

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**



**TESIS**

**“Estudio de las Propiedades Térmicas, Mecánicas,  
Morfológicas y Estructurales del Adobe como Material  
Biocompósito”**

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

**ELABORADO POR:**

**MC JOSHUA MIGUEL PIÑAS MOYA**

**ASESOR:**

**DRA. MÓNICA MARCELA GÓMEZ LEÓN**

**LIMA - PERÚ**

**2018**

## DEDICATORIA:

*Esta tesis va dedicada a ti mamá, por apoyarme toda mi vida a superarme. Este logro es un pequeño detalle con mucho sacrificio y cariño de parte mía. Asimismo, dedicada a mama Juana y papa Óscar por los sabios consejos brindados. Finalmente, dedicada a la memoria de mis abuelos Rufina y Demetrio que en vida me cuidaron mucho.*

## AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Mónica Marcela Gómez León, directora del Círculo de Investigación. Por su dirección, paciencia, entrega y valiosos consejos, que me permitieron alcanzar los objetivos de esta tesis.

A mis profesores Dr. José Solís, Dr. Manfred Horn y Mg. Clemente Luyo de la Facultad de Ciencias de los cuales he aprendido mucho en los últimos años.

Al Dr. Leonel Lira, Mg. Saul García, Dr. René López y Dr. Víctor Lizardi por el apoyo brindado durante la estadía en el Laboratorio de Conductividad Térmica, Centro Nacional de Metrología (CENAM), México.

Al Mg. Rafael Espinoza por brindarme un espacio en el CER-UNI para trabajar la fabricación de las probetas de adobe.

A Sodi, por su apoyo incondicional, durante mi vida pre y universitaria, con el cual he logrado cumplir mis metas y esta tesis en particular.

A mis amigos Juan y Alyssia por su apoyo en la fabricación de las probetas de adobe.

A mis familiares, Víctor, Erika, Gugu, Irene, Pablo, Carlos, por creer en mí y brindarme su apoyo y consejo en todo momento

El desarrollo de esta tesis fue posible debido al financiamiento recibido por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT) del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) por medio del convenio de financiación N° 024-2016, y al financiamiento del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería por medio del Proyecto de Investigación Formativa 2017 FC-F-26-2017.

Finalmente, agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería, mi alma mater, por brindarme las herramientas para ser un profesional y mejor persona.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación presenta el estudio de las propiedades térmicas, mecánicas, morfológicas y estructurales del material biocompósito ampliamente usado en las construcciones de las viviendas de las zonas altoandinas: el adobe.

Para el desarrollo de esta investigación se elaboraron bloques de adobe, reproduciendo las condiciones típicas que los pobladores rurales utilizan para su fabricación. Además, se consideró el estudio de la presencia de *Stipa ichu* (nombre científico del ichu) en el biocompósito.

La caracterización térmica del adobe se realizó empleando un Aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG) realizando las medidas según la norma ASTM C 177. Esta parte del trabajo se desarrolló en el Centro Nacional de Metrología (CENAM) de México.

Por otro lado, la caracterización mecánica del adobe consistió en el desarrollo de los ensayos mecánicos de comprensión, flexión y cizalladura; todos ellos realizados en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Con relación al estudio de las propiedades estructurales y morfológicas del biocompósito se empleó Difracción de Rayos X y Microscopía Electrónica de Barrido, ambas técnicas fueron desarrolladas en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

De acuerdo con los resultados de granulometría y límite líquido y plástico se tiene que la tierra usada para la fabricación de adobes es considerada como CL (un suelo de partículas finas-inorgánicas de arcilla de baja plasticidad), según Norma ASTM D2487.

De acuerdo con los resultados de compresión a la unidad de adobe sin *Stipa ichu* y con *Stipa ichu* se tiene un valor promedio de 24,44 kg cm<sup>-2</sup> y 24,54 kg cm<sup>-2</sup>, respectivamente. En el caso de compresión de pilas de adobe sin fibra y con fibra se obtuvo un valor promedio de 30,22 kg cm<sup>-2</sup> y 26,41 kg cm<sup>-2</sup>, respectivamente. Estos resultados cumplen los valores mínimos indicados en la Norma Peruana E.080 Adobes. En el caso de los resultados del ensayo de flexión de adobe sin fibra y con fibra se tiene un valor promedio de 0,56 MPa y 0,30 MPa, respectivamente. Estos resultados fueron siguiendo las pautas de la Norma Española UNE.EN.196.1. Finalmente, en el ensayo de cizalladura para adobes sin ichu y con ichu se obtuvo un valor promedio de 5,33 kg cm<sup>-2</sup> y 2,73 kg.cm<sup>-2</sup>, respectivamente; siguiendo las pautas de la Norma Técnica Peruana en Maderas NTP 251.013.

Como resultados se tiene que el adobe sin *Stipa ichu* y con *Stipa ichu* tiene una conductividad térmica de 0,371 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> y 0,349 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> respectivamente.

Según las fotografías de microscopía electrónica de barrido se puede observar que la morfología interna del adobe es altamente heterogénea y porosa, la cual contiene partículas de diferentes tamaños que contienen cavidades entre ellas. La fibra (*Stipa ichu*) presenta una distribución aleatoria y se observa cercanamente unida a la matriz que la circunda.

Finalmente, de los estudios de DRX, se tuvo que el tipo de arcilla presente, en la tierra usada para la fabricación de los adobes, predominantemente fue illita-montmorillonita.

**Palabras clave:** Biocompósito, Adobe, *Stipa ichu*, ASTM, Difracción de Rayos X, Microscopía Electrónica de Barrido, Conductividad Térmica.

## ABSTRACT

The present work of investigation presents the study of the thermal, mechanical, morphological and structural properties of the biocomposite material widely used in construction of housing of the high Andean areas: adobe.

For the development of this research, adobe blocks were fabricated, reproducing the typical conditions that rural inhabitants use for their manufacture. Additionally, the dependence of *Stipa ichu* (scientific name of ichu) in the biocomposite was considered.

The thermal characterization of adobe was carried out using Hot Plate with Guard Apparatus performing the measurements according the ASTM C 177 Standard. This part of the work was developed in the National Center of Metrology (CENAM) of Mexico.

The mechanical characterization of adobe consisted in the development of the mechanical tests of compression, bending and shearing; all of them carried out in the Material Testing Laboratory of the Faculty of Civil Engineering at the National University of Engineering.

Structural and morphological properties of the biocomposite were performed using X-ray Diffraction and Scanning Electronic Microscopy, both techniques were developed in the Faculty of Sciences of the National University of Engineering.

Granulometry evaluation and determination of liquid limit and plastic limit of soil, used for manufacture of adobe bricks, were performed according to ASTM D2487, finding a CL type soil (clay of low plasticity with major inorganic content).

According to compression results for adobe bricks without *Stipa ichu* and with *Stipa ichu*, the average values for each case were 24,44 kg cm<sup>-2</sup> and 24,54 kg cm<sup>-2</sup>, respectively. In the case of compression of adobe stacks without fiber and with fiber, an average value of 30,22 kg cm<sup>-2</sup> and 26,41 kg cm<sup>-2</sup> were obtained, respectively. These results met the minimum values indicated in Peruvian Standard E.080 for Adobes. In the case of the results of the adobe bending test without fiber and with fiber, the average value is 0,56 MPa and 0,30 MPa, respectively. These results were following the guidelines of Spanish Standard UNE.EN.196.1. Following the guidelines of the Peruvian Technical Norm in Timbers NTP 251.013, the test of shear for adobes without fiber and with fiber, were performed and average values of 5,33 kg cm<sup>-2</sup> and 2,73 kg.cm<sup>-2</sup> were obtained, respectively.

Thermal conductivity for adobe without *Stipa ichu* and with *Stipa ichu* were 0,371 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> y 0,349 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>, respectively.

According to scanning electron microscopy micrographs of an adobe brick, its internal morphology was highly heterogeneous and porous, which contained particles and cavities of different sizes. The fiber (*Stipa ichu*) presented a random distribution and was observed closely attached to the surrounding matrix.

Finally, from XRD studies, it was found that the type of clay presented in the soil used for the fabrication of adobes, was predominantly illite-montmorillonite.

**Keywords:** Biocomposite, Adobe, *Stipa ichu*, ASTM, X-ray diffraction, Scanning Electron Microscopy, Thermal Conductivity.

## PRÓLOGO

Este trabajo de investigación surgió del interés de aportar en la caracterización integral del adobe, como material biocompósito, dando énfasis al aspecto térmico el cual, hasta el momento, no ha sido abordado en detalle. Sabiendo que el adobe es el material que, por excelencia, es predominante usado en las construcciones de las zonas altoandinas del Perú, las cuales en gran porcentaje están expuestas a condiciones climatológicas extremas cíclicas como las heladas.

Para hacer una contribución asertiva en la modificación de las viviendas ya existentes, o al diseño de nuevas; es necesario contar con los datos de las conductividades térmicas de los materiales usados en la construcción de las edificaciones, aspecto que hasta el momento no se ha realizado en el país.

Desde la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) se viene trabajando, desde, aproximadamente, diez años en el desarrollo de técnicas bioclimáticas orientadas a mejorar la calidad de vida del poblador altoandino. Así lo demuestran las tesis de pregrado (1-2) y postgrado (3-5), de la Escuela de Ingeniería Física y la Maestría en Energías Renovables y Eficiencia Energética, respectivamente. El trabajo desarrollado en esta tesis intenta hacer una contribución a todo el esfuerzo que se viene realizando desde la UNI.

Asimismo, debo señalar que este trabajo de investigación forma parte del proyecto: **“Caracterización térmica de materiales para el almacenamiento de energía en construcciones de viviendas altoandinas,”** que es uno de los componentes del Círculo de Investigación en Ciencia y Tecnología 2016: **“Desarrollo de materiales y dispositivos para la aplicación de estrategias renovables y medioambientales que permitan el suministro de energía y agua para una vivienda rural sostenible”**.

- (1) F. A. Huaylla, 2010
- (2) G. G. Saavedra, 2014
- (3) R. L. Espinoza, 2014
- (4) J. R. Molina, 2016
- (5) J.O. Molina, 2018

# ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
RESUMEN .....	IV
ABSTRACT .....	VI
PRÓLOGO .....	VIII
ÍNDICE GENERAL .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XII
LISTA DE ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS .....	XVI
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	1
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	2
1.4 ANTECEDENTES .....	2
CAPÍTULO 2: MATERIALES COMPÓSITOS .....	5
2.1 EL ADOBE COMO MATERIAL BIOCMPÓSITO .....	5
2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	9
CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE ADOBE .....	11
3.1 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS DE ADOBE .....	11
3.2 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LAS PROBETAS DE ADOBE .....	22
3.2.1 TÉRMICAS .....	22
3.2.2 MECÁNICAS .....	37
3.2.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X .....	45
3.2.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO .....	50
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	53
4.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS ADOBES .....	53
4.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ADOBES .....	56
4.3 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES Y MORFOLÓGICAS DE LOS ADOBES .....	64

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	70
CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES .....	71
CAPÍTULO 7: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
ANEXOS .....	75
ANEXO 1: PROPUESTA Y AVANCE DE LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA BAJO LA NORMA ASTM C 177 .....	75
ANEXO 2: DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE OTROS MATERIALES USADOS EN CONSTRUCCIONES RURALES ALTOANDINAS (TOTORA Y YESO).....	84
ANEXO 3: NORMA E.080 ADOBE .....	88

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Registro de masas para el ensayo de contenido de humedad en las probetas de abobe .....	12
Tabla 2. Registro de pesos para los ensayos de límite líquido y plástico .....	14
Tabla 3. Número de golpes y contenido de humedad (límite líquido).....	15
Tabla 4. Registro de tierra pasante y retenida en los tamices .....	17
Tabla 5. Adobes de diversos tamaños fabricados en la UNI.....	21
Tabla 6. Adobes de diversos tamaños, composición, tiempo de dormido fabricados en Raymina (Ayacucho) .....	21
Tabla 7. Dimensiones de adobes para los diferentes ensayos .....	22
Tabla 8. Capacidades de medición del aparato de placa caliente aislada del CENAM .....	31
Tabla 9. Parámetros para la placa caliente aislada del CENAM .....	31
Tabla 10. Resultados de medición adobe con fibra .....	53
Tabla 11. Resultados de medición adobe sin fibra .....	55
Tabla 12. Conductividad térmica del adobe con el APCG.....	56
Tabla 13. Resultado de comprensión a la unidad para adobe sin fibra .....	57
Tabla 14. Resultado de comprensión a la unidad para adobe con fibra .....	58
Tabla 15. Resultado de la resistencia al corte de la albañilería para el adobe sin fibra.....	60
Tabla 16. Resultado de la resistencia al corte de la albañilería para el adobe con fibra .....	60
Tabla 17. Resultado de flexión para el adobe sin fibra.....	61
Tabla 18. Resultado de flexión para el adobe con fibra .....	62
Tabla 19. Resultados al cizallamiento .....	63
Tabla A1. Condiciones para el cálculo de dimensiones en el CENAM.....	77
Tabla A2. Resultados para distintos valores de L, b, d considerando la tabla A1 .....	77
Tabla A3. Condiciones para el cálculo de dimensiones en CER-UNI.....	77
Tabla A4. Resultados para distintos valores de L, b, d considerando la tabla A3 .....	77
Tabla A5. Resultados de medición yeso .....	84
Tabla A6. Resultados de medición totora.....	86
Tabla A7. Conductividad térmica del yeso y totora con el APCG .....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de materiales compósitos. ....	5
Figura 2. (a) Fibra continua y alineada, (b) fibra discontinua y alineada, (c) fibra discontinua y orientada aleatoriamente. ....	7
Figura 3. Dispositivo para la determinación del Límite Líquido. Unidades en mm .....	13
Figura 4. (a) Materiales: copa casa nave, acanaladores y espátula, (b) División con el acanalador, (c) cerrar la ranura 12,7 mm. ....	14
Figura 5. Ubicación de tamices de mayor abertura (superior) a menor abertura (inferior) para realizar la separación de partículas por tamizado. ....	16
Figura 6. Tierra en suspensión para el ensayo de hidrometría. ....	18
Figura 7. Mezcla de tierra con agua, consistencia plástica. ....	19
Figura 8. Mezcla de tierra tamizada y dormida con ichu seco. ....	20
Figura 9. Diagrama de flujo para la fabricación de las probetas o bloques de adobe. ....	20
Figura 10. Diferentes muestras de adobe secándose al aire libre en Raymina, Ayacucho. ....	22
Figura 11. Representación del flujo de calor en la muestra. Donde $\Delta x$ es el espesor de la muestra, $T_f$ es la temperatura fría, $T_c$ es la temperatura caliente y S es el área de la muestra. ....	25
Figura 12. Representación del flujo de calor por las flechas. Donde la región roja es el calefactor y las regiones celestes son los medios fríos. ....	26
Figura 13. Esquema de un equipo construido bajo la ASTM C 177. ....	27
Figura 14. Ubicación de los termopares en la placa caliente con guarda del APCG. La zona de medición tiene un diámetro de 150 mm y el anillo un diámetro externo de 305 mm separados entre sí 0,8 mm. ....	29
Figura 15. Diagrama del sistema medidor de la conductividad térmica. ....	30
Figura 16. Diferencia de temperaturas entre la zona de medida y la guarda. ....	33
Figura 17. Sistema construido bajo norma ASTM C 177 .....	35
Figura 18. Gradiente de temperatura y potencia vs tiempo .....	35

Figura 19. Configuración experimental para la prueba de conductividad térmica bajo la norma ASTM C 177 .....	36
Figura 20. Estado estable en la calibración del sistema laminar presentado en la Figura 19 .....	36
Figura 21. Diagramas de las pruebas de esfuerzo-deformación. (a) tensión, (b) compresión, (c) cizalladura .....	37
Figura 22. Diagrama de la maquina Uniaxial. ....	39
Figura 23. Máquina Uniaxial para compresión, ubicada en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI. ....	39
Figura 24. Equipo de carga para la determinación de la resistencia a flexión. Unidades en mm.	41
Figura 25. Esquema del ensayo de cizallamiento. ....	43
Figura 26. (a) Vista lateral del equipo adaptado para los ensayos de cizalladura, (b) vista posterior del equipo, sistema de sujeción, ubicada en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI. ....	44
Figura 27. Deducción de la Ley de Bragg para la Difracción de Rayos X. ....	45
Figura 28. Diagrama de flujo de Tratamiento de ácido acético para eliminación de carbonatos. ....	47
Figura 29. Diagrama de flujo de Tratamiento de peróxido de hidrogeno para eliminación de residuos orgánicos. ....	48
Figura 30. Diagrama de flujo de para Identificación de arcilla mediante etileno glicol y tratamiento térmico. ....	49
Figura 31. Diagrama para identificación de arcillas.....	50
Figura 32. Interacción de la radiación con la materia .....	50
Figura 33. Diagrama de flujo para la obtención de fotografías SEM.....	52
Figura 34. Juego de adobes con fibra para medición de conductividad térmica. ....	54
Figura 35. Juego de adobes sin fibra para medición de conductividad térmica. ....	55
Figura 36. Secado de los adobes.....	57
Figura 37. Rotura del adobe después del ensayo a la compresión. ....	57
Figura 38. Secado de las pilas de adobe. ....	59
Figura 39. Fisura de las pilas de adobe luego del ensayo. ....	59

Figura 40. Rotura del ensayo de flexión. ....	61
Figura 41. Corte o rotura del adobe, fin de la prueba. ....	63
Figura 42. Difractogramas para la tierra tratada con: peróxido de hidrogeno, con ácido acético ,y tierra sin tratar. Donde q corresponde al cuarzo, f corresponde a los feldespatos y c corresponde a los carbonatos. ....	64
Figura 43. Difractogramas para la identificación del tipo de arcilla. En la gráfica q corresponde al cuarzo.....	65
Figura 44. Adobe con fibra aumento a 50X. ....	66
Figura 45. Adobe sin fibra aumento 50X. ....	67
Figura 46. Adobe con fibra aumento 583X. ....	67
Figura 47. Adobe sin fibra aumento 600X. ....	68
Figura 48. Esmectita (A) donde las moléculas de agua están atrapadas alrededor de los cationes en la región interlamilar. Vermiculita (B) análogo a la esmectita y tiene dos capas de H <sub>2</sub> O en el espacio interlamilar. Sepiolita (C) contiene agua zeolítica en los canales y tubos de su estructura. Imogolita (D) y halloysita tubular (E, F) tienen estructuras tubulares donde H <sub>2</sub> O reside internamente en el lumen. ....	69
Figura. A1 Error de A en función de <i>Lb</i> .....	76
Figura. A2 Error de B en función de <i>Lb</i> .....	77
Figura. A3 Zona de medición. Diámetro de 150 mm y ubicación del calefactor en 106 mm .....	78
Figura. A4 Guarda. Diámetro interno 152 mm, diámetro exterior 375 mm y ubicación del calefactor 193.5 mm .....	79
Figura. A5 Placa caliente, vista frontal de los discos. Las ranuras son de 5/16'' para los calefactores, el gap es de 1 mm, las ranuras para la salida de alimentación son de 3 mm.....	79
Figura. A6 Placa caliente. Espesor total 5/8'' .....	80
Figura. A7 Corte del ensamblaje de los calefactores.....	81
Figura. A8 Rango común de termopares .....	81
Figura. A9 Temperatura límite del alambre de protección vs diámetro del termopar .....	82
Figura. A10 Serpentín de cobre, arreglo de espiral simple. Entrada parte inferior en el plano y la salida saliendo del plano perpendicular (unidades en mm).....	82

Figura. A11 Arreglo del equipo medidor de conductividad térmica .....	83
Figura A12. Juego de yeso para medición de conductividad térmica .....	85
Figura A13. Juego de totora para medición de conductividad térmica.....	87

## LISTA DE ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS

CARACTERES	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
APCG	Aparato de Placa Caliente con Guarda	
ASTM	Asociación Americana para ensayos y materiales (de los términos en inglés: <i>American Society for Testing and Materials</i> )	
CENAM	Centro Nacional de Metrología (de México)	
CER-UNI	Centro de Energías Renovables y Uso Racional de la Energía de la Universidad Nacional de Ingeniería	
CONCYTEC	Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica	
DRX	Difracción de Rayos X	
FONDECYT	Fondo Nacional de Desarrollo Científico y de Innovación Tecnológica	
INEI	Instituto Nacional de Estadística e informática (del Perú)	
NTP	Norma Técnica Peruana	
SENCICO	Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (del Perú)	
SEM	Microscopía electrónica de barrido (de los términos en inglés: <i>Scanning Electron Microscopy</i> )	
UNE	Norma Española	
UNI	Universidad Nacional de Ingeniería	
$l_c$	Longitud crítica de la fibra	m
$\sigma$	Resistencia a la flexión de la fibra	Pa
$d$	Diámetro de la fibra	m
$\tau$	Resistencia de unión de la fibra-matriz	Pa
$\lambda$	Conductividad térmica	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$q$	Calor proporcionado	W

$q_x$	Flujo de calor en la dirección x	$W m^{-2}$
$\nabla T$	Gradiente de temperatura	$K m^{-1}$
$\Delta T$	Diferencia de temperaturas entre foco caliente y frío	K
$T_f$	Temperatura de la placa fría	K
$T_c$	Temperatura de la zona de medición	K
$A$	Área de la zona de medición de la placa caliente	$m^2$
$\Delta x, e$	Espesor de la muestra	m
$\alpha$	Difusividad térmica	$m^2 s^{-1}$
$\rho$	Densidad	$kg m^{-3}$
$C_p$	Calor específico del material	$J kg^{-1}K^{-1}$
$V$	Diferencia de potencial	V
$I$	Intensidad de corriente	A
$S$	Área de la muestra	$m^2$
$f_0$	Resistencia a la compresión de la unidad	$kg cm^{-2}$
$P$	Carga de rotura	kg
$A_p$	Área promedio de las caras superior e inferior	$m^2$
$f_m$	Resistencia a la compresión de la albañilería	$kg cm^{-2}$
$C$	Factor de corrección (alto/ancho de la pila)	-
$R_f$	Resistencia a la flexión	MPa
$b$	Lado de la sección cuadrada del prisma	mm
$F_f$	Carga aplicada en la mitad del prisma en la rotura	N
$l$	Distancia entre soportes	mm
$F_z$	Resistencia a la cizalladura	$kg cm^{-2}$
$P_z$	Carga aplicada al área expuesta	kg
$A_v$	Área de la zona expuesta	$cm^2$
$w$	Contenido de humedad (agua)	%
$M_{cws}$	Masa del contenedor y tierra húmeda	g

$M_{c ds}$	Masa del contenedor y tierra seca	g
$M_c$	Masa del contenedor	g
$M_w$	Masa de agua ( $M_w = M_{cws} - M_{c ds}$ )	g
$M_s$	Masa de partículas sólidas ( $M_s = M_{c ds} - M_c$ )	g
%C	Porcentaje de contenido de humedad	%
$T_{pc}$	Temperatura de la zona de medición	K
$T_g$	Temperatura de la zona de guarda	K
$\frac{u_\lambda}{\lambda}$	Incertidumbre relativa de la conductividad térmica	-
$\frac{u_q}{q}$	Incertidumbre relativa de la potencia	-
$\frac{u_e}{e}$	Incertidumbre relativa del espesor	-
$\frac{u_A}{A}$	Incertidumbre relativa del área de medición	-
$\frac{u_{\Delta T}}{\Delta T}$	Incertidumbre relativa de la diferencia de temperatura	-
$\frac{u_V}{V}$	Incertidumbre relativa de la diferencia de tensión	-
$\frac{u_I}{I}$	Incertidumbre relativa de la intensidad de corriente	-
$\frac{u_R}{R}$	Incertidumbre relativa de la resistencia eléctrica	-
$D_m$	Diámetro de la zona de medición no dilatado	m
$\alpha$	Coefficiente de expansión térmica	m K <sup>-1</sup>
$D_i$	Diámetro de la zona de medición	m
$D_0$	Diámetro interno del anillo de guarda	m
$D_e$	Diámetro expandido de la zona de medición	m
$A_e$	Área expandida de la zona de medición	m <sup>2</sup>
$n$	Número entero	-
$\lambda$	Longitud de onda de los rayos X	Å
$d_{hkl}$	Distancia entre los planos de la red cristalina	Å
$\theta$	Ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión	°

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Para cuantificar la transferencia de calor de un sistema, por cualquiera de sus tres mecanismos: conducción, radiación o convección, se deben conocer las propiedades térmicas de los materiales que componen al sistema. Específicamente, si se considera que el sistema es una vivienda rural altoandina típica, construida a base de adobe, entonces es indispensable caracterizar térmicamente ese material. Y este es el objetivo básico de esta tesis, que además ha abordado el estudio integral del adobe, como material biocompósito. Por ello se han realizado estudios mecánicos y estructurales de un grupo de muestras de adobe fabricadas bajo condiciones similares a las empleadas en las viviendas rurales altoandinas.

En el presente capítulo se describe el planteamiento del problema abordado, así como los objetivos trazados y el estado de arte de las investigaciones (a nivel nacional e internacional) desarrolladas en el estudio de los adobes.

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las heladas en las zonas rurales altoandinas del Perú, cada año en época de invierno, causan daños en los cultivos y en el ganado, que muchas veces son la base de las actividades económicas que predomina en estas zonas.

En cuanto a la población que vive en esta zona, según el INEI el año 2016, más del 30% está en edad vulnerable [1].

El problema se acentúa más porque, de parte de las instituciones del Gobierno, se tiene poco conocimiento de criterios bioclimáticos y se construyen edificaciones sin el debido aislamiento térmico. Por otro lado los pobladores, sin ninguna orientación técnica, prefieren reemplazar los techos de fibra vegetal (*Stipa Ichu*) por calamina metálica, porque es fácil de instalar y por su tiempo de vida [2].

## 1.2 OBJETIVOS

A continuación, se presentan los objetivos planteados en la presente tesis.

### **OBJETIVO GENERAL**

- Caracterización integral de un grupo de adobes, representativos de las zonas altoandinas. Identificando a los adobes, como materiales biocompósitos a ser caracterizados térmica, mecánica, morfológica y estructuralmente.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Fabricación de adobes, representativos de las zonas rurales altoandinas, considerando un rango de variación en dimensiones y composiciones.
- Clasificación del tipo de suelo.
- Determinar la conductividad térmica del adobe.
- Determinar las propiedades mecánicas del adobe: compresión a la unidad y pilas, flexión y cizalladura.
- Caracterización morfológica de la estructura interna del adobe.
- Caracterización estructural de la tierra usada para la fabricación del adobe.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Las heladas es un fenómeno climático que cada año arremete en el Perú en especial en los lugares altos de Perú. Y en época de invierno provoca daños en la agricultura, en el ganado y en las personas, presentándose incluso pérdidas humanas.

Se hizo un estudio en el 2017 acerca de las heladas radiativas y su impacto en la agricultura en los andes tropicales del Perú por el IGP, siendo la variabilidad de la temperatura mínima más pronunciada en climas secos, considerando el 0 °C como límite para las heladas, se encontró que esto ocurre en un 50% del tiempo entre junio y julio [3].

El tema de las heladas en las zonas alto andinas es noticia cada año, lamentablemente, durante esa estación hay una alta tasa de mortalidad de personas en edad vulnerable, es decir niños menores a 5 años y adultos mayores a 60 años [4]. Por ejemplo, el año 2016 en el mes de junio en Imata, Arequipa (lugar donde se desarrolla en proyecto de investigación financiado por FONDECYT) se registró temperaturas por debajo de -15,8 °C [1].

Por todo ello es necesario hacer un estudio integral del “adobe”, así es primordial conocer sus propiedades térmicas, como la conductividad térmica y difusividad [5], y también es importante conocer sus propiedades mecánicas, como la compresión a la unidad y la resistencia de albañilería, resistencia a la flexión y cizalladura [6].

### **1.4 ANTECEDENTES**

A continuación, se presentarán los antecedentes de estudios térmicos realizados a adobes tanto a nivel nacional como mundial.

#### **EN EL PERÚ**

El adobe es un material de construcción usado desde la antigüedad, por ejemplo Chan-Chan (Trujillo, Perú), que es la segunda ciudad más grande del mundo hecha de adobe [7]. Este material, de fácil acceso, de muy bajo costo y fácil preparación, es usado principalmente en las zonas altas del Perú. Según el INEI, para el año 2015 se tuvo al adobe/tapial como material

predominante en las paredes exteriores de las casa en las zonas rurales del Perú con una presencia de 72,5% [8].

Se han desarrollado exhaustivos estudios de las propiedades mecánicas del adobe en el Perú [9-11]. Sin embargo, hasta el momento no se han reportado estudios nacionales que caractericen paralelamente las propiedades mecánicas y térmicas de estos materiales. Sí se destaca que, por medio de tesis profesionales, de diferentes universidades nacionales, se han construido y diseñado sistemas para poder medir la conductividad térmica de materiales usados en edificación [12] y de especies forestales [13, 14].

También se tienen algunos estudios que permitieron determinar la difusividad térmica de especies como los granos de quinua y cañihua [15]. Por otro lado se han desarrollado simulaciones de transferencia de calor con la finalidad de hacer propuestas para mejorar la calidad de vida de los habitantes en las zonas altoandinas mediante mejoras en los elementos constructivos de las casas [16, 17]. Finalmente se han realizado algunos trabajos de investigación en el estudio de la conductividad térmica de materiales aislantes como el adobe [18] y fibras vegetales como *Stipa ichu* [19].

## EN EL EXTERIOR

A nivel internacional se tiene algunos estudios que involucran tanto la caracterización mecánica y térmica de diferentes presentaciones constructivas del adobe. Como en Italia donde se evaluaron paneles de este material. Para medir la conductividad térmica se construyó un equipo basado con la Norma UNI EN ISO 8990. Los valores de conductividad térmica se encontraron entre 0,09-0,11  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Asimismo, se realizaron evaluaciones de las propiedades mecánicas de los paneles para obtener la resistencia de corte [20]. Por otro lado, en Rumania se determinó mejoras en las propiedades mecánicas y térmicas de los adobes considerando que la adición de 9-10% en volumen de fibra de caña fue equivalente al 30-40% de volumen de paja [21]. En España se han desarrollado estudios en la caracterización mecánica de adobes incluyendo fibras vegetales acondicionadas, como es el caso del *Spartium junceum* [22]. En la India, mejoraron la durabilidad del adobe con la adición de fibras vegetales como la *Grewia optiva* (2% en peso) y *Pinus roxburghii* (1% en peso) comparándose con un adobe estabilizado (2,5% en peso de cemento) [23].

A nivel internacional se tienen algunos estudios usando sistemas bajo la norma ASTM C 177 para medir la conductividad térmica, como en el caso de México donde se evaluaron: paneles de fibras de coco envueltos en ferrocemento, obteniéndose un valor de 0,221  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  [24]; también se midieron bloques de yeso, poliestireno, PVC y piedra pómez, obteniéndose valores de 0,178  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , 0,0326  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , 0,0569  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  y 0,391  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , respectivamente [25]. Destacan también los trabajos realizados en Turquía donde bajo la norma ASTM C 549 se midió la conductividad térmica de ladrillos de adobe reforzados con fibras; además se encontró que el uso de piedra pómez en los ladrillos disminuía la conductividad térmica [26]. Recientemente en Sudáfrica,

donde empleando la norma ASTM C 518, se determinó la conductividad térmica de probetas de fibra animal proveniente de *Ovis aries*, así como bloques fabricados con fibras de poliéster [27].

## CAPÍTULO 2: MATERIALES COMPÓSITOS

A continuación, se presenta la clasificación de los materiales compósitos y específicamente se define al adobe como material biocompósito [28]. Además, brevemente, se comenta la caracterización general de los materiales, resaltando los aspectos térmicos, mecánicos y estructurales, dado que son los que en detalle se abordarán en el desarrollo de este trabajo de investigación. Adicionalmente se presenta un pequeño resumen de la Norma Peruana E.080 Adobes.

### 2.1 EL ADOBE COMO MATERIAL BIOCOPÓSITO

Un material compósito es considerado como un material *multi-fase* que muestra una proporción significativa de propiedades de ambas fases constituyentes, de tal manera que se realice una mejor combinación de propiedades [29].

Muchos materiales compósitos están conformados por dos fases; una es llamada **matriz** la cual es continua y encierra a la otra fase, comúnmente llamada la fase **dispersa**.

