
		I	II	III	IV	V	P (1)	NP (2)
Variación dimensional (máxima en %)	Hasta 100 mm	8	7	5	4	3	4	7
	Hasta 150 mm	6	6	4	3	2	3	6
	Más de 150 mm	4	4	3	2	1	2	4
Alabeo (máximo en mm)		10	8	6	4	2	4	8
Resistencia a la Compresión f'_b mínimo en ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$) sobre área bruta		50	70	95	130	180	50	20
Absorción %		< 22						

Capítulo 6

Conclusiones

- Se determinó la medida de conductividad térmica para una muestra de UB-IAA y se obtuvo un valor de $0,270 \pm 0,029 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.
- Se determinó la difusividad térmica de una UB-IAA y se obtuvo un valor de $(5,67 \pm 0,46)\times 10^{-7} \text{ (m}^2\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$.
- A partir de los resultados de difracción de rayos X (DRX) se determinaron los principales componentes (minerales) presentes y su contenido en peso en la UB-IAA, los cuales fueron: : cristobalita 29 %, sanidina 28 %, anortita 22 %, albita 17 % y biotita 4 %.
- Los principales elementos químicos encontrados en la muestra de UB-IAA según espectroscopia de energía dispersiva (EDS) y su contenido en % At fueron: oxígeno 51,16 %, silicio 26,86 %, sodio 7,12 %, aluminio 6,08 %, cloro 5,42 %, potasio 1,81 %, calcio 1,12 % y hierro 0,46 %.
- La muestra de la UB-IAA es porosa y de estructura heterogénea lo que se puede observar de los resultados obtenidos de las imágenes del MEB.
- Se determinó el valor de la resistencia a la compresión de la UB-IAA y se obtuvo un valor promedio de $91 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$.
- De los resultados de las propiedades mecánicas como unidad de albañilería, se concluyó que la muestra de UB-IAA presenta propiedades que corresponden a un ladrillo tipo II según el RNE E 0.70.
- Se determinó el valor del porcentaje de absorción de humedad en 24 h para la UB-IAA, se obtuvo el valor promedio de 17,2 % adecuado para usar en la intemperie según el RNE E 0.70.
- Debido a sus propiedades térmicas y mecánicas se presentan como una opción adecuada para su uso en zonas Altoandinas. Comparando el adobe con la UB-IAA, los valores de la conductividad térmica y resistencia a la compresión del adobe reportados en la tesis de título profesional de Mc Joshua Piñas [28] fueron: $0,371 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ y $24,44 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$

Capítulo 6. Conclusiones

respectivamente, siendo la UB-IAA ligeramente un mejor aislante térmico y con mejores propiedades mecánicas.

Referencias

- [1] P. Paquereau, J. Thouret, G. Wörner, and M. Fornari, "Neogene and quaternary ignimbrites in the area of arequipa, southern peru: Stratigraphical and petrological correlations," *Journal of Volcanology and Geothermal*, vol. 150, 2006.
- [2] G. J. C. Neyra, "Percepción de los cortadores de ignimbrita de la quebrada de añashuayco como patrimonio cultural, distrito de cerro colorado - arequipa." Univeridad Nacional de San Agustín de Arequipa: Repositorio de Tesis UNSA, 2017.
- [3] J. L. Galindo, "Proyecto de investigación de albañilería "Ensayos de albañilería en sillar"." Pontificia Universidad Católica del Perú: Repositorio de Tesis PUCP, Lima, 1988.
- [4] D. del Pueblo, "Defensoría del pueblo pide reformulación de la intervención estatal para garantizar la protección efectiva de la población en las zonas rurales." <https://www.defensoria.gob.pe/wp-content/uploads/2018/07/19.-Heladas-y-friaje.pdf>, 2018. Accedido: 26-08-2019.
- [5] E. Comercio, "En puno el 60% de cabezas de ganado sufren las consecuencias de las nevadas." <https://elcomercio.pe/peru/puno/puno-60-cabezas-ganado-sufren-consecuencias-nevada-fotos-noticia-539416>, 2018. Accedido: 26-08-2019.
- [6] P. el Consejo de Ministros, "Plan multisectorial ante heladas y friaje 2018.." http://www.pcm.gob.pe/wp-content/uploads/2018/04/Plan_Multisectorial_Heladas_Friaje-2018.pdf, 2018. Accedido: 19-09-2019.
- [7] A. Luchetti, D. Gravley, A. Gualda, and A. Nardy, "Textural evidence for high-grade ignimbrites formed by low-explosivity eruptions, paraná magmatic province, southern brazil," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2017.
- [8] A. Pola, J. Martinez, J. Macías, N. Fusi, G. Crosta, V. Garduño, and J. Nuñez, "Geomechanical characterization of the miocene cuitzeo ignimbrites, michoacán, central mexico," *Engineering Geology*, vol. 214, pp. 79–93, 2016.
- [9] "Estudio estratigráfico y de volcanología física de la ignimbrita pudahuel (chile)." Repositorio Universidad de Chile UC, 2012.
- [10] K. Ulamis, P. Bilgehan, and K. c, "Thermal conductivity variation of ignimbrites based on index properties," *V. Global Stone Congress*, 2014.

REFERENCIAS

- [11] J. Llanque, "Arquitectura bioclimática." Universidad Nacional de San Agustín, 2000.
- [12] R. Alonso, "Ignimbrita o sillar: Una roca de construcción ecológica [entrada de blog]." <http://danielsalmoral.com/2016/04/23/ignimbrita-o-sillar-una-roca-de-construccion-ecologica-por-ricardo-alonso/>, 2016. Accedido: 26-08-2019.
- [13] P. M. Vilca, "Estudio geológico y análisis estructural de la veta el cofreparatia - provincia de lampa, departamento de puno." Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa: Repositorio de Tesis UNSA, 2016.
- [14] L. Herrera, E. Montalvo, and K. Rodríguez, "Evaluación del desempeño térmico del sillar (ignimbrita) de arequipa," *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, vol. 22, 2019.
- [15] INEI, "Características de las viviendas particulares y los hogares." https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1538/Libro.pdf, 2017. Accedido: 26-08-2019.
- [16] W. F. Jenks, "Notas acerca de la geología de la región de arequipa." Universidad San Agustín de Arequipa, 1945.
- [17] C. N. Fenner, "Geología de los alrededores de arequipa." Reverté, 1940.
- [18] V. Zorrilla and L. Carrauri, "El sillar como material de construcción." Universidad Nacional de Ingeniería: Lima, 1996.
- [19] A. Bustamante, F. Capel, F. Barba, P. Callejas, R. Guzmán, and A. Trujillo, "Mössbauer studies of raw materials from misti volcano of arequipa (peru) for its potential application in the ceramic field," *Springer Science + Business Media B.V.*, 2009.
- [20] J. Ramos, "Arequipa: Hace 115 años empezó a construirse mercado san camilo." <https://diariocorreo.pe/edicion/arequipa/hace-115-anos-empezo-a-construirse-mercado-638641/f>, 2015. Accedido: 02-12-2019.
- [21] J. Mazzotti, "Centro histÓrico de arequipa la ciudad blanca." https://www.viaja-peru.com/guia-viajes/arequipa_centro_historico.htm. Accedido: 02-12-2019.
- [22] Aqplink, "Monumental puente bolognesi." <https://www.pinterest.com/pin/40743571604574802/?lp=true>. Accedido: 02-12-2019.
- [23] A. tradicional, "El monasterio de santa rosa." <http://arequipatradicional2.blogspot.com/2017/08/el-monasterio-de-santa-rosa.html>, 2017. Accedido: 02-12-2019.
- [24] Olebu, "Teatro municipal de arequipa." <http://www.olebu.com/pe/teatro-municipal-de-arequipa-184>. Accedido: 02-12-2019.

