



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

**“ESTUDIO DE PERMEABILIDAD EN EL ADOBE  
IMPLEMENTANDO AGREGADOS NATURALES”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO EN DISEÑO**

PRESENTA:

**ITZEL GARCÍA GÓMEZ**

CODIRECTORES:

**ING. OSCAR DÍAZ DE LEÓN SÁNCHEZ**

**DR. RAFAEL ALAVÉZ RAMÍREZ**

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA. DICIEMBRE DEL 2017



A mis papás.

A quienes ocuparán por siempre un espacio en mi corazón.



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional. A Yatzín, Xanat, Dalia y Saúl por su comprensión y por alentarme a seguir adelante. A Omar por sus consejos y paciencia. A mi familia.

A mis directores de tesis Ing. Oscar Díaz de León Sánchez y Dr. Rafael Alavéz Ramírez por guiarme, por sus enseñanzas, consejos, apoyo y por su tiempo.

A mis revisores Arq. Jesús Sánchez Luqueño, Ing. Miguel Osorio Aranda y Mtro. Armando Rosas González por su ayuda y confianza.

A quienes me compartieron sus conocimientos acerca del adobe, especialmente a la C. Matilde Hernández, al C. Benito Zárate y al C. Raimundo Jiménez.

Al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR-IPN) Unidad Oaxaca por el apoyo para la realización de esta tesis mediante el proyecto Caracterización térmica de un módulo-prototipo con sistema híbrido de muro y techo con inercia térmica clave SIP 20170849, asimismo por las instalaciones y equipo facilitado, al Ingeniero Margarito Ortiz Guzmán del laboratorio de materiales.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca, al Instituto de Diseño. A los profesores, técnicos, compañeros y amigos que me han acompañado en este trayecto, por la convivencia compartida, las experiencias, enseñanzas, desacuerdos y alegrías que hemos pasado juntos.



# ÍNDICE

LISTA DE TABLAS .....	10
LISTA DE FIGURAS .....	12
RESUMEN .....	15
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	19
1.1. Planteamiento del problema .....	23
1.2. Justificación .....	27
1.3. Antecedentes: El adobe .....	29
1.3.1. <i>Características</i> .....	30
1.3.2. <i>Materiales para hacer adobe</i> .....	32
1.3.3. <i>Proceso de elaboración del adobe</i> .....	36
1.4. Agregados en el adobe .....	42
1.4.1. <i>Procesos de estabilización</i> .....	46
1.4.2. <i>Estabilizantes consolidantes</i> .....	47
1.4.3. <i>Estabilizantes por fricción</i> .....	49
1.4.4. <i>Estabilizantes por impermeabilización</i> .....	51
1.4.5. <i>Estabilizantes artificiales y comerciales</i> .....	57
1.5. Objetivos .....	63
1.5.1. <i>Objetivo general</i> .....	63
1.5.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	63
CAPÍTULO 2. MARCO REFERENCIAL .....	67
2.1. Caracterización del suelo para su uso como adobe .....	67
2.1.1. <i>Muestreo</i> .....	67
2.1.2. <i>Secado</i> .....	68
2.1.3. <i>Disgregado</i> .....	68
2.1.4. <i>Cuardeo</i> .....	69
2.1.5. <i>Pruebas de compactación</i> .....	70
2.1.6. <i>Sistema unificado de clasificación de suelos</i> .....	74
2.1.7. <i>Granulometría</i> .....	77
2.1.8. <i>Límites de Atterberg</i> .....	79
2.2. Permeabilidad.....	83
2.3. Pruebas de laboratorio y normas relacionadas .....	87
2.3.1. <i>Absorción de agua</i> .....	87
2.3.2. <i>Resistencia a la compresión axial</i> .....	88
2.3.3. <i>Características de los materiales</i> .....	89

<i>2.3.4. Resistencia a la flexión</i> .....	92
2.4. Diseño de experimentos .....	96
<i>2.4.1. Conceptos básicos de la estadística</i> .....	99
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....	105
3.1. Diagrama de las fases del proyecto .....	105
3.2. Fase I. Clasificación del suelo con base en el SUCS.....	107
<i>3.2.1. Localización del suelo</i> .....	107
<i>3.2.2. Análisis granulométrico</i> .....	109
<i>3.2.3. Límites de consistencia</i> .....	113
<i>3.2.4. Carta de plasticidad</i> .....	117
<i>3.2.5. Prueba AASHTO estándar variante A</i> .....	118
3.3. Fase II. Pruebas en cubos .....	120
<i>3.3.1. Diseño de experimentos para cubos</i> .....	121
<i>3.3.2. Elaboración de cubos para obtener proporciones adecuadas</i> .....	125
<i>3.3.3. Prueba de degradación en agua</i> .....	134
<i>3.3.3.1. Observaciones por muestra</i> .....	135
<i>3.3.4. Prueba de resistencia a la compresión</i> .....	145
3.4. Fase III. Pruebas en adobes .....	147
<i>3.4.1. Diseño de experimentos para adobes</i> .....	149
<i>3.4.2. Prueba de permeabilidad</i> .....	151
<i>3.4.3. Prueba de resistencia a la compresión</i> .....	152
<i>3.4.4. Prueba de resistencia a la flexión</i> .....	155
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	159
4.1. Fase I. Clasificación del suelo con base en el SUCS.....	159
<i>4.1.1. Análisis granulométrico</i> .....	159
<i>4.1.2. Límites de consistencia</i> .....	159
<i>4.1.3. Carta de plasticidad</i> .....	160
<i>4.1.4. Prueba AASHTO estándar variante A</i> .....	161
4.2. Fase II. Pruebas en cubos .....	163
<i>4.2.1. Cubos muestra</i> .....	163
<i>4.2.2. Prueba de degradación en agua</i> .....	164
<i>4.2.3. Prueba de resistencia a la compresión</i> .....	166
4.3. Fase III. Pruebas en adobes .....	174
<i>4.3.1. Prueba de permeabilidad</i> .....	174
<i>4.3.2. Prueba de resistencia a la compresión</i> .....	175

<i>4.3.3. Requisitos de calidad .....</i>	179
<i>4.3.4. Prueba de resistencia a la flexión.....</i>	181
CONCLUSIONES.....	185
RECOMENDACIONES .....	187
ANEXOS.....	191
A. Entrevistas .....	191
B. Materiales utilizados.....	196
C. Muestras de la prueba de resistencia a compresión en cubos .....	197
D. Detalles de pruebas en adobes.....	207
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....	209

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1.1. IMPACTO ENERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	26
TABLA 1.3.3.1. MATERIALES UTILIZADOS PARA ELABORAR ADOBES.....	39
TABLA 1.3.3.2. PROCESO PARA ELABORAR ADOBES .....	39
TABLA 2.1.6.1. SÍMBOLOS DE GRUPO (SUCS) .....	75
TABLA 2.1.6.2. TIPOLOGÍA DE SUELOS (SUCS) .....	75
TABLA 2.3.3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS LADRILLOS Y BLOQUES CERÁMICOS .....	90
TABLA 2.3.3.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS PARA LADRILLOS Y BLOQUES CERÁMICOS FABRICADOS CON MÁQUINA.....	91
TABLA 2.3.3.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS PARA LADRILLOS Y BLOQUES CERÁMICOS FABRICADOS A MANO.....	91
TABLA 3.3.1.1.DISEÑO DE EXPERIMENTO DE CUBOS.....	123
TABLA 3.4.1.1.DISEÑO DE EXPERIMENTO DE ADOBES.....	150
TABLA 4.1.2.1. VALORES DE LOS LÍMITES DE CONSISTENCIA.....	160
TABLA 4.2.3.1. DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN LAS MUESTRAS ELABORADAS DE LA ETAPA 1. PRUEBAS INICIALES (SELECCIÓN DE AGREGADO). .....	166
TABLA 4.2.3.2. ANOVA DE LA ETAPA 1. PRUEBAS INICIALES (SELECCIÓN DE AGREGADO).....	167
TABLA 4.2.3.3. DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN LAS MUESTRAS ELABORADAS DE LA ETAPA 2. PRUEBAS INTERMEDIAS (PROPORCIONAMIENTO).....	168
TABLA 4.2.3.4. ANOVA DE LA ETAPA 2. PRUEBAS INTERMEDIAS (PROPORCIONAMIENTO). .....	168
TABLA 4.2.3.5. DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN LAS MUESTRAS ELABORADAS DE LA ETAPA 3. PRUEBAS FINALES EN CUBOS.....	170
TABLA 4.2.3.6. ANOVA DE LA ETAPA 3. PRUEBAS FINALES EN CUBOS.....	170
TABLA 4.3.1.1. DATOS RECADABOS DE LA PRUEBA DE PERMEABILIDAD EN LOS ADOBES .....	175
TABLA 4.3.2.1. DATOS CONSEGUIDOS DE LA PRUEBA DE COMPRESIÓN EN LOS ADOBES.....	176
TABLA 4.3.2.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PROMEDIO DE LOS ADOBES ELABORADOS.....	176
TABLA 4.3.2.3. ANOVA DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN ADOBES.....	177

TABLA 4.3.3.1. COMPARACIÓN DE ALGUNOS REQUERIMIENTOS DE CALIDAD ENTRE LADRILLOS Y BLOQUES CERÁMICOS Y ADOBE CON RESINA DE PINO .....	180
TABLA 4.3.4.1. DATOS RECOPILADOS DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN .....	181
TABLA 4.3.4.2. VALOR PROMEDIO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN POR MUESTRA.....	181
TABLA B.1. MATERIALES UTILIZADOS.....	196
TABLA C.1. DATOS DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN LAS MUESTRAS ELABORADAS.	197
TABLA C.2. PROMEDIOS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS MUESTRAS ELABORADAS. ....	199
TABLA D.1. DATOS CONSEGUIDOS DE LA PRUEBA DE COMPRESIÓN EN LOS ADOBES.....	207
TABLA D.2. DATOS CONSEGUIDOS DE LA PRUEBA DE FLEXIÓN EN LOS ADOBES.....	208