Las propiedades de los compósitos son función de las propiedades de las fases constituyentes, su cantidad relativa, y la geometría de la fase dispersa. Este último punto hace referencia a la forma de las partículas, el tamaño de las partículas, su distribución, y su orientación.

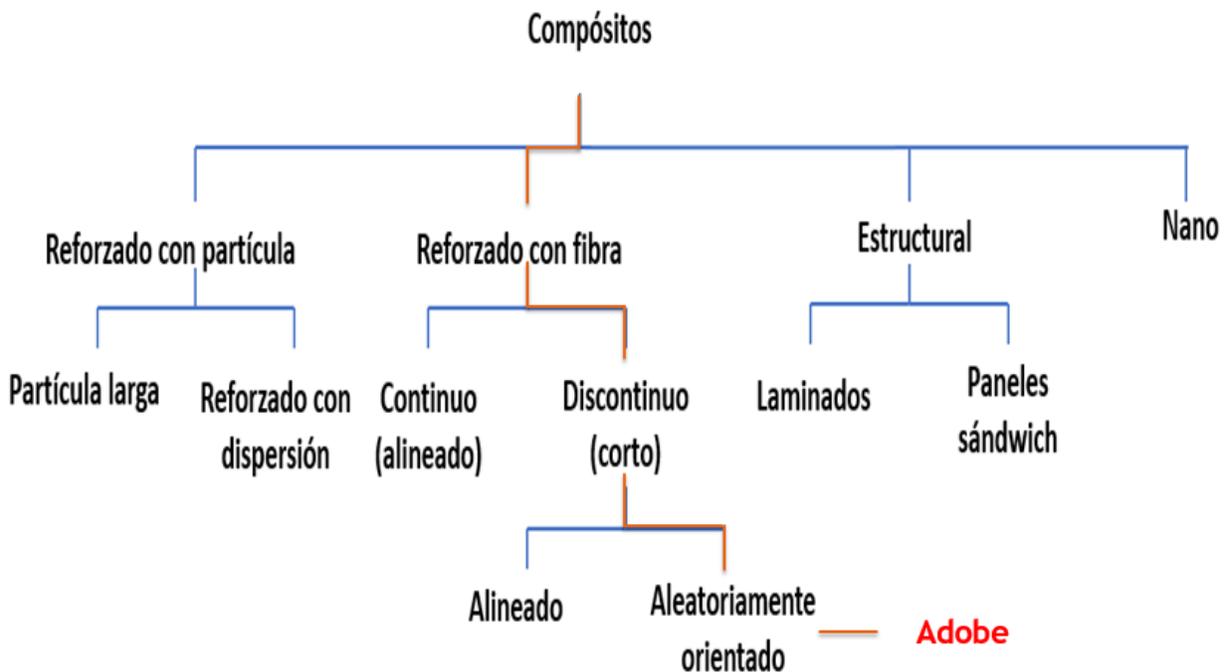


Figura 1. Clasificación de materiales compósitos. [29]

## **Nano compósitos**

Están compuestos de nano partículas que están incrustados en la matriz del material. Estos materiales pueden ser diseñados para tener propiedades superiores a las que la fase dispersa, en tamaño volumétrico, presentarían para características: mecánicas, eléctricas, magnéticas, ópticas, térmicas, biológicas o de transporte. Las propiedades dependen no solo en las propiedades de la matriz y las nano partículas, sino también en la forma de la nano partícula, el contenido y las características interfaciales matriz-nano partícula.

## **Compósitos estructurales**

Es un material *multi-capa* y, normalmente, un compuesto de baja densidad, usado en aplicaciones donde se requiere integridad estructural, alta resistencia a la compresión y torsión, y buena rigidez. Las propiedades dependen no solo de las propiedades de los materiales constituyentes, sino también de la geometría de los elementos.

El compuesto más común de este grupo es el laminar, el cual está compuesto de hojas en dos dimensiones o paneles unidos entre sí. Si el sistema está compuesto de varias láminas, o capas, es llamado "laminado", el cual sus propiedades dependerán en como la dirección del esfuerzo varía entre capa a capa. La resistencia general y el grado de isotropía dependen del material de la fibra, el número de capas y la secuencia de orientación. Un ejemplo es el compuesto laminado de quitina con ácido poli láctico (obtenida por el método de prensa en caliente) para desarrollar nuevos materiales con excelentes propiedades mecánicas y térmicas para aplicaciones de implantación en el área de huesos o dientes [30].

El otro tipo de compuesto de este grupo es el panel sándwich, el cual consiste en dos capas externas, las cuales están separadas por un núcleo céntrico, de mayor espesor a estas. Las capas externas son rígidas y resistentes, mientras que el núcleo es más liviano y tiene un bajo módulo de elasticidad. La rigidez del panel depende principalmente en las propiedades del núcleo y su espesor [29].

## **Compósitos reforzado con partículas**

En este tipo de compuesto, las partículas de la matriz se clasifican en dos categorías: las grandes (a nivel macroscópico), y las más pequeñas que se encuentran en dispersión, que pueden tener diámetros entre 0,01 y 0,1  $\mu\text{m}$ ; es decir la interacción partícula-matriz no puede ser tratada a nivel atómico.

Las partículas grandes, para un refuerzo eficaz, deben ser distribuidas uniformemente por toda la matriz. Además, el volumen de cada fase influye en el comportamiento; las propiedades mecánicas se incrementan con el aumento del contenido de partículas. Un ejemplo claro es el concreto, en donde el cemento es la matriz y la tierra y grava las partículas dispersas [29].

Para compósitos reforzados en dispersión, los metales y aleaciones son un claro ejemplo, donde tratamientos térmicos son usados para lograr mejoras en sus propiedades.

## Compósitos reforzado con fibras

Los compósitos más importantes son aquellos en los cuales la fase dispersa está en forma de fibras y se clasifican por su largo (longitud).

Las características mecánicas del compuesto reforzado con fibras dependen no solo de las propiedades de la fibra, sino también en el grado en el cual una carga aplicada es transmitida a las fibras por la fase matricial.

La longitud crítica ( $l_c$ ) de las fibras es un factor importante para un efectivo fortalecimiento y endurecimiento del material compuesto. La longitud crítica depende de tres factores: el diámetro de la fibra ( $d$ ), la resistencia de flexión ( $\sigma$ ) y la resistencia de unión de las fibras-matriz ( $\tau$ ).

$$l_c = \frac{\sigma \cdot d}{2\tau} \quad (1)$$

Para fibras  $l \gg l_c$  ( $l \gg 15l_c$ ) son denominadas continuas; mientras que las fibras discontinuas tienen longitudes menores a esta. Para mejorar la resistencia del compuesto, las fibras deben ser continuas.

El arreglo u orientación de las fibras relativa de una a otra, la concentración de las fibras, y la distribución de las fibras tienen una significativa influencia en la resistencia y otras propiedades de los compósitos reforzados con fibra. Con respecto a la orientación, dos casos son posibles como se muestra en la Figura 2, mostrada a continuación [29].

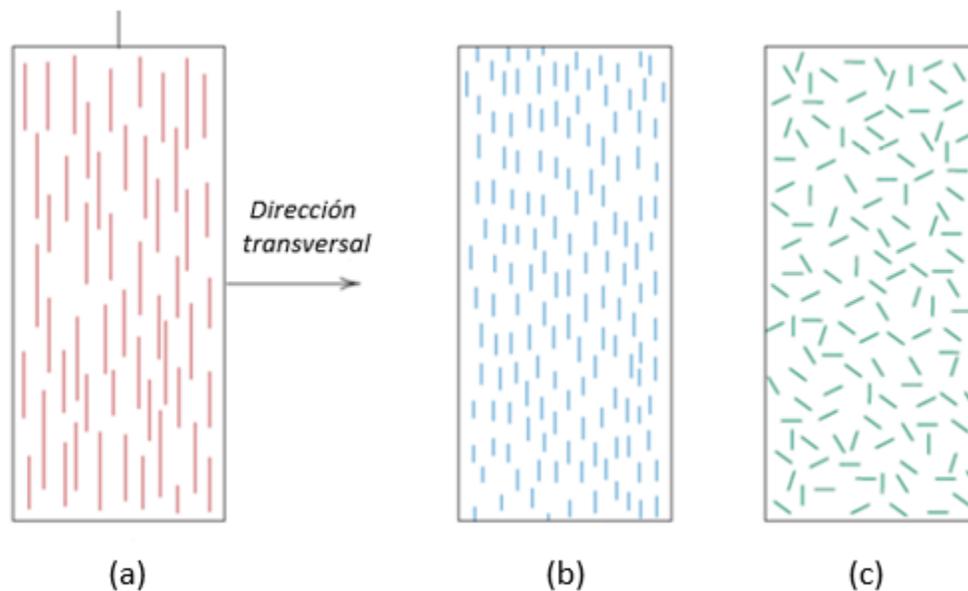


Figura 2. (a) Fibra continua y alineada, (b) fibra discontinua y alineada, (c) fibra discontinua y orientada aleatoriamente. [29]

Bajo esta clasificación el adobe es considerado un ***material compuesto reforzado con fibra vegetal discontinua y orientada aleatoriamente***.

### **Material biocompósito**

Un material biocompósito es un material compuesto hecho completamente de fuentes renovables, es decir tanto la fase continua (matriz) y la fase dispersa (reforzamiento) deben provenir de fuentes renovables [28]. Sus propiedades son influenciadas por un número de diferentes variables, como el tipo de fibra, condiciones ambientales de fabricación, método de procesamiento, y la modificación de la fibra [31].

En el caso de las fibras naturales se pueden sub-clasificar en vegetal, animal y mineral. Todas las fibras vegetales están compuestas de celulosa, mientras que las de fibra animal consisten en proteínas. Las fibras vegetales se pueden clasificar generalmente como fibras de líber, de hojas o de semillas; además la superficie de las fibras naturales es áspera y desigual, proporcionando una buena adhesión a la matriz en una estructura compuesta [28].

Los biocompósitos se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de reforzamiento: fibras cortas, fibras continuas y partículas (polvos) [32], análogo a la clasificación de compósitos.

Por tanto, el adobe es considerado un **material biocompósito**; que por sus componentes naturales es, por excelencia, un material de construcción sostenible. Los biocompósitos ayudan a reducir el desperdicio no renovable, el uso de materias primas y el consumo de combustibles fósiles.

### **Definición tradicional**

Finalmente, para complementar la definición del adobe, se tiene una descripción general de sus componentes. El adobe es uno de los materiales de construcción más antiguos usados por la humanidad, así lo demuestra la Ciudadela de Chan-Chan (Trujillo, Perú) con 1300-1400 años de antigüedad [7]. Se conoce como “adobe” a un bloque de tierra cruda mezclada con agua y, a veces, con paja u otras fibras vegetales, y secado al aire bajo sombra. Es un material heterogéneo, tiene partículas de diferentes tamaños, aire y agua. Para elaborar adobes de buena calidad se debe contar con la tierra adecuada y para esto existen varios tipos de pruebas de selección del tipo de tierra que dan información sobre el porcentaje recomendado de arcilla, limo y arena. Según la Norma E.080 Adobes, el adobe debe tener 10-30% de arcilla, 15-25% de limo y 55-70% de arena [33].

La arcilla es un material conformado por partículas de diferentes tamaños entre 0,0006 y 0,00002 mm. Está conformada básicamente por silicatos de aluminio hidratados, o también por silicato de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de láminas: la silícica y la alumínica. La silícica tiene una estructura tetraédrica de un átomo de silicio rodeado de cuatro oxígenos y se agrupan en unidades hexagonales siendo un átomo de oxígeno el nexo.

Por otro lado, la aluminica tiene una estructura octaédrica conformada de un átomo de aluminio rodeado de seis de oxígeno, de igual manera el oxígeno es el nexa para conformar la lámina [34].

El limo es un material conformado por partículas de diferentes tamaños subclasificándose en: limo fino (0,006-0,002 mm), limo medio (0,02-0,006 mm) y limo grueso (0,06-0,02 mm) [34].

Finalmente, la arena es un material conformado por partículas de diferentes tamaños subclasificándose en: arena fina (0,2-0,06 mm), arena media (0,6-0,2 mm) y arena gruesa (2,0-0,6 mm) [34]. La adición de arena gruesa a suelos arcillosos disminuye el número y espesor de las fisuras creadas en el proceso de secado de adobes.

## **NORMA E.080 ADOBES**

La norma delimita las consideraciones técnicas necesarias para la fabricación y uso del adobe como unidad constructiva en edificaciones, por ello aborda las características, comportamiento y diseño de este. Asimismo, hace hincapié que las construcciones con adobe serán limitadas según la zona sísmica

Se define al adobe como un bloque macizo de tierra sin cocer; es decir sin llevarlo a exposición de altas temperaturas (350°C), el cual puede contener fibra vegetal u otro material que mejore sus propiedades mecánicas. Un requisito importante es el contenido porcentual de: arcilla 10-20%, limo 15-15% y arena 55-70%. Sus dimensiones deberán estar en la proporción 1:2:4 (alto, ancho, largo; respectivamente) [33].

La norma hace hincapié en los esfuerzos admisibles en los ensayos de compresión. Para fines de diseño se considerará los siguientes esfuerzos mínimos:

- Resistencia a la compresión a la unidad: 12,0 kg/cm<sup>2</sup>.
- Resistencia a la compresión de la albañilería: 2,0 kg/cm<sup>2</sup>.

## **2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES**

Abordando principalmente los materiales sólidos, se sub-clasifican en tres categorías básicas: metales, cerámicos y polímeros. Cabe resaltar que los compósitos son combinaciones ingenieriles de dos o más diferentes materiales, como ya se presentó en la sección anterior.

La propiedad es una característica del material, la cual está en términos de un tipo y magnitud de una respuesta a un estímulo externo. Por lo general, las definiciones de propiedades son independiente de la forma y tamaño. Cada material expuesto a estímulos externos da diferente respuesta. Dentro de las propiedades más importante en el grupo de sólidos se clasifican en seis diferentes categorías que determinan su aplicabilidad: mecánicas, eléctricas, térmicas, magnéticas, ópticas y deteriorativas. En cada categoría hay un tipo característico de estímulo; por ejemplo, las propiedades eléctricas como la conductividad eléctrica o constante dieléctrica,

el estímulo es el campo eléctrico [29]. En el ámbito de la medición de las diferentes propiedades, están pueden ser no destructivas o destructivas.

Muchas veces es conveniente examinar los elementos estructurales y sus defectos, ya que ellos influyen en las propiedades de los materiales. Algunos elementos son de dimensiones macroscópicas por tanto se puede observar a simple vista o a veces con el uso de un microscopio óptico. Mientras que en el caso de elementos de dimensiones microscópicas es necesario el uso de microscopia electrónica de barrido o microscopia electrónica de transmisión para tal fin. Cabe mencionar que muchas importantes aplicaciones de los materiales se han alcanzado de observaciones de la microestructura de los mismos, dado que conociendo esta propiedad se puede entender en rigor el nexo entre otras propiedades. Más aún el conocimiento integro de la microestructura de un material permite también diseñar nuevos materiales con propiedades específicas.

Asimismo, es importante conocer los diferentes elementos presentes en los materiales. Para tal fin es muy usada la técnica de Difracción de Rayos X de una muestra en polvo, dado que permite determinar la estructura cristalina de los sólidos que la componen, aspecto que dará información termodinámica del material.

Es decir, la caracterización completa de un material podría entenderse como la identificación integra de todas sus propiedades, para un adecuado uso y aplicación del material.

En la presente investigación se realizó el estudio de un grupo de probetas de adobe fabricadas con y sin fibra (*Stipa ichu*), y reconociendo la importancia de este material dentro del contexto constructivo de las viviendas rurales para zonas altoandinas; se ha identificado como prioridad determinar sus propiedades térmicas, mecánicas, morfológicas y estructurales.

## CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE ADOBE

El presente capítulo detalla el proceso de selección, clasificación y elaboración empleado para la fabricación de las probetas de adobe estudiadas en el presente trabajo. Además, se presentan los fundamentos de cada una de las técnicas experimentales usadas para el estudio del biocompósito.

### 3.1 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS DE ADOBE

Para la elaboración tradicional de adobes la selección de la tierra se hace de manera empírica. Sin embargo, es necesario realizar la clasificación de suelos de acuerdo con las normas ASTM en lo que corresponde a los límites líquido y plástico, así como su granulometría. Por ello en esta sección se explica, de manera concisa, el proceso de elaboración de las probetas de adobe.

#### SELECCIÓN DE TIERRA PARA FABRICACIÓN DE ADOBES

Antes de la fabricación de las probetas de adobe fue necesario conocer si la tierra a usarse era la adecuada por ello, siguiendo el manual *“Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra-prácticas de campo”* [35], se realizó una identificación cualitativamente de la misma, que consistió en los siguientes tests:

- Caída de la bola: indica el tipo de la tierra en función de sus propiedades de cohesión.
- Cordón: Este test evalúa la resistencia de la tierra en un determinado estado de humedad y nos da información sobre el tipo de tierra más probable que lo constituye.
- Cinta: este test relaciona la plasticidad con el tipo de la tierra.
- Test de exudación: evalúa la plasticidad de la tierra en función de la su capacidad de retener agua.
- Resistencia seca: El test identifica el tipo de la tierra en función de su resistencia mecánica.
- Rollo: Este test verifica la cantidad de arcilla (material cohesivo) contenida en la tierra.
- Caja: Este test mide la retracción lineal del suelo que, indirectamente, indica el comportamiento de la retracción volumétrica.

#### CLASIFICACIÓN DE SUELOS

La tierra para la fabricación de adobes fue sometida a diferentes ensayos. Primero se ensayó el contenido de humedad en la tierra según la norma ASTM D2216. Luego se realizaron los ensayos de límite líquido y límite plástico según la norma ASTM D4318. Finalmente se hizo un ensayo de granulometría por tamizado y por hidrometría según la norma ASTM D422. Estos ensayos se realizaron en Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI [36].

## Contenido de humedad

El contenido de humedad en un suelo es la relación expresada como un porcentaje de la masa de agua en una masa dada de material a la masa del material sólido.

La muestra fue pesada antes con su respectiva tara en una balanza de clase II de 0,1g de legibilidad. Luego se llevó al horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C por 24 horas. Finalizado este tiempo se pesó nuevamente según procedimiento de la Norma ASTM D2216 [37].

Finalmente se calculó el contenido de humedad siguiendo la relación:

$$w = \left[ \frac{M_{cws} - M_{cds}}{M_{cds} - M_c} \right] \times 100 = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

Donde

$w$ : Contenido de humedad (%)

$M_{cws}$ : Masa del contenedor y tierra húmeda (g)

$M_{cds}$ : Masa del contenedor y tierra seca (g)

$M_c$ : Masa del contenedor (g)

$M_w$ : Masa de agua ( $M_w = M_{cws} - M_{cds}$ ) (g)

$M_s$ : Masa de partículas sólidas ( $M_s = M_{cds} - M_c$ ) (g)

**Tabla 1.** Registro de masas para el ensayo de contenido de humedad en las probetas de abobe

Sistema	Masa (g)
Contenedor + peso del suelo húmedo	3292,4
Contenedor + peso del suelo seco	3217,2
Agua (g)	75,2
Contenedor (g)	812,7
Suelo seco (g)	2404,5

## Ensayos de Límites Líquido y Plástico

La propiedad del suelo de ser moldeado se llama plasticidad. Según el contenido de humedad, adopta una consistencia determinada.

La consistencia de un suelo es la relativa facilidad con la que puede ser deformado y depende de un contenido de humedad determinado. Para los suelos cohesivos se definen cuatro estados de consistencia: Sólido, Semi-sólido, Plástico y Líquido.

Los límites líquido y plástico se utilizan para clasificar e identificar los suelos, los cuales se determinaron según la Norma ASTM D4318.

**El límite líquido** es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso. **El procedimiento general para el límite líquido** consiste en colocar una muestra húmeda en la Copa de Casagrande, dividirlo en dos con el acanalador y contar el número de golpes requerido para cerrar la ranura.

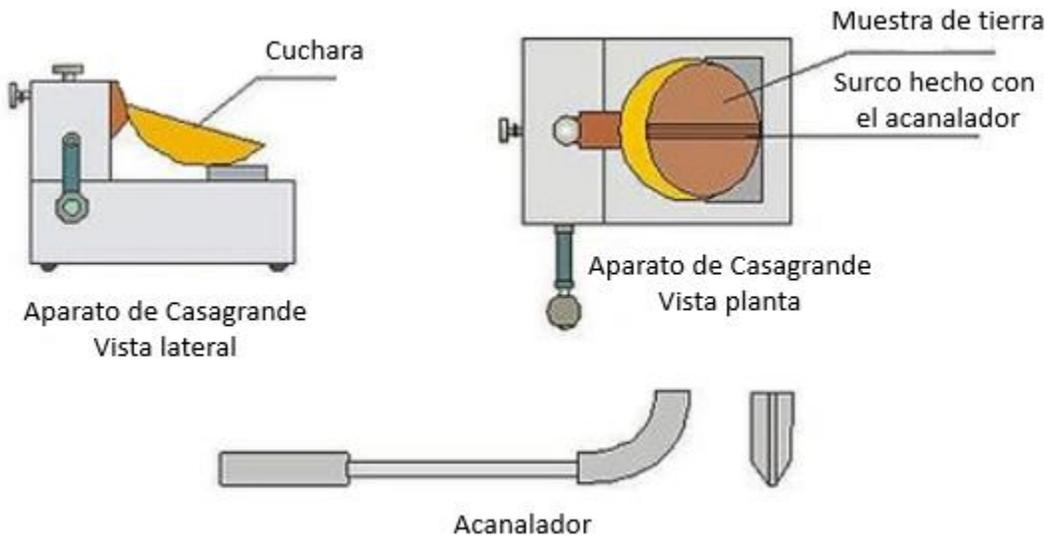


Figura 3. Dispositivo para la determinación del Límite Líquido. Unidades en mm [38].

Específicamente la Norma ASTM D4318 señala que se trabaja con una muestra seca de tierra tamizada por la malla N° 40. A la tierra se agrega una pequeña cantidad de agua y se homogeniza completamente la muestra. Luego, con la ayuda de una espátula, se coloca y nivela en la parte central de la Copa de Casagrande. En el centro de la Copa se pasa el acanalador para definir una ranura con una dimensión determinada según el espesor del acanalador (Figura 4b). La Copa de Casagrande se pone en movimiento por medio de una manivela y se suministraron (2 golpes por segundo), hasta que la ranura se cerró en una longitud de 12,6 mm (Figura 4c). En ese momento se registra la cantidad de golpes y se toma una muestra de la parte central para ser depositado en una vasija y pesarla. Posteriormente la muestra colectada en la vasija se lleva a un tratamiento térmico de  $110 \pm 5$  °C por 24 horas y finalmente es nuevamente pesada para determinar el contenido de humedad. Se grafica el contenido de humedad vs el número de golpes en escala semi logarítmica [39].



(a)

(b)

(c)

**Figura 4.** (a) Materiales: copa casa nave, acanaladores y espátula, (b) División con el acanalador, (c) cerrar la ranura 12,7 mm.

Repetir el procedimiento con al menos 3 muestras más.

**Tabla 2.** Registro de pesos para los ensayos de límite líquido y plástico

Número de Prueba	LÍMITE PLÁSTICO		LÍMITE LÍQUIDO			
	1	2	1	2	3	4
Contenedor N°	J	50	A0	00	T4	M6
N° golpes	-	-	34	31	23	19
Masa del contenedor + suelo húmedo (g)	21,6	24,2	46,4	53,0	46,6	42,2
Masa del contenedor + suelo seco (g)	20,7	23,4	44,9	51,5	45,0	40,8
Masa del agua (g)	0,9	0,8	1,5	1,5	1,6	1,4
Masa del contenedor (g)	16,2	18,2	37,70	45,10	38,60	35,80
Masa suelo seco (g)	4,5	5,2	7,2	6,4	6,4	5,0
Contenido de humedad (%)	20,00	15,38	20,83	23,44	25,00	28,00

El Límite Líquido se determina según la ecuación lineal (3), determinada a partir del logaritmo natural del número de golpes ( $N$ ) (eje  $x$ ) y el contenido de humedad (eje  $y$ ), evaluado para  $N=25$ .

**Tabla 3.** Número de golpes y contenido de humedad (límite líquido)

<i>N</i>	48	36	24	22
Log( <i>N</i> )	1,68124124	1,5563025	1,38021124	1,34242268
% C	20,41	21,71	21,90	22,36

$$\%C = a + b \cdot \text{Log}(N) \quad (3)$$

A partir de la tabla 3 y la ecuación 3 donde %C es el contenido de humedad se determinó a=28,87, b=-4,889.

**El límite plástico** es la humedad correspondiente en el cual el suelo se cuarteo y quiebra al formar pequeños rollitos o cilindros pequeños. **El procedimiento para el límite plástico** consiste amasar el suelo, formar rollitos hasta que su diámetro sea de 3,2 mm según Norma ASTM 4318. La prueba continua hasta que el rollito empieza a rajarse y tiende a desmoronarse. Una vez que se tiene al menos 6 gramos de los rollitos depositar en una vasija, pesar esta. Luego se lleva a un tratamiento térmico de  $110 \pm 5$  °C por 24 horas. Una vez retirado del horno volver a pesar para determinar el contenido de humedad. Seguidamente se repite el mismo procedimiento.

El límite plástico es el promedio de ambas determinaciones de contenido de humedad.

### **Análisis granulométrico**

Este análisis nos permite la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas del suelo.

Si se requiere la curva granulométrica completa incluyendo la fracción de tamaño menor que el tamiz de 0,074 mm (N° 200), la gradación de ésta se determinará por sedimentación, utilizando el hidrómetro para obtener los datos necesarios. Es por ello que realizaron ambas granulometrías: por tamizado y por hidrómetro de acuerdo con la Norma ASTM D422.

### **Análisis granulométrico de suelos por tamizado**

En este análisis se tiene una porción de tierra seca la cual se debe pesar, seguido se tiene que lavar en la malla N° 200 y pesar la tierra una vez secada al horno. La diferencia de peso entre la tierra seca al inicio y la tierra seca después del secado se sumará al porcentaje de la tierra que pasa la malla N° 200, valor en la última línea de la Tabla 4. De acuerdo con esto se pasó por las mallas:  $\frac{1}{4}$ ", N° 4, N° 10, N° 20, N° 30, N° 40, N° 60, N° 100 y N° 200.

El arreglo de estos tamices es de forma vertical de mayor abertura a menor abertura, como se indica en la Figura 5.



**Figura 5.** Ubicación de tamices de mayor abertura (superior) a menor abertura (inferior) para realizar la separación de partículas por tamizado.

Se registra la masa retenida por tamiz, se consideró 420,6 g de tierra secada al horno.

**Tabla 4.** Registro de tierra pasante y retenida en los tamices

Tamiz	Abertura (mm)	Masa Retenida (gr)	% Parcial Retenido	(%) acumulado	
				Retenido	Pasa
1/4"	6,350	<b>2,00</b>	0,5%	0,5%	99,5%
Nº4	4,760	<b>2,00</b>	0,5%	1,0%	99,0%
Nº10	2,000	<b>8,40</b>	2,0%	2,9%	97,1%
Nº20	0,840	<b>20,30</b>	4,8%	7,8%	92,2%
Nº30	0,590	<b>14,50</b>	3,4%	11,2%	88,8%
Nº40	0,426	<b>19,80</b>	4,7%	15,9%	84,1%
Nº60	0,250	<b>35,40</b>	8,4%	24,3%	75,7%
Nº100	0,149	<b>43,40</b>	10,3%	34,6%	65,4%
Nº200	0,074	<b>46,30</b>	11,0%	45,6%	54,4%
Pasa		<b>228,80</b>	54,4%	100,0%	0,0%

#### **Análisis granulométrico por medio del Hidrómetro**

El hidrómetro se utiliza para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo. Con el fin de clasificación de suelos, este método aplica a partículas de suelos que pasan el tamiz N 10 (2,0 mm) y para una mayor precisión se utiliza el tamiz N° 200 (74 µm).

En este ensayo se consideró el tamiz N° 200, a continuación, se detalla el procedimiento:

- Para el caso de suelos limosos y arcillosos la cantidad requerida es de 50 g a 60 g en masa seco.
- Se prepara en un vaso precipitado una solución de 10 g de  $(\text{NaPO}_3)_6$  (Hexametáfosfato de Sodio) con 250 ml de agua destilada y agregar el peso seco a este. Con la finalidad de evitar que el suelo en suspensión se agrupe formando grumos o flóculos.
- Se deposita la mezcla en un vaso de dispersión, lavando cualquier residuo que quede en el vaso precipitado.
- Se coloca el vaso de dispersión en el aparato agitador durante un minuto.
- Se transfiere la suspensión a un cilindro de sedimentación de 1000 ml. Se tapa el cilindro utilizando un tapón adecuado, agitar la suspensión vigorosamente durante varios segundos.
- Al terminar el minuto de agitación, se coloca el cilindro sobre una mesa.
- Se introduce lentamente el hidrómetro en la suspensión y comienza a tomar el tiempo con un cronometro.

Finalmente se tomó medidas de temperatura y del Hidrómetro a: 15 segundos, 30 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 5 minutos, 10 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 60 minutos, 4 horas y 24 horas [40].



**Figura 6.** Tierra en suspensión para el ensayo de hidrometría.

Con los resultados de los dos análisis de granulometrías se obtuvo la curva granulométrica completa de la tierra empleada en la presente tesis.

Finalmente con los resultados de los límites líquido y plástico y la granulometría se puede clasificar la tierra usada según la Norma ASTM 2487 [41].

## FABRICACIÓN DE ADOBES

El proceso para la fabricación de las probetas o bloques de adobes se explicará a continuación y se presentará en el diagrama de la Figura 9:

- Tamizar la tierra (0,2 cm de abertura), con la finalidad de separar piedras u otros materiales de mayor tamaño a la abertura del tamiz.
- La tierra se humedece poco a poco con agua hasta tener una consistencia plástica, como se muestra en la Figura 7.
- Luego se agrega la fibra como se muestra en la Figura 8, se mezcla y se cubre, con una lámina de polietileno, y se mantienen esa condición durante dos o tres días, con el objetivo que la arcilla de la tierra adsorba la máxima cantidad de moléculas de agua en su estructura. Este proceso se conoce artesanalmente con el término “dormido”, término que en adelante también se usara en este trabajo.
- Una vez terminado el proceso anterior de dormido la mezcla esta lista para ser puesta en los moldes. Los cuales deben ser humedecidos y recubiertos con arena fina para que el adobe pueda ser desmoldado fácilmente.
- El tiempo de secado depende de las condiciones ambientales y se debe dejar bajo sombra para evitar el agrietamiento.



Figura 7. Mezcla de tierra con agua, consistencia plástica.



Figura 8. Mezcla de tierra tamizada y dormida con ichu seco.

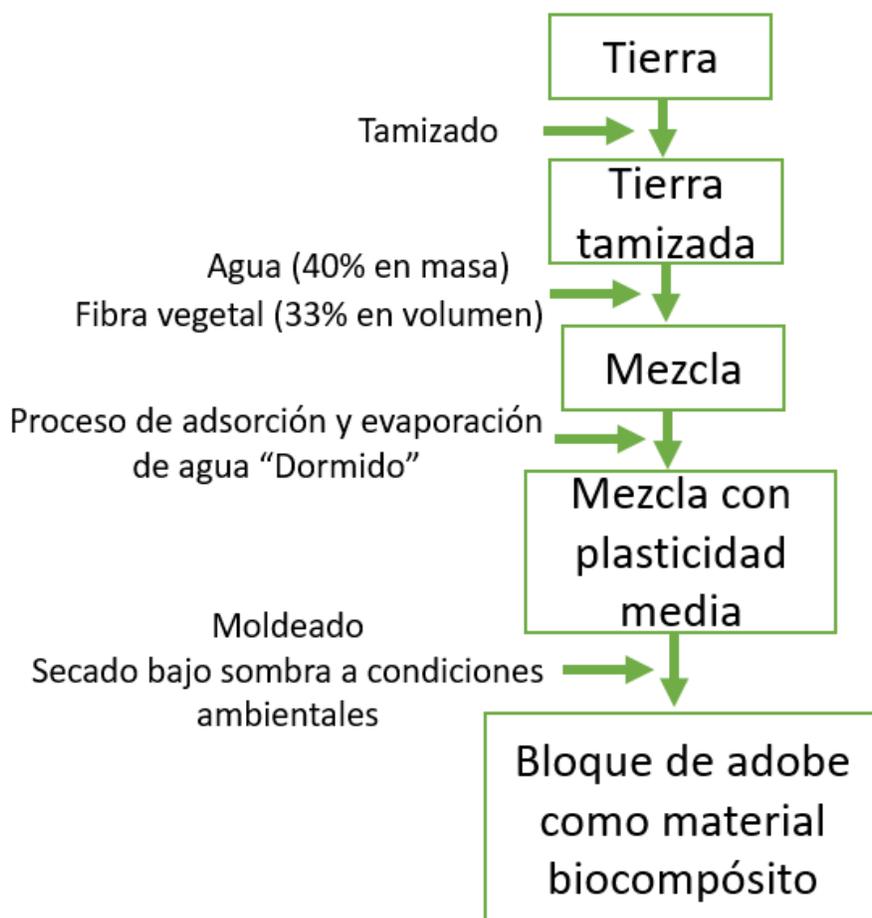


Figura 9. Diagrama de flujo para la fabricación de las probetas o bloques de adobe.