REFERENCIAS

- [25] P. en videos, "La casa del moral, el monumento más antiguo de arequipa." <https://www.peruenvideos.com/casa-moral-monumento-antiguo-arequipa/>.
Accedido: 02-12-2019.
- [26] J. Cengel, "Transferencia de calor y masa." Mc Graw Hill, 2007.
- [27] P. Alazate, J. Montes, and C. Silva, "Medición de temperatura: sensores termoeléctricos," *Scientia et Technica*, 2007.
- [28] J. M. P. Moya, "Estudio de las propiedades térmicas, mecánicas, morfológicas y estructurales del adobe como material biocompósito." Univeridad Nacional de Ingeniería: Repositorio de Tesis UNI, 2018.
- [29] L. L. Cortéz and E. M. Lango, "Medición de la conductividad térmica de materiales aislantes en CENAM. encuentro nacional de metrología eléctrica." CENAM: Santiago de Querétaro, México, 2007.
- [30] L. L. Cortéz and E. M. Lango, "Diseño del sistema de medición de conductividad térmica de materiales de construcción. memorias del simposio de metrología eléctricas." CENAM: Santiago de Querétaro, México, 2010.
- [31] W. N. dos Santos, J. N. dos Santos, P. Mummery, and A. Wallwork, "Thermal diffusivity of polymers by modified angström method. polymer testing," *Elsevier*, 2009.
- [32] Y. Zhu, "Heat-loss modified angstrom method for simultaneous measurements of thermal diffusivity and conductivity of graphite sheets: The origins of heat loss in angstrom method," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 92, p. 784–791, 2015.
- [33] I. Chino and A. Gutarra, "Propiedades mecánicas y térmicas de adobes compactados," *XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXIV- SPES)*, pp. 13–17, 2017.
- [34] L. Ventura, "Medición de difusividad térmica de 12 especies de maderables: Repositorio proyecto de tesis uni," pp. 7–13, 2017.
- [35] C. Kittel, "Introducción al estado sólido." New York: Wiley, 1996.
- [36] J. Cengel, "Elements of x- ray diffraction." Massachus: Addison-Wesley, 1978.
- [37] W. Callister, "Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales." Mc Graw Hill, 1995.
- [38] E. Fernández and A. Warley, "Electron probe x-ray microanalysis for the study of cell physiology," 2008.
- [39] M. Scimea, A. Orlandi, I. Terrenato, S. Bischetti, and E. Bonanno, "Assessment of metal contaminants in non-small cell lung cancer by edx microanalysis," 2014.
- [40] Comité NTE, "Norma técnica E.070 albañilería," 2006.
- [41] A. V. Torre and J. Arrieta, "Ensayos en materiales de construcción procedimientos." Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Civil.

Anexos

Anexo A

Medida intercomparativa de conductividad térmica para la totora

En el anexo N° 2 en la tesis de grado de Mc Joshua Piñas Moya [28], se determinó la conductividad térmica de la totora que se llevo a cabo con el aparato patrón de conductividad térmica APCG basado en la norma ASTM C 177 en el Centro Nacional de Metrología de México (CENAM).

las placas del APCG del CENAM son de cobre, el diámetro de la zona de medición es 15,0 cm y el diámetro externo de la zona de guarda es 30,5 cm.

Los resultados de la medición de conductividad térmica con el APCG del CENAM para la totora de dimension 25,0 cm x 25,0 cm x 2,412 cm se muestra a continuación.

Tabla A.1. Resultados del ensayo de medición de la conductividad térmica de la totora medido con el equipo patrón APCG del CENAM.

Parámetro Físico	Q (W)	A ($10^{-2}m^2$)	e ($10^{-2}m$)	ΔT (K)	λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Magnitud	1,40	2,145	2,412	13,77	0,045
				Incertidumbre	0,002

Para realizar una medida intercomparativa, las dos muestras de totora que se empleó en el CENAM se trajeron al laboratorio de Ingeniería Física en la Universidad Nacional de Ingeniería para determinar su conductividad térmica empleando el equipo medidor de conductividad térmica LAMBDA - UNI.

Anexo A. Medida intercomparativa de conductividad térmica para la totora

- **Toma 7 (02/10/2019-03//2019):** Ensayo de medición de conductividad térmica de la totora con dimension de 25,0 cm x 25,0 cm x 2,412 cm empleando el equipo LAMBDA-UNI. Se muestra en la Fig A.1 un gráfico del comportamiento de la temperatura promedio de la placa caliente en la zona central, guarda, frías y potencia eléctrica vs el tiempo. El ensayo se realizó en 16 h.