## LISTA DE FIGURAS

FIG. 1.1. DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DE ARQUITECTURA DE SUELO .....	19
FIG. 1.2. DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DE RIESGO SÍSMICO.....	20
FIG. 1.1.1. DOCE TÉCNICAS CON MATERIAL DE SUELO .....	23
FIG. 1.1.2. BAJA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN, A LA COMPRESIÓN Y FLEXIÓN.....	25
FIG. 1.1.3. BAJA RESISTENCIA AL AGUA.....	25
FIG. 1.3.3.1. PROCESO DE ELABORACIÓN DE ADOBES.....	37
FIG. 1.4.4.1. JUGO DE HOJA DE PLÁTANO. ....	52
FIG. 1.4.4.2. MUCÍLAGO DE NOPAL .....	53
FIG. 1.4.4.3. PRODUCTOS DEL PINO.....	54
FIG. 2.1.6.1. CARTA DE PLASTICIDAD .....	77
FIG. 2.3.4.1. DIAGRAMA DEL APARATO PARA LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN .....	93
FIG. 3.1.1. DIAGRAMA DE LAS FASES DEL TRABAJO .....	106
FIG. 3.2.1. SUELO DE SAN AGUSTÍN YATARENI .....	107
FIG. 3.2.2.1. SECADO DEL SUELO .....	109
FIG. 3.2.2.2. DEPÓSITO DE TIERRA EN FORMA DE CRUZ EN LA TARA .....	110
FIG. 3.2.2.3. TAMICES UTILIZADOS PARA CRIBAR LA TIERRA .....	110
FIG. 3.2.2.4. LAVADO DE LA MUESTRA .....	112
FIG. 3.2.2.5. MUESTRA DE LA CÁPSULA 10 PUESTA A HERVIR .....	113
FIG. 3.2.2.6. OBTENCIÓN DE LA GRANULOMETRÍA FINA PESANDO EL MATERIAL QUE PASÓ CADA MALLA UTILIZADA.....	113
FIG. 3.2.3.1. COPA DE CASAGRANDE CON LA MEZCLA DE SUELO HUMEDECIDO.....	115
FIG. 3.2.3.2. MEDICIÓN DE LA MUESTRA UNIDA A LOS 25 GOLPES .....	115
FIG. 3.2.3.3. MUESTRAS OBTENIDAS DEL LÍMITE LÍQUIDO .....	115
FIG. 3.2.3.4. ELABORACIÓN DE MUESTRAS PARA CONTRACCIÓN LINEAL .....	115
FIG. 3.2.3.5. MUESTRA EN FORMA DE MINI CILINDROS PARA LÍMITE PLÁSTICO.....	116
FIG. 3.2.3.6. MUESTRAS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA PUESTOS A SECAR EN HORNO .....	116
FIG. 3.2.3.7. MUESTRAS SALIDAS DEL HORNO A LAS 24 HORAS .....	117
FIG. 3.2.5.1. SUELO SELECCIONADO CON 200 ML DE AGUA.....	119
FIG. 3.2.5.2. COMPACTACIÓN DEL SUELO UTILIZANDO EL PISÓN.....	119
FIG. 3.2.5.3. MOLDE CON EL SUELO YA COMPACTADO, SIN PASAR LOS 2.5 CM.....	119
FIG. 3.2.5.4. CÁPSULAS CON LA MUESTRA DE SUELO COMPACTADO .....	119
FIG. 3.2.5.5. CÁPSULAS CON LAS MUESTRAS DE SUELO COMPACTADO .....	120
FIG. 3.3.2.1. MATERIAL UTILIZADO PARA LA ELABORACIÓN DE CUBOS .....	125
FIG. 3.3.2.2. COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA EN LOS CUBOS USANDO EL PISÓN PEQUEÑO .....	126
FIG. 3.3.2.3. CUBO DE SUELO SOLO.....	127
FIG. 3.3.2.4. CUBO DE SUELO + JUGO DE HOJA DE PLÁTANO .....	127
FIG. 3.3.2.5. CUBO DE SUELO + HOJA DE PLÁTANO .....	128
FIG. 3.3.2.6. CUBO DE SUELO + ENGRUDO DE TRIGO DILUIDO. ....	128
FIG. 3.3.2.7. CUBO DE SUELO + 10% RESINA DE PINO .....	129
FIG. 3.3.2.8. CUBOS SECANDO; SE OBSERVAN DISTINTOS COLORES EN LAS MUESTRAS .....	130
FIG. 3.3.2.9. CUBO DE SUELO Y 5% DE RESINA DE PINO (M5RP) .....	131

FIG. 3.3.2.10. CUBO DE SUELO Y 15% DE RESINA DE PINO (M15RP).....	131
FIG. 3.3.2.11. CUBO DE SUELO Y 20% DE RESINA DE PINO (M20RP).....	131
FIG. 3.3.2.12. CUBO DE SUELO Y 25% DE RESINA (M25RP).....	132
FIG. 3.3.2.13. CUBO DE SUELO Y EXCREMENTO DE BURRO (MSE) .....	133
FIG. 3.3.2.14. CUBO CON SUELO, EXCREMENTO DE BURRO Y 15% DE RESINA DE PINO (MSERP15) .....	133
 FIG. 3.3.3.1. PROCESO DE INMERSIÓN DE LOS CUBOS .....	134
FIG. 3.3.3.1.1. CUBO DE SUELO SOLO AL MOMENTO DE HABERSE SUMERGIDO.....	135
FIG. 3.3.3.1.2. CUBOS DE SUELO + 5% JUGO DE HOJA DE PLÁTANO.....	135
FIG. 3.3.3.1.3. CUBOS DE SUELO + 5% JUGO DE HOJA DE PLÁTANO.....	136
FIG. 3.3.3.1.4. CUBOS DE SUELO + 5% HOJA DE PLÁTANO MOLIDA .....	136
FIG. 3.3.3.1.5. CUBOS DE SUELO + 10% ENGRUDO DE TRIGO .....	137
FIG. 3.3.3.1.6. CUBOS DE SUELO + 10% DE RESINA DE PINO SUMERGIDOS .....	138
FIG. 3.3.3.1.7. CUBOS DE SUELO + 10% DE RESINA .....	138
FIG. 3.3.3.1.8. CUBOS DE SUELO + 5% DE RESINA DE PINO.....	139
FIG. 3.3.3.1.9. CUBOS DE SUELO + 15% DE RESINA DE PINO AL ESTAR SUMERGIDOS EN EL AGUA.....	140
FIG. 3.3.3.1.10. CUBOS DE SUELO + 15% DE RESINA DE PINO YA DEFORMADOS.....	140
FIG. 3.3.3.1.11. CUBOS DE SUELO + 20% DE RESINA DE PINO AL ESTAR SUMERGIDOS EN AGUA .....	141
FIG. 3.3.3.1.12. CUBOS DE SUELO + 20% DE RESINA DE PINO YA DEFORMADOS.....	141
FIG. 3.3.3.1.13. CUBOS DE SUELO + 25% DE RESINA DE PINO AL ESTAR SUMERGIDOS EN AGUA .....	142
FIG. 3.3.3.1.14. CUBOS DE SUELO + 25% DE RESINA DE PINO YA DEFORMADOS.....	142
FIG. 3.3.3.1.15. CUBOS DE SUELO + EXCREMENTO DE BURRO AL SUMERGIRSE EN EL AGUA .....	143
FIG. 3.3.3.1.16. CUBOS DE SUELO + EXCREMENTO DE BURRO YA DESHECHOS .....	143
FIG. 3.3.3.1.17. CUBOS DE SUELO + EXCREMENTO DE BURRO + 15% DE RESINA DE PINO AL ESTAR SUMERGIDOS EN AGUA .....	144
FIG. 3.3.3.1. 18. CUBOS DE SUELO + EXCREMENTO DE BURRO + 15% DE RESINA DE PINO YA DEFORMADOS .....	144
 FIG. 3.3.4.1. COLOCACIÓN DE LOS CUADRADOS DE CARTÓN EN EL CUBO.....	145
FIG. 3.3.4.2. AJUSTE DE LA ALTURA DE LA MÁQUINA AL TAMAÑO DEL CUBO .....	145
FIG. 3.3.4.3. COLOCACIÓN EN 0 DEL MICRÓMETRO DE LA MÁQUINA.....	146
FIG. 3.3.4.4. MÁQUINA DE COMPRESIÓN SIENDO ENCENDIDA .....	146
 FIG. 3.4.1. ADOBES FRAGMENTADOS .....	148
FIG. 3.4.2. CINCO DE LOS SEGUNDOS ADOBES ELABORADOS .....	148
FIG. 3.4.3. RESINA DE PINO UTILIZADA PARA LA ELABORACIÓN DE ADOBES .....	149
 FIG. 3.4.2.1. ADOBES SUMERGIDOS POR 24 HORAS.....	151
FIG. 3.4.2.2. ADOBE CON RESINA EN BÁSCULA .....	152
 FIG. 3.4.3.1. CABECEO DE ADOBES.....	153
FIG. 3.4.3.2. PRUEBAS DE COMPRESIÓN EN ADOBE .....	154
 FIG. 3.4.4.1. COLOCACIÓN DE BLOQUE PARA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN .....	156
FIG. 3.4.4.2. UBICACIÓN DE LA FRACTURA.....	156
 FIG. 4.1.1.1. GRÁFICA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA RESULTANTE .....	159
FIG. 4.1.3.1. CLASIFICACIÓN DEL SUELO SELECCIONADO PARA LA ELABORACIÓN DE ADOBES, DE ACUERDO A LA CARTA DE PLASTICIDAD .....	161
 FIG. 4.1.4.1. GRÁFICA DE LOS DATOS OBTENIDOS .....	162