La fabricación de adobes, estos se hicieron en la UNI con tierra adquirida de una cantera en Huachipa y en Raymina con tierra de la localidad (Ayacucho).

**En la UNI**, en un principio se trabajó con tierra sin tamizar y moldes sin arena fina. Posteriormente se consideró agregar *Stipa ichu* seco dándole una distribución ordenada (que no haya fibra sobresaliente del bloque del adobe) y finalmente se consideró el tamizado y dormido de tierra con fibra seca.

**Tabla 5.** Adobes de diversos tamaños fabricados en la UNI

Probetas de Adobe Dimensiones (cm)	#	Relación en volumen Tierra: fibra vegetal	Tiempo de Dormido (días)
5,0 x 5,0 x 2,5	20	2:1	5
17,0 x 17,0 x 2,5	30	2:1	5
28,0 x 14,0 x 7,0	30	2:1	5

**En Raymina** se realizó un doble tamizado, primer tamizado (abertura de 0,5 cm) y el segundo tamizado (abertura de 0,2 cm) seguido de un proceso de dormido como lo indica la Tabla 6.

**Tabla 6.** Adobes de diversos tamaños, composición, tiempo de dormido fabricados en Raymina (Ayacucho)

Probetas de Adobe Dimensiones (cm)	#	Relación en volumen Tierra: fibra vegetal	Tiempo de Dormido (días)
5,0 x 5,0 x 2,5	8	4:1	1
	14	2:1	2
	5	2:1	3
17,0 x 17,0 x 2,5	2	2:1	2
	2	2:1	3
41,0 x 41,0 x 5,0	1	4:1	3
28,0 x 14,0 x 7,0	1	1:1	2
	3	4:1	5



**Figura 10.** Diferentes muestras de adobe secándose al aire libre en Raymina, Ayacucho.

A continuación, se detallará las dimensiones de los bloques de adobes para los diferentes ensayos.

**Tabla 7.** Dimensiones de adobes para los diferentes ensayos

<b>Ensayo</b>	<b>Dimensiones en cm</b>
SEM	5,0 x 5,0 x 2,5
Compresión unidad y pilas	28,0 x 14,0 x 7,0
Flexión	7,0 x 7,0 x 24,0
Cizalladura	7,0 x 7,0 x 12,0
Conductividad térmica	17,0 x 17,0 x 2,5

### 3.2 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LAS PROBETAS DE ADOBE

En la caracterización de las propiedades térmicas y mecánicas de las probetas de adobe se desarrolló siguiendo normas técnicas antes mencionadas. Mientras que la determinación del tipo de arcilla, presente en la tierra, se hizo mediante DRX. Y la morfología interna de un bloque de adobe se estudió mediante SEM.

#### 3.2.1 TÉRMICAS

A continuación, se presentará el fundamento teórico haciendo énfasis en la conductividad térmica. Además, se detalla el principio de operación, el funcionamiento, y el proceso de medición empleando un Aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG).

#### PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES

Las propiedades térmicas se agrupan en dos grupos: propiedades de transporte y las propiedades termodinámicas. Las propiedades de transporte son la conductividad térmica y difusividad

térmica; mientras que las propiedades termodinámicas son la densidad, calor específico y capacidad calorífica volumétrica.

La conductividad térmica  $\lambda$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) es el coeficiente que relaciona el flujo de calor  $q$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) por unidad de tiempo, por unidad de área de una superficie isotérmica (en la dirección de disminución de la temperatura), con el gradiente de temperatura  $\nabla T$  ( $\text{K m}^{-1}$ ) el cual es un vector normal a la superficie isotérmica. Cabe mencionar que la conductividad térmica depende de la densidad y de las condiciones externas, como son la temperatura ambiente y la humedad relativa del medio.

A continuación, se muestra la Ley de Fourier [42], expresión basada en observación experimentales para materiales homogéneos e isotrópicos, de la cual se deriva el concepto de la conductividad térmica y es expresada de la siguiente forma:

$$q = -\lambda \nabla T \quad (4)$$

En cambio, la expresión de la difusividad térmica  $\alpha$  ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ) se halla a partir de la ecuación diferencial de la conducción de calor. La difusividad térmica está asociada con la velocidad de propagación de calor en la superficie del material durante el cambio de temperatura en el tiempo. Esta expresada de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad (5)$$

Donde  $\rho$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) es la densidad aparente del material,  $C_p$  ( $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) es el calor específico del material.

La conductividad térmica se puede medir usando diferentes métodos. Como por ejemplo para el caso de materiales sólidos aislantes se tiene: la Técnica Modificada Transitoria de Fuente Plana, el tradicional aparato de placa caliente (ASTM C 177), el aparato medidor de flujo de calor (ASTM C 518), fuente de plano transitorio y el aparato láser flash [43]. Los dos últimos son más costosos en comparación con los tres primeros. Los tres primeros son comerciales, el primero es versátil por el tiempo de medición, el cual es de unos segundos; mientras que las mediciones de los equipos construidos bajo las normas ASTM C 177 y ASTM C 518 pueden tardar horas, días. Entre estos dos últimos métodos, el primero es un método primario, mientras que el segundo es un método secundario y su fin es de investigación y calibración. Método primario y secundario hace referencia a la forma en que se obtiene la medida: directa o indirecta (mediante mediciones auxiliares) respectivamente [44].

Para la medición de la conductividad térmica del adobe se considerará el uso de un equipo construido bajo la norma ASTM C 177 llamado APCG, ubicado en el Laboratorio de Conductividad Térmica de la División de Termometría del Centro Nacional de Metrología (CENAM), México.

## EQUIPO MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

El sistema APCG del CENAM es un aparato primario; es decir, es un sistema el cual mide la propiedad física en mención de manera directa. Fue diseñado siguiendo las pautas de la norma ASTM C 177. Utiliza la técnica de transferencia de calor por conducción en estado estable.

Para deducir el principio de operación del APCG partiremos de la ecuación diferencial de conducción en el caso estable, para el caso de un material homogéneo, isótropo con características estacionarias y sin generación de calor [45]:

$$\lambda \nabla^2 T(r, t) = 0 \quad (6)$$

Considerando el caso unidireccional en el eje  $x$ , tenemos a partir de la ecuación 6. Donde  $r$  y  $t$  son distancia y tiempo, respectivamente.

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (7)$$

Luego se tiene a partir de la ecuación 7:

$$\lambda \left( \frac{d}{dx} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right) = 0 \quad (8)$$

Para que se cumpla la ecuación 8 se tiene lo siguiente:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \nabla T = q_x = CTE, \quad (9)$$

donde  $q_x$  es el flujo de calor por unidad de tiempo por unidad de área de una superficie isotérmica en dirección del descenso de temperatura; en otras palabras, se tiene la Ley de Fourier. Siendo la ecuación 9 una constante ( $CTE$ ) con tal que satisfaga la ecuación 8,

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \approx -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{q}{A}, \quad (10)$$

donde  $A$  es el área de la zona de medición; la cual no es necesariamente igual al área de la muestra  $S$ , más aún el área de la muestra debe ser igual o mayor al área de la zona de medición.

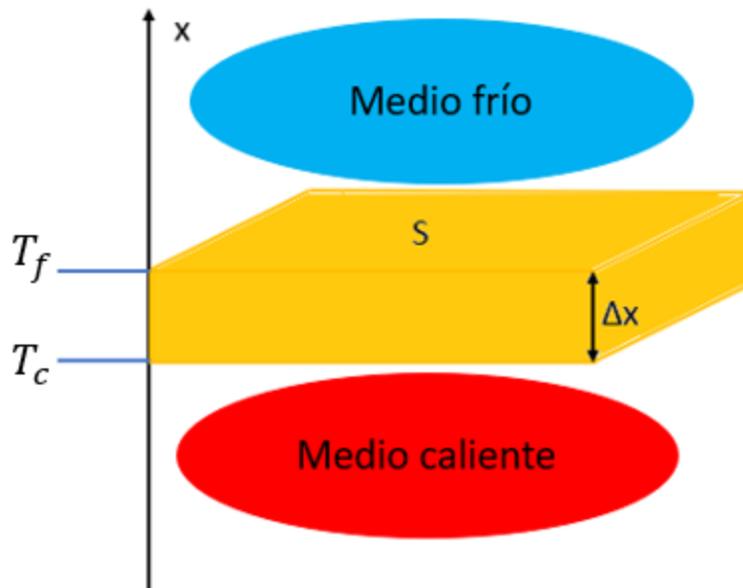
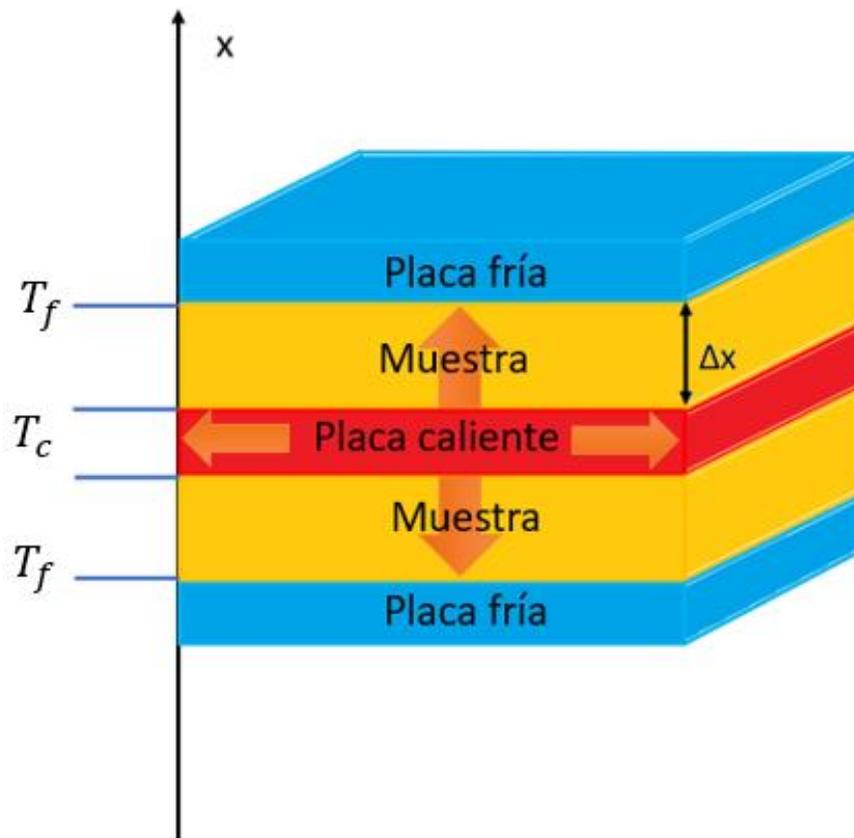


Figura 11. Representación del flujo de calor en la muestra. Donde  $\Delta x$  es el espesor de la muestra,  $T_f$  es la temperatura fría,  $T_c$  es la temperatura caliente y  $S$  es el área de la muestra.

De la ecuación 10 y la Figura 11, se conoce  $\Delta x$ ,  $\Delta T = T_f - T_c$ ,  $A$  es definido por el área de la zona de medición de la placa caliente.

Si bien es cierto que en la Figura 11 se indica que hay dos medios uno caliente y uno frío. Se deben definir ambos, para el caso del medio caliente se debe conocer  $q$  el calor proporcionado. Para ello se considera para este caso un calefactor, el cual a un valor de voltaje y de intensidad de corriente transmitirá el calor hacia la muestra y en las demás direcciones, por Efecto Joule [42].

Debido a que el calor por el calefactor se transmite a todas las direcciones, como lo indica las flechas en la Figura 12, debajo de este debe haber una muestra idéntica a la primera. Además, rodeando este calefactor debe existir un medio para minimizar la pérdida lateral. Este consiste en un pequeño encapsulado de aire seguido de otro calefactor cuya función sea que la diferencia de temperatura entre los calefactores sea mínima.



**Figura 12.** Representación del flujo de calor por las flechas. Donde la región roja es el calefactor y las regiones celestes son los medios fríos.

El medio frío también debe estar fijado a una temperatura, para este caso deben existir dos sumideros, uno encima de la primera muestra y otro debajo de la segunda muestra.

A continuación, se tendrá los detalles de cada parte del APCG.

El sistema tiene orientación vertical por facilidad de operación y un ambiente con temperatura y humedad controlada para que no influya en la estabilidad de la temperatura y en el resultado de la conductividad térmica; cuenta con: dos placas frías de aluminio, una placa caliente rodeado de un anillo de guarda (todas circulares) de cobre, sistema de recirculación de agua, termopares, fuentes de alimentación lineal, selector de canales, multímetro digital, control de temperatura de la placa caliente con respecto a la guarda, sistema de adquisición de datos, sensores de registro de humedad relativa y temperatura ambiente. Un corte transversal del equipo se tiene en la Figura 13.

Para que las mediciones de conductividad térmica que provienen de un sistema primario sean confiables y sean reconocidas internacionalmente, es necesario que el sistema a desarrollar tenga dimensiones que permita las comparaciones entre laboratorios con tal fin el APCG fue

construido con las siguientes dimensiones del espécimen: 305 mm de diámetro y un espesor máximo de 47 mm.

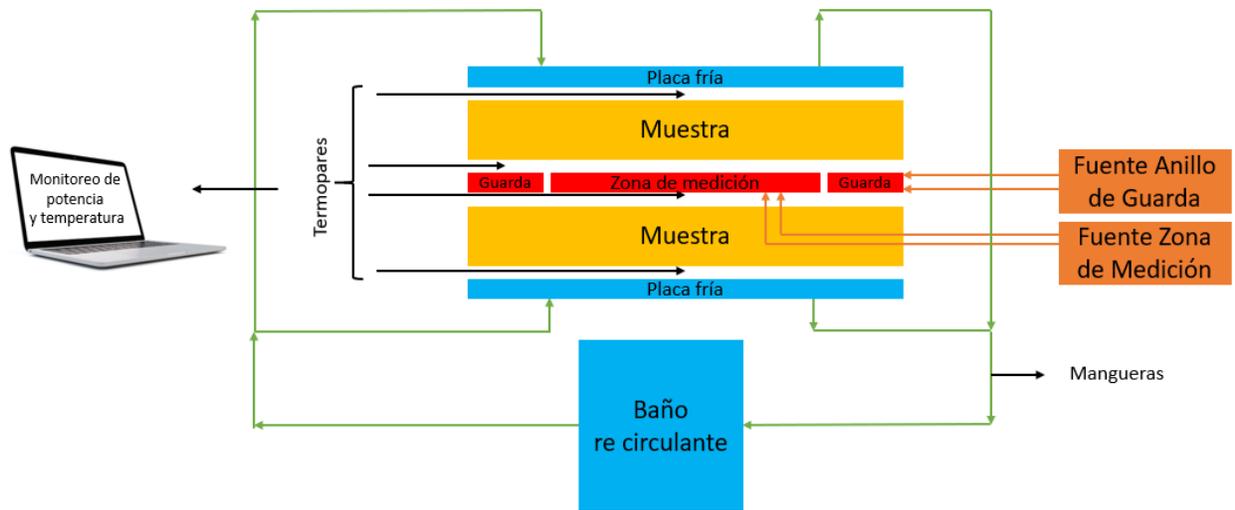


Figura 13. Esquema de un equipo construido bajo la ASTM C 177.

Las placas son de aluminio, un metal de alta conductividad térmica para mantener la temperatura uniforme y bajo costo.

**La placa caliente** la cual está conformada por **la zona de medición** y **el anillo de guarda** tiene un diámetro externo de 305 mm y un espesor de 12,2 mm. La zona de medición tiene un diámetro de 150 mm rodeado de un anillo de guarda de diámetro externo 305 mm entre estas dos hay un espacio de aire de 0,8 mm para aislar térmicamente una de otra.

Para la **ubicación de los sensores** de temperatura se utiliza la ecuación diferencial de conducción de calor para el caso de un material homogéneo:

$$\lambda \nabla^2 T(r, t) + g(r, t) = \rho C_p \frac{\partial T(r, t)}{\partial t}, \quad (11)$$

donde  $g$  es el aporte de energía por fuente internas en el material [45].

Usando la **ecuación 11** para el caso de coordenadas cilíndricas, se analiza la distribución de temperaturas en todas las posiciones radiales tanto para el área de medición como para la guarda. Luego se determina el promedio de temperaturas en cada región, así se puede comparar el valor de temperatura promedio con la temperatura asociada a su posición radial donde se aproxime a este, esta posición radial será representativa de cada zona. Dichas posiciones radiales serán donde se coloquen los sensores de temperatura.

En la zona de medición se tiene tres termopares tipo T distribuidos angularmente y en la guarda se cuenta con cuatro termopares tipo T también distribuidos angularmente como se indica en la

Figura 14. Estos termopares están en el interior de las placas colocadas en canales y tienen una única salida. Para tener el control de diferencia de temperatura entre el área de medición y la guarda; estos siete termopares están conectados en serie; es decir se tiene un montaje diferencial del termopar el cual al considerar las salidas 1 y 8 de la Figura 14 nos dará la suma de la diferencia de voltaje entre el área de medición y la guarda.

El área de medición y la guarda están soportadas mediante tres alfileres de acero inoxidable distribuidos equidistantes; para soportar el disco de la zona de medición cada uno de estos alfileres se empuja radialmente desde la sección de guarda por medio de un tornillo opresor.

Las **placas frías** cuentan con un canal de  $\frac{1}{2}$ " por donde circula agua mediante el baño termostático. Cada placa tiene un agujero por donde se inserta el termopar. El diámetro de estas placas es de 305 mm y su espesor de 28 mm. El material es de cobre pintado con negro mate.

Todos los extremos de todos los termopares (juntas frías) están en una caja como se indica en la Figura 15. Como la medición del termopar depende de la temperatura de la caja, el cual puede fluctuar; es recomendable hacer una compensación a la junta fría. Para ello se tiene un termopar de referencia donde la junta fría está en la caja y su junta caliente en contacto con agua pura en estado sólido y líquido (baño).

Este valor de caída de tensión del termopar de referencia que está en el baño se restara a las caídas de tensión de los otros nueve termopares cuyas juntas frías están en la caja (tres termopares de la zona de medición, cuatro termopares de la zona de guarda y dos termopares de las placas frías). Finalmente, de acuerdo con la calibración del termopar, se convierte las lecturas de voltaje a temperatura.

El **sistema de recirculación de agua** cuenta con un baño termostático y mangueras que se acoplan a tuberías tanto por las placas frías inferior como superior.

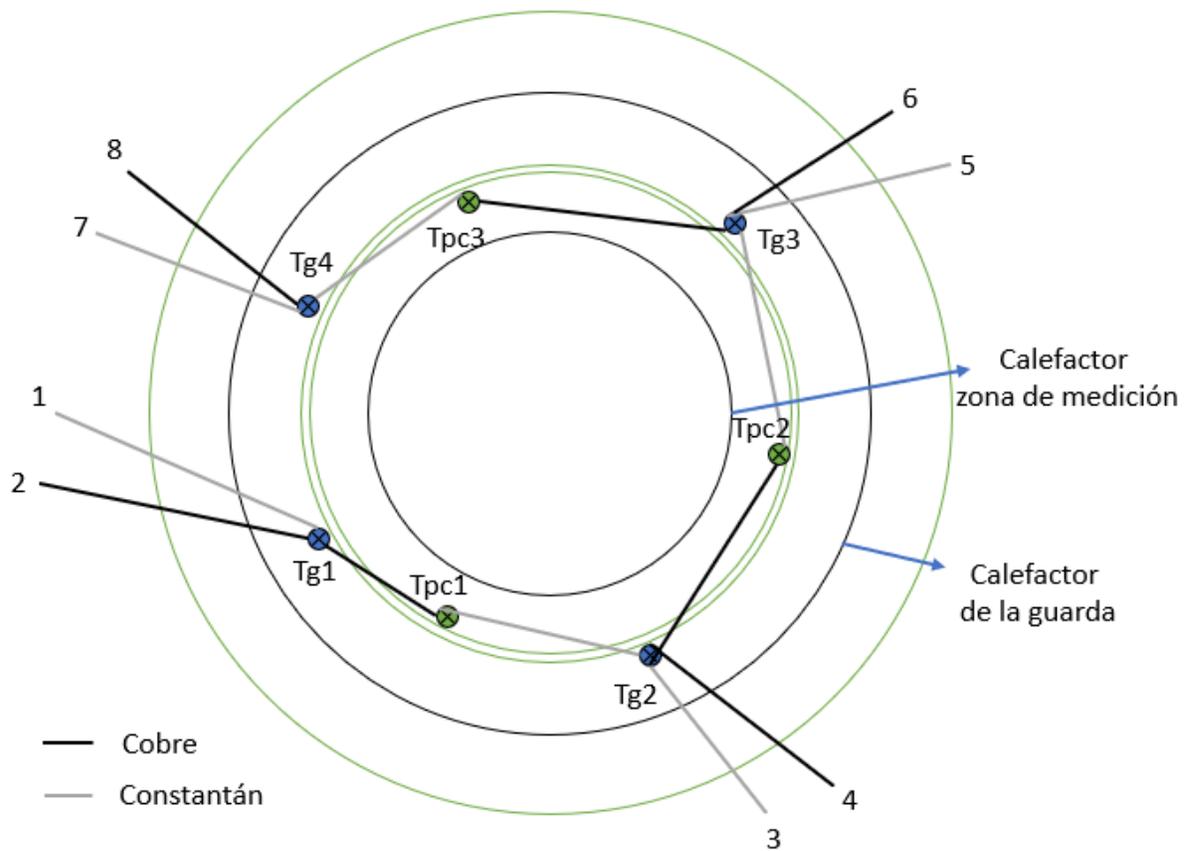
Se tiene dos **fuentes de suministro de potencia** para la zona de medida y guarda:

- La fuente de la zona de medida es de la marca KEITHLEY 100 V/1 A, 10 V/10 A máximo. Para ajustar los valores de voltaje y corriente se hace desde el programa LABVIEW. Para el cálculo de la corriente se tiene en serie una resistencia patrón, el cual es mucho menor que la resistencia del voltímetro y por medio de la Ley de Ohm se puede hallar la corriente suministrada.
- La fuente de la guarda es de la marca KEPCO POWER SUPPLY MSK 60\_2M 0-60 V, 0-2 A. En este caso para ajustar los valores de voltaje y corriente se hace de manera manual.

Cabe mencionar que se eligió la operación manual de la guarda para asegurarse que la potencia suministrada este en estado estable. El tiempo de estabilidad de la fuente de la zona de medida es mucho mayor que la fuente de la guarda. Es por ello por lo que se fija un valor de potencia para la zona de medida y con la fuente de guarda se busca los valores de voltaje y corriente con tal que cierre la diferencia de temperaturas entre estas; es decir la diferencia promedio de la temperatura de la placa caliente y la guarda sea del orden de 0,003 °C.

Para poder hacer las lecturas de los diez termopares, voltaje, corriente de la fuente de la placa caliente se cuenta con un selector de canales marca KEITHLEY 7001 SWITCH SYSTEM y un multímetro marca HEWLETT PACKARD 3458A MULTIMETER. Para medir la caída de voltaje en el termopar diferencial se tiene un KEITHLEY 182 SENSITIVE DIGITAL VOLTMETER.

Se tiene un sistema de adquisición y representación gráfica de las lecturas mediante una interfaz hecha en LABVIEW.



**Figura 14.** Ubicación de los termopares en la placa caliente con guarda del APCG. La zona de medición tiene un diámetro de 150 mm y el anillo un diámetro externo de 305 mm separados entre sí 0,8 mm.

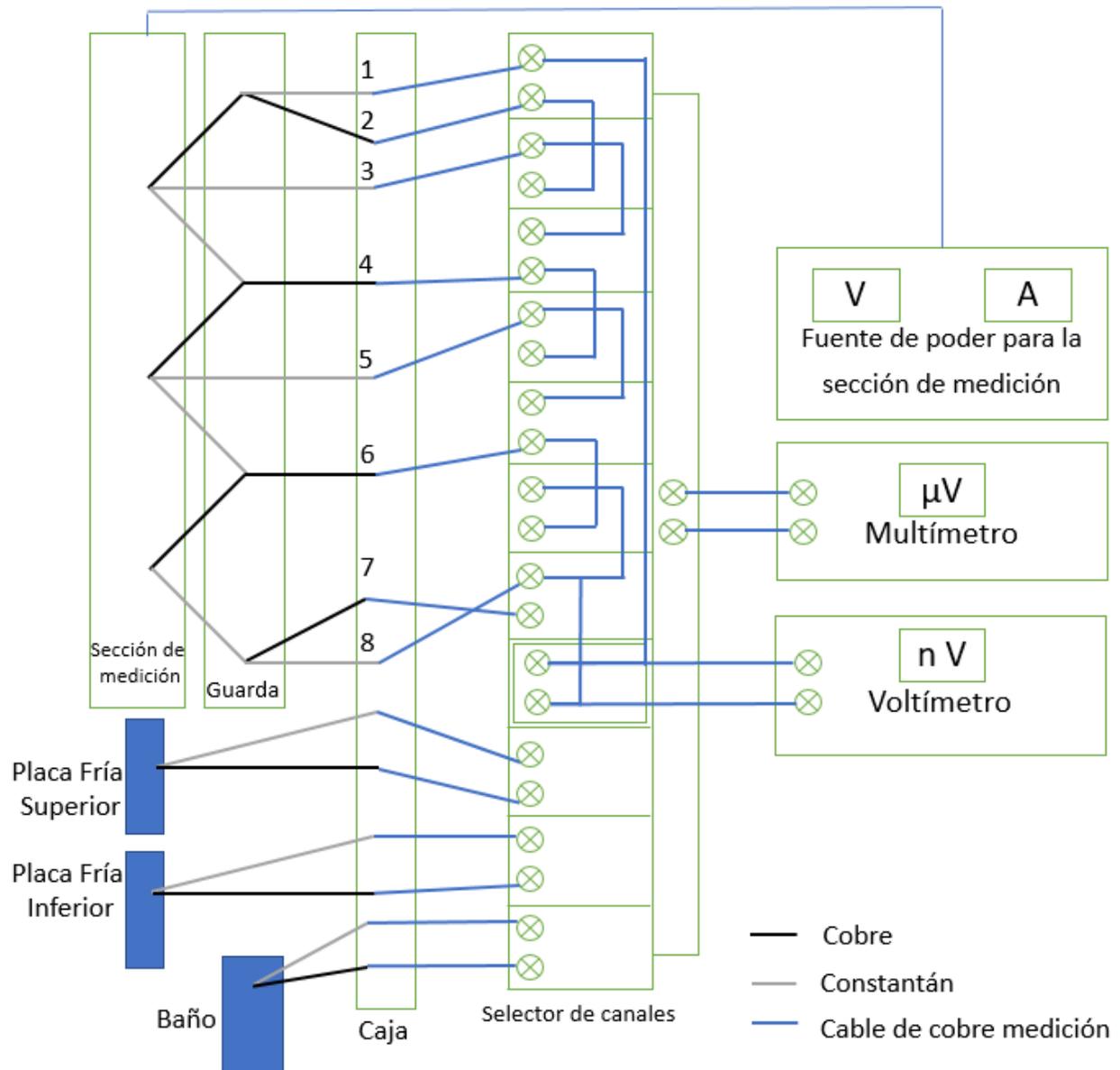


Figura 15. Diagrama del sistema medidor de la conductividad térmica. [46]

Las características principales del equipo están resumidas en las siguientes tablas.

**Tabla 8.** Capacidades de medición del aparato de placa caliente aislada del CENAM

Parámetro	Valor
Orientación de la placa	Horizontal
Espesor máximo del espécimen, mm	47
Temperatura máxima de la placa caliente, °C	60
Intervalo de temperatura en la placa fría, °C	-10 a 60
Incertidumbre estimada, %	2
Conductancia máxima del espécimen, W/(m <sup>2</sup> K)	1,5

**Tabla 9.** Parámetros para la placa caliente aislada del CENAM

Parámetros	Valores
Diámetro del área de medición, mm	150
Localización del calefactor $r = a/\sqrt{2}$ (a diámetro del área de medición), mm	106
Área de medición, mm <sup>2</sup>	17670
Resistencia eléctrica del calefactor de la sección de medición, $\Omega$	94,3
Relación (diámetro placa/diámetro sección de medición)	2,03

### PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

En el procedimiento de medición se considera primero la preparación del espécimen a medir, la instalación del espécimen en el aparato, establecer el estado estable térmico, adquisición de datos y análisis de resultados.

#### Preparación del espécimen

- Antes de cada prueba se midió el espesor, se pesó la muestra y se forró con un recubrimiento plástico, de 8  $\mu\text{m}$  de espesor, para evitar que absorba humedad del medio.

- El espécimen debe cubrir la sección de medición enteramente; si no es el caso las partes no cubiertas deberán llenarse con un material que tenga características de conductancia similares a las del espécimen. Si el área del espécimen a su vez es mayor que el área de la medición se debe completar la diferencia con un material aislante.
- El espécimen debe ser homogéneo; de no ser así el flujo de calor por unidad de área variara apreciablemente sobre la sección de medición.
- Las superficies del espécimen deberán ser paralelas para asegurarse que tengan contacto térmico uniforme con las placas de calentamiento y enfriamiento.

### Instalación

- Las superficies de las placas frías y la placa caliente deben estar limpias, desconectadas de la alimentación del flujo de agua, y sin los sensores de temperatura en las placas frías.
- Se colocan el par de especímenes entre la placa caliente y las placas frías.
- Se conecta la alimentación de flujo de agua a las placas frías, además se insertan los termopares.
- Se suministra calor, a través de las fuentes, para el área de medición y la guarda.
- Se prepara un baño de hielo y se sumerge el termopar de referencia.
- Se corre el programa de adquisición de datos y se nombra un archivo donde se almacenará la data.

### Estado estable térmico

El tiempo para alcanzar el estado estable térmico del sistema varía considerablemente con las características de las muestras y las condiciones de prueba.

- Se fija la temperatura de la placa fría y los valores de voltaje y corriente de las fuentes de alimentación de la zona de medición y la guarda.
- Se requiere que las temperaturas de la zona de medición y de las placas frías se mantengan constantes en el tiempo, esto se verá gráficamente en el software.
- Se debe ajustar los valores de voltaje y corriente de las fuentes tal que la diferencia de temperaturas entre **la zona medición y la guarda** ( $T_{pc} - T_g$ ) sea alrededor de  $\pm 0,003$  °C como se indica en la Figura 16.

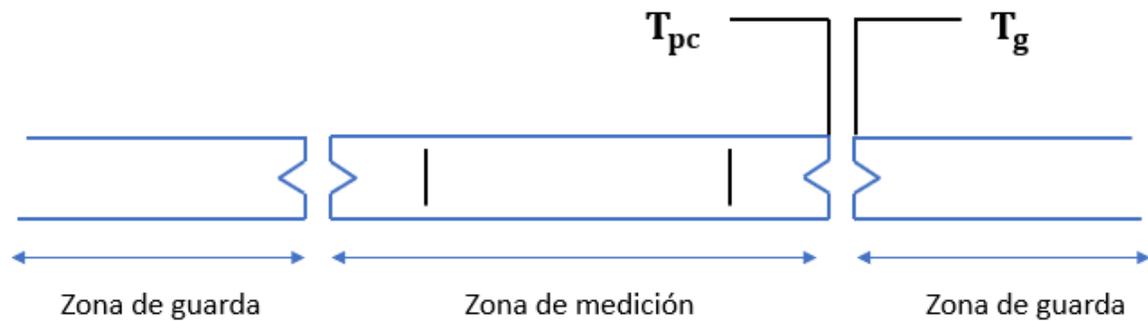


Figura 16. Diferencia de temperaturas entre la zona de medida y la guarda.