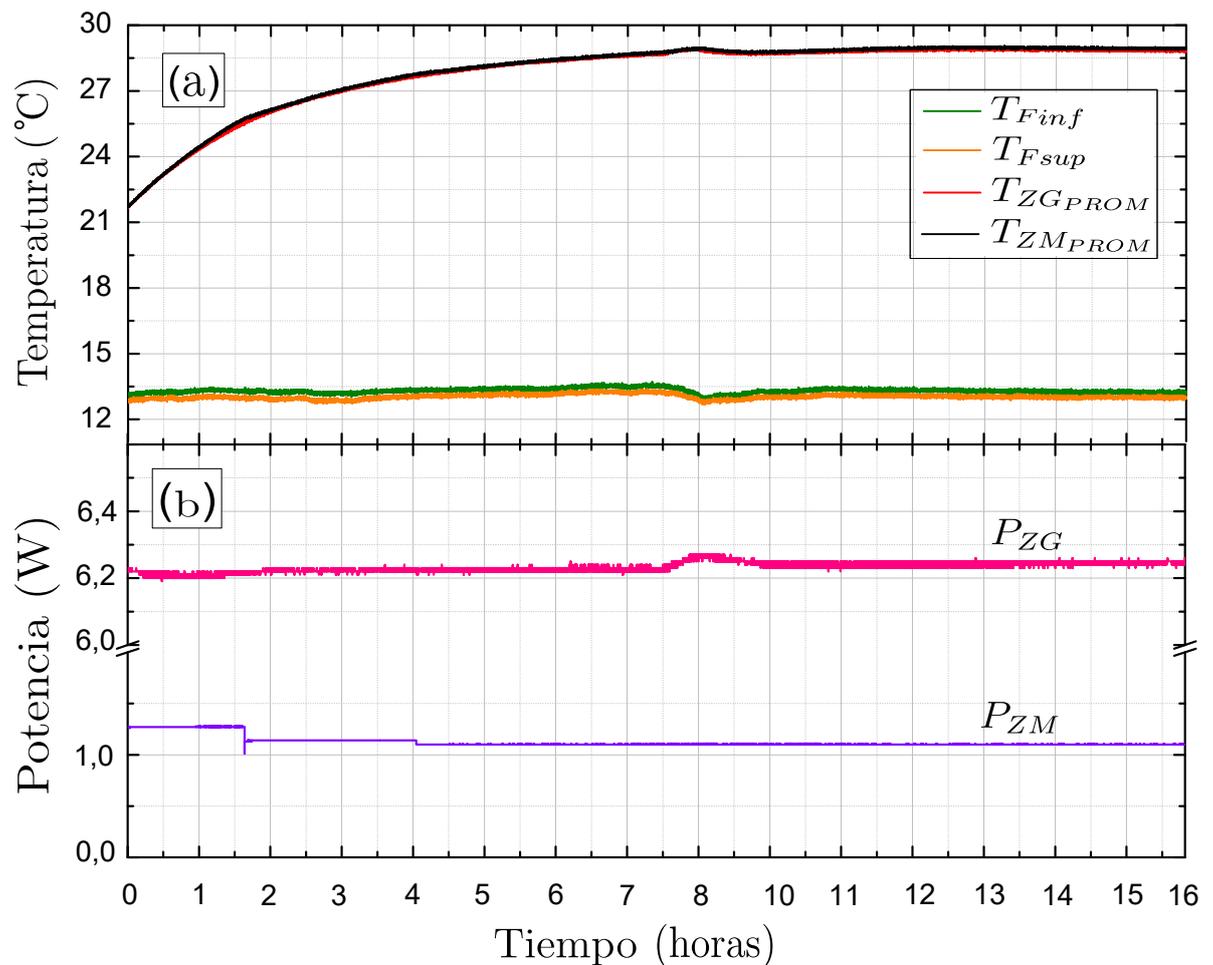


Figura A.1. Comportamiento en el tiempo para: (a) Temperatura placa fría inferior ($T_{F_{inf}}$) (°C), temperatura placa fría superior ($T_{F_{sup}}$) (°C), temperatura placa zona de medición promedio ($T_{ZM_{PROM}}$) (°C), Temperatura placa zona de guarda promedio ($T_{ZG_{PROM}}$) (°C) y (b) potencia eléctrica suministrada a la zona de medición (P_{ZM}) (W), potencia eléctrica suministrada a la zona de guarda (P_{ZG}) (W).

Anexo A. Medida intercomparativa de conductividad térmica para la totora

Se seleccionó el rango estacionario en un intervalo de tiempo de 09:36 h:mm. De tal manera que la diferencia de la temperatura promedio de la zona de medida y guarda cumple con la condición de estar incluido en el rango de 0,0 a 0,2 °C según la norma ASTM C-177.

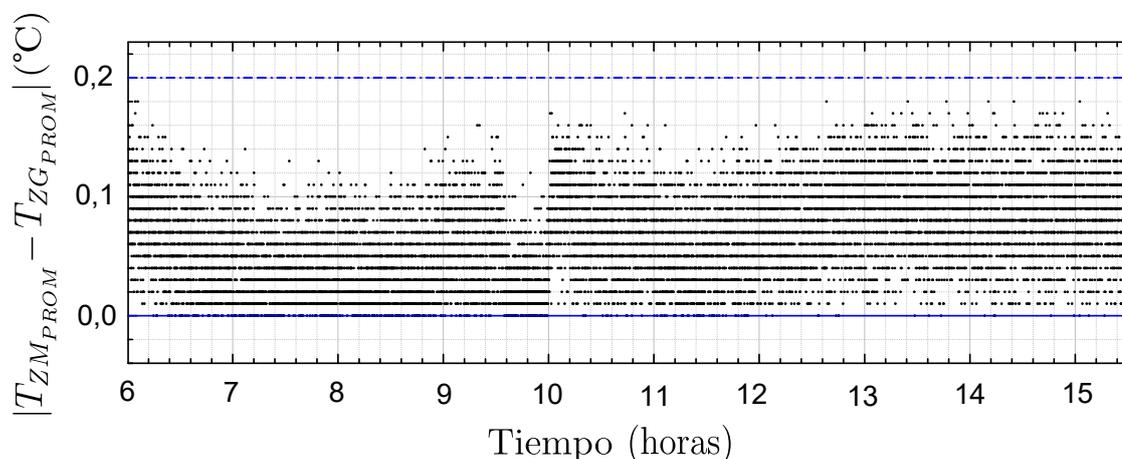


Figura A.2. Selección del rango estacionario o permanente térmico en el tiempo tal que se cumple que: $0,0\text{ °C} < |T_{ZM_{PROM}} - T_{ZG_{PROM}}| < 0,2\text{ °C}$.

Tabla A.2. Resultados del ensayo de la totora empleando el equipo LAMBDA-UNI.

Parámetro Físico	Q (W)	A (10^{-2}m^2)	e (10^{-2}m)	ΔT (K)	λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Magnitud	0,55	1,791	2,412	15,76	0,047
Incertidumbre	0,005	0,008	0,005	1,28	0,002

Tabla A.3. Medida intercomparativa de conductividad térmica para la muestra de totora.