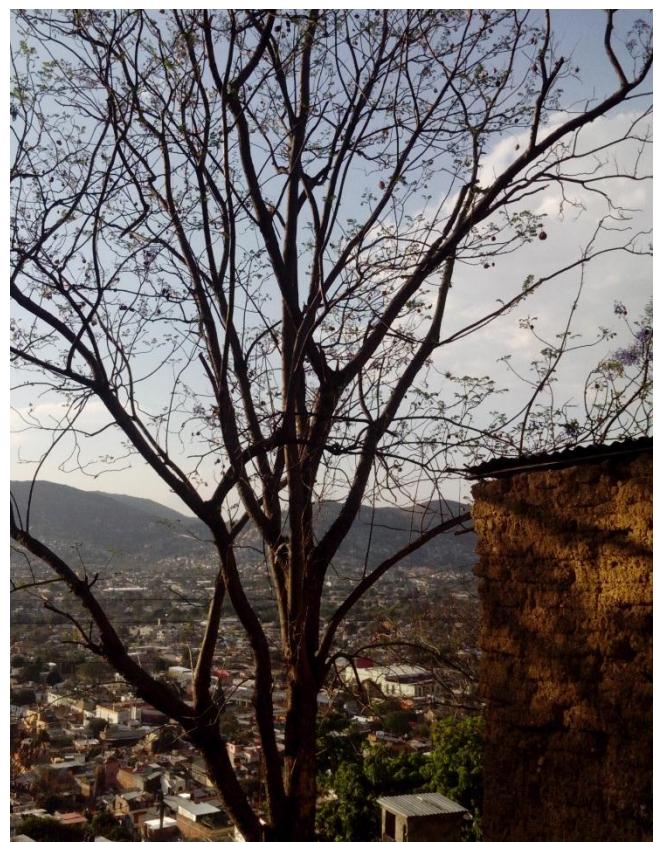
FIG. 4.2.2.1. PROMEDIO DE LOS TIEMPOS QUE TARDAN LAS MUESTRAS EN DESHACERSE COMPLETA O CASI COMPLETAMENTE.....	165
FIG. 4.2.3.1. GRÁFICA DE INTERVALOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA ETAPA 1 .....	167
FIG. 4.2.3.2. GRÁFICA DE INTERVALOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA ETAPA 2 .....	169
FIG. 4.2.3.3. GRÁFICA DE INTERVALOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA ETAPA 3 .....	171
FIG. 4.2.3.4. RESISTENCIA A COMPRESIÓN PROMEDIO RESULTANTE EN LAS MUESTRAS DE SUELO SOLO Y EN LAS MUESTRAS DE DISTINTAS PROPORCIONES DE RESINA DE PINO.....	172
FIG. 4.2.3.5. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PROMEDIO DE TODAS LAS MUESTRAS REALIZADAS .....	173
FIG. 4.3.2.1. GRÁFICA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS ADOBES DE SUELO + EXCREMENTO DE BURRO (MSE) .....	178
FIG. 4.3.2.2. GRÁFICA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS ADOBES DE SUELO + ESTIÉRCOL DE BURRO + 15% DE RESINA DE PINO (MSERP15) .....	178
FIG. 4.3.2.3. GRÁFICA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS ADOBES ENSAYADOS .....	179
FIG. 4.3.4.1. GRÁFICA DE LOS DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE LOS ADOBES CON SUELO + EXCREMENTO DE BURRO .....	183
FIG. 4.3.4.2. GRÁFICA DE LOS DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE LOS ADOBES CON SUELO + EXCREMENTO DE BURRO + 15% RESINA DE PINO.....	184
FIG. 4.3.4.3. PROMEDIO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE LOS ADOBES ENSAYADOS. EL MÓDULO DE RUPTURA DE LAS DOS MUESTRAS ES PRÁCTICAMENTE IGUAL.....	184
FIG. C.1. RESULTADOS POR MUESTRA, DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE SUELO SOLO. ....	200
FIG. C.2. RESULTADOS POR MUESTRA, DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE SUELO Y 5% DE JUGO DE HOJA DE PLÁTANO (M5JHP) .....	201
FIG. C.3. RESULTADOS POR MUESTRA, DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE SUELO Y 5% DE HOJA DE PLÁTANO (M5HP).....	201
FIG. C.4. RESULTADOS POR MUESTRA, DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE SUELO Y 10% DE ENGRUDO DE TRIGO (M10ET).....	202
FIG. C.5. RESULTADOS POR MUESTRA, DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE SUELO Y 5% DE RESINA DE PINO (M15RP).....	202
FIG. C.6. RESULTADOS POR MUESTRA, DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE SUELO Y 10% DE RESINA DE PINO (M10RP).....	203
FIG. C.7. RESULTADOS POR MUESTRA, DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE SUELO Y 15% DE RESINA DE PINO (M15RP).....	204
FIG. C.8. RESULTADOS POR MUESTRA, DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE SUELO Y 20% DE RESINA DE PINO (M20RP).....	204
FIG. C.9. RESULTADOS POR MUESTRA, DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE SUELO Y 25% DE RESINA DE PINO (M25RP).....	205
FIG. C.10. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN LOS CUBOS MUESTRA DE SUELO Y ESTIÉRCOL DE BURRO (MSE).....	206
FIG. C.11. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN LOS CUBOS MUESTRA DE SUELO, ESTIÉRCOL DE BURRO Y 15% DE RESINA DE PINO (MSERP15).....	206

## RESUMEN

Uno de los problemas del adobe como material de construcción es su vulnerabilidad a las condiciones atmosféricas tales como su estabilidad volumétrica, poca resistencia al agua y poca resistencia mecánica, lo que provoca fisuración y deformaciones en el suelo, ataque de agua capilar y poca resistencia a la absorción. En el presente trabajo se analizaron agregados naturales a la matriz del adobe para disminuir la permeabilidad y mejorar sus propiedades mecánicas.

Para tal efecto, en una primera fase se realizaron pruebas de resistencia a la compresión y degradación en agua en muestras obtenidas en cubos de 5 cm. de suelo solo y de suelo combinado con jugo de hoja de plátano, hoja de plátano, engrudo de trigo, resina de pino, excremento de burro, excremento de burro y resina de pino; realizándose un Análisis de la Varianza a los resultados obtenidos de los ensayos de compresión en cubos. En una segunda fase se efectuaron pruebas de permeabilidad, de resistencia a la compresión y flexión en adobes con dimensiones de 30cm x 22cm x 10cm y de 15cm x 22cm x 10cm. A los valores obtenidos en la resistencia a la compresión y flexión en adobes se les realizó un Análisis de la Varianza. En la primera fase del trabajo las muestras que tardaron mayor tiempo en desintegrarse en agua y que tuvieron mayor resistencia a la compresión fueron las de suelo con 15% de resina de pino y las de 15% de resina de pino con excremento de burro. El Análisis de la Varianza en cubos mostró que el ajuste fue óptimo. En la segunda fase, los adobes hechos con suelo y 15% de resina terminaron fracturándose, por lo que sólo a los adobes con suelo + excremento de burro y a los adobes de suelo + excremento de burro + 15% de resina de pino se les realizaron pruebas de permeabilidad, de resistencia a la compresión y de resistencia a flexión.

Los resultados obtenidos en las pruebas de los adobes ensayados indicaron que la impermeabilidad del adobe con estiércol y resina de pino aumentó (absorción de agua: 18.95%), incluyendo su resistencia a compresión (5.88 MPa), mientras que su resistencia a flexión se mantuvo casi igual a la presentada en los adobes sin resina (0.838 MPa y 0.840 MPa respectivamente). A su vez, los resultados fueron más altos a los planteados por la norma N-CMT-2-01-001 para los bloques de calidad E (24 % de absorción de agua y resistencia a compresión de 2 MPa). Finalmente, el Análisis de Varianza para las muestras de adobe mostró que el ajuste no fue óptimo.



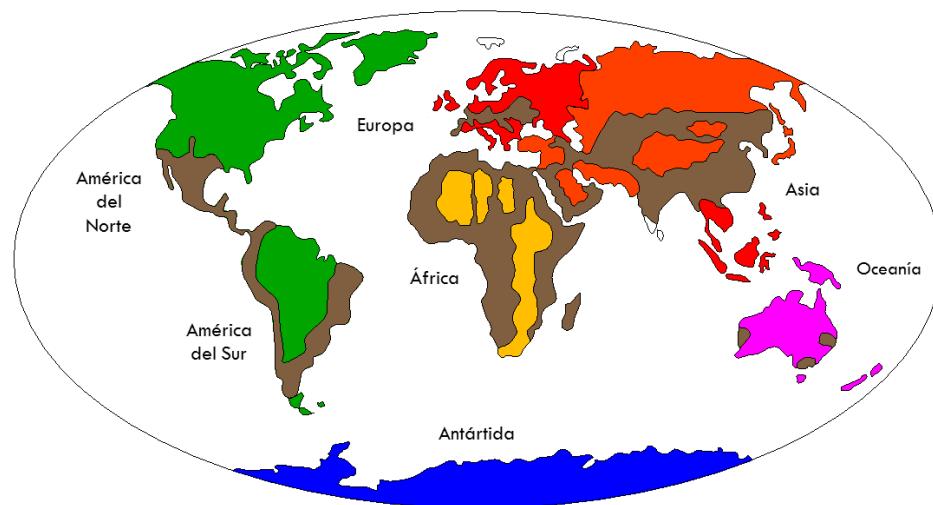
## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

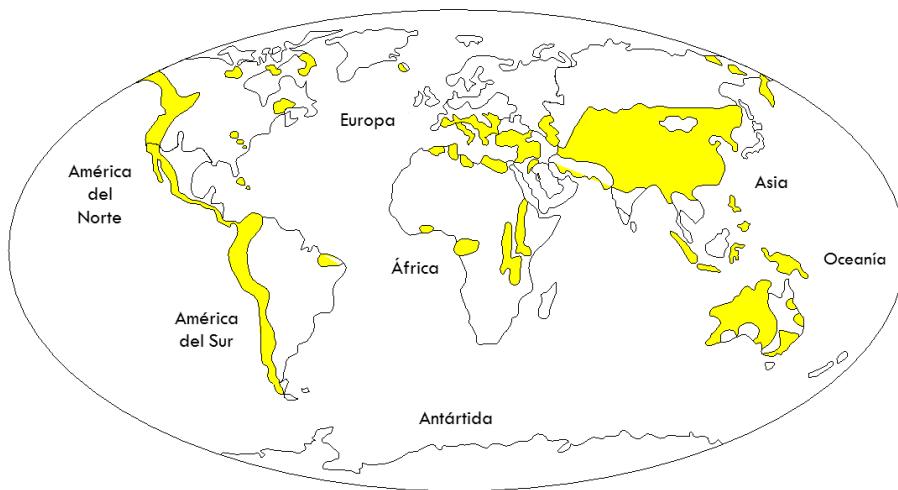
Cuando el hombre comenzó su vida sedentaria dejando atrás sus hábitos nómadas, empezó a preocuparse en dónde vivir, dónde resguardarse de la lluvia, el sol y otros eventos climáticos. Inicialmente se estableció en cuevas, luego construyó chozas con ramas, hojas y pieles hasta que comenzó a utilizar la tierra creando bloques con los que edificaron sus viviendas; y este método fue evolucionando con las diferentes tecnologías desarrolladas, legándonos las distintas alternativas de construcción que existen actualmente.