### Adquisición de datos

- El programa calcula periódicamente la temperatura de la placa caliente, placa fría, guarda, potencia suministrada a la zona de medida, conductividad térmica. Se observa estabilidad dependiendo de la muestra puede ser horas, días o semanas.
- Para el cálculo de la conductividad el programa toma cada minuto datos de fuente de potencia, nanovoltímetro, multímetro (FEM de los termopares, la corriente del sensor de temperatura y humedad). Los datos se utilizan para calcular temperaturas de la sección de medición, de la sección de guarda y de la diferencia de temperaturas entre ellas. La corriente se utiliza para calcular temperatura y humedad ambiental. Además, se calcula la expansión térmica del área de medición de la placa caliente, y se realiza el cálculo de la conductividad térmica.
- El espesor de la muestra es una cantidad que se obtiene directamente.

### Análisis de resultados

El resultado de una medición solo es una aproximación o estimación del valor del mesurando, será completa cuando va acompañado por su incertidumbre.

La incertidumbre de una prueba se determina al aplicar la ley de propagación de incertidumbres a un modelo definido. Las incertidumbres pueden ser de tipo A y tipo B.

Las incertidumbres del tipo A se considera que son debidas a la repetibilidad de la variable y las de tipo B son debido al instrumento y se pueden obtener de certificados de calibración.

- Para usar la ecuación 7 se tiene que analizar los datos que estén en estado estable térmico y se considera el promedio en ese intervalo de tiempo.
- Para la incertidumbre de la conductividad térmica se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{u_\lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{u_q}{q}\right)^2 + \left(\frac{u_e}{e}\right)^2 + \left(\frac{u_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta T}}{\Delta T}\right)^2} \quad (12)$$

Para cada incertidumbre relativa se considera lo siguiente:

$$u_{relativa} = \frac{u_{total}}{valor\ experimental} \quad (13)$$

$$u_{total} = \sqrt{(u_{tipo\ A})^2 + (u_{tipo\ B})^2} \quad (14)$$

Siendo  $u_{tipo\ A}$ : desviación estándar de los datos experimentales y  $u_{tipo\ B}$ : del certificado de calibración.

De la ecuación 14 se tiene cada una de las incertidumbres relativas:

- Para la **potencia** se tiene la ecuación 15, pero como la intensidad de corriente es medida usando la ley de ohm, se tiene a su vez la ecuación 16:

$$\frac{u_q}{q} = \sqrt{\left(\frac{u_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{u_I}{I}\right)^2} \quad (15)$$

$$\frac{u_I}{I} = \sqrt{\left(\frac{u_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{u_R}{R}\right)^2} \quad (16)$$

- Para la incertidumbre relativa del **espesor** se considera las expresiones 13 y 14, donde  $u_{tipo\ A}$  sería la desviación estándar promedio de espesores y  $u_{tipo\ B}$  es la mínima división del instrumento de medida; en este caso vernier.
- Para la incertidumbre relativa del **área**, se mide el diámetro el cual se calcula a partir de la sección de medición  $D_i$  y el diámetro interno del anillo de guarda  $D_0$  por medio de la siguiente relación:

$$D_m = \sqrt{\frac{D_i^2 + D_0^2}{2}} \quad (17)$$

Luego como la zona de medida está sometido a una fuente de calor; este se dilatará por tanto se debe calcular el diámetro expandido  $D_e$  según:

$$D_e = D_m[1 + \alpha(T_m - T_a)] \quad (18)$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica,  $T_m$  temperatura registrada en la medición y  $T_a$  temperatura inicial ambiental.

Finalmente se tiene el área expandida:

$$A_e = \pi \frac{D_e^2}{4} \quad (19)$$

Usando esta última expresión, además de las ecuaciones 13 y 14 se calcula la incertidumbre relativa del área.

- Para la incertidumbre de la **diferencia de temperatura** se considera las ecuaciones 13 y 14, donde  $u_{tipo\ A}$  sería la desviación estándar promedio de la diferencia de temperaturas; mientras que  $u_{tipo\ B}$  esta dada por el certificado de calibración de los termopares.

Dos trabajos reportan la medición de la conductividad térmica de materiales usados en construcción. Uno de ellos, desarrollado en Perú, usando únicamente *Stipa ichu* orientada en

diferentes direcciones [19]. El sistema usado fue el de la Figura 17, y el comportamiento de la gradiente de temperatura y potencia, dependiente del tiempo, se muestra en la Figura 18.

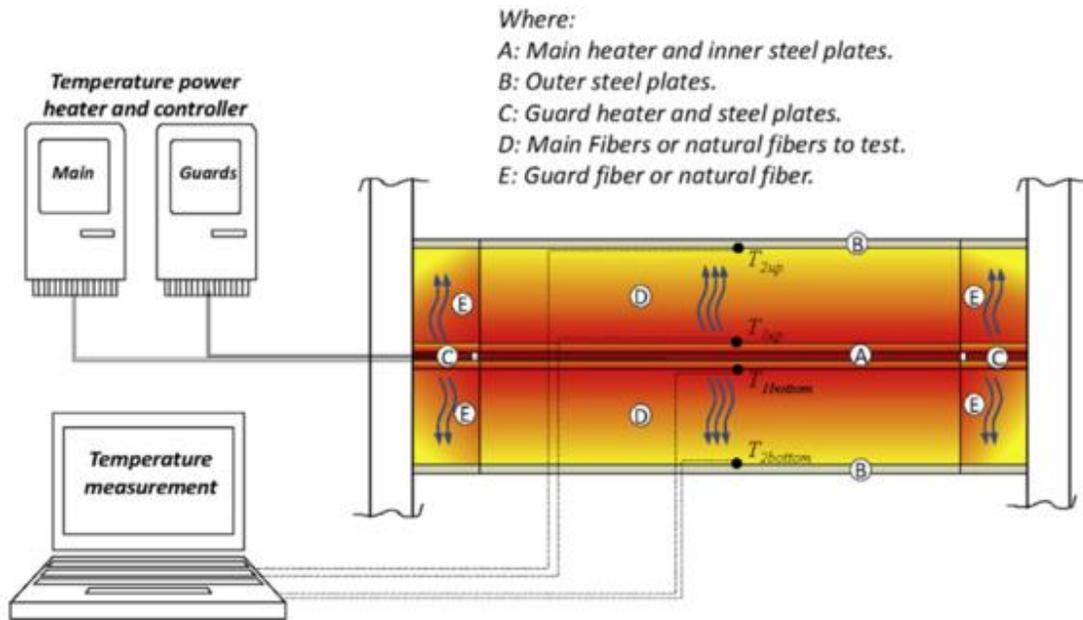


Figura 17. Sistema construido bajo norma ASTM C 177 [19].

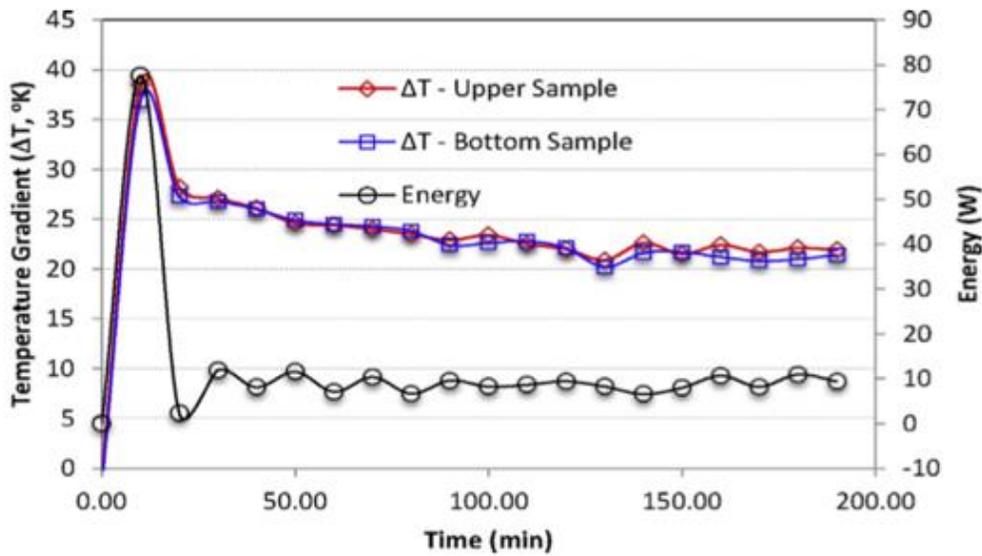


Figura 18. Gradiente de temperatura y potencia vs tiempo [19].

El otro trabajo se desarrolló en México, y consistió en medir un sistema laminar que consistente en ferrocemento, como capa externa, y fibras de coco, como capa interna. La configuración experimental se presenta en el diagrama Figura 19, y los resultados de la medición en estado estable se presentan en la Figura 20 [24].

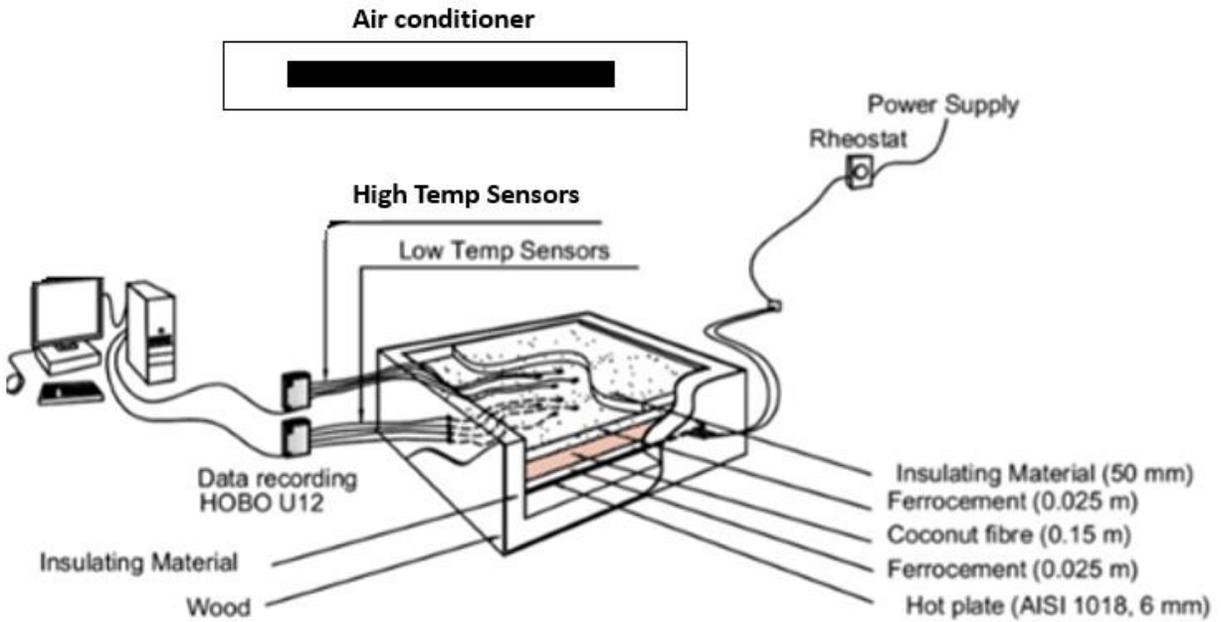


Figura 19. Configuración experimental para la prueba de conductividad térmica bajo la norma ASTM C 177 [24].

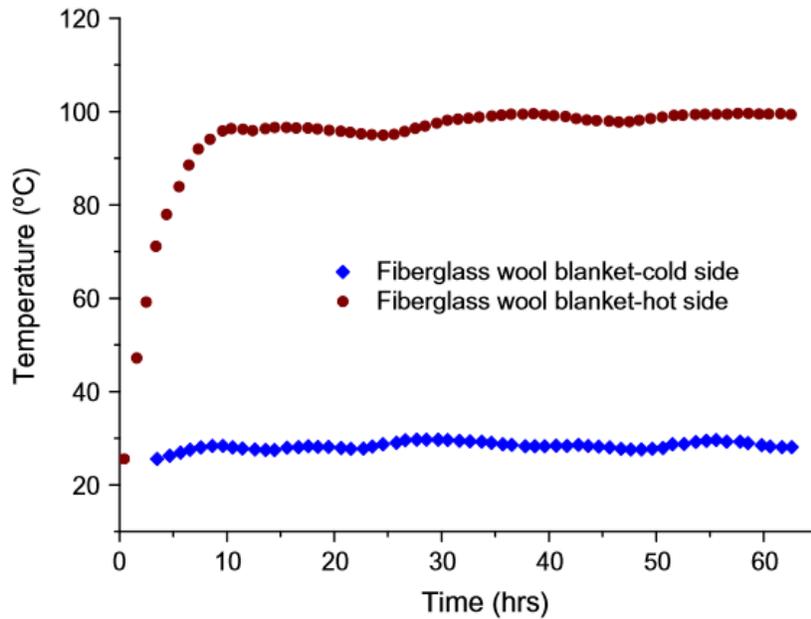


Figura 20. Estado estable en la calibración del sistema laminar presentado en la Figura 19 [24].

### 3.2.2 MECÁNICAS

A continuación, en la presente sección se detallará el fundamento de los ensayos mecánicos. Posteriormente, se presenta los procedimientos y consideraciones de cada uno de los ensayos realizados en los bloques de adobe.

#### PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

En edificaciones, las paredes y techos están sujetas a fuerzas o cargas. En el caso de una vivienda hecha en adobe o tapial es necesario conocer las características del material y fabricar adecuadamente cada componente con tal que resista a la posible fractura o ruptura. El comportamiento mecánico de un material refleja la relación entre su respuesta o deformación cuando se aplica una carga o fuerza. Las importantes propiedades mecánicas son la resistencia, dureza, ductilidad y rigidez [29].

Si una carga cambia, en función al tiempo, en un rango de  $0,1-0,2 \text{ kg s}^{-1}$  si es aplicado uniformemente a través de una sección o superficie de un material, el comportamiento mecánico puede comprobarse mediante una simple prueba de esfuerzo-deformación. Hay tres maneras en que una carga puede ser aplicada: tensión, compresión y cortadura como se muestra en la Figura 21.

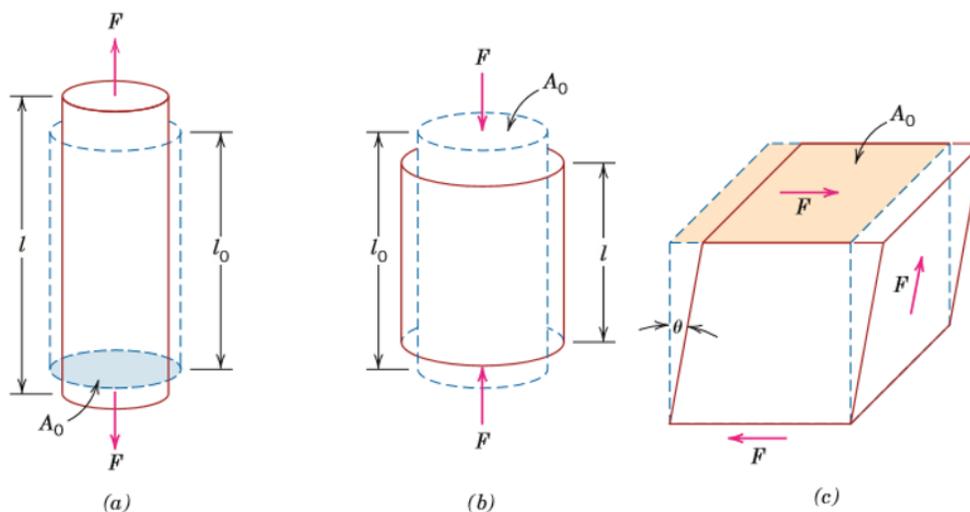


Figura 21. Diagramas de las pruebas de esfuerzo-deformación. (a) tensión, (b) compresión, (c) cizalladura [29].

La prueba de compresión es similar a la prueba de tensión, excepto que la fuerza es compresiva y el espécimen se contrae a lo largo de la dirección del esfuerzo. Este ensayo se hará en el adobe considerando la Norma E.080 Adobes y normativa peruana del ensayo tanto en unidades como en pilas.

Adicionalmente se hará el ensayo de flexión y cizalladura. Para el ensayo de flexión se consideró la norma española UNE-EN 196-1 adaptándose al caso del adobe, mientras que cizalladura se realizó mediante la norma peruana NTP 251.013 de madera adaptándose al caso del adobe.

Se estudió el comportamiento mecánico de la compresión en unidades de adobe y en pilas (columnas de cuatro adobes) para el caso de adobe sin y con fibra. Las dimensiones del adobe fueron de 7,0 cm x 14,0 cm x 28,0 cm según lo dispuesto en la norma E.080 Adobes.

### **RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA ALBAÑILERÍA**

La resistencia a compresión es la principal propiedad de las unidades de albañilería. Un valor alto (mayor a 500 kg cm<sup>-2</sup>) refleja una buena calidad para los fines estructurales, en cambio valores bajos (menor a 300 kg cm<sup>-2</sup>) serían poco resistentes y durables.

En este ensayo se evaluó juego de adobes sin fibra y otro juego de adobes con fibra.

En el proceso de secado del adobe sus dimensiones se reducen, por tanto, es necesario medir todas las dimensiones al menos cuatro veces y promediar para tener el área de trabajo.

Hay un tratamiento previo al ensayo, el cual es denominado el “capeado”, la cual es una capa elaborada de yeso, cemento y agua. La proporción de yeso-cemento fue de 1:2 con suficiente agua, para tener una mezcla espesa. Con la ayuda de un nivel, se asegura la planitud y paralelismo de las caras que estarán expuestas a los platos de la prensa. Posteriormente se dejó secar al aire libre.

El ensayo se realizó en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI. Se usó la Máquina Uniaxial N ° 2 (Figura 23), la cual tiene 2 cargas donde la carga más baja, tiene como capacidad máxima 30 toneladas; se eligió esta máquina ya que el adobe es un material de baja resistencia.

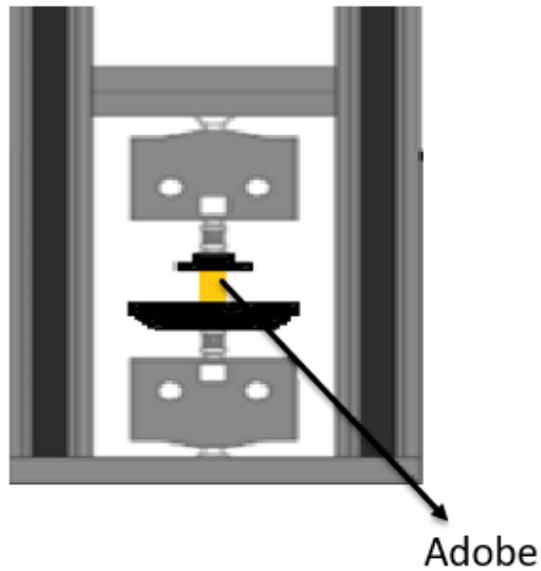


Figura 22. Diagrama de la maquina Uniaxial. [10]

Se efectuaron los ensayos de laboratorio, de acuerdo con lo indicado en la norma NTP 399.613. La resistencia de cada espécimen (compresión a la unidad  $f_0$ ) se calculó dividiendo la carga de rotura entre el área bruta de la superficie de asiento, como se muestra en la ecuación 20.



Figura 23. Máquina Uniaxial para compresión, ubicada en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI.

$$f_0 = \frac{P}{A_p}, \quad (20)$$

donde  $P$  es la carga de rotura,  $A_p$  es el área promedio de las caras superior e inferior

### RESISTENCIA AL CORTE DE LA ALBAÑILERÍA

El ensayo de resistencia al corte de la albañilería comúnmente llamado “ensayo de pilas” se realizó empleando prismas compuestos por dos o más hiladas de unidades enteras de probetas de adobe asentadas una sobre la otra mediante un mortero.

Estas pilas se ensayan a compresión axial y los resultados se utilizan para diseñar estructuralmente los muros de un edificio o casa; así como para corroborar la calidad de la construcción.

En esta parte se ensayó pilas de adobes, un juego de pilas adobe sin fibra y otro juego de pilas adobe con fibra. El mortero en este caso es del mismo material del adobe; es decir tierra con agua, previamente dormida.

Al igual que con el ensayo a la compresión de la unidad se debe hacer el “capeado” para las 2 caras opuestas. Con la ayuda de un nivel, se asegura la planitud y paralelismo de las caras que estarán expuestas a los platos de la prensa. Posteriormente se deja secar en el laboratorio.

El ensayo se realizó en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil (UNI). Se usó la Máquina Uniaxial N° 2 y en este caso se usó, al igual que el ensayo de compresión a la unidad, la capacidad máxima de 30 toneladas.

La determinación de la resistencia a la compresión en pilas de ladrillo se desarrolló, de acuerdo con la norma NTP 399.602. La resistencia de cada pila  $f_m$  de adobe se calculó dividiendo la carga de rotura entre el área bruta de la superficie de asiento, todo por el coeficiente de esbeltez, como se muestra en la ecuación 21.

$$f_m = \frac{P}{A_p} \cdot C, \quad (21)$$

donde  $P$  es la carga de rotura,  $A_p$  es el área promedio de las caras superior e inferior y  $C$  es el factor de corrección o esbeltez (alto/ancho de la pila).

## RESISTENCIA A FLEXIÓN

Debido a que no hay norma en el ensayo de flexión en adobes, se adaptó la norma española para métodos de ensayo de cementos UNE-EN 196-1.

La máquina de ensayo para determinar la resistencia a flexión debe ser capaz de aplicar cargas hasta 10 kN, con una precisión de  $\pm 1,0\%$  de la carga registrada en las 4/5 partes superiores del rango utilizado, y con una velocidad de carga de  $(50 \pm 10)$  N/s.

La máquina debe estar provista de dos rodillos de apoyo de acero de  $(10,0 \pm 0.5)$  mm de diámetro distantes uno del otro  $(100,0 \pm 0.5)$  mm, y un tercer rodillo de carga de acero del mismo diámetro y equidistante de los otros dos en la cara opuesta del espécimen a ensayar. El dispositivo de carga se muestra en la Figura 24.

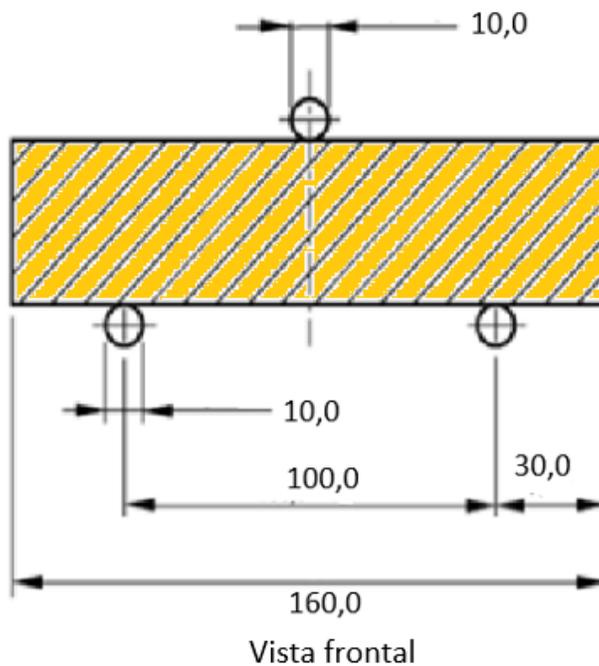


Figura 24. Equipo de carga para la determinación de la resistencia a flexión. Unidades en mm.

[47]

Los tres rodillos deben ser paralelos y permanecer así durante el ensayo, equidistantes y perpendiculares a la dirección de la probeta.

## Procedimiento

Se utilizó el método de carga de los tres puntos, explicado anteriormente.

Se colocó el prisma en la máquina de ensayo, con una cara lateral sobre los rodillos soporte y con su eje longitudinal normal a los soportes. Se aplicó la carga verticalmente mediante los rodillos de carga sobre la cara lateral opuesta del prisma y se mantuvo a una velocidad de  $2,2 \text{ N s}^{-1}$  [47].

Se calculó la resistencia a flexión  $R_f$ , mediante la siguiente fórmula:

$$R_f = \frac{1,5xF_fxl}{b^3}, \quad (22)$$

donde

$R_f$ : Resistencia a flexión (MPa)

$b$ : Lado de la sección cuadra del prisma (mm)

$F_f$ : Carga aplicada en la mitad del prisma en la rotura (N)

$l$ : Distancia entre soportes (mm)

## ENSAYO DE CIZALLADURA

De igual forma, como no hay norma en el ensayo de flexión en adobes, se adaptó la norma peruana NTP 251.013 de maderas a adobes para tal fin.

La máquina de ensayo para determinar la resistencia a la cizalladura es detallada con la siguiente Figura 25.

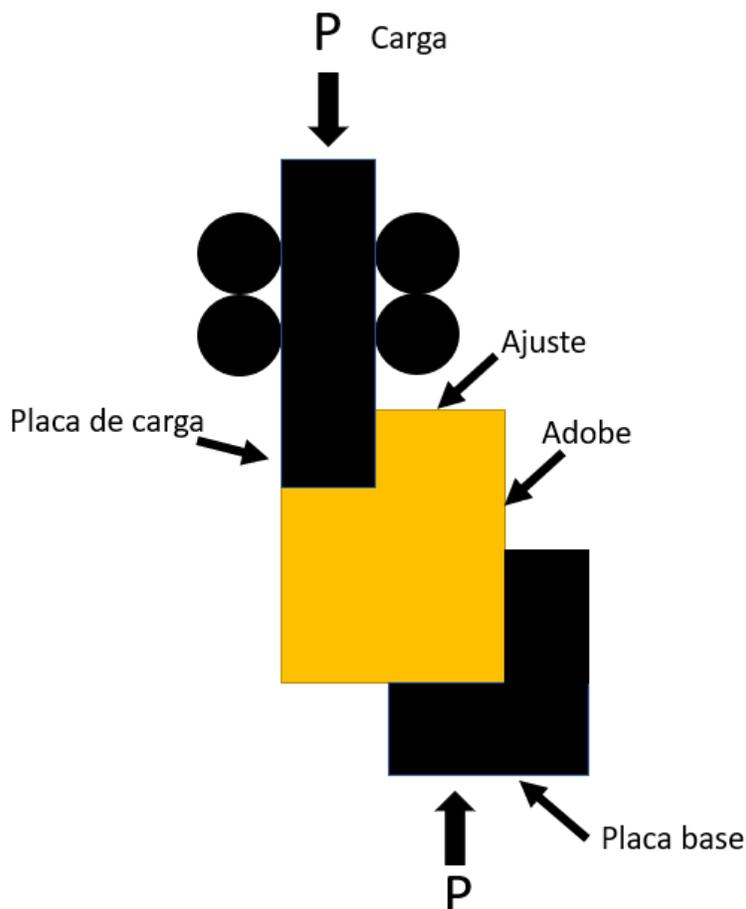


Figura 25. Esquema del ensayo de cizallamiento.

Se consideró la fabricación de adobes de 12,0 cm x 7,0 cm x 7,0 cm, posteriormente se cortó con una sierra un volumen de 7,0 cm x 3,0 cm x 3,0 cm.

### Procedimiento

Como se observa en la Figura 25 se tiene un corte transversal, el material se ajusta también por las laterales por medio de unas placas de fierro, adicionalmente se ajusta el material en la cara superior (que no está expuesta a la carga) mediante un sistema de sujeción como se indica en la Figura 26. Se agregó unas placas de aluminio de 30,0 mm x 60,0 mm x 2,0 mm al área expuesta a la carga, y al área donde se hace la sujeción (Figura 26b).



(a)

(b)

**Figura 26.** (a) Vista lateral del equipo adaptado para los ensayos de cizalladura, (b) vista posterior del equipo, sistema de sujeción, ubicada en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI.

Se utilizó el equipo “Universal Testing” y con una velocidad de  $2,2 \text{ N s}^{-1}$ , se dio inicio a la carga, el cual se mantuvo fija durante todo el ensayo. Finalmente, el ensayo se detuvo cuando el indicador deja de subir y/o se evidencia el corte en el material.

Para el cálculo de la cizalladura se usó la siguiente expresión:

$$F_z = \frac{P_z}{A_v}, \quad (23)$$

donde

$F_z$ : Resistencia a la cizalladura ( $\text{kg cm}^{-2}$ )

$P_z$ : Carga aplicada al área expuesta (kg)

$A_v$ : Área de la zona expuesta ( $\text{cm}^2$ )

### 3.2.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Los rayos X son radiaciones electromagnéticas con longitud de onda entre 0,02 Å y 100 Å. Debido a que los rayos X tienen longitudes de onda similar al tamaño de las distancias interatómicas en un cristal, ellos son muy usados para analizar la estructura de estos.

Los átomos en cristales interactúan con los rayos X de tal manera que se producen interferencias constructivas. Como una estructura cristalina es un arreglo ordenado de átomos, las reflexiones ocurren en los planos cristalinos. Si se tienen dos rayos, como se muestra en la Figura 27, con mismo ángulo de incidencia ( $\theta$ ), uno de los rayos viaja una distancia adicional  $2a$  (SQ+QT) y si esta distancia es un múltiplo de su longitud de onda ( $n\lambda$ ) entonces estos estarán en fase en su salida del cristal por tanto ocurrirá interferencia constructiva.

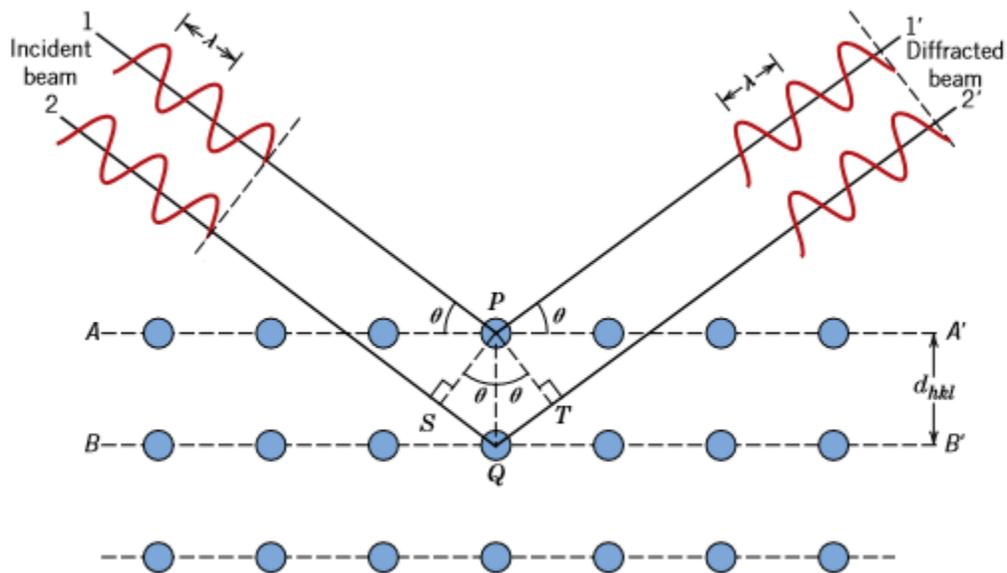


Figura 27. Deducción de la Ley de Bragg para la Difracción de Rayos X. [29]

De la Figura 27 se puede obtener una equivalencia:

$$n\lambda = 2d_{hkl} \text{Sen}\theta \quad (24)$$

Donde

$n$ : Número entero

$\lambda$ : Longitud de onda de los rayos X (Å)

$d_{hkl}$ : Distancia entre los planos de la red cristalina (Å)

$\theta$ : Ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión (°)

En la práctica, en vez de reorientar el cristal para que otro plano atómico sea expuesto un método más rápido es usado llamado “método del polvo”. Donde se tiene aleatoriamente los planos atómicos y haciendo un escaneo del ángulo de incidencia de los rayos X de 0 a 90° al igual que el detector permite hacer un barrido más versátil. Posteriormente al escaneo de la muestra se podrá graficar la intensidad de los rayos X vs el ángulo  $2\theta$ , por lo general o hacer la conversión a  $d$  mediante la ecuación de Bragg. Y como cada compuesto con la misma estructura cristalina tendrá un patrón idéntico de difracción, el patrón sirve como una “huella digital” para la sustancia.