EQUIPO	λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$\pm u_\lambda$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Patrón de conductividad térmica APCG (CENAM)	0,045	0,002
LAMBDA-UNI	0,047	0,005
Error porcentual %	4,4	

De los resultado de la tabla A.3 el error porcentual en la medida de la conductividad térmica de la totora con el equipo LAMBDA-UNI es 4,4% por exceso al valor medido con el equipo patrón de conductividad térmica del CENAM.

Anexo B

Aparato portátil para la medición de conductividad térmica

En la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, se construyó un Aparato portátil para medir la conductividad térmica. De este proyecto, participo como uno de los inventores de la Universidad Nacional de Ingeniería para una patente, del cual se ha presentado una solicitud como modelo de utilidad para el programa patenta 2019 de Indecopi, cuyo expediente es 002181-2019/DIN llamado “Aparato portátil para la medición de conductividad térmica de sólidos aislantes”. Este aparato está basado en la norma ASTM C 518. El sistema ha sido expuesto durante 4 días en la feria del XVIII concurso nacional de invenciones y diseños industriales 2019 organizado por Indecopi.



Figura B.1. Aparato portátil para medir conductividad térmica de materiales sólidos aislantes.

Anexo C

Medición de conductividad térmica para la UB-IAA empleando el equipo LAMBDA-UNI a distintas condiciones de operación.

Se presentan los resultados de conductividad térmica para la UB-IAA a distintas condiciones de operación del equipo LAMBDA-UNI.

- **Toma 1** En la figura C.1 se muestra un gráfico del comportamiento de la temperatura promedio de la placa caliente en la zona central, guarda, frías y potencia eléctrica vs el tiempo. El ensayo se realizó en un intervalo de tiempo de (21 h 09 min 42).

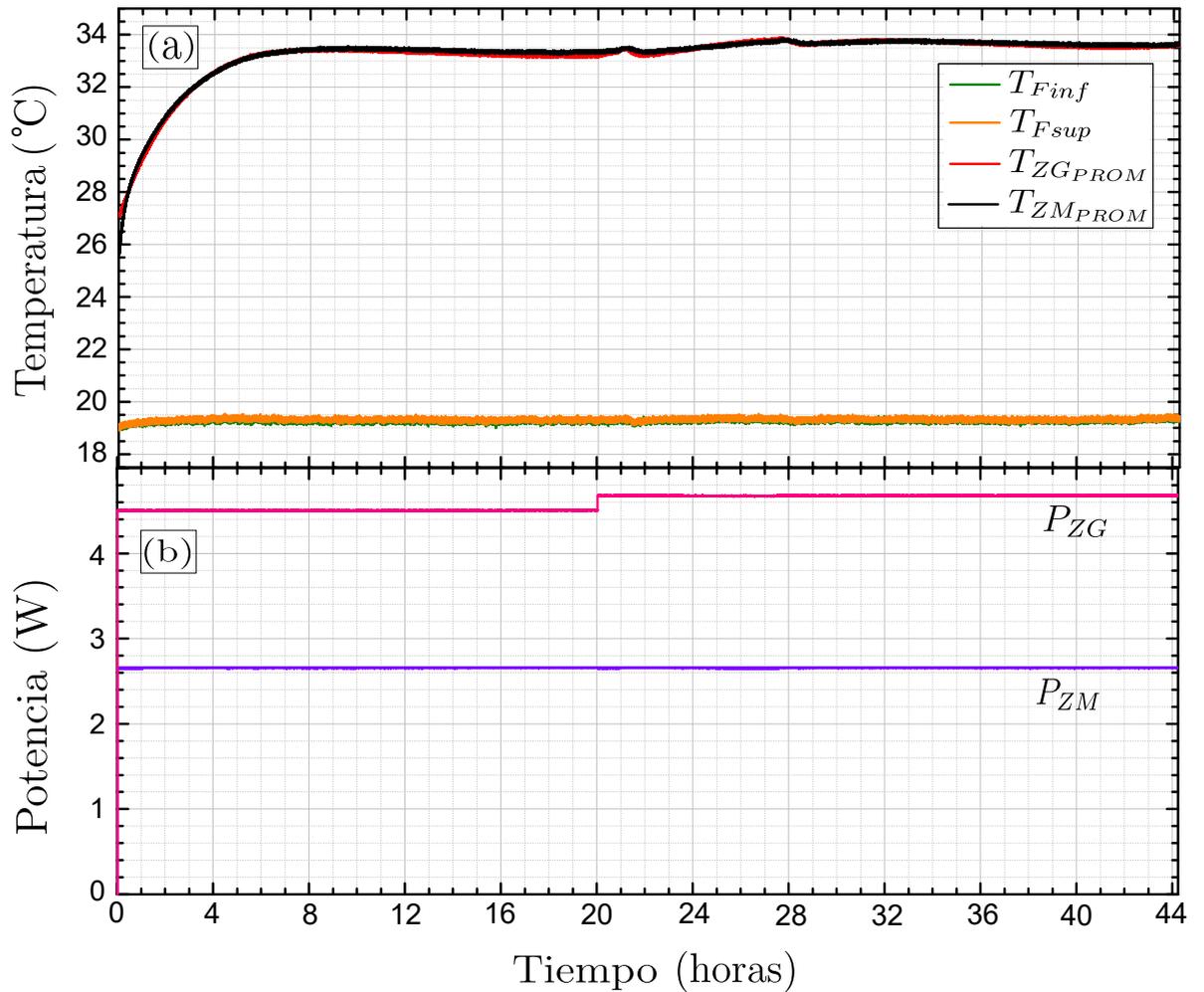


Figura C.1. Comportamiento en el tiempo para (a) temperatura placa fría inferior (T_{Finf}) (°C), temperatura placa fría superior (T_{Fsup}) (°C), temperatura placa zona de medición promedio (T_{ZM_PROM}) (°C), temperatura placa zona de guarda promedio (T_{ZG_PROM}) (°C) y (b) potencia eléctrica suministrada a la zona de medición (P_{ZM}) (W), potencia eléctrica suministrada a la zona de guarda (P_{ZG}) (W).

Se escogió el rango estacionario en un intervalo de tiempo de 22 h. De tal manera que la diferencia de la temperatura promedio de la zona de medida y guarda cumple con la condición de estar incluido en el rango de 0,0 a 0,2 °C según la norma ASTM C-177.