La arquitectura en tierra es una de las antiguas formas de construir (Fig. 1.1) que aún prevalecen en la actualidad, ya que resulta más económico que otros sistemas de construcción.



**Fig. 1.1.** Distribución mundial de arquitectura de suelo. Fuente: Houben y Hubert, 1994.

Varios de los lugares donde se ha presentado esta forma de construcción son zonas con actividad sísmica (Fig. 1.2) ya que se encuentran en la frontera de las placas tectónicas.



*Fig. 1.2. Distribución mundial de riesgo sísmico. Fuente: Global Seismic Hazard, 2007.*

Por ejemplo, en China, los edificios de tierra de Fujian (“tulou”) son una construcción de tapial china única de los hakka y otros pueblos en las regiones montañosas del suroeste de la región de esta región; construidas en su mayor parte entre los siglos XII y XX. Un tulou es normalmente un recinto cerrado, rectangular o circular en su configuración con una pared de tierra muy gruesa que soporta el peso y estructuras de madera, de tres a cinco pisos de alto, que alberga hasta 80 familias. Es *Patrimonio de la Humanidad* desde 2008, según la UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) son “ejemplos excepcionales de una traducción constructiva y funcionalidad ejemplificando un tipo particular de residencia comunal y organización defensiva y, en términos de su relación armoniosa con su entorno”.

Otro ejemplo del uso de la tierra es la técnica del adobe, que consiste en bloques de tierra arcillosa cruda que por lo general se mezcla con fibras o excremento de burro o vaca, debido a que brinda una mejor adherencia entre los materiales. La zona arqueológica de Paquimé (Casas Grandes), Chihuahua, está conformada por construcciones altas de adobe de hasta siete pisos, paredes de gran grosor, cuartos y puertas en forma de T y

caminos laberínticos, formando parte del paisaje que dejó la arquitectura prehispánica en el norte de México. Es considerada *Patrimonio de la Humanidad* por la UNESCO desde 1998.

El método de elaboración de adobes es el resultado de atinos y desatinos, donde los aciertos prevalecen y la información resultante se transmite de generación en generación; además ésta va variando según el lugar donde se elabore, por lo que se puede decir que es transmitido de manera oral y no escrita, pero existen investigadores y autores que buscan dar sustento a los métodos empíricos del adobe, llegando a estudiar proporciones adecuadas de arcilla, limos y arenas para su elaboración y los elementos que se pueden agregar para aumentar sus características mecánicas, químicas y/o físicas.

Inclusive se estudia cómo mejorar las características del suelo cuando no resulta apropiado, a través de procesos de estabilización, con los cuales se busca subsanar las deficiencias del suelo, ya sea que necesiten agregar componentes del mismo suelo (llamados procesos homogéneos) o agregar materiales ajenos al mismo (denominados procesos heterogéneos), los cuales pueden ayudar a las arcillas en la acción aglutinante sobre las partículas inertes del suelo (nombrados estabilizantes consolidantes), a formar una “capa protectora” en torno a las partículas de arcilla regulando su contacto con el agua (llamados estabilizantes por impermeabilización o hidrofugantes) o bien pueden servir para controlar el desplazamiento, dilatación y retracción durante el secado de las partículas del suelo al conformar una especie de red (estabilizantes por fricción). (Guerrero, 2007).

El estudio del adobe resulta muy extenso, ya que se puede hablar desde el tipo de componentes que conforman el suelo hasta qué nuevos elementos se le pueden agregar y no sólo naturales, sino también sustancias químicas, pero todas estas aportaciones tienen

como meta conseguir que este sistema constructivo sea más eficiente y duradero que el actual.

Para este proyecto de tesis se plantea el estudio de la permeabilidad del adobe con la implementación de algún componente natural con la finalidad de experimentar si se puede conseguir una mayor impermeabilidad con la cual poder prolongar su durabilidad, así como conocer sus resistencias a la compresión y a la flexión.

### 1.1. Planteamiento del problema

Existen diferentes materiales empleados en la edificación como el cemento, tabique, ladrillo o los basados en la utilización de tierra, los cuales son manipulados sin sufrir transformaciones químicas en sus componentes.

Dentro de la tradición de la construcción con suelo a nivel mundial se reconocen 12 métodos que se han venido consolidando a ensayo y error (Fig. 1.1.1); así es como cada lugar ha utilizado los materiales locales disponibles, que en su gran mayoría su impacto al medio ambiente es menor que otros materiales constructivos en su proceso de fabricación como en su desecho.

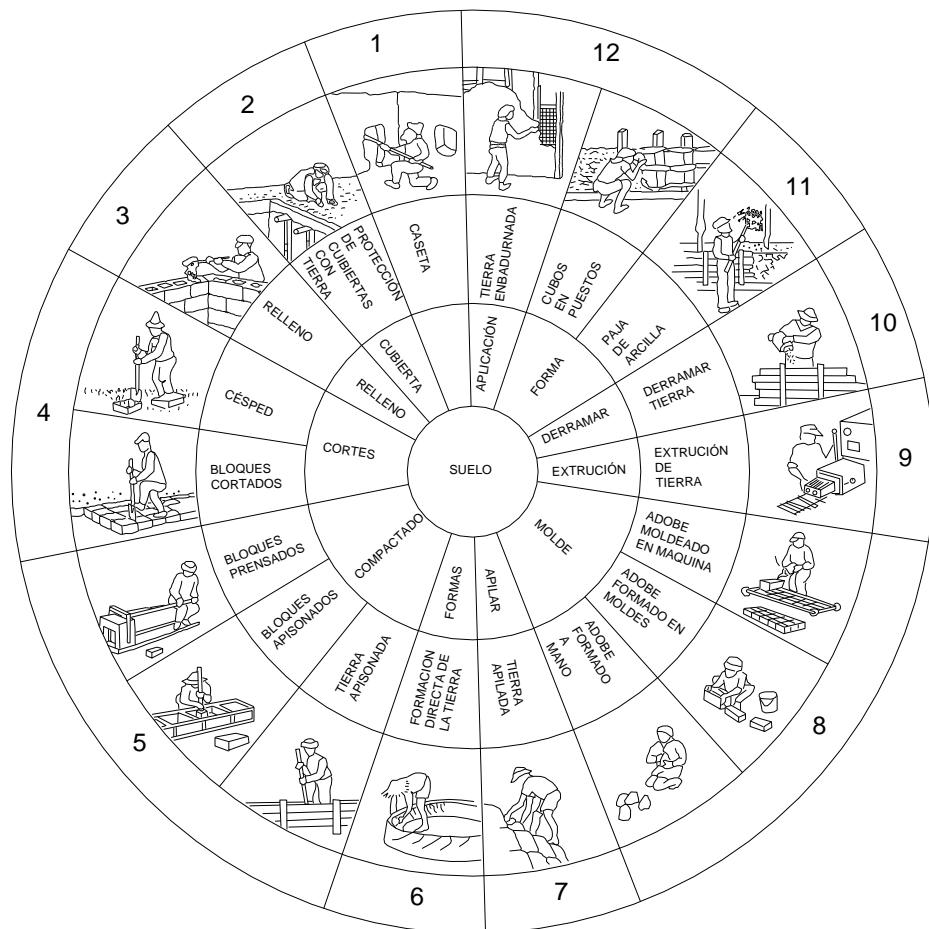


Fig. 1.1.1. Doce técnicas con material de suelo. Fuente: Earth construction, a comprehensive guide, 1994.

Algunos métodos son:

- a) El adobe
- b) El sistema cob, éste proviene de la palabra derivada del zapoteco que significa pared; es un sistema constructivo utilizado en la Sierra Sur de Oaxaca que mezcla resina de pino-barro, agua y fibras, las cuales pueden ser muy variadas siempre y cuando presenten pelaje; el sistema utiliza crucetas o escalerillas para nivelar los muros y usan contrafuertes para dar solidez estructural.
- c) El bahareque, que consiste en un entramado de madera, carrizo o bambú que posteriormente se recubre con tierra, en el cual debe cuidarse que no se contraiga. Las diferencias entre materiales constructivos base tierra y los que requieren un proceso industrializado, es decir, que requieren una transformación de la materia prima, varían respecto al costo de materiales, su tiempo de vida útil, su accesibilidad en todas las regiones o el impacto que tienen en el medio ambiente, cuestión importante debido a la cantidad de energía que requieren para su elaboración y la forma de obtención de recursos energéticos actuales. Estos aspectos determinan las ventajas o desventajas de dichos materiales.

Los materiales base tierra resurgen como una opción amigable con el medio ambiente, pueden utilizarse para acabados de muros aparentes, material decorativo en construcciones de estilos similares al rústico, pero requieren de alguna mejora en sus características físicas, químicas o mecánicas para prolongar su tiempo de vida útil y puedan considerarse una alternativa adecuada en la edificación (Guerrero,2007).

Tal es el caso del adobe, el cual cuenta con ciertas desventajas o prejuicios que lo demeritan, sin embargo, erradicando sus debilidades puede convertirse en una mejor opción como sistema constructivo, ya que por ejemplo, no presenta gran resistencia a la

humedad (Fig. 1.1.2), ni al sol en exceso, o cuentan con una baja resistencia a la abrasión, a la compresión y a flexión (Fig. 1.1.3).



Fig. 1.1.2. Baja resistencia a la abrasión, a la compresión y flexión. Fuente: El tesista.



Fig. 1.1.3. Baja resistencia al agua. Fuente: Alavéz, 2012.

Las tecnologías alternativas de construcción como son el adobe, los bloques de suelo compactado, la paja de arcilla, el bahareque, los sistemas de techo prefabricados, las bóvedas de ladrillo, los techos de losas con relleno, los cementos con cal y puzolana, etc. pueden ser usadas para minimizar el consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> en la manufactura de materiales para la construcción de viviendas.