### **Procedimiento**

La difracción de rayos es la técnica más común usada para estudiar las características de la estructura cristalina y determinar mineralogía de los granos finos sedimentados, especialmente las arcillas.

Para el tratamiento de muestras nos basaremos en un manual especializado para la preparación y tratamiento de la arcilla [48].

**En la primera parte** se hizo dos tratamientos independientes:

- Tratamiento con ácido acético para remover los carbonatos
- Tratamiento con peróxido de hidrogeno para remover restos orgánicos

En tratamiento con fuertes ácidos para remover los carbonatos puede atacar la estructura de las arcillas. Es por ello por lo que se usó ácido acético diluido porque es menos probable que afecte a la estructura cristalina de la arcilla.

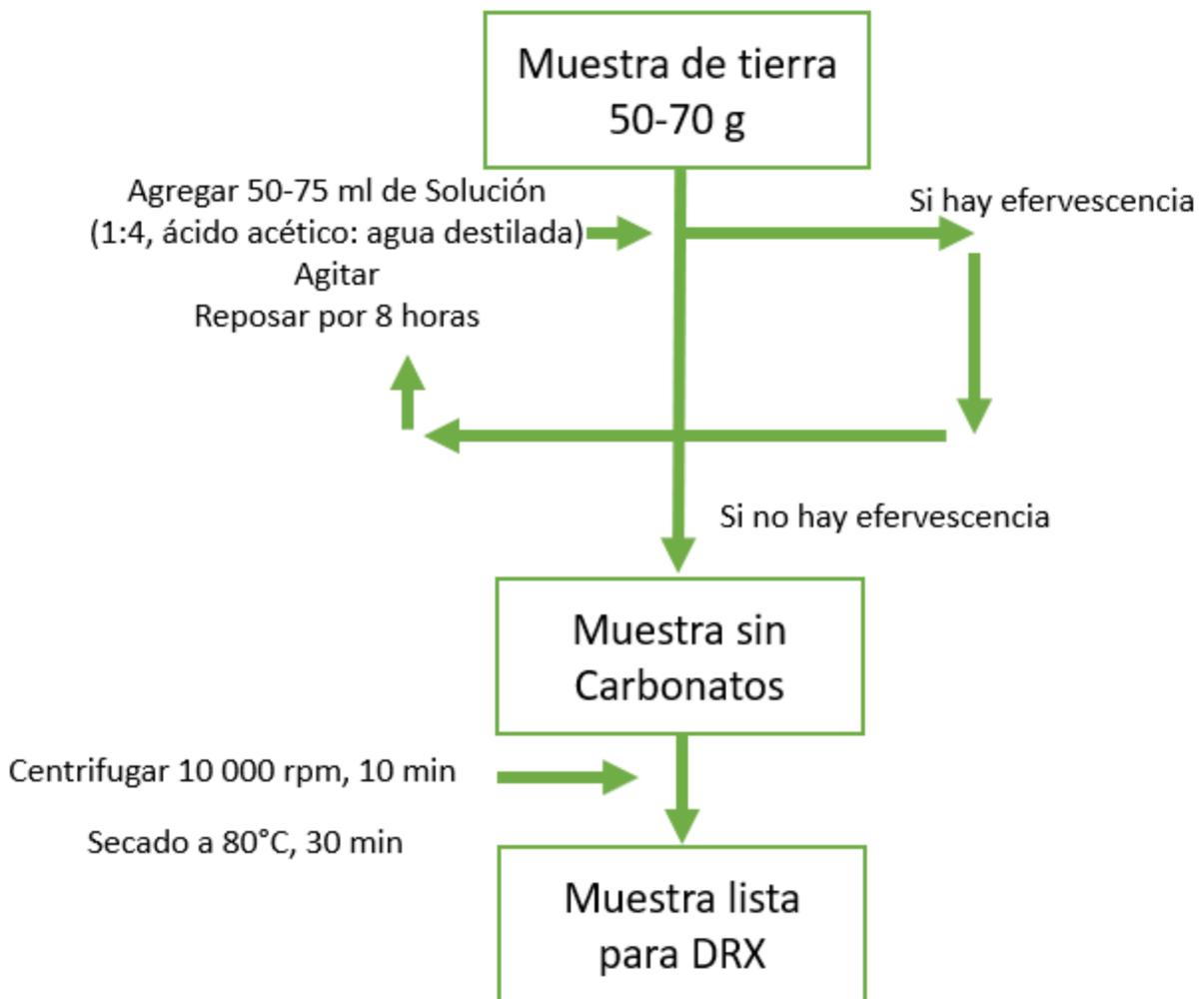


Figura 28. Diagrama de flujo de Tratamiento de ácido acético para eliminación de carbonatos.

La presencia de orgánicos, el cual puede causar la aparición de nuevos picos en el patrón de difracción, puede obstruir los picos de algunas especies. Para la eliminación de residuos orgánicos se utilizó peróxido de hidrogeno. Hay que tener en cuenta que puede ocurrir que se oxide el hierro octaedro desapareciendo la clorita y la vermiculita.

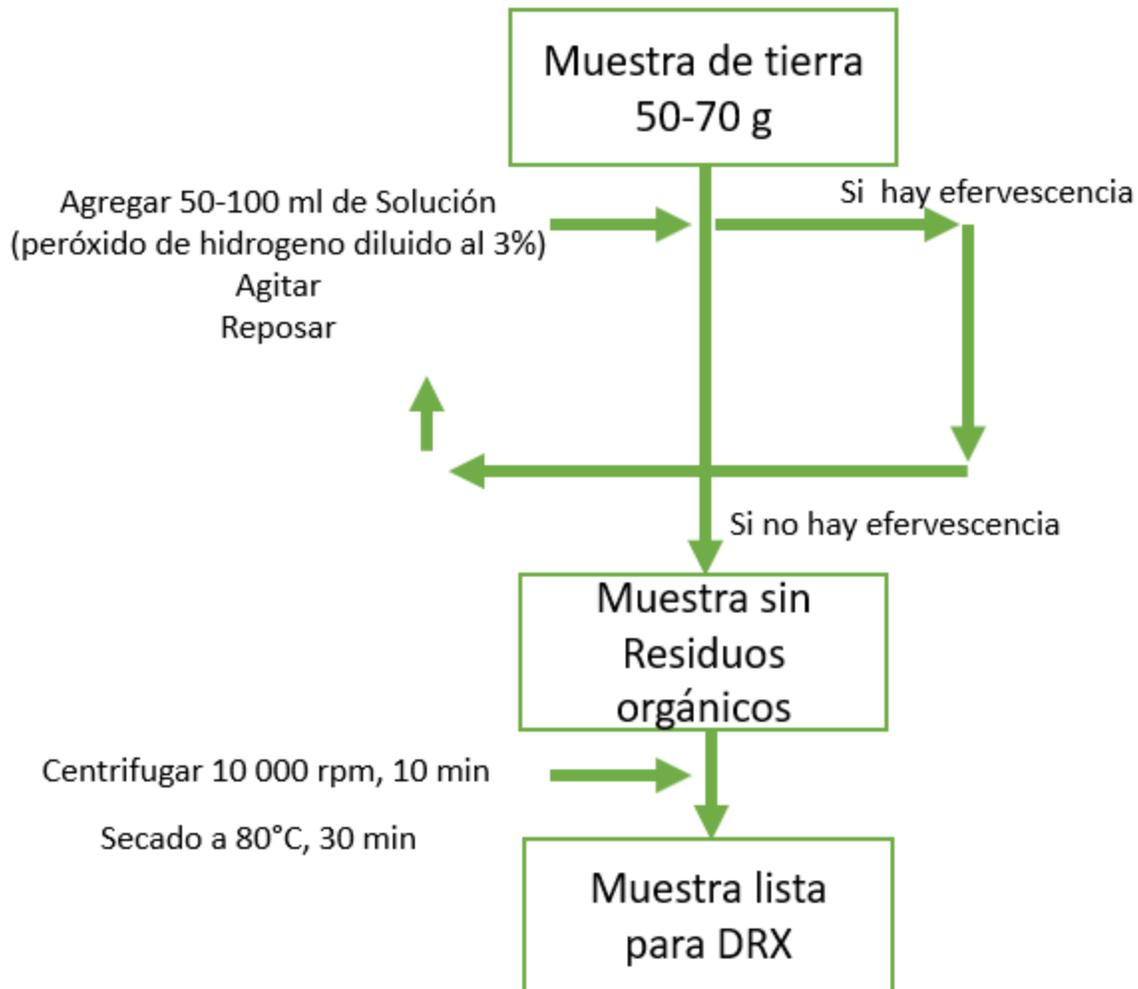


Figura 29. Diagrama de flujo de Tratamiento de peróxido de hidrogeno para eliminación de residuos orgánicos.

Luego de hacer ambos tratamientos se centrifugó ambas muestras a 10 000 rpm por 10 minutos. Posteriormente se llevó a la estufa a 80°C por 30 minutos para secarlos y depositarlos.

Para hacer una comparación con la tierra sin tratar se procedió a moler hasta tener partículas más finas al igual que con las muestras tratadas con ácido acético y peróxido de hidrogeno.

**En la segunda parte**, se obtuvo arcilla a partir de la tierra mediante suspensión para luego hacer una comparación entre: arcilla sin tratar, tratada con etileno glicol y tratada térmicamente, se preparó lo siguiente en los porta muestras.

- Arcilla sin tratamiento
- Arcilla tratada con etileno glicol

- Arcilla tratada térmicamente a 400 °C por 30 minutos.
- Arcilla tratada térmicamente a 550 °C por 30 minutos.

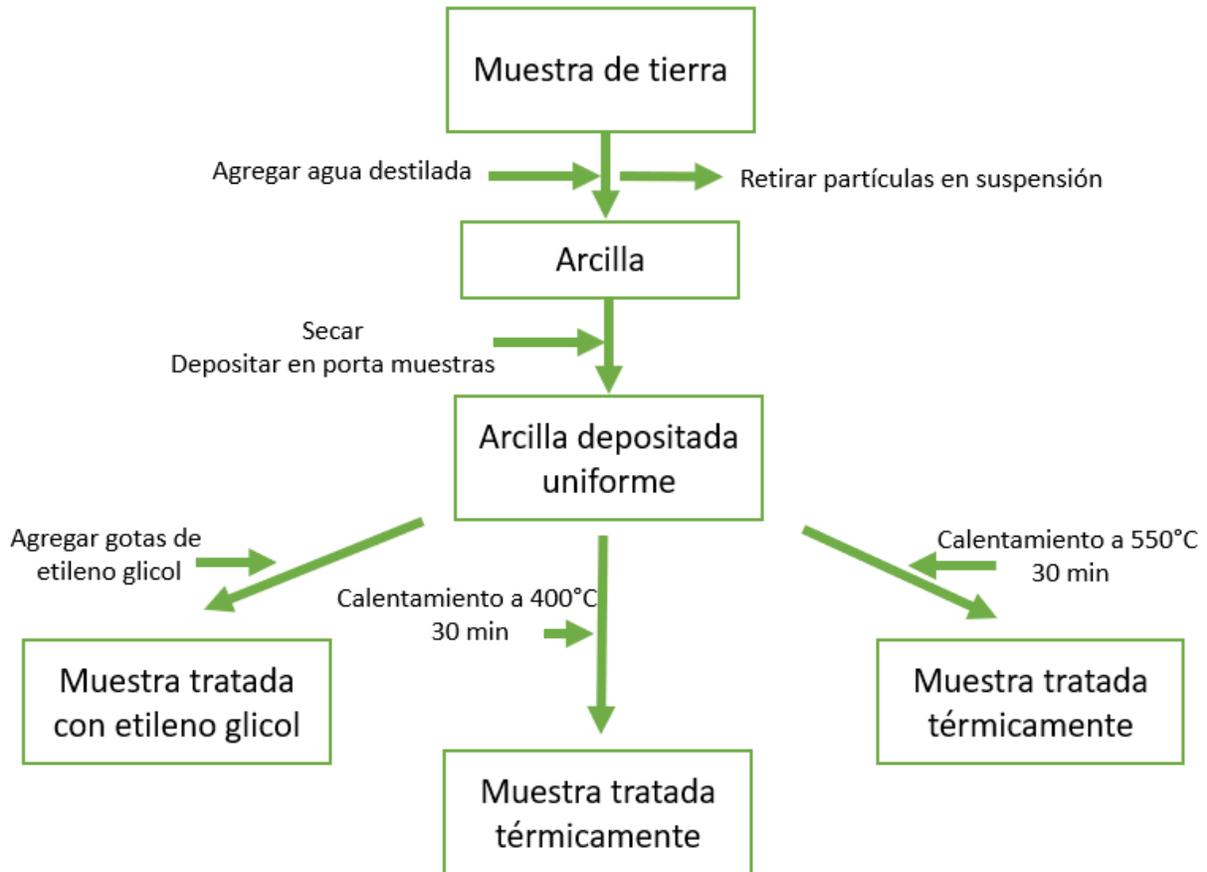


Figura 30. Diagrama de flujo de para Identificación de arcilla mediante etileno glicol y tratamiento térmico.

Finalmente, se hizo DRX para cada una de las muestras. Se usó “D8 ADVANCE ECO-BRUKER” difractómetro con radiación de Cu. Las condiciones de trabajo fueron: fuente de Rayos X de 1 kW, el barrido fue de 5° a 80°.

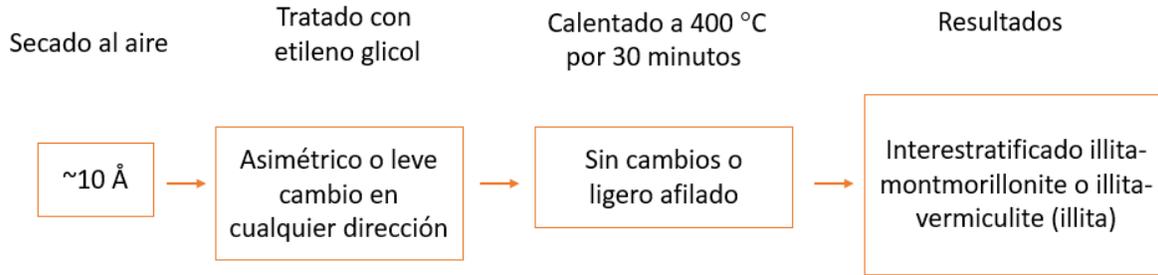


Figura 31. Diagrama para identificación de arcillas [48].

### 3.2.4 MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Un microscopio electrónico de barrido es usado para poder obtener información morfológica, topográfica, además de información cualitativa y cuantitativa de una muestra. Esta muestra debe ser tratada según lo que se desea observar en el microscopio.

La superficie de la muestra a examinarse es escaneada con un haz de electrones, y el haz reflejado de electrones es recogido y luego desplegado en la misma tasa de escaneo en tubo de rayos catódicos. La imagen en la pantalla representa las características de la superficie de la muestra.

Al SEM se le pueden agregar diferentes detectores, los cuales captaran los electrones emitidos por la interacción de la fuente de electrones con la muestra a diferentes niveles de energía. Cada detector nos dará información diferente.

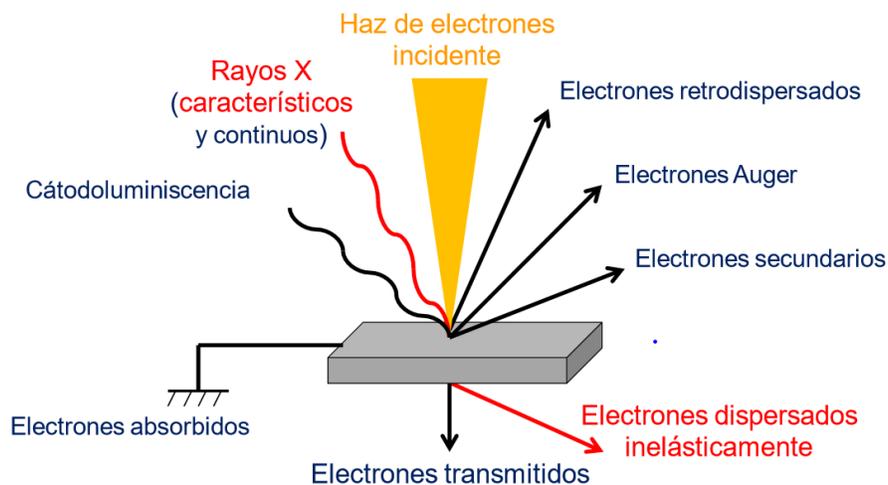


Figura 32. Interacción de la radiación con la materia [49].

El SEM cuenta con una fuente de electrones provenientes de aplicar un voltaje elevado por lo general de 20 kV a un alambre de tungsteno, los electrones del tungsteno están alrededor de este por el efecto de emisión termoiónica. A estos electrones se aplica un potencial para poder desprenderlos, seguido de un potencial elevado para acelerarlos.

Los electrones acelerados debido a que su desprendimiento no es uniforme pasan por un conjunto de lentes electromagnéticas; es decir por un conjunto de bobinas que tienen un campo definido en los ejes x e y lo que hará que se tenga un haz de electrones cilíndrico. Luego los electrones son orientados por un conjunto de lentes objetivo. Este último sirve para magnificar la imagen obtenida.

El barrido del SEM se da a cabo con cuatro bobinas, dos bobinas desvían el haz de electrones en dirección x mientras que las otras dos bobinas desvían el haz de electrones en dirección y. Mediante movimientos rápidos del haz se puede irradiar toda la superficie de la muestra.

Debido a la interacción de la fuente de electrones con la muestra se tiene diferentes electrones con diferente energía. En el caso del detector EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), mide la energía de los rayos X, este aplica una diferencia de potencial lo suficiente en la muestra para solo captar la emisión X de los diferentes elementos presentes en la muestra.

La señal de la muestra (electrones) es detectado por un detector de electrones conectado a un tubo de rayos catódicos, la cual luego es codificada, almacenada y permite controlar la intensidad en un punto determinado del tubo de rayos catódicos. Por ejemplo, un detector EDS detectara los rayos característicos con lo cual se podrá identificar los elementos presentes en la muestra, mientras un detector Auger detectara los electrones Auger este da información de la superficie.

### **Parámetros de trabajo**

Se trabajó con un SEM marca ZEISS modelo EVO MA 10, en bajo vacío. Las condiciones de trabajo fueron: voltaje del filamento a 30 kV, la distancia de trabajo fue de 23,5 mm.

### **Preparación de muestras**

Para muestras conductoras: es sencilla solo se limpia la muestra y se pega sobre el porta muestras, utilizando un pegamento especial conductor.

Para muestras no conductoras, como es el caso del adobe se requiere hacer un recubrimiento, una película delgada de un elemento conductor (carbón, paladio u oro) este recubrimiento debe ser tal que circule la corriente eléctrica y no tape características superficiales [50].

Un requisito indispensable es la ausencia de líquidos, la muestra debe estar seca. Es por ello por lo que se llevó al adobe a la estufa a 80°C por 12 horas para secarlo. Luego se hizo un corte transversal al bloque de adobe con tal que pueda entrar en el porta muestras, finalmente se adhirió al porta muestras con una cinta conductora de carbón. Se preparó 2 muestras una de adobe con paja y otra de adobe sin paja.

El SEM cuenta con sistema de vacío, lugar donde está la muestra. Se inyecta Nitrógeno gaseoso para compensar los porcentajes en Oxígeno, agua y reducir la posibilidad de oxidación del área de trabajo.

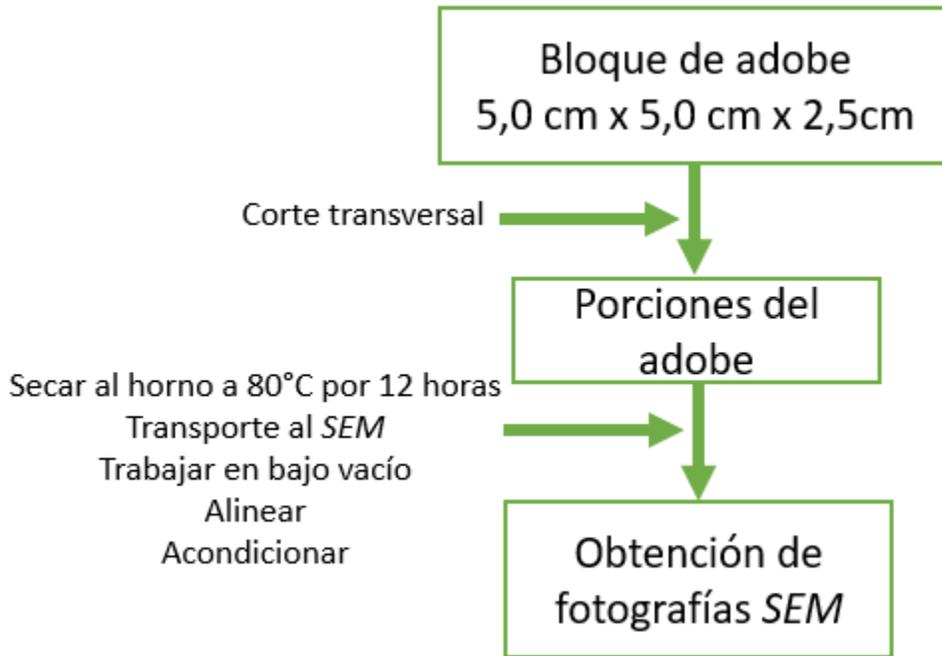


Figura 33. Diagrama de flujo para la obtención de fotografías SEM.

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación, se mostrarán los distintos resultados obtenidos en los estudios de las propiedades térmicas, mecánicas, morfológicas y estructurales de diferentes probetas de adobes con y sin fibra.

### 4.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS ADOBES

En esta sección se considera la medición de adobe sin fibra y con fibra. Para todas las mediciones se estimó inicialmente un valor de potencia para cada zona, siendo la resistencia de la zona de medición mayor de la zona de guarda. Como se debe llegar al estado estable se mantiene la potencia de zona de medición o se varía ligeramente, mientras que a la potencia suministrada a la zona de guarda es la que se debe modificar para cerrar la diferencia en el *gap*.

Tabla 10. Resultados de medición adobe con fibra

<b>Número de Prueba:</b> Uno.	
<b>Descripción de la muestra</b>	
<b>Características:</b> Material de adobe con fibras vegetales, se midió con cubierta de plástico transparente.	
<b>Identificación:</b> A3 y A4.	
<b>Dimensiones:</b> Placa de 16 cm x 16 cm x 2,606 cm.	
<b>Descripción del patrón</b>	
<b>Patrón nacional:</b> CNM-PNE-16.	
<b>Nombre del aparato:</b> Aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG).	
<b>Orientación de los platos:</b> Horizontal.	
<b>Modo de operación:</b> Doble lado de medición.	
<b>Procedimiento de prueba</b>	
Estado permanente con APCG.	
<b>Valores experimentales</b>	
<b>Nombre de la variable:</b>	
Potencia disipada durante la prueba / W	11,4346
Temperatura en la placa caliente / °C	34,0
Temperatura en la placa fría / °C	14,1
Gradiente de temperatura en la muestra / °C	19,9
Temperatura media o de la prueba / °C	24,1
Temperatura ambiente / °C	21,2
Humedad relativa / %HR	58
Espesor de la muestra / m	0,02606
Área de medición / m <sup>2</sup>	0,0214484
Conductividad térmica / W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0,349
Incertidumbre relativa expandida ( <i>k</i> =2) / %	4



**Figura 34.** Juego de adobes con fibra para medición de conductividad térmica.

En el CENAM fue la primera vez que median este tipo de material, por tanto, la dificultad fue encontrar el valor de potencia para ambas regiones (zona de medición y guarda) para tener una diferencia de alrededor de  $20^{\circ}\text{C}$  con respecto a las placas frías. Este ejercicio demoró aproximadamente una semana. Primero se midió el adobe con fibra aplicándose un voltaje y corriente de  $32,0\text{ V}$ ,  $0,338\text{ A}$  y  $11,5\text{ V}$ ,  $0,65\text{ A}$  para la zona de medición y guarda respectivamente. Considerando finalmente los valores de  $33,0\text{ V}$ ,  $0,346\text{ A}$  y  $10,6\text{ V}$ ,  $0,60\text{ A}$  con los cuales se logró el estado estable y una conductividad térmica de  $0,349\text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$  al  $1,66\%$  en contenido de agua.

Tabla 11. Resultados de medición adobe sin fibra

<b>Número de Prueba:</b> Uno.	
<b>Descripción de la muestra</b>	
<b>Características:</b> Material de adobe sin fibras vegetales, se midió con cubierta de plástico transparente.	
<b>Identificación:</b> A1 y A2.	
<b>Dimensiones:</b> Placa de 16 cm x 16 cm x 2,470 cm.	
<b>Descripción del patrón</b>	
<b>Patrón nacional:</b> CNM-PNE-16.	
<b>Nombre del aparato:</b> Aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG).	
<b>Orientación de los platos:</b> Horizontal.	
<b>Modo de operación:</b> Doble lado de medición.	
<b>Procedimiento de prueba</b>	
Estado estable con APCG.	
<b>Valores experimentales</b>	
<b>Nombre de la variable:</b>	
Potencia disipada durante la prueba / W	11,5080
Temperatura en la placa caliente / °C	32,02
Temperatura en la placa fría / °C	14,13
Gradiente de temperatura en la muestra / °C	17,88
Temperatura media o de la prueba / °C	23,1
Temperatura ambiente / °C	21
Humedad relativa / %HR	57
Espesor de la muestra / m	0,02470
Área de medición / m <sup>2</sup>	0,0214484
Conductividad térmica / W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0,371
Incertidumbre relativa expandida (k=2) / %	4



Figura 35. Juego de adobes sin fibra para medición de conductividad térmica.

En esta medición ya se tenía cierta experiencia en los valores de potencia, por tanto, fue más sencillo hacer la medición. Sin embargo, los valores finales de la medición con adobe con fibra no fueron los valores finales para que se llegue al estado estable. Se ajusto ligeramente los valores de voltaje y corriente siendo estos 30,0 V, 0,384 A y 10,7 V, 0,61 A para la zona de medición y guarda respectivamente. Se obtuvo una conductividad térmica de  $0,371 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$  al 1,39% en contenido de agua.

Cabe resaltar que estas mediciones fueron realizadas después de un tratamiento térmico de  $80^{\circ}\text{C}$  por un día. Inicialmente se midió la conductividad térmica de los dos juegos de adobe sin tratamiento térmico teniendo como resultado para adobe con fibra  $0,471 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$  al 2,31% en contenido de agua y para adobe sin fibra  $0,424 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$  al 2,21% en contenido de agua.

A continuación, se tiene la conductividad térmica de los diversos materiales analizados.

**Tabla 12.** Conductividad térmica del adobe con el APCG

Material	Conductividad térmica ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	Incertidumbre 4% ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
Adobe sin fibras	0,371	0,015
Adobe con fibras	0,349	0,014

De los resultados de conductividad térmica del adobe se tiene una distinción respecto a los adobes sin ichu, ya que resulto que se tiene un valor más bajo de conductividad térmica en un 5,9% viéndose que es necesario la adición de aditivos aislantes.

## 4.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ADOBES

A continuación, se tiene los 4 resultados para los ensayos mecánicos: compresión a la unidad, compresión a pilas, flexión y cizalladura. Considerando que todos los adobes contienen las mismas proporciones y condiciones de fabricación según el ensayo.

### **Compresión a la unidad**

En esta sección se presentan los resultados de los análisis realizados bajo la Norma NTP 399.613, la fotografía del secado de los bloques de adobe después del capeado al aire libre Figura 36 y la rotura después del ensayo.

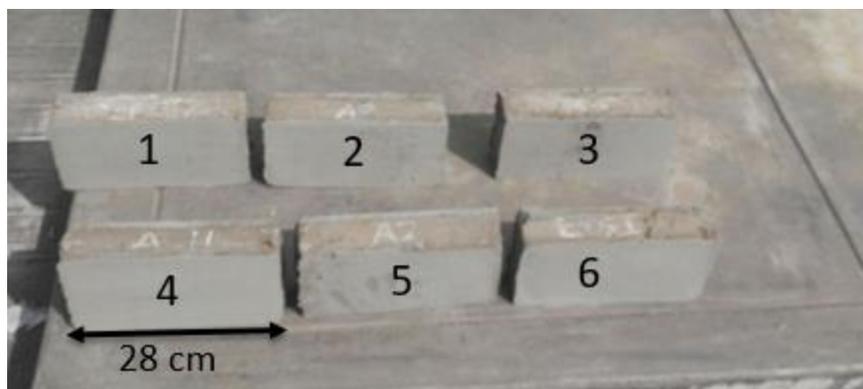


Figura 36. Secado de los adobes.

Una vez realizado la compresión se tiene el adobe todo fisurado como lo indica la Figura 37.



Figura 37. Rotura del adobe después del ensayo a la compresión.

Tabla 13. Resultado de compresión a la unidad para adobe sin fibra

N ° prueba	A1	A2	A3
Área promedio (cm <sup>2</sup> )	347,82	343,86	360,46
Carga de rotura (kg)	7650	9350	8700
Resistencia a la Compresión del espécimen (kg/cm <sup>2</sup> )	21,99	27,19	24,14
Resistencia a la Compresión del espécimen (kPa)	22,42	27,71	24,60
Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	24,44		

**Tabla 14.** Resultado de compresión a la unidad para adobe con fibra

N ° prueba	B1	B2	B3
Área promedio (cm <sup>2</sup> )	353,11	354,43	363,14
Carga de rotura (kg)	7600	9200	9500
Resistencia a la Compresión del espécimen (kg/cm <sup>2</sup> )	21,52	25,96	26,16
Resistencia a la Compresión del espécimen (kPa)	21,94	26,46	26,67
Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	24,55		

Se esperaba que, al tener un adobe con fibras, el valor de su resistencia a la compresión iba a aumentar considerablemente; sin embargo, al comparar los valores promedio de las tablas 13 y 14 se aprecia que no hay diferencia significativa. La adición de fibras aparentemente no lleva a aumentar significativamente la resistencia a compresión [22].

### Compresión a pilas

En esta sección se presentan los resultados de los análisis realizados bajo la Norma NTP 399.602., la fotografía del secado del mortero (2 cm) en las pilas de adobe Figura 38 y la rotura de estos después del ensayo.

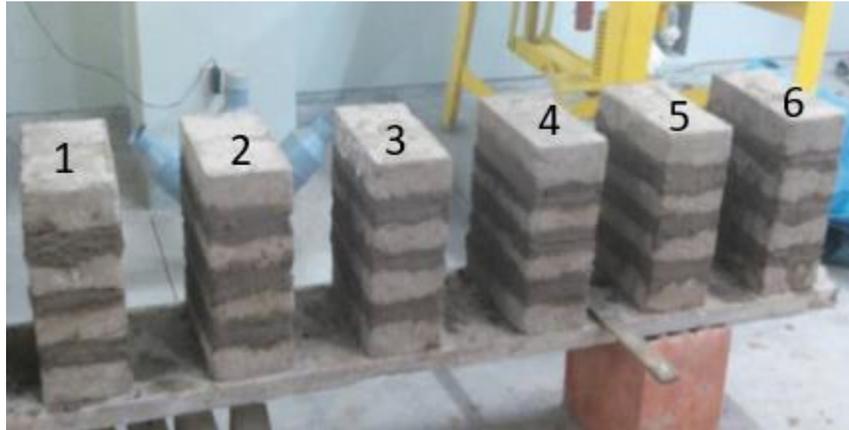


Figura 38. Secado de las pilas de adobe.

Después del ensayo se tiene la fisura o rotura de las pilas de los adobes como se indica en la Figura 39.