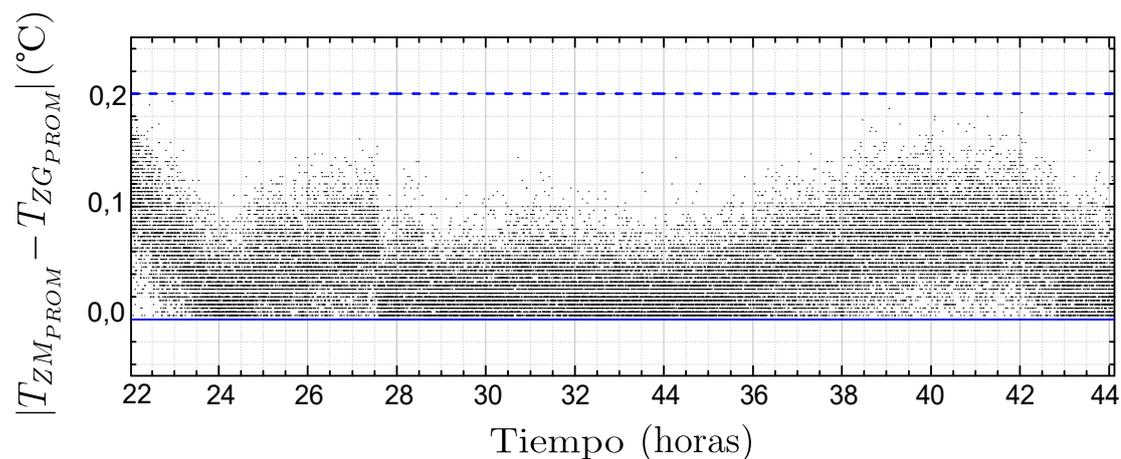


Figura C.2. Selección del rango estacionario o permanente térmico en el tiempo tal que se cumple que: $0,0\text{ }^{\circ}\text{C} < |T_{ZM_{PROM}} - T_{ZG_{PROM}}| < 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla C.1. Resultados del ensayo de conductividad térmica Toma 3.

Parámetro Físico	Q (W)	A (10^{-2}m^2)	e (10^{-2}m)	ΔT (K)	λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Magnitud	1,33	1,791	5,489	14,34	0,284
Incertidumbre	0,006	0,008	0,02	1,27	0,050

Anexo C. Medición de conductividad térmica para la UB-IAA empleando el equipo LAMBDA-UNI a distintas condiciones de operación.

- **Toma 2** En la figura C.3 se muestra un gráfico del comportamiento de la temperatura promedio de la placa caliente en la zona central, guarda, frías y potencia eléctrica vs el tiempo. El ensayo se realizó en un intervalo de tiempo de (08 h 23 min 53).

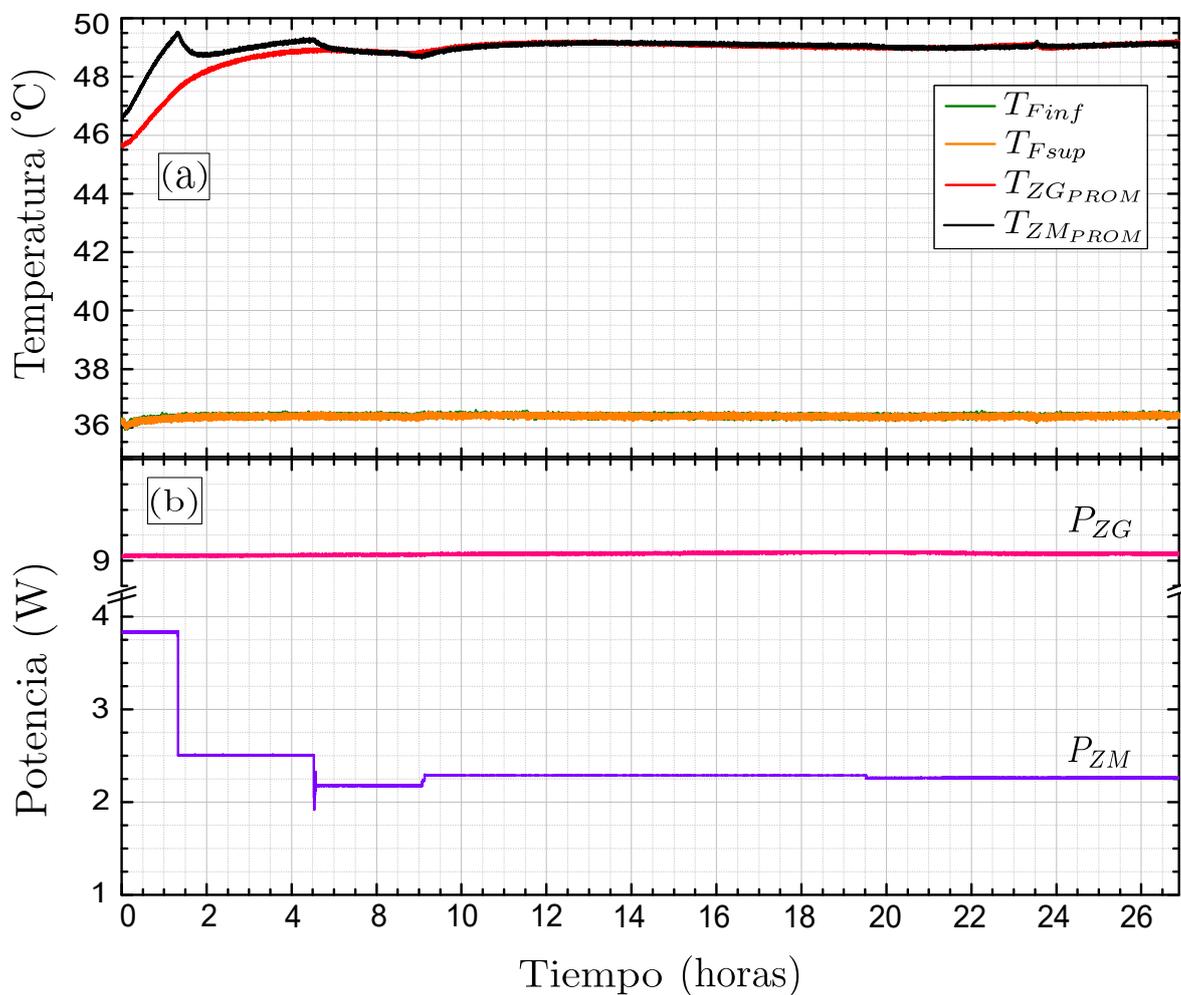


Figura C.3. Comportamiento en el tiempo para (a) temperatura placa fría inferior ($T_{F_{inf}}$) (°C), temperatura placa fría superior ($T_{F_{sup}}$) (°C), temperatura placa zona de medición promedio ($T_{ZM_{PROM}}$) (°C), temperatura placa zona de guarda promedio ($T_{ZG_{PROM}}$) (°C) y (b) potencia eléctrica suministrada a la zona de medición (P_{ZM}) (W), potencia eléctrica suministrada a la zona de guarda (P_{ZG}) (W).