No obstante, el desarrollo y aplicación de materiales industrializados ha tenido un gran auge actualmente. El proceso de manufactura de los materiales industrializados es altamente demandante de materias primas y es también altamente contaminante. La cuantificación de los distintos gases emitidos a la atmósfera, medidos en kilogramos de emisiones de CO<sub>2</sub>, informan del potencial del calentamiento global (GWP, siglas en inglés de Global Warming Potential) a causa de los diversos gases emitidos durante la producción y puesta en obra de los materiales de construcción. Los principales gases producidos y que contribuyen a la ocurrencia del efecto invernadero son: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>), óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y clorofluorocarburos (CFC) (Argüello, 2008). Así

también, Buchan y Honey (1994) consideran que, entre los diversos gases de efecto invernadero emitidos por actividades humanas, derivado de la fabricación de materiales de construcción, el CO<sub>2</sub> es el producto más perjudicial (Tabla 1.1.1).

Tabla 1.1.1.

*Impacto energético de la producción de materiales de construcción.*

IMPACTO ENERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN (POR KILOGRAMOS DE MATERIA)		
MATERIALES	ENERGÍA (MJ/KG)	EMISIONES DE CO <sub>2</sub> X KG DE MATERIAL
Cemento	4.36 (Arguello y Cuchi 2008)	1.00 (Klein, 1998)
Cal	3.43 (Arguello y Cuchi 2008)	0.83 (ITeC)
Ladrillos cerámicos	4.26	0.48 (ITeC)
Suelo	0	0

El adobe tiene grandes cualidades térmicas, acústicas y no genera contaminantes extras al concluir con su ciclo de vida, es decir, es ecológico al no interferir su proceso de elaboración con el medio ambiente, por lo cual es importante retomar su uso mejorando sus propiedades.

Con la formación de Ingeniero en Diseño, es posible generar un análisis del material solo y combinado con agregado natural y evaluar los resultados para mejorar la propiedad de permeabilidad en el adobe, pasando por un proceso de conceptualización a la práctica.

## 1.2. Justificación

México es un país en vías de desarrollo donde parte de la población no cuenta con una vivienda propia, siendo 36 millones de mexicanos los que viven esta situación y no todos los que cuentan con casa propia su construcción está hecha con materiales durables tales como tabique, block, piedra, cantera, cemento o concreto (INEGI, 2010). Tan sólo en Oaxaca tras el censo 2010 realizado por el INEGI, de las 621602 viviendas particulares habitadas, sólo el 66.45% están construidas con materiales durables.

Esto probablemente se debe a que la economía se encuentra en una fase problemática, donde no hay tanto movimiento de recursos, es decir, las personas no cuentan con el dinero necesario para la construcción de una vivienda, por lo cual es necesario buscar alternativas más económicas en los materiales a emplear en la industria de la edificación, por ejemplo el adobe, el cual es un material utilizado desde la antigüedad, de elaboración manual hecho a base de arcilla lo que lo hace un material barato y presente en muchas regiones diferentes tanto del país como en el mundo (Guerrero, 2007).

El adobe es una opción que puede retomarse para la construcción porque en comparación con otros materiales resulta más económico, debido a que no se tiene que pagar el transporte del material puesto que ahí mismo puede producirse; también es térmico, puede utilizarse para acabados en distintas edificaciones o como sistema constructivo si se logra prolongar su ciclo de vida.

Actualmente se busca rescatar esta técnica, mejorar sus características y minimizar sus debilidades, debido a que, aunque es una forma de construcción antiquísima, en realidad no se encuentran tantos libros o documentos que hablen de sus propiedades, a

diferencia de otros materiales como el cemento, que sí cuentan con una gran cantidad de información escrita.

Por lo tanto, esta tesis busca aportar información sobre el adobe y a la vez proponer una nueva forma de fortalecerlo empleando otro material natural; utilizando la tierra de San Agustín Yatareni, Oaxaca, debido a que en este lugar se encuentran suelos con presencia de arcilla y limos, útiles para la elaboración de adobe; además la población de esta zona se dedican a la elaboración de ladrillos, a la elaboración por encargo de adobes, lo cual le da un sustento práctico a la elección del suelo. Se consideró como base las normas reglamentarias referentes a bloques, aplicando los conocimientos adquiridos referentes a resistencia de materiales y sistemas constructivos principalmente.

### 1.3. Antecedentes: El adobe

El adobe es un material compuesto de tierra, la cual idóneamente debe contener arena gruesa, arena fina, sedimento y arcilla; en ocasiones se le agrega materia vegetal como heno o estiércol, según la experiencia de quien lo elabora. El agregado, que sería la arena gruesa, proporciona fortaleza, la arena fina es un relleno para enlazar los granos del agregado, además el sedimento y la arcilla (identificados por el tamaño de partículas) actúan como ligadura y medio plástico para unir los otros ingredientes.

La construcción con adobe se ha utilizado desde la antigüedad en diferentes regiones del mundo entero, en especial donde hay escasez de recursos, de vivienda o porque se pueden encontrar tierras adecuadas para fabricar este material en casi cualquier parte. En Isfahan, Irán, el Hotel Abbasi anteriormente llamado Shah Abbas, por ejemplo, fue construido a partir de arquitectura de tierra, por otro lado, en 1540 en el suroeste de Estados Unidos, los exploradores españoles encontraron pueblos de adobe.

En Malí, África, la Mezquita de Djenné es el mayor edificio sagrado hecho de barro del mundo, también es el más grande hecho con este material de una sola pieza, ya que tiene una superficie de 5625 m<sup>2</sup>. Está considerada una cumbre de la arquitectura sudanesa-saheliana; fue construida entre 1180-1330 y desde 1988 está calificada junto con el casco antiguo de Djenné, como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. Otro ejemplo es la ciudadela de Chan Chan en Perú, la cual es la ciudad construida de adobe más grande de América y la segunda en el mundo; fue declarada *Patrimonio de la Humanidad en peligro* en el mismo año.

### ***1.3.1. Características***

Construir con adobes presenta la ventaja de su similitud formal, constructiva y estética con el ladrillo de campo cocido. En caso de disponer de mucha mano de obra, especializada o no, esta técnica es muy adecuada en función de los procesos de fabricación que permiten la integración de gran cantidad de personas durante el pisado y moldeado, pero teniendo control durante la producción, para minimizar la variación de las dimensiones y la forma irregular de las piezas. Las viviendas de adobe se diseñan con amplios aleros, con corredores exteriores o con cimientos de piedra para proteger las paredes, las cuales se elaboran muy anchas. Los muros de adobes presentan muy buenas condiciones de aislamiento acústico y térmico debido a las características del material y los espesores utilizados.

Las desventajas de esta técnica están en función del propio proceso de fabricación que puede resultar lento ya que se requieren dos o tres semanas para poder utilizar las piezas en caso de que la producción se haga en obra. El proceso también depende de las áreas de pisado, secado y acopio, que comandarán la continuidad de producción mientras se espera que se sequen las piezas anteriores. Por lo tanto, esta técnica requiere cierta previsión de infraestructura para contar con superficies horizontales y limpias, además de zonas protegidas para evitar que el agua de lluvia afecte a la producción.

Las fallas comunes en las construcciones con adobes pueden ser reducidas mediante los controles de la tierra y los estabilizantes utilizados, el dimensionado adecuado de las piezas y los muros, el dimensionado apropiado de la estructura, tanto de la cimentación como del muro portante, o las vigas y pilares y la protección frente a la lluvia y a la humedad natural del terreno. Tanto las ventajas o desventajas se deben tener

en cuenta como datos de la realidad, pero las condicionantes propias de la obra serán las que determinen la viabilidad de los procesos o no.

Las principales razones de derrumbe y vulnerabilidad sísmica de las construcciones de adobe se deben al nulo mantenimiento, al descuido, a las intervenciones inadecuadas sobre su estructura y a las construcciones realizadas de forma precaria o sin el conocimiento adecuado sobre el sistema constructivo, no teniendo en cuenta características básicas de su construcción, como respetar proporciones de altura y espesor, proporciones adecuadas de mezcla, entre otros.

El mayor problema para la reparación, mantenimiento y correcta ejecución de las construcciones de adobe es la pérdida de una tradición ancestral, transmitida de generación en generación, presentando un vacío en la cultura constructiva, perdiendo el saber hacer y generando problemas que pueden ser graves, sobre todo en el caso de países sísmicos.

Esta situación condujo a que la población en general haya favorecido la construcción con bloque, ladrillo y hormigón. Sin embargo, estas viviendas nuevas, pierden su calidad térmica, son más costosas y su edificación en autoconstrucción se hace más difícil. Por esta razón, centros de investigación trabajan para desarrollar construcciones sismorresistentes en adobe que sean saludables y accesibles económicamente.

En Colombia, Perú y Chile se han desarrollado diversos estudios y técnicas tendentes a obtener piezas de adobe sismorresistentes, pudiendo utilizarse tanto en nuevas construcciones como en rehabilitación, además de rescatar esta técnica constructiva y reinterpretarla para su aplicación en la actualidad. (Rivera y Muñoz, 2012).

### ***1.3.2. Materiales para hacer adobe***

De manera general, la tierra está formada por proporciones diversas de grava, arena, limo, arcilla, agua y aire. Esta relación es la que hace posible que la transformación del suelo en material constructivo pueda resultar más o menos adecuada.

Los componentes principales para hacer adobes son tierra y el agua. Por lo general también contiene un elemento extra que sirva para compactar más la mezcla, usualmente son paja o estiércol de burro o vaca, pero no siempre es necesario (estos materiales se explicarán con más detalle en el capítulo 1.4 Agregados en el adobe).

La tierra que se utiliza en la fabricación de adobes se obtiene de 50 cm a 2 m de profundidad del suelo por poseer una variedad granulométrica y se obtiene de yacimientos de arcilla o bancos de material. (Guerrero, 2007). La tierra no debe ser demasiado arcillosa porque de serlo seguramente desarrollarán fisuras como resultado de la retracción presente durante el secado. Diversos textos recomiendan proporciones ideales de arcilla para ser utilizadas en la fabricación de adobes. McHenry (1996, p. 65) propone el 15%; Doat et al. (1996, p. 143) hablan de entre 15 y 18%; Houben y Doat (1982, p. 7) especifica un 20%; Tejeda (2001, p. 31) dice que “en ningún caso se aceptarán suelos con más de 18% de arcillas”; y Bardou (1981, p. 11), con un criterio igualmente impreciso, dice que tal composición “debe ser menor a 20%”.