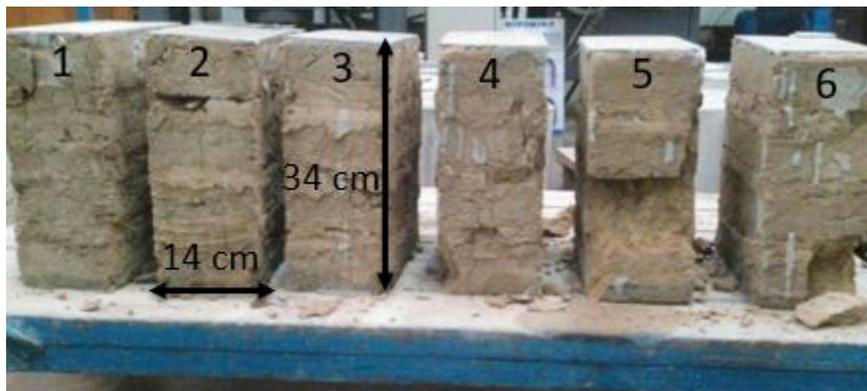


Figura 39. Fisura de las pilas de adobe luego del ensayo.

**Tabla 15.** Resultado de la resistencia al corte de la albañilería para el adobe sin fibra

N ° prueba	A1	A2	A3
Área promedio (cm <sup>2</sup> )	357,78	361,76	353,76
Carga de rotura (kg)	4650	4150	4450
Factor de corrección	2,47	2,41	2,44
Resistencia a la Compresión del espécimen (kg/cm <sup>2</sup> )	32,20	27,67	30,79
Resistencia a la Compresión del espécimen (kPa)	32,82	28,20	31,39
Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	30,22		

**Tabla 16.** Resultado de la resistencia al corte de la albañilería para el adobe con fibra

N ° prueba	B1	B2	B3
Área promedio (cm <sup>2</sup> )	356,44	351,08	363,15
Carga de rotura (kg)	3750	3900	3850
Factor de corrección	2,50	2,45	2,43
Resistencia a la Compresión del espécimen (kg/cm <sup>2</sup> )	26,30	27,19	25,76
Resistencia a la Compresión del espécimen (kPa)	26,81	27,72	26,26
Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	26,42		

De igual forma en los resultados de compresión a las pilas los valores promedio según tablas 15 y 16 no se diferencian en 12,6%. Esto es debido a que las fibras tienen la función de entrelazar la tierra para que no se fisure.

Según la norma peruana de adobes E.080 Adobes se tiene que los resultados en compresión superan los valores mínimos.

## Resistencia a la Flexión

En esta sección se presentan los resultados de los análisis realizados bajo la Norma UNE-EN 196-1, la fotografía del posicionamiento de la muestra en el equipo y la respectiva rotura de la probeta de adobe Figura 40.



Figura 40. Rotura del ensayo de flexión.

A continuación, se tiene los resultados de flexión los dos grupos de adobes A (adobe sin fibra), B (adobe con fibra).

Tabla 17. Resultado de flexión para el adobe sin fibra

	A1	A2	A3	A4	A5
Fuerza (N)	1030	1480	1370	755	1080
Resistencia a la flexión(MPa)	0,48	0,73	0,67	0,39	0,53
Promedio (MPa)	0,56				

El comportamiento tiende a ser lineal y en la ruptura hay descenso brusco debido a que el adobe se parte en dos. Se tiene un valor promedio de 0,56 MPa para los adobes sin ichu, este resultado es muy similar al obtenido en el estudio de adobes de la Huaca de la Luna siendo el valor promedio de 0,58 MPa [10].

**Tabla 18.** Resultado de flexión para el adobe con fibra

	B1	B2	B3	B4	B5
Fuerza (N)	300	715	530	570	850
Resistencia a la flexión(MPa)	0,15	0,34	0,28	0,30	0,45
Promedio (MPa)	0,30				

El comportamiento tiende a ser lineal y en la ruptura hay descenso es gradual teniendo su bajadas y subidas; esto es debido a que el ichu esta evitando que se rompa el adobe que por cierto no se logro romper. Asi mismo los valores de resistencia son muy diferentes debido a que la fibra esta de forma aleatoria en la matriz del adobe, habiendo diferencias en los resultados entre un adobe respecto a otro por esta aleatoriedad. Comparando los ensayos de los adobes con fibra con los de sin fibra, el tiempo de operación fue mucho mayor por la funcion de la fibra de adherir la matriz. Se tiene un valor promedio de 0,30 MPa considerando el valor maximo más no el promedio en la resistencia remanente.

En la ruptura del ensayo de adobes sin fibra estos se cortan por la mitad; sin embargo, para el caso de los adobes con fibra hay dos resistencias una por parte del adobe en conjunto y luego por parte de la fibra teniéndose un mayor tiempo de operación y mayor deformación gradual.

## Cizalladura

En esta sección se presentan los resultados de los análisis realizados bajo la adaptación de la Norma de Maderas NTP 251.013, la fotografía de la ruptura de la probeta de adobe Figura 41.



Figura 41. Corte o rotura del adobe, fin de la prueba.

A continuación, se tiene los resultados para los dos grupos de adobes A (adobe sin fibra), B (adobe con fibra).

Tabla 19. Resultados al cizallamiento

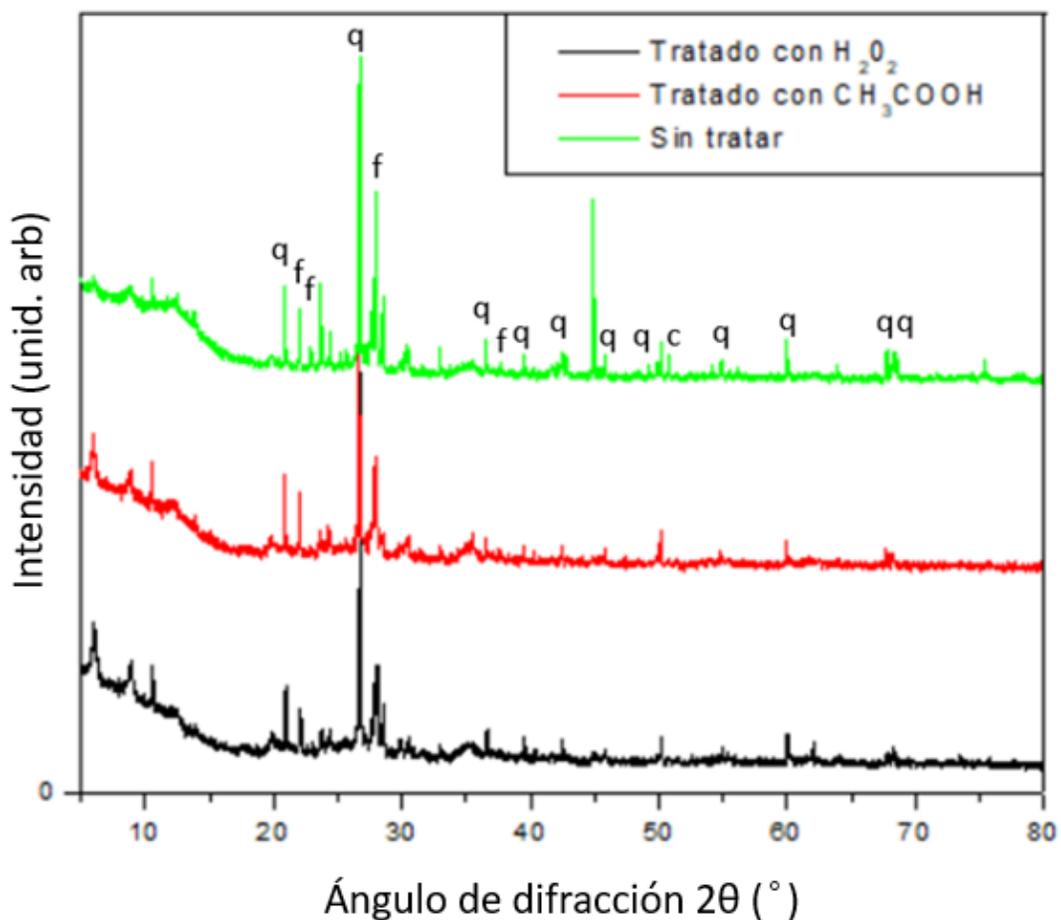
Adobes	Carga (kg)	Área(cm <sup>2</sup> )	Resistencia al cizallamiento (kg/cm <sup>2</sup> )
A1	40	16,8	2,4
A2	140	17,1	8,2
A3	100	18,6	5,4
B1	50	18,6	2,7
B2	50	16,24	3,1
B3	40	16,53	2,4

De acuerdo con los resultados de la resistencia a la cizalladura para ambos casos no hay distinción alguna, siendo los resultados valores muy por debajo bajo con respecto al valor mínimo en madera 40 kg/cm<sup>2</sup>; valor mínimo para la clasificación cualitativa en madera (muy bajo).

### 4.3 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES Y MORFOLÓGICAS DE LOS ADOBES

A continuación se tiene los difractogramas para los dos grupos de análisis. El primero análisis para: tierra sola, tierra tratada con ácido acético y tierra tratada con peróxido de hidrogeno. El segundo análisis para arcilla sin tratar, arcilla tratada con etileno glicol y arcilla sometida a 400°C y 550°C, por 30 minutos en cada caso.

En la Figura 42 se tiene el tratamiento con ácido; primero con ácido acético para eliminar carbonatos luego con peróxido de hidrogeno para la eliminación de materia orgánica.

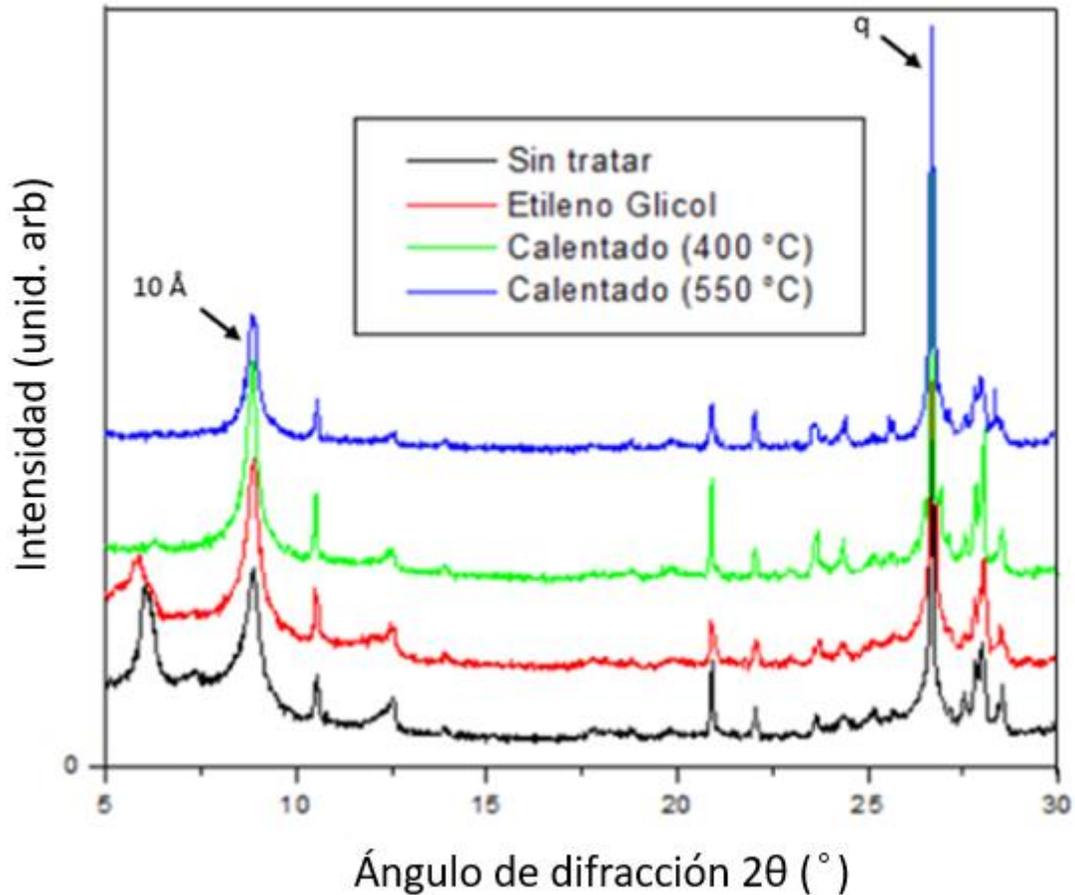


**Figura 42.** Difractogramas para la tierra tratada con: peróxido de hidrogeno, con ácido acético, y tierra sin tratar. Donde q corresponde al cuarzo, f corresponde a los feldespatos y c corresponde a los carbonatos.

Se aprecian claramente los picos correspondientes al cuarzo (q), a los feldespatos (f) en los 3 difractogramas.

Comparando el resultado de tierra tratada con ácido acético con la tierra sin tratar se observa que desaparece el pico de la Dolomita (Carbonato) en  $51,44^\circ$  ( $2\theta$ ).

La Figura 43 presenta los difractogramas resultantes de seguir el procedimiento para la identificación de arcillas (como se presenta en la Figura 31).

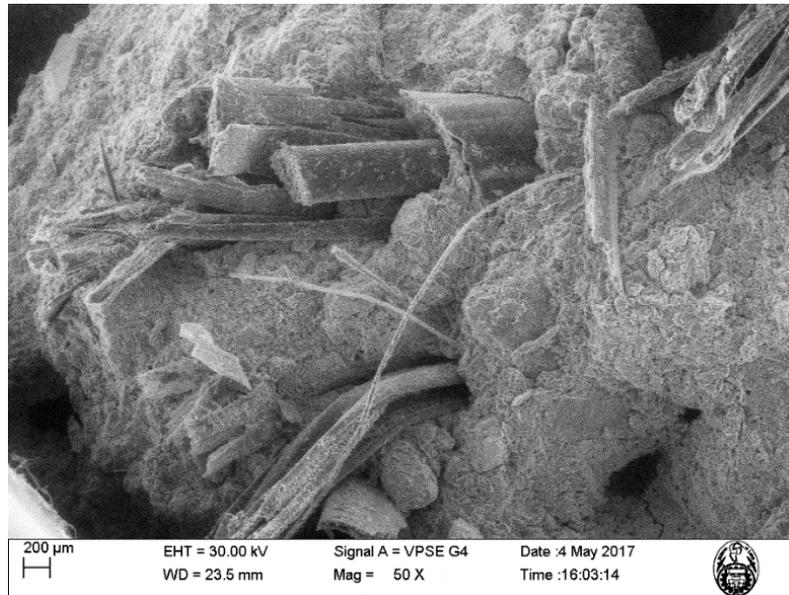


**Figura 43.** Difractogramas para la identificación del tipo de arcilla. En la gráfica q corresponde al cuarzo.

Para el pico de reflexión asignado a  $10 \text{ \AA}$  se observan los cambios de forma, que permiten afirmar que las arcillas presentes pueden ser la illita- montmorillonita o illita-vermiculita (illita) [48].

Para la obtención de los análisis de SEM se fabricó adobes pequeños como los indicados en la sección 3.1 de las siguientes dimensiones 5,0 cm x 5,0 cm x 2,5 cm.

En la Figura 44 se puede observar un sistema constituido por una matriz heterogénea formada por partículas de diversos tamaños, en la cual destaca la presencia de fibras cilíndricas, aleatoriamente distribuidas, cuyos diámetros oscilan entre decenas a centenas de  $\mu\text{m}$ . Destaca en el sistema que hay zonas en las que la fibra se presenta completamente embebida en la matriz, mientras en otras zonas la fibra se encuentra en cavidades, donde no se observa la presencia de la matriz.



**Figura 44.** Adobe con fibra aumento a 50X.

La Figura 45 muestra la micrografía de una muestra de adobe sin fibra, en ese sistema se observa claramente una matriz que posee cavidades de diversos tamaños, entre las cuales las más pequeñas son menores a 50  $\mu\text{m}$  y las más grandes están en el orden de 400  $\mu\text{m}$

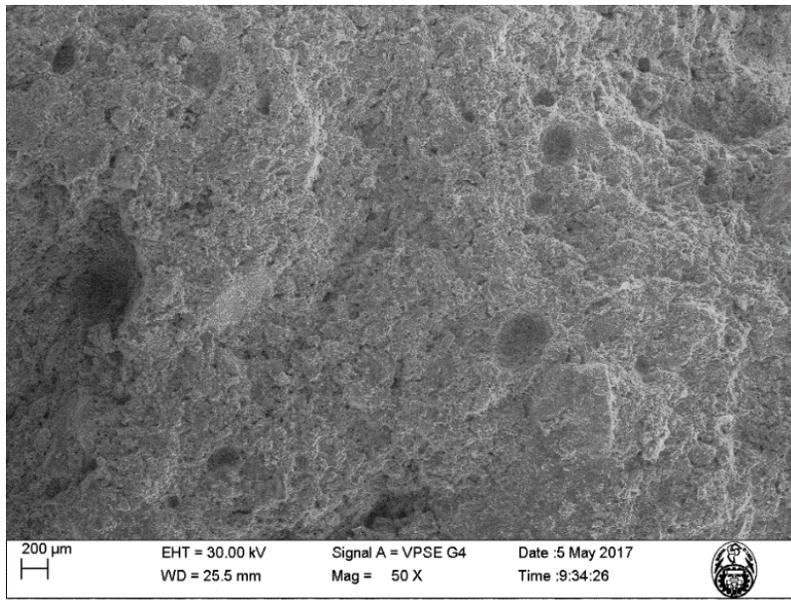


Figura 45. Adobe sin fibra aumento 50X.

En las Figuras 46 y 47 se observan más claro las porosidades del adobe. Además, se observa cómo se cohesionan las partículas entre sí. Teniendo así un material casi compacto en ciertas zonas.

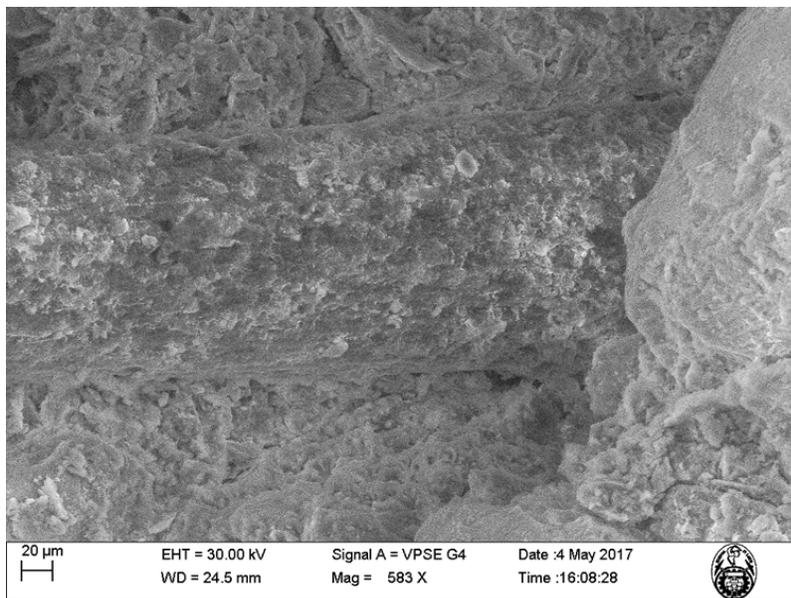
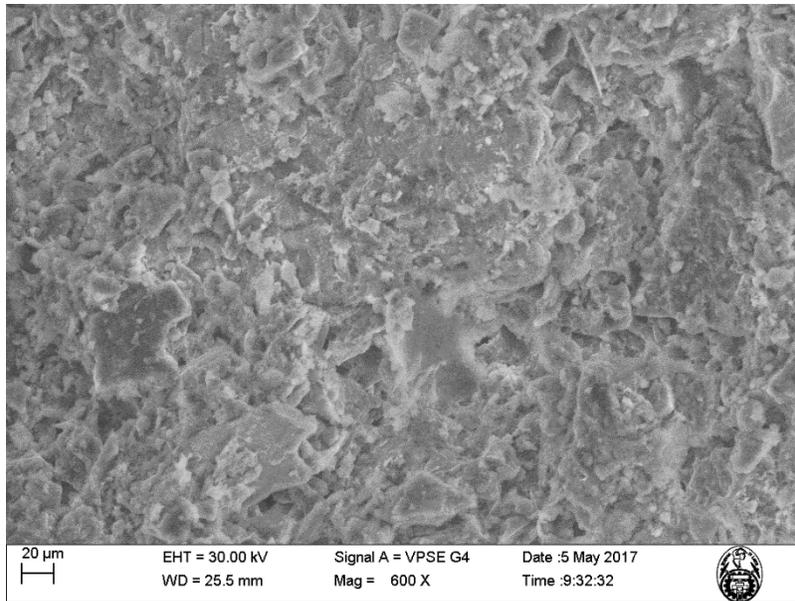


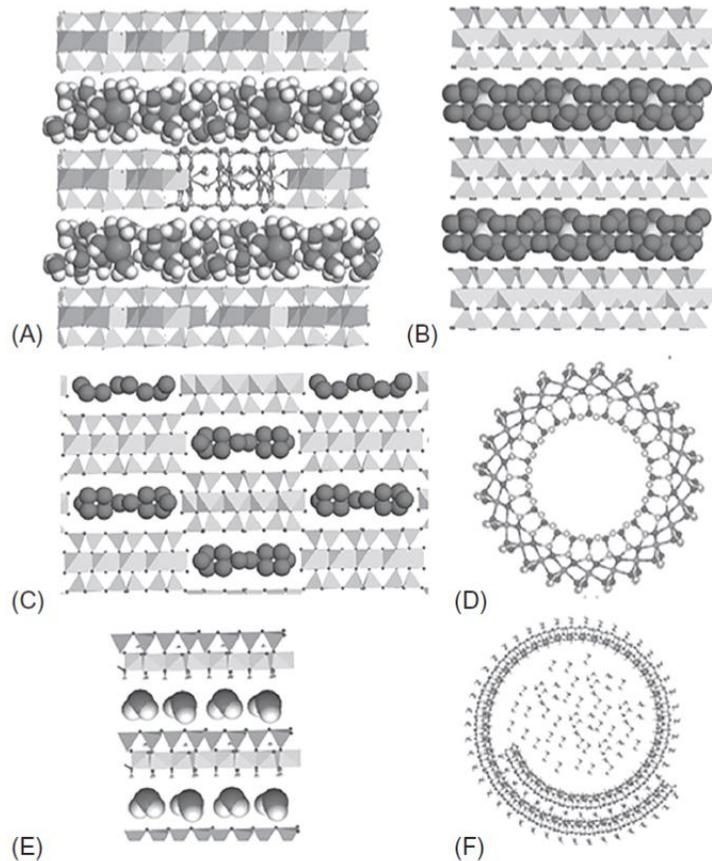
Figura 46. Adobe con fibra aumento 583X.



**Figura 47.** Adobe sin fibra aumento 600X.

De acuerdo con las micrografías de Microscopía Electrónica de Barrido, el adobe es un material biocompuesto compuesto por partículas de diferentes tamaños, encapsulado de aire y reforzado con fibra vegetal.

Por último, para explicar el proceso de adsorción y evaporación de agua en la arcilla durante el proceso tradicionalmente llamado “dormido”, se debe revisar la interacción agua-arcilla. El agua es localizada entre los espacios interlaminares de las arcillas cuando hay un proceso de hidratación. Para diferentes tipos de arcillas se muestra gráficamente la interacción arcilla-agua de acuerdo con Figura 48.



**Figura 48.** Esmectita (A) donde las moléculas de agua están atrapadas alrededor de los cationes en la región interlaminar. Vermiculita (B) análogo a la esmectita y tiene dos capas de H<sub>2</sub>O en el espacio interlaminar. Sepiolita (C) contiene agua zeolítica en los canales y tubos de su estructura. Imogolita (D) y halloysita tubular (E, F) tienen estructuras tubulares donde H<sub>2</sub>O reside internamente en el lumen. [51]

La cantidad de agua adsorbida por las superficies de las capas de las arcillas dependerá de la carga de la capa y el tipo de catión de intercambio. Para el caso de las esmectitas, las moléculas de H<sub>2</sub>O están sueltas coordinando alrededor de los cationes inter capas a través de ion-dipolo e interacción puente hidrogeno. La adsorción adicional de H<sub>2</sub>O ocurre a través de condensación capilar y las capas pueden expandirse de 1 a >150 capas de H<sub>2</sub>O [51]. Este proceso de hinchamiento y deshinchamiento es lo que ocurre durante el dormido. A pesar de los continuos esfuerzos en el estudio de la interacción de la arcilla y agua, este sigue siendo compleja.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Según los objetivos inicialmente planteados y los ensayos realizados se tiene las siguientes conclusiones:

- Se fabricaron bloques de adobe con las mismas composiciones, pero de diferentes dimensiones según los ensayos a desarrollar.
- La tierra trabajada es catalogada como un suelo de partículas finas inorgánicas de arcilla de baja plasticidad.
- Tanto la resistencia a la compresión promedio de la unidad y pilas de adobe cumplen el valor mínimo según la norma E.080 Adobes.
- La resistencia a la flexión de adobe con *Stipa ichu* y sin *Stipa ichu* se obtuvo un valor promedio de 0,56 MPa y 0,30 MPa, respectivamente.
- En el ensayo de cizalladura para adobes sin *Stipa ichu* y con *Stipa ichu* se obtuvo un valor promedio de 5,33 kg cm<sup>-2</sup> y 2,73 kg.cm<sup>-2</sup>, respectivamente.
- La conductividad térmica promedio del adobe sin *Stipa ichu* y con *Stipa ichu* fue de 0,371 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> y 0,349 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>, respectivamente.
- La morfología interna del adobe es porosa, la cual contiene partículas de diferentes tamaños y encapsulados de aire. La distribución del *Stipa ichu* es aleatoria y se adhiere bien a la matriz.
- Se identificó illita-montmorillonita a 10 Å como arcilla presente en la tierra usada para la fabricación de los bloques de adobe.

## CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES

Con el objetivo de mejorar los resultados y tener una visión más amplia se planea los siguientes aspectos como futuras mejoras a realizarse en este trabajo de investigación:

- Realizar la elaboración en un ambiente netamente destinado para la fabricación, preparación de muestras de materiales aislantes.
- Hacer una búsqueda más amplia de normas internacionales en lo que respecta a los procedimientos como ASTM, UNE y también las normas peruanas NTP para su ágil interpretación y discusión.
- Realizar la calibración y trazabilidad del equipo medidor de conductividad una vez se concluya su fabricación, utilizando en primer lugar los materiales medidos en el CENAM.
- Hacer mediciones de conductividad térmica y la resistencia a la compresión mecánica en adobes: con diferentes tipos de fibra que se encuentren en las diferentes localidades altoandinas, variando la composición porcentual de los compuestos principales de la tierra (arena, arcilla), con compactación, con aditivos como cemento Portland, entre otros.
- Hacer mediciones de conductividad térmica de otros materiales aislantes usados en la construcción de viviendas bioclimáticas.
- Medir la resistencia a la flexión de las fibras vegetales a usarse.

## CAPÍTULO 7: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SENAHMI. *Más del 30% de la población que vive en zonas afectadas por heladas está en edad vulnerable*. 2017; Available from: <https://www.inei.gob.pe/prensa/noticias/mas-del-30-de-la-poblacion-que-vive-en-zonas-afectadas-por-heladas-esta-en-edad-vulnerable-9208/>.
2. Barrantes, S., *Diseño bioclimático de una vivienda rural en Yanacolpa, Santiago de Chocorvos, provincia de Huaytará, departamento de Huancavelica y en zonas similares*. 2016: Gerencia de Investigación y Normatividad-SENCICO.
3. Saavedra, M. and K. Takahashi, *Physical controls on frost events in the central Andes of Peru using in situ observations and energy flux models*. Agricultural and Forest Meteorology, 2017. **239**: p. 58-70.
4. INDECI. *Defensa Civil: Fallecieron 312 personas por bajas temperaturas*. 2017; Available from: <http://peru21.pe/actualidad/defensa-civil-baja-temperatura-cobra-vida-312-personas-hasta-momento-2195872>.
5. Govaer, D., *Apprent thermal conductivity of a local adobe building material*. Solar Energy, 1987. **38**(3): p. 165-168.
6. Silveira, D., H. Varum, and A. Costa, *Influence of the testing procedures in the mechanical characterization of adobe bricks*. Construction and Building Materials, 2013. **40**: p. 719-728.
7. Oliva, R.M., *Chan Chan: la milenaria ciudad de barro con enigmáticos relieves*. 1980, Lima, Perú: Editorial Litografica La Confianza.
8. INEI. *Viviendas, según material predominante en las paredes exteriores y área de residencia*. 2016; Available from: <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/poblacion-y-vivienda/>.
9. Gálvez, J.A.L. and P.J.B. Carlos, *Evaluación Funcional y Constructiva de Viviendas con Adobe Estabilizado en Cayalti. Programa COBE-1976*, in *Facultad de Ingeniería Civil - Sección de Post Grado*. 2012, Universidad Nacional de Ingeniería: Programa Cybertesis PERÚ. p. 237.
10. Aguilar, R., M. Montesinos, and S. Uceda, *Mechanical characterization of the structural components of Pre-Columbian earthen monuments: Analysis of bricks and mortar from Huaca de la Luna in Perú*. Case Studies in Construction Materials, 2017. **6**: p. 16-28.
11. Nakata, I.M., *Gestión del Riesgo: Metodología para la Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de Edificaciones de Adobe a Nivel Local*, in *Facultad de Ingeniería Civil - Sección de Postgrado*. 2012, Universidad Nacional de Ingeniería: Programa Cybertesis PERÚ. p. 126.
12. Soto, A.M.V., *Diseño de un dispositivo de medición de la conductividad térmica de materiales de edificación según la norma ASTM C1043*, in *Facultad de Ciencias e Ingeniería*. 2016, Pontificia Universidad Católica del Perú: Repositorio Digital de Tesis PUCP. p. 115.
13. Buendía, M.F.B., *Diseño y Elaboración de un Equipo para la Medición de Conductividad Térmica en Condiciones Inestables de la Madera*, in *Facultad de Ciencias Forestales*. 2007, Universidad Nacional Agraria La Molina: Repositorio La Molina. p. 74.
14. Custodio, M.C., *Determinación del calor específico y de la conductividad térmica de dos especies forestales*, in *Escuela de Post-Grado. Especialidad de Industrias Forestales*. 1996, Universidad Nacional Agraria La Molina: Repositorio La Molina. p. 60.
15. Huamán, N.L., et al., *Efecto del contenido de humedad y temperatura sobre la difusividad térmica en granos andino*. Revista de la Sociedad Química del Perú, 2016. **82**(3): p. 259-271.
16. Ramos, E., et al., *Acondicionamiento térmico para edificaciones rurales altoandinas*. Memoria del XX Simposio Peruano de Energía Solar, Tacna-Perú, 2013: p. 13.