Anexo C. Medición de conductividad térmica para la UB-IAA empleando el equipo LAMBDA-UNI a distintas condiciones de operación.

Se escogió el rango estacionario en un intervalo de tiempo de 07 h 53 min 20. De tal manera que la diferencia de la temperatura promedio de la zona de medida y guarda cumple con la condición de estar incluido en el rango de 0,0 a 0,2 °C según la norma ASTM C-177.

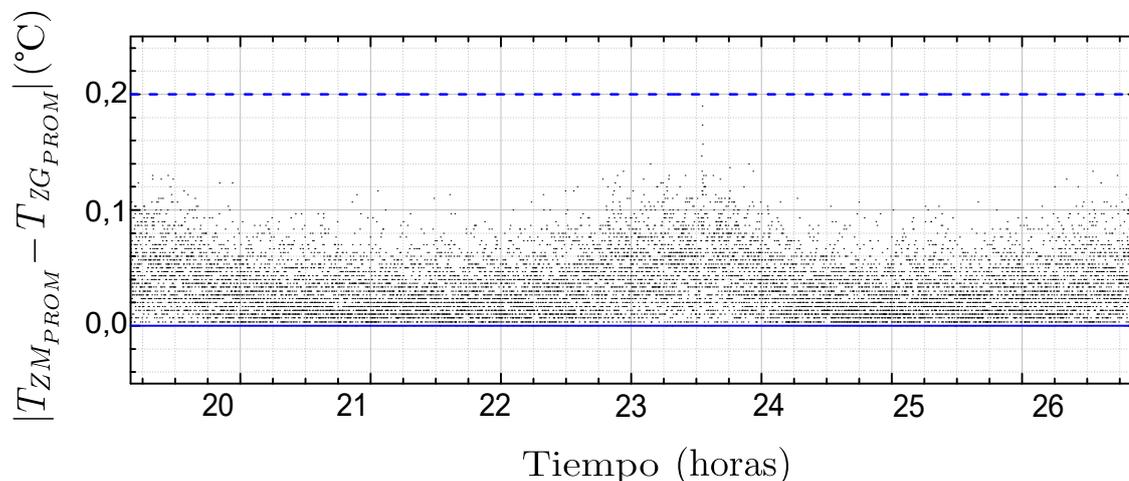


Figura C.4. Selección del rango estacionario o permanente térmico en el tiempo tal que se cumple que: $0,0\text{ °C} < |T_{ZM_PROM} - T_{ZG_PROM}| < 0,2\text{ °C}$.

Tabla C.2. Resultados del ensayo de conductividad térmica Toma 4.

Parámetro Físico	Q (W)	A (10^{-2}m^2)	e (10^{-2}m)	ΔT (K)	λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Magnitud	1,63	1,791	5,489	24,15	0,275
Incertidumbre	0,007	0,008	0,02	1,23	0,046

Anexo D

Medición de difusividad térmica para la UB-IAA por el método de Ångström con distintos periodos.

Se midió la difusividad térmica de la UB-IAA con el método de Ångström incluyendo pérdidas por convección y radiación, para periodos de la onda de calor de 20 min, 25 min y 30 min.

- **Periodo 20 minutos:** En la figura D.1 se muestra un gráfico del comportamiento de la temperatura en la posición x_1 y x_2 en la muestra UB-IAA vs el tiempo. El ensayo se realizó en 06 h 35, y se seleccionó el rango estacionario en un intervalo de tiempo de 01 h 35, y se muestra el rango estacionario para el ajuste no lineal seno.

$|x_1 - x_2| = 1,5$ cm; Periodo: 20 min.