La clasificación granulométrica de la tierra, que es más aceptada a escala internacional, parte de los siguientes criterios: se denomina grava a las partículas con un tamaño superior a los 2 mm. La arena está en un rango de entre 0.06 mm y 2 mm. El limo va de 0.002 mm a 0.06mm y las arcillas son partículas menores a 0.002 mm (Houben, 2001, p. 25).

Aunque cada componente juega un papel importante dentro del conjunto del suelo y éste varía en función del sistema constructivo que se utilice, el rol que desempeña la arcilla es clave por tratarse del material aglomerante, mientras que la grava, la arena y el limo dan estructura y estabilidad al sistema.

El agua constituye otro elemento fundamental dentro del proceso constructivo ya que cumple dos funciones sustantivas. En primer lugar, permite el movimiento de las partículas sólidas de la mezcla al transportar a las más pequeñas entre las de mayor tamaño. En segundo lugar, activa las propiedades adhesivas de la arcilla (Rodríguez, 2001, p. 84).

La singularidad de la arcilla radica en el hecho de estar formada por silicoaluminatos hidratados que provienen de la desintegración geológica de rocas. Está constituida por cristales (micelas) que, debido a su forma plana y lisa, presentan la cualidad de desplazarse fácilmente entre el resto de las partículas y establecer relaciones electrostáticas que las ligan en conjunto.

Este desplazamiento depende de su contacto con el agua, a nivel macroscópico, se evidencia en la transformación del suelo en un material plástico, coloidal o hasta líquido, que recupera su estado sólido original al secar (Warren, 1999, pp. 40-41).

Pero no todas las arcillas tienen comportamientos similares, pues en función de la dimensión de la separación de sus micelas y de la serie de elementos químicos que las conforman, cambia su grado de actividad. Esto hace posible clasificar los tipos de arcillas a partir de rangos que van desde las que tienen un comportamiento muy inestable, con lo que su adherencia y mutabilidad de volumen al hidratarse puede ser muy fuerte, hasta el límite opuesto, formado por aquellas que resultan casi inertes y por lo tanto, mucho más estables en contacto con el agua.

Dentro del primer grupo se encuentran las arcillas conocidas como “expansivas” que en general pertenecen al grupo de las esmectitas (tales como las montmorillonitas, nontronitas y saponitas, así como sus lodos derivados conocidos como bentonitas) y que tienen la particularidad de permitir la entrada de mucha agua entre las láminas de su estructura, con lo que manifiestan potentes procesos de hinchamiento que suelen tener efectos muy nocivos en la construcción.

La arcilla se define como una tierra de grano fino que se vuelve plástica o maleable cuando se humedece. Se trata de un grupo particular de minerales con un tamaño específico de partícula, y ese tamaño le confiere ciertas propiedades como la plasticidad y la capacidad de comportarse como un coloide. Para entender mejor sus características es importante saber cómo se forman y de dónde provienen las arcillas.

En la corteza terrestre se encuentra comúnmente silicio (Si), aluminio (Al) y hierro (Fe) combinados en forma de óxidos en las rocas que, combinados con agua, carbono (C), azufre (S), hidrógeno (H), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) se combinan de maneras diferentes para formar minerales. Los minerales son sólidos con una composición química característica y con una estructura cristalina que se refiere a que sus átomos están en forma ordenada. Las sustancias que no tienen este arreglo ordenado se denominan amorfas (Rice, 1987).

Las arcillas son derivados de las rocas y por lo tanto es necesario conocer su mineralogía para comprender la naturaleza de las arcillas derivadas. Los minerales más comunes presentes en las rocas son los feldespatos, micas, anfíboles, piroxenos y olivinas.

Así, las arcillas están principalmente constituidas por sílica y alúmina, que son dos elementos químicos resistentes al intemperismo.

La estructura de las arcillas depende de la estabilidad de los electrones de los átomos que las conforman. El sílice y el aluminio trabajan como cationes (con carga eléctrica negativa) que para formar compuestos estables deben de perder (o compartir) cuatro y tres electrones respectivamente, lo que los hace que atraigan átomos de oxígeno para estabilizarse. Hay que tomar en cuenta que los cationes de Si y Al pueden ser sustituidos por otros de magnesio (Mg) o fierro en sus diferentes valencias, lo que da lugar a la complejidad estructural y a la variedad de aproximadamente cincuenta tipos de especies arcillosas.

Esta sustitución de cationes hace que las “orillas” de las partículas de arcillas queden insatisfechas eléctricamente, lo que causa que éstas tiendan a unirse con otros elementos para lograr una estabilidad. Los elementos ajenos entran en sustitución del núcleo de aluminio o sílice o bien como impurezas en forma de sales solubles o impurezas y juegan un papel importante junto con la atracción eléctrica ya que le confieren a las arcillas ciertas propiedades y un comportamiento significativo (Rice, 1987).

Al mezclar la arcilla con el agua, las cargas compartidas que se generan permiten la plasticidad y un alineamiento de la estructura de la arcilla siguiendo la estructura de las micelas o plateletas (fomentado por la carga negativa de las láminas arcillosas que generan repulsión entre si aumentando el espacio entre ellas y promoviendo una mayor entrada de agua), creando nuevas fuerzas de atracción y cuando la fuerza aplicada es removida, las partículas siguen unidas (Domínguez y Shifter, 1995).

Si el agua es extraída, el volumen disminuye ya que ésta sale del espacio interlaminar de la arcilla. Este proceso es muy conocido y aplicado para la consolidación mecánica de suelos y este mismo proceso ocurre al hacer la mezcla húmeda del adobe. (Martínez, 2007).

Se debe tener presente el sistema constructivo que se va a emplear, por ejemplo al edificar tapias, es conveniente que el contenido de arcilla sea mayor ya que se requiere poca agua para su elaboración. En cambio, para hacer adobes o bahareque se utiliza mucha mayor cantidad de agua, por lo que una tierra demasiado arcillosa probablemente desarrollará fisuras como manifestación de la retracción que se verifica durante el secado.

### ***1.3.3. Proceso de elaboración del adobe***

La técnica de elaboración de adobe consiste esencialmente en el moldeado de bloques de barro utilizando un molde o gavera, que se secan al sol y posteriormente permiten construir estructuras portantes de muros, arcos, bóvedas o cúpulas por hiladas sobrepuertas. Las dimensiones de los adobes están relacionadas con el posible manejo de las piezas y la velocidad de avance de la obra. Muchos edificios de la época colonial tenían adobes de 60 x 45 x 10 cm, pero debido a que llegaban a pesar más de treinta kilos, en muchos sitios tradicionales se han disminuido las dimensiones a 48 x 24 x 8 cm. Estas medidas influencian de manera directa en la forma en que se alinearán por hiladas para lograr un reparto uniforme de los esfuerzos, para poder construir muros, columnas, contrafuertes, entre otros.

La tierra para elaborar los adobes se tiene que dejar perfectamente humedecida en el “pisadero” por un periodo no menor a los dos días, protegiéndola de la intemperie bajo una cubierta o con una cama de paja para conservar su nivel de humedad.

Este paso que se conoce tradicionalmente como “dormido”, “fermentado” o “podrido” del barro es fundamental ya que garantiza la correcta hidratación de todas las partículas de arcilla presentes y su “activación” como aglomerante.

Para la elaboración de las piezas se coloca el molde o gavera, previamente humedecido, sobre el piso del tendal que ha sido rociado con arena. El barro hidratado y en estado plástico se arroja con fuerza dentro del molde y se comprime con la mano o los pies, repartiéndolo perfectamente hacia las esquinas hasta el llenado total. Posteriormente se enrasa la superficie con la mano humedecida o con la ayuda de una regla de madera.

Finalmente se saca la gavera cuidando levantarla verticalmente y con decisión para evitar la deformación de las aristas. Despues, los adobes se dejan a la intemperie para lograr un secado homogéneo (Fig. 1.1.3). (Guerrero, 2008).



Fig. 1.3.3.1. Proceso de elaboración de adobes. Realizada la mezcla de los materiales y su reposo, a) Se prepara el molde humedeciéndolo antes de utilizarlo. b) Se coloca el molde y se vacía la mezcla con fuerza y cuidando de no dejar espacios vacíos. c) Se empareja la parte superior con la mano o con una regla de madera. d) Se desmolda moviendo el marco de lado a lado y se deja secar el adobe obtenido. Fuente: El tesista.

En regiones con climas demasiado extremos y con asoleamiento intenso, es necesario proteger las piezas con una cubierta liviana o bajo una cama de paja durante las dos o tres primeras horas para evitar que se deformen o agrieten por un secado diferencial. Dependiendo de las condiciones del sitio, se podrán poner de canto para que se ventilen adecuadamente en tres o cuatro días, y en un par de semanas se podrán almacenar, cuidando que tengan la separación suficiente para que el aire circule entre ellos. Existen aspectos en la tradición cuyo olvido ha incidido en la alteración de la correcta fabricación.

El proceso descrito de elaboración de adobes en este trabajo, se relaciona con las maneras de elaborarlo de personas de la región Mixteca y, principalmente, de personas de Valles Centrales del estado de Oaxaca, difiriendo en detalles como el tiempo de realización de ciertas etapas o los aditamentos a la mezcla que se agregan, aunque el investigador Guerrero, por ejemplo, explica más a detalle el proceso, además de expresar el por qué agregar ciertos materiales.

Los procesos de elaboración de adobe que describieron los entrevistados se encuentran dentro de los anexos de este trabajo, mientras que en las tablas siguientes se hace un recuento de la información recabada (Tabla 1.3.3.1 y Tabla 1.3.3.2).