17. Saavedra, G.G., *Simulación térmica de un proyecto de vivienda para la Provincia de Cotabambas, Apurímac*. Memoria del XVIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente, Lima-Perú, 2011: p. 11.
18. Abanto, G.A., et al., *Thermal properties of adobe employed in Peruvian rural areas: Experimental results and numerical simulation of a traditional bio-composite material*. Case Studies in Construction Materials, 2017. **6**: p. 177-191.
19. Charca, S., et al., *Assessment of Ichu fibers as non-expensive thermal insulation system for the Andean regions*. Energy and Buildings, 2015. **108**: p. 55-60.
20. Buratti, C., et al., *Mechanical characterization and thermal conductivity measurements using of a new 'small hot-box' apparatus: innovative insulating reinforced coatings analysis*. Journal of Building Engineering, 2016. **7**: p. 63-70.
21. Calatan, G., et al., *Determining the Optimum Addition of Vegetable Materials in Adobe Bricks*. Procedia Technology, 2016. **22**: p. 259-265.
22. Picuno, P., *Use of traditional material in farm buildings for a sustainable rural environment*. International Journal of Sustainable Built Environment, 2016. **5**(2): p. 451-460.
23. Sharma, V., B.M. Marwaha, and H.K. Vinayak, *Enhancing durability of adobe by natural reinforcement for propagating sustainable mud housing*. International Journal of Sustainable Built Environment, 2016. **5**(1): p. 141-155.
24. Alavez-Ramirez, R., et al., *Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels*. Construction and Building Materials, 2012. **37**: p. 425-431.
25. Lira, L., et al., *Medición de la Conductividad Térmica de Algunos Materiales Utilizados en Edificaciones*. Memorias del Simposio de Metrología, CENAM. Santiago de Querétaro, México, 2008: p. 5.
26. Binici, H., et al., *Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials*. Construction and Building Materials, 2007. **21**(4): p. 901-906.
27. Patnaik, A., et al., *Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies*. Energy and Buildings, 2015. **92**: p. 161-169.
28. Nickel, J. and U. Riedel, *Activities in biocomposites*. Materials Today, 2003. **6**(4): p. 44-48.
29. Willian D. Callister, Jr., David G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering - An Introduction*. 9 ed. 2013, United States of America: John Wiley & Sons, Inc. 990.
30. Nasrin, R., et al., *Preparation of Chitin-PLA laminated composite for implantable application*. Bioactive Materials, 2017. **2**(4): p. 199-207.
31. Ramesh, M., K. Palanikumar, and K.H. Reddy, *Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **79**: p. 558-584.
32. Ramakrishna, S. and Z.M. Huang, *Biocomposites*, in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2016, Elsevier.
33. SENCICO, *Adobe, Norma E.080*. 2006: El Peruano, Lima
34. Juárez Badillo, R.R., *Mecánica de Suelos: Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. Vol. 1. 2005, México: Limusa, Noriega Editores.
35. Neves, C.M.M., et al., *Selección de Suelos y Métodos de Control en la Construcción con Tierra. Prácticas de Campo*. 2009, Red Iberoamericana Proterra.
36. *Laboratorio N° 2 Mecánica de Suelos, Universidad Nacional de Ingeniería*. Available from: <http://www.lem.uni.edu.pe>.
37. ASTM D2216, *Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. 1998.
38. Lleida, I.T.d. *AP- 005. Plasticidad: Límite Líquido. Método de la Cuchara. Ámbito de Suelos*. Available from: <http://www.construmatica.com/construpedia/AP->

- \_005. Plasticidad: L%C3%ADmite\_L%C3%ADquido.\_M%C3%A9todo\_de\_la\_Cuchara.\_%C3%81 mbito\_de\_Suelos.
39. ASTM D4318, *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. 2000.
  40. ASTM D422, *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. 1998.
  41. ASTM D2487, *Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. 2000.
  42. Mark W. Zemansky, R.H.D., *Heat and Thermodynamics*. The Physics Teacher, 1997. **35**: p. 447-448.
  43. C-THERM. *TCi Thermal Conductivity Analyzer* 2017; Available from: [http://ctherm.com/products/tci\\_thermal\\_conductivity/](http://ctherm.com/products/tci_thermal_conductivity/).
  44. ASTM C177, *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plates Apparatus*. 2004.
  45. Özisik, M.N., *Heat Conduction*. 2 ed. 1993, North Carolina: A Wiley - Interscience Publication, John Wiley and Sons, Raleigh. 356.
  46. Fuentes, V.M., *Sistema Primario de Medición de Conductividad Térmica de Aislantes Térmicos. Diseño y Construcción*, in *Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada* 2003, Instituto Politécnico Nacional, México. p. 90.
  47. UNE-EN 196-1, *Métodos de ensayo de cementos, Parte 1, Determinación de resistencias mecánicas*. 2005.
  48. L.J. Poppe, V.F.P., J.C. Hathaway, and D.S. Blackwood, *A Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction*. 2002, U.S Department of the Interior, U.S Geological Survey. 88.
  49. Investigación, S.T.d. *Técnicas de Análisis Químico Superficies*. 2012; Available from: <https://ssyf.ua.es/es/formacion/documentos/cursos-programados/2012/especifica/tecnicas-instrumentales-en-el-analisis-de-superficie/26-noviembre-tecnicas-de-analisis-quimico-superficies.pdf>.
  50. Gonzales, C.D., *Preparación de muestras para un Microscopio Electrónico de Barrido. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería*. 2009.
  51. Johnston, C.T., *Chapter 9 - Infrared Studies of Clay Mineral-Water Interactions*, in *Developments in Clay Science*, W.P. Gates, et al., Editors. 2017, Elsevier. p. 288-309.
  52. Lira, L., et al., *Medición de la Conductividad Térmica de Materiales Aislantes en CENAM*. Memorias del Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica, CENAM. Santiago de Querétaro, México, 2007: p. 11.
  53. Lira, L., et al., *Diseño del sistema de medición de conductividad térmica de materiales para construcción*. Memorias del Simposio de Metrología, CENAM. Santiago de Querétaro, México, 2010: p. 6.
  54. M. H. Hahn, H.E.R., and D. R. Flynn, *Robinson Line-Heat-Source Guarded Hot Plate Apparatus*. ASTM STP 544, R.P. Tye, ed: 167-192, 1974.

## ANEXOS

### ANEXO 1: PROPUESTA Y AVANCE DE LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO MEDIDOR DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA BAJO LA NORMA ASTM C 177

A continuación, se presentan los trabajos previos con los cuales se definen las dimensiones de la placa caliente, ubicación de los calefactores, ubicación de termopares del equipo medidor de conductividad térmica que será construido en el Laboratorio de Ingeniería Física.

#### TRABAJOS PREVIOS

Hubo un exhaustivo estudio en la construcción del equipo de conductividad térmica en el CENAM. Para desarrollar el método primario se realizaron varios estudios y caracterizaciones al aparato de placa caliente con guarda, dentro de las investigaciones se tiene [52]:

- la evaluación del límite de error de cualquier aparato de placa caliente con guarda como función de sus parámetros geométricos, sus dimensiones y las características de la muestra
- determinación del campo de temperatura en la zona de medición y la guarda de manera teórica y experimental
- estudio de la transferencia de calor en el espacio anular, entre otros trabajos muy interesante

A continuación, se evaluará el efecto de borde, las características de la placa caliente, fuentes de calor, termopares, placas frías.

#### EFFECTO DE BORDE

Para la propuesta del equipo primero se estudió el efecto de borde. El efecto de borde se expresa con una ecuación paramétrica que permite diseñar o evaluar un instrumento dentro de ciertos límites de error. Los parámetros son  $X, L, b, d, h, k$ .

$$EE = EE \left( X, \frac{L}{b}, \frac{d}{b}, \frac{h}{k_z}, \frac{k_z}{k_r} \right) \quad (A1)$$

Donde

$$X = \frac{(T_H + T_C - 2T_A)}{(T_H - T_C)} \quad (A2)$$

Esta expresión es función de la temperatura del plato caliente ( $T_H$ ), plato frío ( $T_C$ ) y la temperatura ambiente ( $T_A$ ),  $L$  es el espesor de la muestra,  $b$  es el radio de la zona de medición,  $d$  es el radio de la guarda,  $k_z$  y  $k_r$  son las conductividades térmicas en las direcciones axial y radial del material de la zona de medición y  $h$  es el coeficiente convectivo de transferencia de calor.

La ecuación (A1) puede ser escrita de la siguiente manera [53]:

$$EE = A + BX \tag{A3}$$

Donde  $A$  y  $B$  se obtienen en función de  $\frac{L}{b}, \frac{d}{b}$  como lo indican las Figuras A1 y A2.

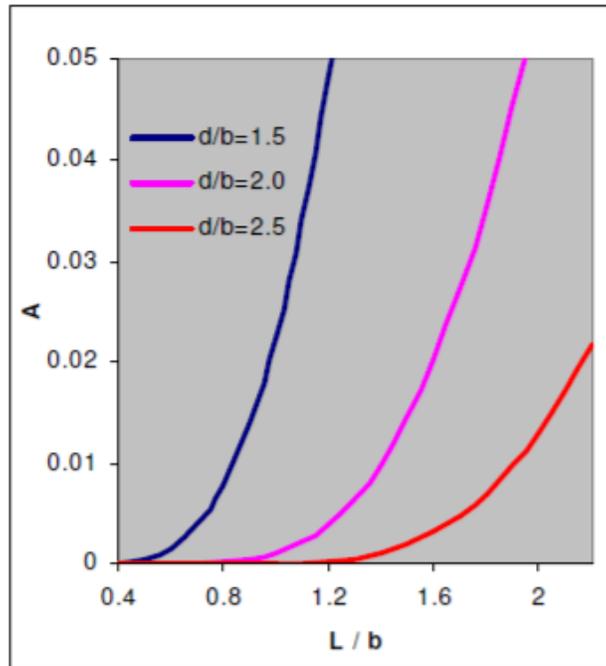


Figura. A1 Error de A en función de  $\frac{L}{b}$  [53]

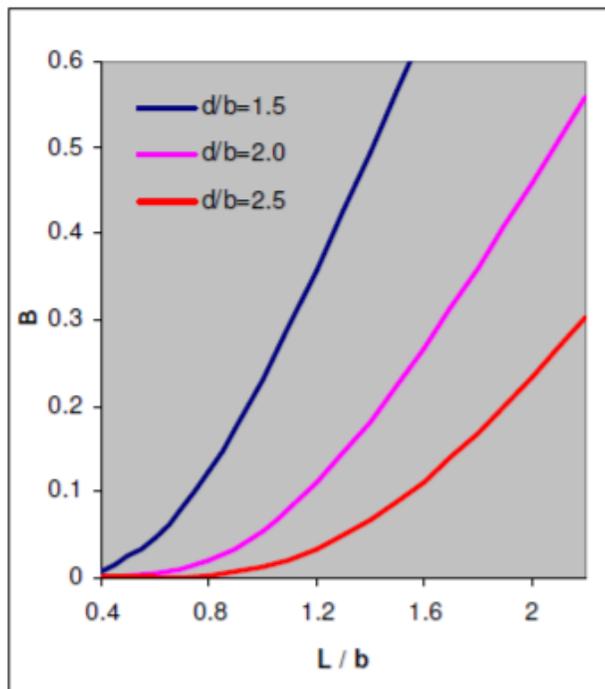


Figura. A2 Error de B en función de  $\frac{L}{b}$  [53]

EE se calcula con ayuda de las Figuras A1, A2 y las condiciones experimentales vía la ecuación (A3).

A continuación, se presenta unas tablas donde se muestra la estimación del error por efecto de borde:

Tabla A1. Condiciones para el cálculo de dimensiones en el CENAM

Th (°C)	Tc (°C)	Ta (°C)
34	14	22

Tabla A2. Resultados para distintos valores de L, b, d considerando la tabla A1

#	Espesor (mm)	Radios (mm)				Temperatura (°C)	Efecto de borde			
		L	B	d	L/b		d/b	X	A	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	7,14E-04	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	0,620053	2,010554	0,2	0	0,00833	0,001666	0,1666

Pero las condiciones que tenemos en el CER-UNI no son las mismas, a continuación, se tiene la predicción del Efecto de borde para dimensiones similares al APCG-310:

Tabla A3. Condiciones para el cálculo de dimensiones en CER-UNI

Th (°C)	Tc (°C)	Ta (°C)
45	25	25

Tabla A4. Resultados para distintos valores de L, b, d considerando la tabla A3

#	Espesor (mm)	Radios (mm)				Temperatura (°C)	Efecto de borde			
		L	B	d	L/b		d/b	X	A	B
1	50	50	100	1	2	1	0,001428	0,058	0,059428	5,9428
2	50	75	125	0,666667	1,666667	1	0,00357	0,0916	0,09517	9,517
3	50	75	150	0,666667	2	1	7,14E-04	0,025	0,025714	2,5714
4	50	75	187,5	0,666667	2,5	1	0	0,00833	0,00833	0,833
APCG-310	47	75.8	152,4	0,620053	2,010554	1	0	0,00833	0,00833	0,833

De las tablas A3 y A4 se tiene que la mejor opción es la # 4 con 0,833 %EE; es decir 150 mm de diámetro para la zona de medida y 375 mm de diámetro para la guarda.

### PLACA CALIENTE

La placa caliente consiste en una zona de medición de 150 mm de diámetro y una placa de guarda concéntrica coplanaria con un diámetro interior de 152 mm y un diámetro exterior de 375 mm, el diseño de la placa caliente está basado en el estudio de efecto de borde presentado en la sección anterior.

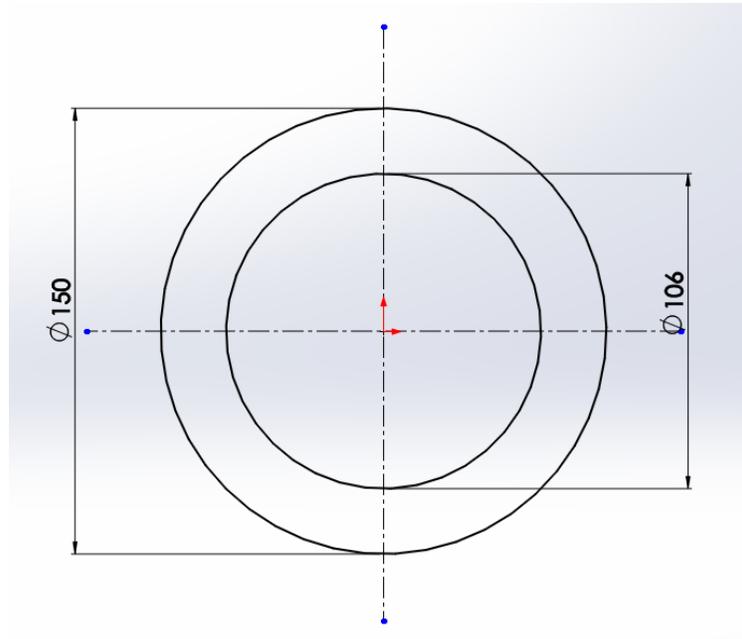
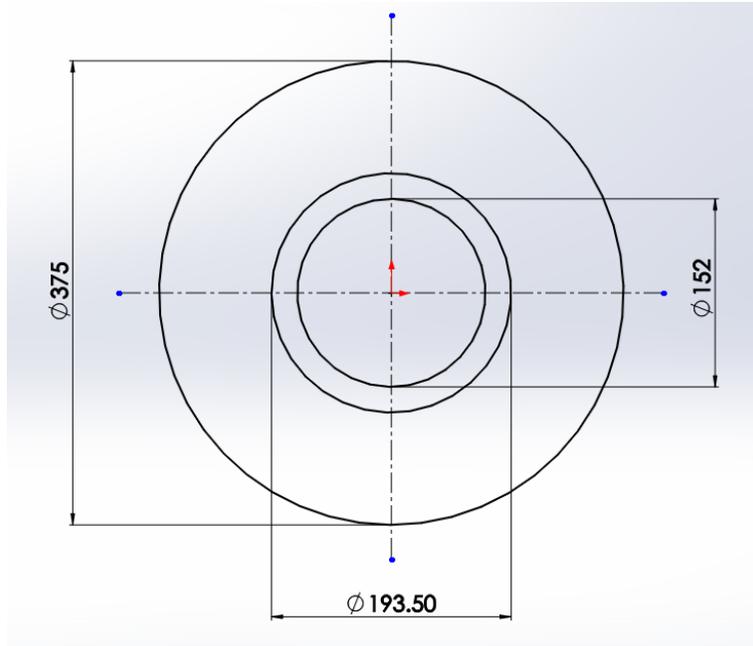
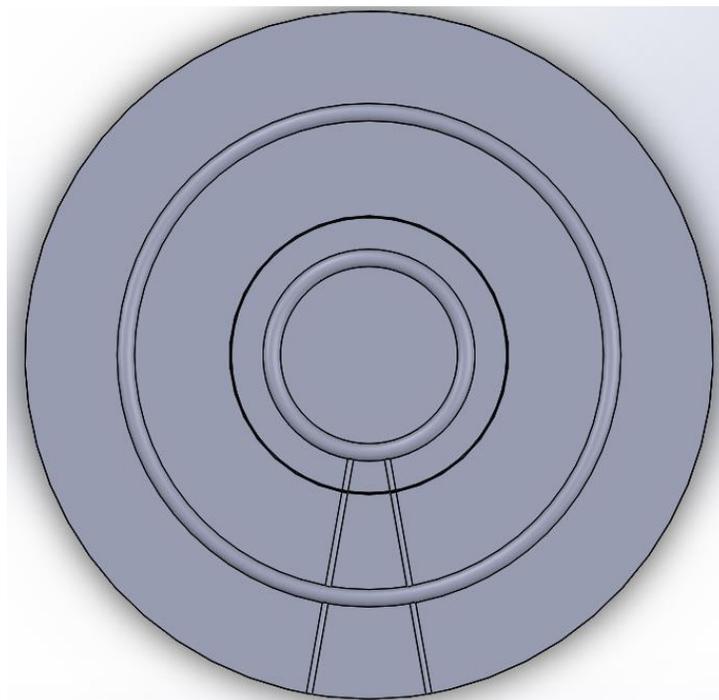


Figura. A3 Zona de medición. Diámetro de 150 mm y ubicación del calefactor en 106 mm



**Figura. A4** Guarda. Diámetro interno 152 mm, diámetro exterior 375 mm y ubicación del calefactor 193.5 mm



**Figura. A5** Placa caliente, vista frontal de los discos. Las ranuras son de 5/16'' para los calefactores, el gap es de 1 mm, las ranuras para la salida de alimentación son de 3 mm

La separación entre las placas es de 1 mm. Tanto la zona de medición y la placa de guarda están diseñadas de tal manera que sean un tipo sándwich, tal forma que se pueda colocar fácilmente la resistencia eléctrica tipo tubular, cables de alimentación y los termopares. Estos dos discos de 5/16" cada uno serán acoplados con pernos haciendo un total de 5/8" de espesor para la placa caliente, a su vez la zona de medición y la placa de guarda están unidas por medios de pernos para fijar las placas, ajustar el espacio libre entre estos y mantener en el mismo plano a la guarda.

Diversos materiales se consideraron para su fabricación como aluminio, cobre, plata y oro; sin embargo, se seleccionó una aleación duraluminio (aleación de Al-Cu-Mg) por su bajo costo en comparación a los demás, también por su alta conductividad térmica ( $164 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), buena resistencia a la oxidación y facilidad para su maquinado.

**La ubicación de los calefactores** se ha estudiado previamente y se tiene definido la ubicación de estos en función del radio de la zona de medición, lo permite lograr que la temperatura superficial promedio en el área de medición se aproxime a la temperatura en su borde [54]. De donde se concluye que para el caso de solo un calefactor para la zona de medición su ubicación es en  $r = a/\sqrt{2}$ , donde  $a$  es el diámetro de la zona de medición. Para nuestro caso  $a = 150 \text{ mm}$ , luego la fuente de calor de la zona de medición se coloca en un diámetro de 106 mm y es un elemento calefactor tipo tubo circular de 8 mm. Para el caso de la placa de guarda, de igual manera para un calefactor se tiene que su ubicación es en  $r = 1,29 \cdot a/2$ , para nuestro caso se tiene  $r = 193,5 \text{ mm}$ . Los calefactores se colocaron en los alojamientos en la superficie interna de los discos, recubiertos con mostacilla. Los cables de alimentación eléctrica se conducen al exterior por una perforación radial a las placas.

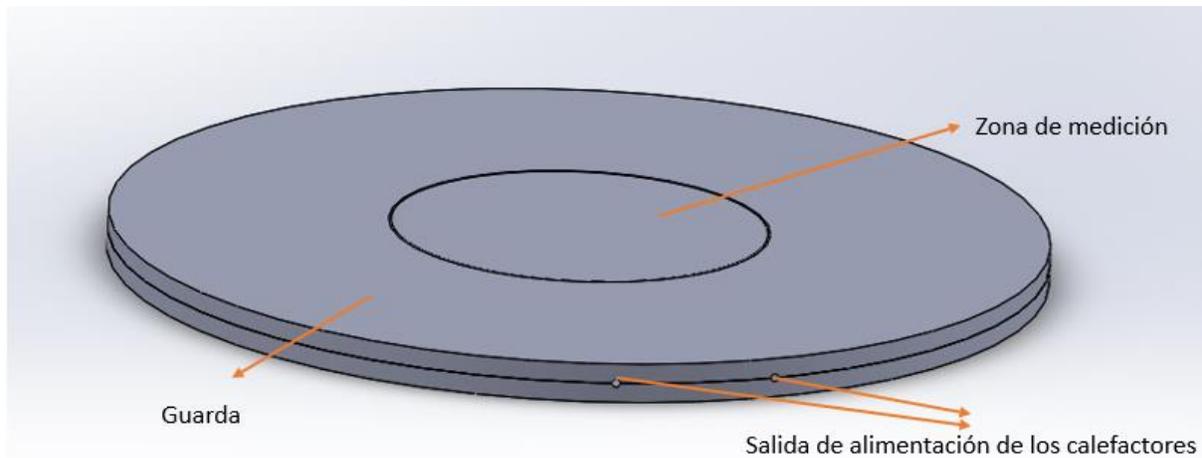


Figura. A6 Placa caliente. Espesor total 5/8"

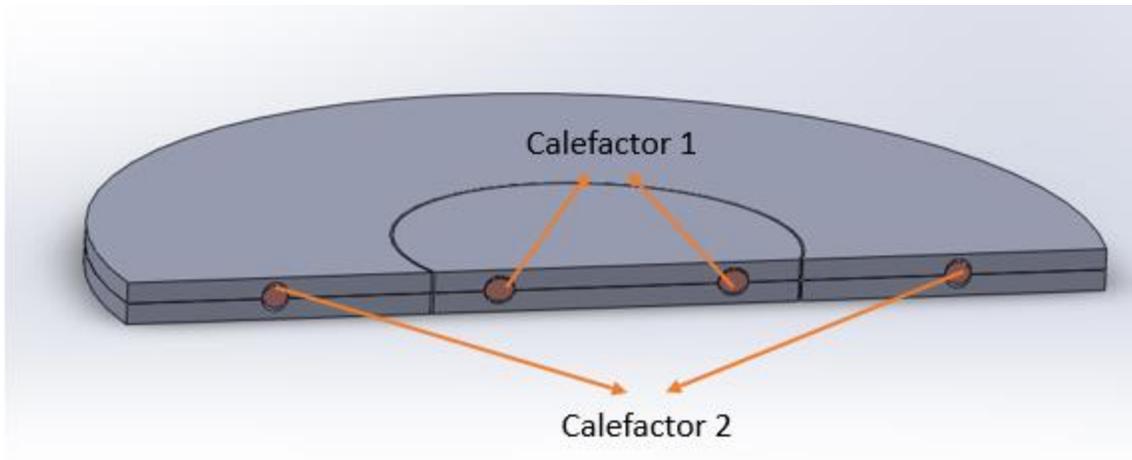


Figura. A7 Corte del ensamblaje de los calefactores

### FUENTES DE CALOR

Dos fuentes de corriente directa de 0-18 V y 0-10 A proporcionará la potencia tanto a la zona de medida y la guarda de la placa de medición. La potencia en la placa se determinará al medir la caída de tensión eléctrica a través del calefactor y la correspondiente intensidad de corriente. La tensión a través del calefactor se mide directamente con un voltímetro y la intensidad de corriente se determina de la caída de tensión eléctrica a través de un resistor estándar de  $\zeta$ ohm en serie con el calefactor.

### TERMOPARES

Todos los termopares que se eligieron fueron tipo T (Cobre-Constantán 30 AWG 0,01'). por su rango de operación de acuerdo con nuestra aplicación de operación 25°C a 50°C y por la temperatura limite según su diámetro.

Common Thermocouple Temperature Ranges			
Calibration	Temp Range	Std. Limits of Error	Spec. Limits of Error
<b>J</b>	0°C to 750°C (32°F to 1382°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
<b>K</b>	-200°C to 1250°C (-328°F to 2282°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
<b>E</b>	-200°C to 900°C (-328°F to 1652°F)	Greater of 1.7°C or 0.5%	Greater of 1.0°C or 0.4%
<b>T</b>	-250°C to 350°C (-328°F to 662°F)	Greater of 1.0°C or 0.75%	Greater of 0.5°C or 0.4%

Figura. A8 Rango común de termopares

**Upper Temperature Limit in °C (°F) of Protected Bare Wire Thermocouples Vs. Wire Diameter**

T/C Type	Wire Size						
	8 AWG 0.128"	14 AWG 0.064"	20 AWG 0.032"	24 AWG 0.020"	28 AWG 0.013"	30 AWG 0.010"	36 AWG 0.005"
<b>J</b>	760 (1400)	590 (1100)	480 (900)	370 (700)	370 (700)	320 (600)	315 (590)
<b>K</b>	1260 (2300)	1090 (2000)	980 (1800)	870 (1600)	870 (1600)	760 (1400)	590 (1100)
<b>E</b>	870 (1600)	650 (1200)	540 (1000)	430 (800)	430 (800)	370 (700)	320 (600)
<b>T</b>	370 (700)	370 (700)	260 (500)	200 (400)	200 (400)	150 (300)	
<b>RX/SX</b>	200 (400)	200 (400)	200 (400)	200 (400)	200 (400)	150 (300)	
<b>N</b>	1260 (2300)	1090 (2000)	980 (1800)	980 (1800)	980 (1800)	870 (1600)	
<b>CX</b>	472 (800)	472 (800)	472 (800)	472 (800)	472 (800)	400 (752)	

Figura. A9 Temperatura límite del alambre de protección vs diámetro del termopar

### PLACAS FRÍAS

Las dos placas frías son móviles y están diseñadas para circular un fluido a través de ellas por medio de un espiral de cobre. Cada placa de aluminio es de 5/16" de espesor, acoplado a este estará un arreglo de serpentín de cobre es de 1/4" diámetro como en la Fig. A10. Esta configuración permite lograr una distribución uniforme de temperaturas sobre la superficie de la placa fría. Las placas tienen una temperatura uniforme dentro del rango  $1 \pm 0,5$  °C en un intervalo de temperaturas de operación de 18°C a 25°C, el cual será verificado con una cámara térmica. El fluido de trabajo es agua.

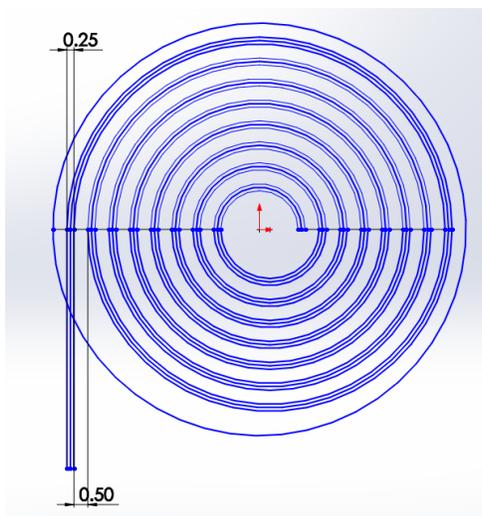
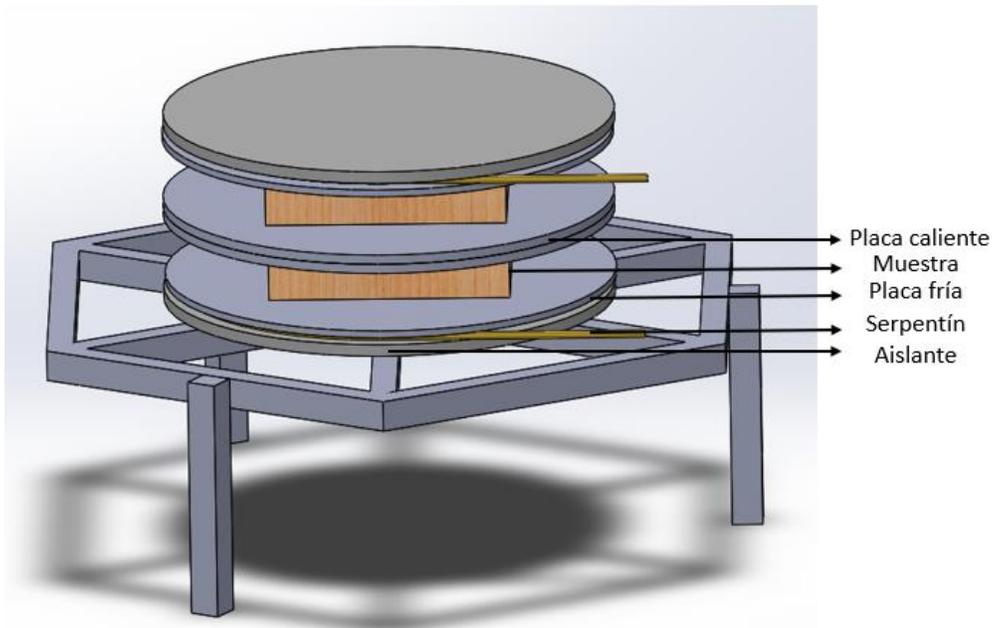


Figura. A10 Serpentín de cobre, arreglo de espiral simple. Entrada parte inferior en el plano y la salida saliendo del plano perpendicular (unidades en mm)

Las superficies exteriores y los bordes de las placas frías están aislados con un espesor de 2,5 cm de un material aislante.

El fluido será bombeado desde un tanque de capacidad de 750 L mediante una pequeña bomba. El criterio de la elección del volumen del tanque es por qué se requiere un aproximado de 50 horas para que la temperatura contenida del tanque varíe en 1 °C tiempo suficiente para poder hacer las mediciones en estado estacionario.

Finalmente se tiene el sistema ensamblado en la Figura A11 adicionalmente de la forma del soporte que tendría.



**Figura. A11** Arreglo del equipo medidor de conductividad térmica

## ANEXO 2: DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE OTROS MATERIALES USADOS EN CONSTRUCCIONES RURALES ALTOANDINAS (TOTORA Y YESO)

Además de medir la conductividad térmica del adobe, se hizo mediciones a un juego de bloque de yeso de 25,0 cm x 25,0 cm x 2,0 cm y a un juego de sándwich de totora 25,0 cm x 25,0 cm x 2,4 cm.

### Resultado del yeso

Tabla A5. Resultados de medición yeso

<b>Número de Prueba:</b> Uno.	
<b>Descripción de la muestra</b>	
<b>Características:</b> Material de yeso, se midió con cubierta de plástico transparente.	
<b>Identificación:</b> Y1 y Y2.	
<b>Dimensiones:</b> Placa de 25 cm x 25 cm x 1,967 cm.	
<b>Descripción del patrón</b>	
<b>Patrón nacional:</b> CNM-PNE-16.	
<b>Nombre del aparato:</b> Aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG).	
<b>Orientación de los platos:</b> Horizontal.	
<b>Modo de operación:</b> Doble lado de medición.	
<b>Procedimiento de prueba</b>	
Estado permanente con APCG.	
<b>Valores experimentales</b>	
<b>Nombre de la variable:</b>	
Potencia disipada durante la prueba / W	9,8275
Temperatura en la placa caliente / °C	32,02
Temperatura en la placa fría / °C	14,20
Gradiente de temperatura en la muestra / °C	17,82
Temperatura media o de la prueba / °C	23,1
Temperatura ambiente / °C	21,6
Humedad relativa / %HR	58
Espesor de la muestra / m	0,01967
Área de medición / m <sup>2</sup>	0,0214484
Conductividad térmica / W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0,254
Incertidumbre relativa expandida (k=2) / %	4



**Figura A12.** Juego de yeso para medición de conductividad térmica

En la medición del yeso se sabía previo al ensayo que el valor de su conductividad térmica sería menor al del adobe, mientras el material sea más aislante la potencia suministrada a la zona de medición debe disminuir. Considerándose inicialmente los valores de voltaje y corriente de 30,66 V, 0,321 A y 18,5 V, 1,05 A para la zona de medición y guarda respectivamente. Sin embargo, se fue variando la potencia de la guarda para cerrar la diferencia entre la zona de medición y guarda; siendo los valores de voltaje y corriente de 30,66 V, 0,321 A y 19,9 V, 1,13 A para llegar al estado estable.