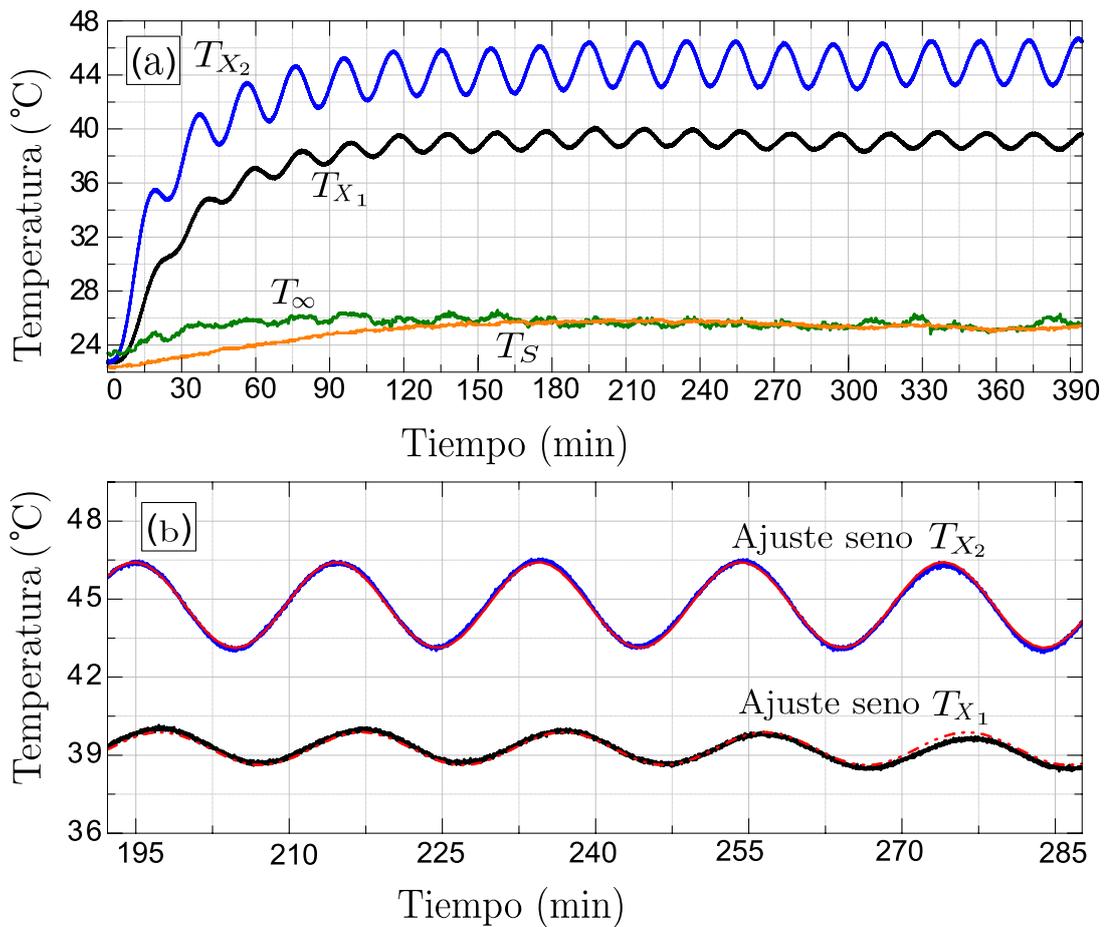


Figura D.1. Comportamiento en el tiempo para (a) temperatura en la posición (T_{X_1}) ($^{\circ}\text{C}$), temperatura en la posición (T_{X_2}) ($^{\circ}\text{C}$) para la muestra UB-IAA y (b) selección del rango estacionario donde se muestra el ajuste no lineal del seno para T_{X_1} y T_{X_2} .

Tabla D.1. Parámetros del ajuste seno para la curva en el rango estacionario.

Ecuación	$T = T_0 + M_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi(t - t_0)}{P} \right)$		
Adj. R-Square	0,96885	0,99691	
Temperatura	Parámetros	Valor	Error estándar
T_{X_1}	t_1	854,55	5,18
	P	595,03	0,2
	M_1	0,619	0,003
	T_1	39,18	0,002
T_{X_2}	t_2	659,92	1,14
	P	594,72	0,05
	M_2	1,64	0,003
	T_2	44,74	0,001

Anexo D. Medición de difusividad térmica para la UB-IAA por el método de Ångström con distintos periodos.

Tabla D.2. Valores y errores estándar de los parámetros para el cálculo de difusividad térmica determinados a partir del ajuste no lineal.

Parámetro	A_1 (°C)	A_2 (°C)	Δt (s)	$ x_1 - x_2 $ (m)	R
Magnitud	0,619	1,641	194,62	0,015	2,65
error estándar	0,001	0,003	6,32	0,0001	0,01

Anexo D. Medición de difusividad térmica para la UB-IAA por el método de Ångström con distintos periodos.

- **Periodo 25 minutos:** En la figura D.2 se muestra un gráfico del comportamiento de la temperatura en la posición x_1 y x_2 en la muestra UB-IAA vs el tiempo. El ensayo se realizó en 08 h 31, y se seleccionó el rango estacionario en un intervalo de tiempo de 02 h 05, y se muestra el rango estacionario para el ajuste no lineal seno.

$|x_1 - x_2| = 1,5$ cm; Periodo: 25 min.

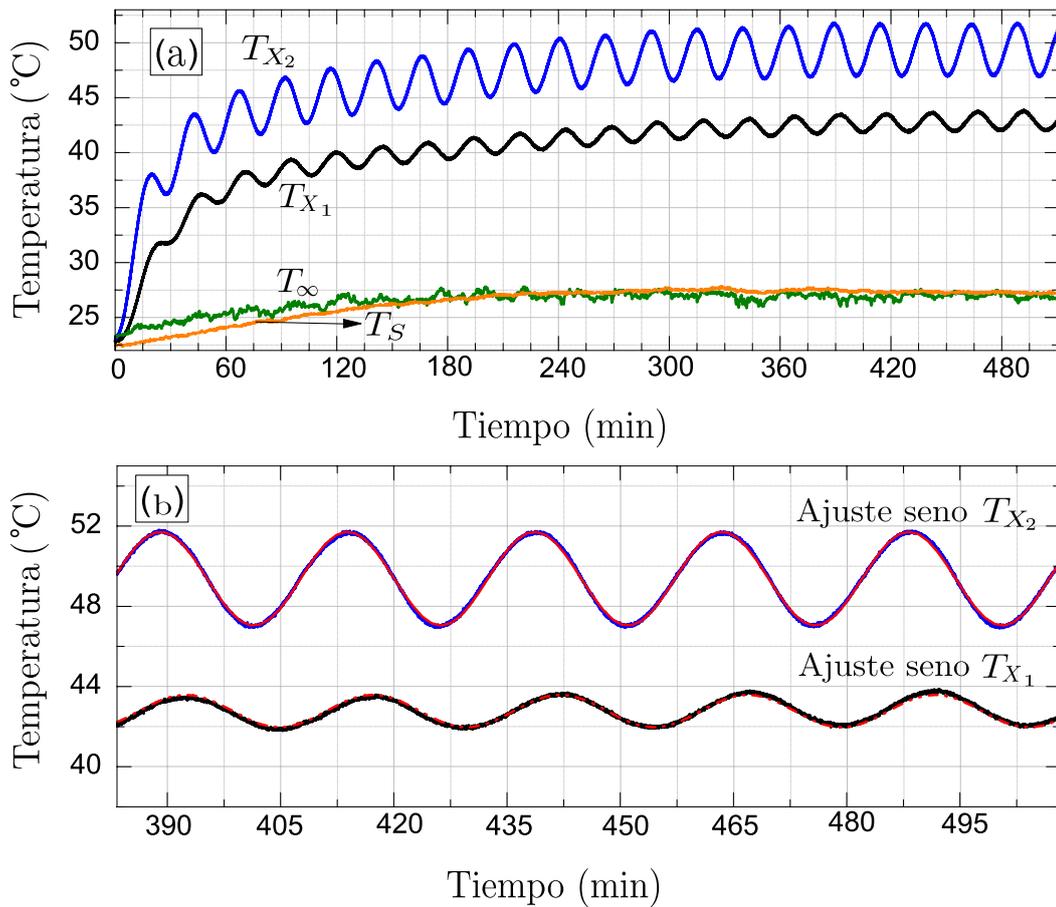


Figura D.2. Comportamiento en el tiempo para (a) temperatura en la posición (T_{X_1}) (°C), temperatura en la posición (T_{X_2}) (°C) para la muestra UB-IAA y (b) selección del rango estacionario donde se muestra el ajuste no lineal del seno para T_{X_1} y T_{X_2} .

Anexo D. Medición de difusividad térmica para la UB-IAA por el método de Ångström con distintos periodos.

Tabla D.3. Parámetros del ajuste seno para la curva en el rango estacionario.