Tabla 1.3.3.1

*Materiales utilizados para elaborar adobes*

Región a la que pertenece el entrevistado	Materiales utilizados para elaborar adobes	¿Qué le agregan para “mejorar” el adobe?	Lugar de donde se obtienen los materiales
<b>Mixteca</b>	Tierra arcillosa	Estiércol	Cerca de su hogar
<b>Valles Centrales 1 (Etla)</b>	Tierra, pasto y agua	Excremento de toro	Cerro cercano a su casa
<b>Valles Centrales 2 (Santa María Atzompa)</b>	Tierra arcillosa	Cenizas de madera	De la región
<b>Valles Centrales 3 (San Sebastián Tutla)</b>	Tierra arcillosa	Estiércol de burro	De sus terrenos
<b>Valles Centrales 4 (Santa Lucía del Camino)</b>	Tierra arcillosa	Estiércol de burro	De San Agustín Yatareni

Fuente: Entrevistas realizadas (ver ANEXOS A. Entrevistas).

Tabla 1.3.3.2 *Proceso para elaborar adobes*

PROCESO PARA ELABORAR ADOBES					
FASES	MIXTECA	VALLES CENTRALES 1	VALLES CENTRALES 2	VALLES CENTRALES 3	VALLES CENTRALES 4
<b>Fase preliminar</b>	Elaboración de molde.		Elaboración de molde.	Dejar el molde remojado en agua un día.	Elaboración del molde si no se tiene con la medida pedida.
<b>Preparación de los materiales</b>	Triturar estiércol.	Colar la tierra.		Recoger la mezcla que se describe abajo, taparla con un	Dejar reposar la mezcla y usar hasta el día siguiente.

				nylon y dejarla “reposar” para que al día siguiente ya se pueda usar.	
		Colar el excremento.			
<b>Mezcla de los materiales</b>	Mezclas los materiales agregando el agua necesaria para conseguir la consistencia deseada.	Mezclar los materiales y agregar agua suficiente para poder amasar la mezcla.	Mezcla de materiales usando pala y pies.	Mojar la tierra y mezclarla. Homogeneizada la mezcla, agregar el abono. “Barretear la tierra”, como si se cortara el barro.	Revolver muy bien la tierra, agregar agua necesaria y después el excremento de burro. Mezclar muy bien.
	Verter la mezcla en el molde.	Vaciar en el molde.	Vaciar mezcla en el molde y llenar bien.	Mojar un trapo y pasarlo por el molde. Tocar la mezcla para sacar piedras.	Mojarse las manos para tomar la mezcla, sacar piedras si hay.
<b>Vaciado</b>	Sacar los bloques.	Aplastar materiales.	Sacar los bloques.	Echar mezcla al molde, asegurando las esquinas.	Verter mezcla en el molde, emparejando con la mano y arrojando el excedente al sig. lugar donde se hará el adobe.
		Sacar del molde.		Alzar el molde 1ro. de una esquina, después de la otra.	Alzar el molde con cuidado, primero de una esquina e ir

					moviendo lento de arriba a abajo el molde. Enjuagar el molde cada 4 adobes más o menos.
<b>Secado</b>	Secar de 5 a 10 días hasta que estén duros y secos.	Secar por 10 días en un lugar alejado de animales y limpio, para evitar daños en los bloques.	Secar por 1 semana a 2, hasta que queden duros.	-Dejar secando por 1 día. -Emparejar los adobes con un cuchillo viejo y se deja parado sobre su lado corto por 1 día más. -Al 3er. Día se apilar y secar en el sol.	Secar por 8 a 10 días, dependiendo del clima.

Fuente: Entrevistas realizadas (ver ANEXOS A. Entrevistas).

Con los datos recabados se puede notar que el procedimiento que plantea Guerrero va acorde a lo que las personas hacen en realidad, ciertos pasos varían un poco y los fabricantes no saben a “ciencia cierta” por qué agregar ciertos materiales. Es así como se puede comprobar la experiencia de antaño de las personas que elaboran adobe, trabajos como los que se nombran en la biografía ayudan a corroborar y fortalecer los conocimientos que existen respecto a la cultura de construcción con adobe, lo cual este proyecto tiene como meta alcanzar.

Al término de secado de los bloques, se ha de cuidar que durante el proceso constructivo se eleven las hiladas de adobes de manera paulatina, dejando que el mortero seque perfectamente. Conviene construir un máximo de seis hiladas por día y continuar

hasta el siguiente la obra. De lo contrario, el mortero de las hiladas bajas se comprime más que el de las altas, con lo que se provoca un aspecto y un comportamiento menos homogéneo de muros, bóvedas o cúpulas.

#### **1.4. Agregados en el adobe**

La arquitectura de tierra ha estado presente en los asentamientos humanos localizados en diversas latitudes, desde las etapas más primitivas hasta las más complejas del desarrollo de la cultura. En función de este desarrollo, así como de los recursos existentes en cada localidad, se generaron técnicas constructivas que emplearon la tierra en diversas magnitudes y en combinación con otros materiales, para configurar lo que se conoce como sistemas constructivos.

Muchas de estas técnicas basadas en la utilización de tierra se encuentran aún vigentes sin muchos cambios. La evolución tecnológica se ha basado en el equilibrio entre la satisfacción de las necesidades sociales y la previsión de las condiciones de riesgo de los edificios. Son muchos los factores que han influenciado en el perfeccionamiento o abandono de diversas técnicas constructivas, por ejemplo, las formas de organización comunitaria, la disponibilidad de recursos naturales, los sistemas de división del trabajo, los intercambios comerciales y la geografía local. (Guerrero, 2007).

Aunque también se han realizado diferentes trabajos donde se experimenta la combinación del suelo con otros materiales para mejorar sus propiedades mecánicas, físicas o químicas, por ejemplo:

Con el fin de evaluar cómo afectan los aditivos de planta de maíz, festuca, paja, piedras de oliva a tierra, migajas de caucho y el poliuretano, en la resistencia a la flexión y la compresión de los adobes, Serrano, Barreneche y Cabeza realizaron un diseño de

experimento utilizando un software, permitiendo la máxima información con un número mínimo de experimentos. Un diseño de tres niveles fue elegido en este estudio. Esto significa que se consideran k factores, cada uno a 3 niveles (0,1 y 2) que se denominan niveles bajos, intermedios y altos. Los resultados mostraron que el diseño de tres niveles de experimentos define correctamente las ecuaciones de flexión y resistencia a la compresión, además muestra la interacción entre ellas. Consiguiéndose una mejora máxima del 89% y del 26% de la resistencia a la flexión en plantas de maíz y festuca, respectivamente. Además la resistencia a la flexión mejoró mediante la adición de paja y planta de maíz, pero al contrario, no se recomiendan festuca ni piedras de oliva. Por otra parte, la adición de aditivos, en general, no se recomienda para aumentar la resistencia a la compresión, excepto con planta de maíz, donde la resistencia a la compresión permaneció constante en el rango estudiado. (Serrano, Barreneche y Cabeza, 2016).

Por otro lado, se han implementado soluciones en gel en adobes para mejorar sus propiedades, como el uso del sol-gel titanio ( $TiO_2$ ) a base de isopropoxido de titanio IV (TIP4) como recubrimiento en adobes. Las capas sol-gel modificaron la superficie del adobe, que puede conducir potencialmente a nuevas funcionalidades que mejoran el rendimiento del adobe, como mayor resistencia al agua e impariendo comportamiento bactericida. El procesamiento del sol-gel se produce a temperatura ambiente, por lo que es en general una técnica de bajo costo, amigable con el medio ambiente; los costes del nuevo tratamiento aplicado sobre adobe estarán relacionados con el precio de los precursores de partida, pero esto puede compensarse con la evitación de altas temperaturas para la producción de los materiales. Se llevarán a cabo investigaciones adicionales centradas en los costes de recubrimientos sol-gel. Todavía queda por hacer un análisis económico y cuantitativo ambiental completo para establecer la adecuación comercial real

y el impacto ambiental de los materiales desarrollados. (Calabria, Vasconcelos, Daniel y Chater 2009).

Como se ha hecho mención, la tierra como material de construcción es cada vez más estudiada por su bajo impacto ambiental y su disponibilidad. Los agregados de plantas y las fibras se han incorporado a la matriz de tierra con el objetivo de mejorar el rendimiento durante miles de años, pero los estudios científicos comenzaron hace poco. La influencia de agregados o fibras sobre la absorción de agua compuesta fue muy poco estudiada, siendo mucho más investigada la de los estabilizadores. (Laborel-Préneron, Aubert, Magniont, Tribout y Bertron, 2016). La absorción de agua se puede medir por inmersión o capilaridad. En cuanto a los yesos, la absorción no es un criterio indispensable porque se supone que están dentro del edificio o están protegidos de la lluvia. Sin embargo, es interesante medir cómo se ven afectados por el aumento capilar que puede ocurrir desde el suelo. Un resultado claro es que los bloques no estabilizados no resisten la inmersión. Algin y Turgut (2008), muestran que la cantidad de agua absorbida es proporcional al contenido de residuos de algodón. El aumento del contenido de algodón en un 40% (en volumen) más que duplicó la absorción de agua del material (del 12.5% al 27.2%), pero este valor fue aceptable en comparación con los otros materiales ligeros.

Asimismo Taallah et al. (2014), demostraron que el aumento de contenido de fibra al 0.2% condujo a un aumento en la absorción de agua y la hinchazón. De estos dos artículos, podría generalizarse que la adición de agregados o fibras aumenta la absorción de agua debido a su alta capacidad de permeabilidad. La impregnación de agua por agregados y fibras tiene un efecto importante en su adhesión con la matriz. La hinchazón de las partículas, engendrada por la absorción de agua durante las primeras 24 horas,

empuja el suelo. Cuando, después del secado, el volumen de las partículas disminuye, se crean huecos alrededor de ellas. (Laborel-Préneron, et al., 2016).