## Resultado de la totora

Tabla A6. Resultados de medición totora

<b>Número de Prueba:</b> Uno.	
<b>Descripción de la muestra</b>	
<b>Características:</b> Material de fibra vegetal, se midió con cubierta de plástico transparente. <b>Identificación:</b> T1 y T2. <b>Dimensiones:</b> Placa de 25 cm x 25 cm x 2,412 cm.	
<b>Descripción del patrón</b>	
<b>Patrón nacional:</b> CNM-PNE-16. <b>Nombre del aparato:</b> Aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG). <b>Orientación de los platos:</b> Horizontal. <b>Modo de operación:</b> Doble lado de medición.	
<b>Procedimiento de prueba</b>	
Estado permanente con APCG.	
<b>Valores experimentales</b>	
<b>Nombre de la variable:</b>	
Potencia disipada durante la prueba / W	1,4017
Temperatura en la placa caliente / °C	31,23
Temperatura en la placa fría / °C	13,77
Gradiente de temperatura en la muestra / °C	17,5
Temperatura media o de la prueba / °C	22,5
Temperatura ambiente / °C	20,7
Humedad relativa / %HR	62
Espesor de la muestra / m	0,02412
Área de medición / m <sup>2</sup>	0,0214484
Conductividad térmica / W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0,045
Incertidumbre relativa expandida (k=2) / %	4



**Figura A13.** Juego de totora para medición de conductividad térmica

Para este caso, el laminado de totora es un material más aislante que el yeso. Por tanto, la necesidad de reconsiderar los valores de potencia. Siendo los valores iniciales de voltaje y corriente de 11,6 V, 0,121 A y 11,6 V, 0,66 A para la zona de medición y guarda respectivamente. Al igual que el caso del yeso se vio la necesidad de ajustar la potencia de la guarda, pero en este caso disminuyendo los valores de voltaje y corriente. Esto porque la temperatura de la guarda sobrepasaba en aproximadamente 2 °C a la zona de medición, caso contrario al del yeso donde la temperatura de la guarda era menor a la zona de medición. Los valores finales de voltaje y corriente fueron de 11,6 V, 0,121 A y 9,5 V, 0,54 A para la zona de medición y guarda respectivamente.

Finalmente se tiene una tabla de resumen de la conductividad térmica del yeso y totora.

**Tabla A7.** Conductividad térmica del yeso y totora con el APCG

Material	Conductividad térmica ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	Incertidumbre 4% ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
Yeso	0,254	0,010
Totora	0,045	0,002

# ANEXO 3: NORMA E.080 ADOBE

## NORMA E.080

### ADOBE

#### Artículo 1.- ALCANCE

La Norma comprende lo referente al adobe simple o estabilizado como unidad para la construcción de albañilería con este material, así como las características, comportamiento y diseño.

El objetivo del diseño de construcciones de albañilería de adobe es proyectar edificaciones de interés social y bajo costo que resistan las acciones sísmicas, evitando la posibilidad de colapso frágil de las mismas.

Esta Norma se orienta a mejorar el actual sistema constructivo con adobe tomando como base la realidad de las construcciones de este tipo, existentes en la costa y sierra.

Los proyectos que se elaboren con alcances y bases distintos a los consideradas en esta Norma, deberán estar respaldados con un estudio técnico.

#### Artículo 2.- REQUISITOS GENERALES

2.1. El proyecto arquitectónico de edificaciones de adobe deberá adecuarse a los requisitos que se señalan en la presente Norma.

2.2. Las construcciones de adobe simple y adobe estabilizado serán diseñadas por un método racional basado en los principios de la mecánica, con criterios de comportamiento elástico.

2.3. Las construcciones de adobe se limitarán a un solo piso en la zona sísmica 3 y a dos pisos en las zonas sísmicas 2 y 1 definidas en la NTE E.030 Diseño Sismorresistente.

Por encima del primer piso de adobe, podrán tenerse estructuras livianas tales como las de quinchá o similares.

2.4. No se harán construcciones de adobe en suelos granulares sueltos, en suelos cohesivos blandos, ni arcillas expansivas. Tampoco en zonas propensas a inundaciones cauces de avalanchas, aluviones o huaycos o suelos con inestabilidad geológica.

2.5. Dependiendo de la esbeltez de los muros, se deberá incluir la colocación de refuerzos que mejoren el comportamiento integral de la estructura.

#### Artículo 3.- DEFINICIONES

##### 3.1. Adobe

Se define el adobe como un bloque macizo de tierra sin cocer, el cual puede contener paja u otro material que mejore su estabilidad frente a agentes externos.

##### 3.2. Adobe Estabilizado

Adobe en el que se ha incorporado otros materiales (asfalto, cemento, cal, etc.) con el fin de mejorar sus condiciones de resistencia a la compresión y estabilidad ante la presencia de humedad.

##### 3.3. Mortero

Material de unión de los adobes. Puede ser barro con paja o con arena, o barro con otros componentes como asfalto, cemento, cal, yeso, bosta, etc.

##### 3.4. Arriostre

Elemento que impide el libre desplazamiento del borde de muro. El arriostre puede ser vertical u horizontal.

##### 3.5. Altura Libre de Muro

Es la distancia vertical libre entre elementos de arriostre horizontales.

##### 3.6. Largo Efectivo

Distancia libre horizontal entre elementos de arriostre verticales o entre un elemento de arriostre y un extremo libre.

##### 3.7. Esbeltez

Relación entre la altura libre del muro y su espesor.

##### 3.8. Muro Arriostrado

Es un muro cuya estabilidad lateral está confiada a elementos de arriostre horizontales y/o verticales.

##### 3.9. Extremo Libre de Muro

Es el borde vertical u horizontal no arriostrado de un muro.

#### 3.10. Vigas Collar o Soleras

Son elementos de uso obligatorio que generalmente conectan a los entrepisos y techos con los muros. Adecuadamente rigidizados en su plano, actúan como elemento de arriostre horizontal (Ver Artículo 6 (6.3)).

#### 3.11. Contrafuerte

Es un arriostre vertical construido con este único fin.

#### Artículo 4.- UNIDAD O BLOQUE DE ADOBE

##### 4.1. Requisitos Generales

La gradación del suelo debe aproximarse a los siguientes porcentajes: **arcilla** 10-20%, **limo** 15-25% y **arena** 55-70%, no debiéndose utilizar suelos orgánicos. Estos rangos pueden variar cuando se fabriquen adobes estabilizados. El adobe debe ser macizo y sólo se permite que tenga perforaciones perpendiculares a su cara de asien-to, cara mayor, que no representen más de 12% del área bruta de esta cara.

El adobe deberá estar libre de materias extrañas, grietas, rajaduras u otros defectos que puedan degradar su resistencia o durabilidad.

##### 4.2. Formas y Dimensiones

Los adobes podrán ser de planta cuadrada o rectangular y en el caso de encuentros con ángulos diferentes de 90°, de formas especiales.

Sus dimensiones deberán ajustarse a las siguientes proporciones:

a) Para adobes rectangulares el largo sea aproximadamente el doble del ancho.

b) La relación entre el largo y la altura debe ser del orden de 4 a 1.

c) En lo posible la altura debe ser mayor a 8 cm.

##### 4.3. Recomendaciones para su Elaboración

Remojar el suelo y retirar las piedras mayores de 5 mm y otros elementos extraños.

Mantener el suelo en reposo húmedo durante 24 horas. Secar los adobes bajo sombra.

#### Artículo 5.- COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LAS CONSTRUCCIONES DE ADOBE

##### 5.1. Comportamiento Sísmico de las Construcciones de Adobe

Las fallas de las estructuras de adobe no reforzadas, debidas a sismos, son frágiles. Usualmente la poca resistencia a la tracción de la albañilería produce la falla del amarre de los muros en las esquinas, empezando por la parte superior; esto a su vez aísla los muros unos de otros y conduce a una pérdida de estabilidad lateral, produciendo el desplome del mismo fuera de su plano.

Si se controla la falla de las esquinas, entonces el muro podrá soportar fuerzas sísmicas horizontales en su plano las que pueden producir el segundo tipo de falla que es por fuerza cortante. En este caso aparecen las típicas grietas inclinadas de tracción diagonal.

Las construcciones de adobe deberán cumplir con las siguientes características generales de configuración:

a) Suficiente longitud de muros en cada dirección, de ser posible todos portantes.

b) Tener una planta que tienda a ser simétrica, preferentemente cuadrada.

c) Los vanos deben ser pequeños y de preferencia centrados.

d) Dependiendo de la esbeltez de los muros, se definirá un sistema de refuerzo que asegure el amarre de las esquinas y encuentros.

##### 5.2. Fuerzas Sísmicas Horizontales

La fuerza sísmica horizontal en la base para las edificaciones de adobe se determinará con la siguiente expresión:

$$H = S U C P$$

Donde:

**S:** Factor de suelo (indicado en la Tabla 1),

**U:** Factor de uso (indicados en la Tabla 2),

**C:** Coeficiente sísmico (indicado en la Tabla 3) y

**P:** Peso total de la edificación, incluyendo carga muerta y el 50% de la carga viva.

**TABLA 1**

Tipo	Descripción	Factor S
I	Rocas o suelos muy resistentes con capacidad portante admisible $\geq 3 \text{ Kg/cm}^2$	1,0
II	Suelos intermedios o blandos con capacidad portante admisible $\geq 1 \text{ Kg/cm}^2$	1,2

**TABLA 2**

Tipo de las Edificaciones	Factor U
Colegios, Postas Médicas, Locales Comunales, Locales Públicos	1,3
Viviendas y otras edificaciones comunes	1,0

**5.3. Comportamiento del Adobe Frente a Cargas Verticales**

Usualmente la resistencia de la albañilería a cargas verticales no presenta problemas para soportar la carga de uno o dos pisos. Se debe mencionar sin embargo que los elementos que conforman los entrepisos o techos de estas edificaciones, deben estar adecuadamente fijados al muro mediante la viga collar o solera.

**TABLA 3**

Zonas Sísmica	Coefficiente Sísmico C
3	0,20
2	0,15
1	0,10

**ZONAS SÍSMICAS\*  
FIGURA 1**



\* Ver Anexo

**5.4. Protección de las Construcciones de Adobe**

La humedad y la erosión producidas en los muros son principales causantes del deterioro de las construcciones de tierra, siendo necesaria su protección a través de:

- Recubrimientos resistentes a la humedad
- Cimientos y sobrecimientos que eviten el contacto del muro con el suelo
- Veredas perimetrales
- Aleros
- Sistemas de drenaje adecuados

**Artículo 6.- SISTEMA ESTRUCTURAL**

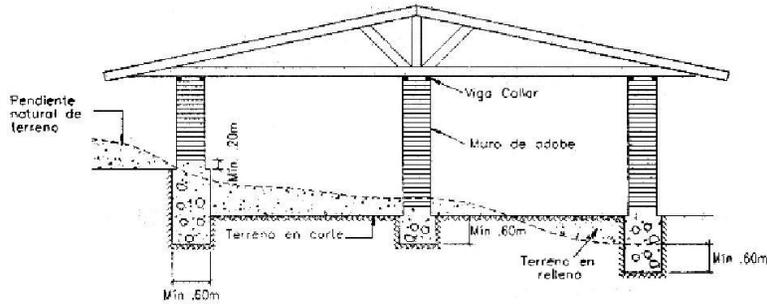
El sistema estructural de las construcciones de adobe estará compuesto de:

- a) Cimentación
- b) Muros
- c) Elementos de arriostre horizontal
- d) Elementos de arriostre vertical
- e) Entrepiso y techo
- f) Refuerzos

**6.1. Cimentación**

- a) No se harán construcciones de adobe en suelos granulares sueltos, en suelos cohesivos blandos ni en arcillas expansivas. Tampoco en zonas propensas a inundaciones, cauces de avalanchas, aluviones o huaycos, o suelos con inestabilidad geológica.
- b) La cimentación deberá transmitir la carga de los muros al terreno de acuerdo a su esfuerzo permisible y tendrá una profundidad mínima de 60 cm medida a partir del terreno natural y un ancho mínimo de 40 cm.
- c) Los cimientos para los muros deberán ser concreto ciclópeo o albañilería de piedra. En zonas no lluviosas de comprobada regularidad e imposibilidad de inundación, se permitirá el uso de mortero Tipo II para unir la mampostería de piedra (Ver Artículo 7 (7.2)).
- d) El sobrecimiento deberá ser de concreto ciclópeo o albañilería de piedra asentada con mortero Tipo I (Ver Artículo 7 (7.11)), y tendrá una altura tal que sobresalga como mínimo 20 cm sobre el nivel del suelo. (Ver Figura 2).

FIGURA 2



**6.2. Muros**

- a) Deberá considerarse la estabilidad de todos los muros. Esto se conseguirá controlando la esbeltez y utilizando arriostres o refuerzos.
- b) Las unidades de adobe deberán estar secas antes de su utilización y se dispondrá en hiladas sucesivas considerando traslape tal como se muestra en las Figuras 3 y 4.
- c) El espesor de los muros se determinará en función de la altura libre de los mismos y la longitud máxima del muro entre arriostres verticales será 12 veces el espesor del muro. (Ver Tabla 4)
- d) En general los vanos deberán estar preferentemente centrados. El borde vertical no arriostrado de puertas y

ventanas deberá ser considerado como borde libre.

El ancho máximo de puertas y ventanas (vanos) será de 1/3 de la longitud del muro y la distancia entre el borde libre al arriostre vertical más próximo no será menor de 3 ni mayor de 5 veces el espesor del muro. Se exceptúa la condición de 3 veces el espesor del muro en el caso que el muro esté arriostrado al extremo (Ver Figura N° 5)

- e) Como refuerzo se podrá utilizar cualquier material de los especificados en la Artículo 6 (6.4).
- f) Los muros deberán ser diseñados para garantizar su resistencia, según lo especificado en la Artículo 8.
- g) En caso de muros cuyos encuentros sean diferentes a 90° se diseñarán bloques especiales detallándose los encuentros.

FIGURA 3  
MURO REFORZADO CON CAÑA O SIMILAR VERTICAL Y HORIZONTAL

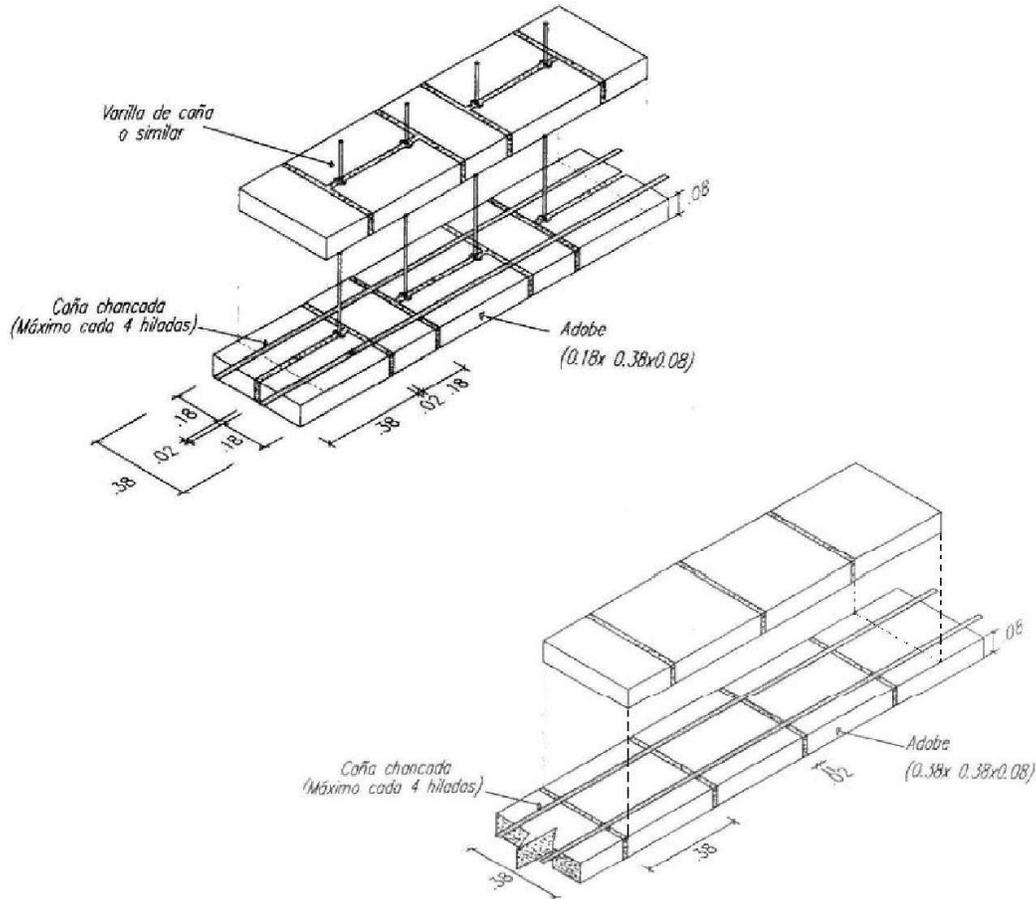
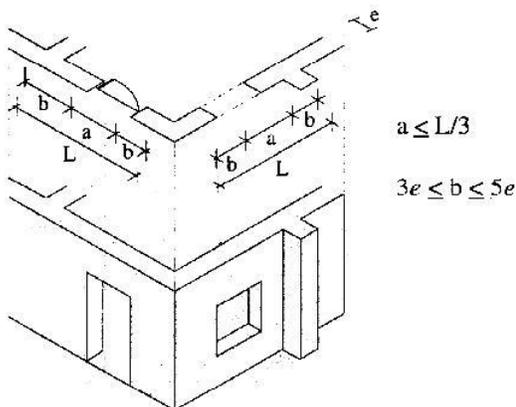


FIGURA 4  
TIPOS AMARRE EN ENCUENTROS DE MUROS DE ADOBE CON O SIN REFUERZO

Tipo de encuentro	Muros Reforzados	Muros no Reforzados
En L	Primera Hilada	Primera Hilada
	Segunda Hilada	Segunda Hilada
En T	Primera Hilada	Primera Hilada
	Segunda Hilada	Segunda Hilada
En X	Primera Hilada	Primera Hilada
	Segunda Hilada	Segunda Hilada

FIGURA 5



### 6.3. Elementos de Arriostre

a) Para que un muro se considere arriostrado deberá existir suficiente adherencia o anclaje entre éste y sus elementos de arriostre, para garantizar una adecuada transferencia de esfuerzos.

b) Los elementos de arriostre serán verticales y horizontales.

c) Los arriostres verticales serán muros transversales o contrafuertes especialmente diseñados. Tendrán una adecuada resistencia y estabilidad para transmitir fuerzas cortantes a la cimentación.

Para que un muro o contrafuertes se considere como arriostre vertical tendrá una longitud en la base mayor o igual que 3 veces el espesor del muro que se desee arriostrar.

d) Pueden usarse como elementos de arriostre vertical, en lugar de los muros transversales o de los contrafuertes de adobe, refuerzos especiales como son las columnas de concreto armado que se detallan en la Sección 6.4, refuerzos especiales.

e) Los arriostres horizontales son elementos o conjunto de elementos que poseen una rigidez suficiente en el plano horizontal para impedir el libre desplazamiento lateral de los muros.

Los elementos de arriostre horizontal más comunes son los denominados viga collar o solera. Estas pueden ser de madera o en casos especiales de concreto madera. (Ver Artículo 6 (6.4)).

f) Los elementos de arriostre horizontal se diseñarán como apoyos del muro arriostreado, considerándose al muro como una losa vertical sujeto a fuerzas horizontales perpendiculares a él.

g) Se deberá garantizar la adecuada transferencia de esfuerzos entre el muro y sus arriostres, los que deberán conformar un sistema continuo e integrado.

#### 6.4. Refuerzos Especiales

De acuerdo a la esbeltez de los muros que se indican en la Tabla 4, se requieren refuerzos especiales. Estos tienen como objetivo mejorar la conexión en los encuentros de muros o aumentar la ductilidad de los muros. Dentro de los refuerzos especiales más usados se tienen caña, madera o similares, malla de alambre y columnas de concreto armado.

Se detallarán especialmente los anclajes y empalmes de los refuerzos para garantizar su comportamiento eficaz.

TABLA 4

Esbeltez	Arriostres y Refuerzos Obligatorios	Espesor mín. Muro (m)	Altura mín. Muro (m)
 6	Solera	0,4 – 0,5	2,4 – 3,0
 8	Solera + elementos de refuerzos horizontal y vertical en los encuentros de muros	0,3 – 0,5	2,4 – 4,0
 9	Solera + elementos de refuerzos horizontal y vertical en toda la longitud de los muros	0,3 – 0,5	2,7 – 4,5

En casos especiales podrá ser mayor de 9 pero menor de 12, siempre y cuando se respalde con un estudio técnico que considere refuerzos que garanticen la estabilidad de la estructura.

##### a) Caña madera o similares

Estos refuerzos serán tiras, colocadas horizontalmente cada cierto número de hiladas (máximo cada 4 hiladas) y estarán unidas entre sí mediante amarres adecuados en los encuentros y esquinas. Podrán usarse en los encuentros y esquineros de los muros o en toda la longitud de los muros, dependiendo de lo indicado en la Tabla 4.

En el caso de que se utilicen unidades cuya altura sea mayor de 10 cm, las tiras de caña tendrán un espaciamiento máximo de 40 cm.

Las tiras de caña o similares se colocarán necesariamente coincidentes con el nivel superior o inferior de todos los vanos.

Se colocarán cañas o elementos de características similares como refuerzos verticales, ya sea en un plano central entre unidades de adobe (Ver Figura 3), o en alvéolos de mínimo 5 cm de diámetro dejados en los adobes (Ver Figura 3).

En ambos casos se rellenarán los vacíos con mortero. Un esfuerzo vertical deberá estar anclado a la cimentación y fijado a la solera superior. Se usará caña madura y seca o elementos rectos y secos de eucalipto u otros similares.

Se podrá usar madera en dinteles de vanos y vigas soleras sobre los muros.

La viga solera se anclará adecuadamente al muro y al dintel si lo hubiese.

##### b) Malla de alambre

Se puede usar como refuerzo exterior aplicado sobre la superficie del muro y anclado adecuadamente a él. Deberá estar protegido por una capa de mortero de cemento – arena de 4 cm aproximadamente.

La colocación de la malla puede hacerse en una o dos caras del muro, en cuyo caso se unirá ambas capas mediante elementos de conexión a través del muro. Su uso es eficiente en las esquinas asegurado un traslape adecuado.

##### c) Columnas y vigas de concreto armado

La utilización de columnas de concreto armado como confinamiento de muros de adobe debe utilizarse en casos en que el espesor del muro no exceda los 25 cm y se utilice para unir los adobes un mortero que contenga cemento para poder anclar alambre de  $\frac{1}{4}$ » cada tres hiladas

con la finalidad de conseguir una adecuada transmisión de esfuerzos entre el muro y la columna.

La utilización de vigas soleras de concreto armado tiene como objetivo contribuir a formar un diagrama rígido en el nivel en que se construya, puede ser colocado en varios niveles formando anillos cerrados, pero principalmente debe colocarse en la parte superior. Se puede combinar con elementos de refuerzo verticales como cañas o columnas de concreto armado.

De acuerdo al espesor de los muros, se deberá colocar el refuerzo que se indica en la Tabla 4.

En casos especiales se podrá considerar espesores de muro de 20 – 25 cm, siempre que se respalde por un estudio técnico que considere refuerzos verticales y horizontales.

#### 6.5. Techos

a) Los techos deberán en lo posible ser livianos, distribuyendo su carga en la mayor cantidad posible de muros, evitando concentraciones de esfuerzos en los muros; además, deberán estar adecuadamente fijados a éstos a través de la viga solera.

b) Los techos deberán ser diseñados de tal manera que no produzcan en los muros, empujes laterales que provengan de las cargas gravitacionales.

c) En general, los techos livianos no pueden considerarse como diafragmas rígidos y por tanto no contribuyen a la distribución de fuerzas horizontales entre los muros. La distribución de las fuerzas de sismo se hará por zonas de influencia sobre cada muro longitudinal, considerando la propia masa y las fracciones pertinentes de las masas de los muros transversales y la del techo.

d) En el caso de utilizar tijerales, el sistema estructural del techado deberá garantizar la estabilidad lateral de los tijerales.

e) En los techos de las construcciones se deberá considerar las pendientes, las características de impermeabilidad, asilamiento térmico y longitud de los aleros de acuerdo a las condiciones climáticas de cada lugar.

#### Artículo 7.- MORTEROS

Los morteros se clasificarán en dos grupos:

a) **Tipo I** (en base a tierra con algún aglomerante como cemento, cal, asfalto, etc.).

b) **Tipo II** (en base a tierra con paja).

Se considera que las juntas de la albañilería constituyen las zonas críticas, en consecuencia, ellas deberán contener un mortero del tipo I ó II de buena calidad.

##### 7.1. Mortero Tipo I

Mortero de suelo y algún aglomerante como cemento, cal o asfalto.

Deberá utilizarse la cantidad de agua que permita una adecuada trabajabilidad.

Las proporciones dependen de las características granulométricas de los agregados y de las características específicas de otros componentes que puedan emplearse.

##### 7.2. Mortero Tipo II

La composición del mortero debe cumplir los mismos lineamientos que las unidades de adobe y de ninguna manera tendrá una calidad menor que las mismas.

Deberá emplearse la cantidad de agua que sea necesaria para una mezcla trabajable.

Las juntas horizontales y verticales no deberán exceder de 2 cm y deberán ser llenadas completamente.

#### Artículo 8.- ESFUERZOS ADMISIBLES

Los ensayos para la obtención de los esfuerzos admisibles de diseño considerarán la variabilidad de los materiales a usarse.

Para fines de diseño se considerará los siguientes esfuerzos mínimos

Resistencia a la compresión de la

unidad:  $f_o$  12 kg / cm<sup>2</sup>

Resistencia a la compresión de la albañilería:

$f_m$  0,2  $f_o$  ó 2 kg / cm<sup>2</sup>

Resistencia a la compresión por aplastamiento:

$$1,25 f_m$$

Resistencia al corte de la albañilería:

$$V_m \quad 0,25 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

### 8.1. Resistencia a la Compresión de la Unidad

La resistencia a la compresión de la unidad se determinará ensayando cubos labrados cuya arista será igual a la menor dimensión de la unidad de adobe.

El valor del esfuerzo resistente en compresión se obtendrá en base al área de la sección transversal, debiéndose ensayar un mínimo de 6 cubos, definiéndose la resistencia última ( $f_o$ ) como el valor que sobrepase en el 80% de las piezas ensayadas.

Los ensayos se harán utilizando piezas completamente secas, siendo el valor de  $f_o$  mínimo aceptable de 12 kg/cm<sup>2</sup>.

La resistencia a la compresión de la unidad es un índice de la calidad de la misma y no de la albañilería.

### 8.2. Resistencia a la Compresión de la Albañilería

La resistencia a la compresión de la albañilería podrá determinarse por:

a) Ensayos de pilas con materiales y tecnología a usar en obra.

Las pilas estarán compuestas por el número entero de adobes necesarios para obtener un coeficiente de esbeltez (altura / espesor) del orden de aproximadamente tres (3), debiéndose tener especial cuidado en mantener su verticalidad.

El número mínimo de adobes será de cuatro (4) y el espesor de las juntas será de 2 cm. La disposición del ensayo será la mostrada en la Figura 6.

El tiempo de secado del mortero de las pilas será de 30 días y el número mínimo de pilas a ensayar será de tres (3).

Mediante estos ensayos se obtiene el esfuerzo último  $f_m'$  en compresión de la pila, considerándose aquel valor que sobrepasa en 2 de las 3 pilas ensayadas.

Es esfuerzo admisible a compresión del muro ( $f_m$ ) se obtendrá con la siguiente expresión:

$$f_m \quad 0,25 f_m'$$

Donde:

$f_m'$  = esfuerzo de compresión último de la pila

b) Alternativamente cuando no se realicen ensayos de pilas, se podrá usar el siguiente esfuerzo admisible:

$$f_m \quad 2,0 \text{ Kg} / \text{cm}^2$$

### 8.3. Esfuerzo Admisible de Compresión por Aplastamiento

El esfuerzo admisible de compresión por aplastamiento será:  $1,25 f_m$

### 8.4 Resistencia al Corte de la Albañilería

La resistencia al corte de la albañilería se podrá determinar por:

a) Ensayos de compresión diagonal con materiales y tecnología a usarse en obra.

La disposición del ensayo será la mostrada en la Figura 7.

Se ensayarán un mínimo de tres (3) especímenes.

El esfuerzo admisible al corte del muro ( $V_m$ ) se obtendrá con la expresión:

$$V_m \quad 0,4 f_i'$$

Donde:

$f_i'$  = esfuerzo último del murete de ensayo.

Este valor será el sobrepasado por 2 de cada 3 de los muretes ensayados.

b) Alternativamente cuando no se realicen ensayos de muretes, se podrá usar el siguiente esfuerzo admisible al corte:

$$V_m \quad 0,25 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

## Artículo 9.- DISEÑO DE MUROS

### 9.1. Diseño de Muros Longitudinales

La aplicación de la resistencia  $V_m$  se efectuará sobre el área transversal crítica de cada muro, descontando vanos si fuera el caso.

FIGURA 6  
ENSAYO DE COMPRESIÓN AXIAL

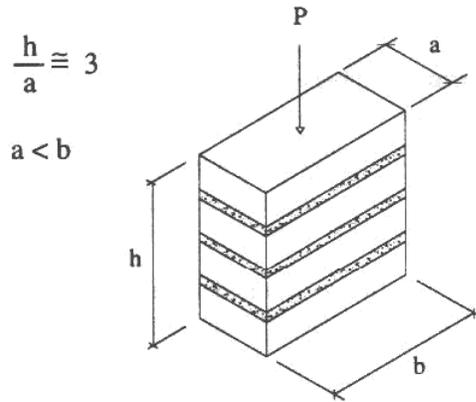
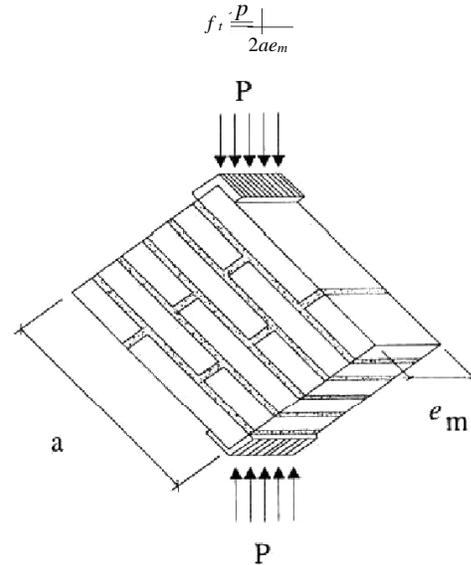


FIGURA 7  
ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAGONAL



## ANEXO

### ZONIFICACIÓN SÍSMICA

Las zonas sísmicas en que se divide el territorio peruano, para fines de esta Norma se muestran en la Figura 1.

A continuación, se especifican las provincias de cada zona.

#### Zona 1

1. Departamento de Loreto. Provincias de Ramón Castilla, Maynas, y Requena.

2. Departamento de Ucayali. Provincia de Purús.

3. Departamento de Madre de Dios. Provincia de Tahuamanú.

#### Zona 2

1. Departamento de Loreto. Provincias de Loreto, Alto Amazonas y Ucayali.

2. Departamento de Amazonas. Todas las provincias.
3. Departamento de San Martín. Todas las provincias.
4. Departamento de Huánuco. Todas las provincias.
5. Departamento de Ucayali. Provincias de coronel Portillo, Átalaya y Padre Abad.
6. Departamento de Cerro de Pasco. Todas las provincias.
7. Departamento de Junín. Todas las provincias.
8. Departamento de Huancavelica. Provincias de Acobamba, Angaraes, Churcampa, Tayacaja y Huancavelica.
9. Departamento de Ayacucho. Provincias de Sucre, Huamanga, Huanta y Vilcashuaman.
10. Departamento de Apurímac. Todas las provincias.
11. Departamento de Cusco. Todas las provincias.
12. Departamento de Madre de Dios. Provincias de Tambopata y Manú.
13. Departamento de Puno. Todas las provincias.

### **Zona 3**

1. Departamento de Tumbes. Todas las provincias.
  2. Departamento de Piura. Todas las provincias.
  3. Departamento de Cajamarca. Todas las provincias.
  4. Departamento de Lambayeque. Todas las provincias.
  5. Departamento de La Libertad. Todas las provincias.
  6. Departamento de Ancash. Todas las provincias.
  7. Departamento de Lima. Todas las provincias.
  8. Provincia Constitucional del Callao.
  9. Departamento de Ica. Todas las provincias.
  10. Departamento de Huancavelica. Provincias de Cas-trovirreyña y Huaytará.
  11. Departamento de Ayacucho. Provincias de Cangallo, Huanca Sancos, Lucanas, Víctor Fajardo, Parinacochas y Paucar del Sara Sara.
  12. Departamento de Arequipa. Todas las provincias.
  13. Departamento de Moquegua. Todas las provincias.
  14. Departamento de Tacna. Todas las provincias.
-