Ecuación	$T = T_0 + M_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi (t - t_0)}{P} \right)$		
Adj. R-Square	0,96885	0,99691	
Temperatura	Parámetros	Valor	Error estándar
T_{X_1}	t_1	865,84	6,05
	P	744,04	0,17
	M_1	0,80	0,001
	T_1	42,77	0,001
T_{X_2}	t_2	674,35	1,53
	P	743,27	0,04
	M_2	2,34	0,002
	T_2	49,37	0,001

Tabla D.4. Valores y errores estándar de los parámetros para el cálculo de difusividad térmica determinados a partir del ajuste no lineal.

Parámetro	A_1 (°C)	A_2 (°C)	Δt (s)	$ x_1 - x_2 $ (m)	R
Magnitud	0,807	2,341	191,49	0,015	2,92
error estándar	0,001	0,002	7,58	0,0001	0,006

Anexo D. Medición de difusividad térmica para la UB-IAA por el método de Ångström con distintos periodos.

- **Periodo 30 minutos:** En la figura D.3 se muestra un gráfico del comportamiento de la temperatura en la posición x_1 y x_2 en la muestra UB-IAA vs el tiempo. El ensayo se realizó en 09 h 22, y se seleccionó el rango estacionario en un intervalo de tiempo de 04 h 22, y se muestra el rango estacionario para el ajuste no lineal seno.

$|x_1 - x_2| = 1,5$ cm; Periodo: 30 min.

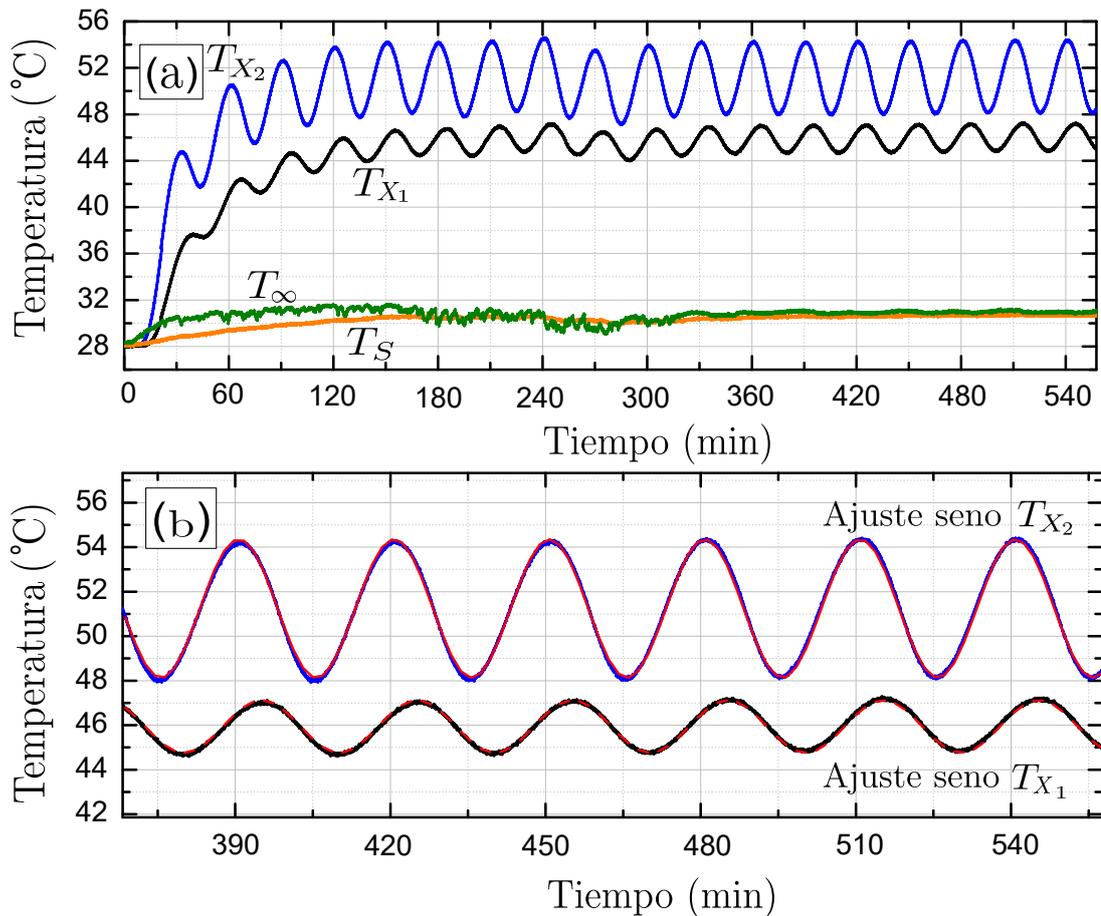


Figura D.3. Comportamiento en el tiempo para (a) temperatura en la posición (T_{X_1}) (°C), temperatura en la posición (T_{X_2}) (°C) para la muestra UB-IAA y (b) selección del rango estacionario donde se muestra el ajuste no lineal del seno para T_{X_1} y T_{X_2} .

Anexo D. Medición de difusividad térmica para la UB-IAA por el método de Ångström con distintos periodos.

Tabla D.5. Parámetros del ajuste seno para la curva en el rango estacionario.

Ecuación	$T = T_0 + M_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi (t - t_0)}{P} \right)$		
Adj. R-Square	0,96885	0,99691	
Temperatura	Parámetros	Valor	Error estándar
T_{X_1}	t_1	1660,53	2,29
	P	901,60	0,08
	M_1	1,18	0,001
	T_1	45,94	0,001
T_{X_2}	t_2	1362,82	1,26
	P	901,04	0,04
	M_2	3,12	0,001
	T_2	51,24	0,002

Tabla D.6. Valores y errores estándar de los parámetros para el cálculo de difusividad térmica determinados a partir del ajuste no lineal.

Parámetro	A_1 (°C)	A_2 (°C)	Δt (s)	$ x_1 - x_2 $ (m)	R
Magnitud	1,176	3,115	210	0,015	2,883
error estándar	0,001	0,002	7,58	0,0001	0,006

Tabla D.7. Se muestran los resultados de la difusividad térmica para la UB-IAA a distintas frecuencias de trabajo.

Frecuencia (μHz)	Periodo (min)	$\alpha \times 10^{-7}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$\pm u_\alpha \times 10^{-7}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
833,3	20	5,91	0,47
666,7	25	5,32	0,43
555,6	30	5,08	0,40

Estos resultados son expresados con un factor de cobertura $k = 2$, es decir con un nivel de confianza de 95 % en su incertidumbre.