También se ha realizado experimentaciones (pruebas mecánicas) en suelos arcillosos estabilizados con alginato y reforzados con fibra de lana de oveja. El alginato (un polímero natural de las paredes celulares de las algas marrones) se utilizó como enlace con un suelo arcilloso y lana de oveja se utilizó como refuerzo. Las pruebas realizadas mostraron que la adición de alginato por separado aumenta la resistencia a la compresión de 2.23 a 3.77 MPa y la adición de fibra de lana aumenta la resistencia a la compresión un 37%. Se encontró que el beneficio potencial de la estabilización dependía de las combinaciones del estabilizador (alginato) y fibra de lana. Añadir alginato y reforzar con fibra de lana duplica la resistencia a la compresión del suelo, obteniéndose mejores resultados con una menor cantidad de lana. Los potenciales del alginato en la estabilización del suelo son considerables en comparación con la cal y el cemento, dado que las algas marinas y los suelos arcillosos son abundantes en muchas partes del mundo, los suelos estabilizados con alginato pueden utilizarse potencialmente como sustituto del suelo estabilizado con cemento. El uso propuesto de estabilizadores naturales debe ayudar a promover el desarrollo sostenible en la industria de la construcción. En la actualidad se están desarrollando otras pruebas como la conductividad térmica, la permeabilidad al aire, la absorción y desorción de la humedad y la resistencia al agua, para investigar su resistencia a los efectos perjudiciales del agua, a fin de evaluar la sostenibilidad y la viabilidad de extender su uso a climas templados. (Galán-Marín, Rivera-Gómez y Petric 2010).

#### ***1.4.1. Procesos de estabilización***

La construcción con suelo implica una elección entre tres enfoques principales:

- El uso del suelo disponible en el sitio y la adaptación del proyecto en la medida de lo posible a la calidad del suelo,
- El uso de otro suelo más adecuado a los requerimientos del proyecto, por lo que se debe llevar al sitio y combinarlo con el suelo local para que se adapte a las necesidades del proyecto.
- La estabilización del suelo.

Cuando las características del suelo no resultan apropiadas para utilizar en construcción con tierra y no se cuenta con otras fuentes cercanas de obtención, es posible emprender acciones para su mejoramiento a través de procesos de estabilización en la tierra, los cuales consisten en agregar componentes adicionales que subsanen sus debilidades, incluso estas técnicas pueden dar un beneficio adicional a tierras que desde un principio eran adecuadas. Actualmente existen muchos productos que se utilizan para la estabilización de suelos. Estos estabilizadores pueden ser usados en mayor parte en muros de tierra o como protección de su superficie. La estabilización es muy antigua, pero fue en 1920 cuando se le dio un enfoque científico. Aproximadamente, tres décadas después de la Segunda Guerra Mundial se llevó a cabo más investigación sobre el tema, y los trabajos continúan en la actualidad (Houben y Hubert, 1994). A pesar de los esfuerzos en la investigación, la estabilización de suelos no es una ciencia exacta. Los métodos de estabilización más conocidos y más prácticos incrementan la densidad del suelo por la compactación, el reforzamiento del suelo con fibras, o añadiendo cemento, cal o materiales bituminosos. (Alavéz, 2012).

Los estabilizantes o estabilizadores disponibles en la naturaleza más comúnmente utilizados en construcciones tradicionales son: arena y arcilla, paja y fibras de plantas, jugos de plantas (savia látex, aceites), cenizas de madera, excremento de animal (principalmente estiércol y orina de caballo) y otros productos de animales (sangre, pelo, cola, hormigueros).

Los estabilizadores manufacturados más comunes, (por ejemplo, productos y subproductos de las industrias locales o de los grandes procesos industriales) son la cal y puzolana, el cemento Portland, yeso, asfalto, estabilizadores de suelo comerciales, silicato de sodio ("vidrio soluble"), resinas, sueros (caseína) y melaza.

Estos estabilizantes nombrados se describen de manera breve más adelante. La elección del estabilizador más adecuado dependerá principalmente de los costos y de la disponibilidad local, pero también en cierto grado de la aceptación local.

Los procesos de estabilización se dividen en procesos homogéneos y procesos heterogéneos. Los homogéneos consisten en la modificación de las proporciones relativas de la granulometría natural del suelo por medio del agregado de los materiales que hacen falta o son deficientes. Mientras que los heterogéneos consisten en agregar al suelo componentes que no se encuentran en él naturalmente, confiriéndoles propiedades estables ante la presencia de agua. La estabilización heterogénea se divide a su vez en tres: estabilizantes por consolidación, por fricción y por impermeabilización.

#### ***1.4.2. Estabilizantes consolidantes***

Los estabilizantes o estabilizadores consolidantes ayudan a las arcillas en la acción aglutinante que ejercen sobre las partículas inertes del suelo. El estabilizante por consolidación con que se cuenta y que se ha usado por mucho tiempo, es la cal. Durante

el proceso natural de carbonatación de esta sustancia, que se denomina químicamente hidróxido de calcio, sirve de liga a las partículas del suelo, además de disminuir sus niveles de absorción hídrica y por tanto, su posible retracción al secado.

La cal presenta la cualidad adicional de no modificar la porosidad de la tierra, con lo que se mantiene tanto su capacidad de adherirse a otros materiales constructivos como permitir el intercambio de aire y vapor de agua con el medio ambiente.

Sin embargo, los sismos y el agua son los principales agentes de vulnerabilidad de las estructuras terreas, por lo que la búsqueda de resistencia a sus embates en gran medida ha guiado la generación de respuestas formales, materiales y dimensionales.

En una serie de estudios llevados a cabo en la Universidad Federal de Bahía con miras a determinar el efecto de la composición mineralógica de las arcillas dentro de sistemas compactados de suelo-cal, se desarrollaron diversos ensayos con probetas en las que se agregaron como estabilizantes fracciones de cal que variaban entre 0 y 12%. Entre los resultados obtenidos, destaca el hecho de que para determinados tipos de suelos se pudieron obtener incrementos en la resistencia de la compresión simple que pasó de 6 hasta 15 kg/cm<sup>2</sup>. Además se puso en evidencia la disminución de la contracción de las mezclas debido al secado, así como la limitación en la acumulación de agua. Las mejores respuestas se consiguieron agregando solamente entre 4 y 8% de cal (Hoffman, 2002, p. 72).

Por otra parte, existe un sinnúmero de sustancias de origen orgánico que también pueden cumplir funciones aglutinantes, como el caso de los polímeros extraídos de vegetales como las cactáceas o las suculentas, así como las proteínas animales provenientes de la leche, la sangre o el huevo.

En México y Perú pervive la costumbre de usar la pulpa del cactus de tuna –baba de nopal– que desde la época prehispánica, ésta formaba parte de los adhesivos tanto para el manejo de la tierra utilizada de material constructivo como para el caso de los revoques y pinturas a la cal.

#### ***1.4.3. Estabilizantes por fricción***

Los estabilizantes por fricción sirven para controlar el desplazamiento, dilatación y retracción durante el secado de las partículas del suelo. Conforman una especie de “red” a la que se adhieren las partículas del suelo y que controla su desplazamiento, dilatación y retracción durante el fraguado.

Esta “red” se desarrolla mediante la introducción de materiales fibrosos que pueden ser de origen vegetal como es el caso de la paja de diferentes gramíneas, virutas de madera, acículas de pináceas, cáscaras de coco, tallos del maíz y fibras de pita o sisal.

También existe una tradición de utilizar estiércol de caprinos, camélidos, bovinos o equinos, argumentando que estos materiales mejoran la maleabilidad y adherencia de las mezclas. Sin embargo, su principal función desde la perspectiva de la estabilización radica en que estas fibras vegetales han sido trituradas por el ganado y son de fácil obtención en los sitios rurales.

Es importante hacer notar que las fibras han de utilizarse en condiciones secas ya que de lo contrario se corre el riesgo de que se pudran con lo que, además de disminuir todas sus cualidades, son causa de deterioros posteriores en las estructuras por los microorganismos que generan.

La elección de la fibra va a depender de la disponibilidad regional. En este sentido, la que mayor difusión ha alcanzado por su extensivo uso en el medio rural es la paja,

principalmente de trigo o arroz. Las fibras modifican la textura de los componentes constructivos haciéndolos más ásperos, incrementando la adherencia con el resto de los componentes estructurales y los revestimientos.

*a) Paja, fibras de vegetales*

Estas actúan como refuerzos, especialmente para moderar el agrietamiento en suelos con gran contenido de arcilla. También hacen más liviano el suelo, incrementan sus propiedades aislantes (buena en regiones áridas y serranía) y aceleran el proceso de secado (proporcionando canales de drenaje).

La paja es universalmente el refuerzo más común del suelo; casi cualquier tipo es aceptable (trigo, centeno, cebada, entre otros), también el rastrojo de la mayoría de las cosechas de cereal. Otras fibras vegetales son sisal o henequén, cáñamo, hierba de elefante, estopa (fibra de coco), bagazo (residuo de caña de azúcar), entre otros. Para obtener resultados satisfactorios, la proporción mínima de refuerzos vegetales es 4% por volumen; de 20 a 30 kg por m<sup>3</sup>. Como los refuerzos vegetales tienden a debilitar el producto final e incrementar la absorción de agua, debe evitarse el uso excesivo. (Stultz y Mukerji, 1993).

*b) Excremento de animal*

El estiércol es el estabilizador más común, valioso principalmente por su efecto reforzador (debido a las partículas fibrosas) y característica de repeler los insectos. No se mejora significativamente la resistencia al agua, y se reduce la resistencia a la compresión.

El estiércol de caballo o camello son las alternativas menos empleadas. La orina de caballo como sustituto del agua de mezclado ayuda a disminuir el agrietamiento y mejora la resistencia a la erosión. Se obtienen mejores resultados añadiendo cal.

#### ***1.4.4. Estabilizantes por impermeabilización***

Los estabilizantes por impermeabilización o hidrofugantes conforman una “capa protectora” en torno a las partículas de arcilla regulando su contacto con el agua. Las sustancias que funcionan como “repelentes” son las grasas tanto de origen animal como vegetal o fósil, según la disponibilidad regional.

Al igual que sucede con el resto de los estabilizantes, la cantidad que se utilice debe ser moderada para que no se interfiera el comportamiento normal de las arcillas. Por ejemplo, si se agregara demasiado impermeabilizante en una mezcla de barro, las arcillas no se activarían y dejarían de funcionar como aglomerante del conjunto.

También sucede que una misma sustancia estabilizante puede cumplir varias funciones de manera simultánea, como en caso del mucílago de tuna o el hidróxido de calcio que, aparte de servir como adhesivos y fluidizantes de las mezclas, evitan en cierta medida la penetración de la humedad (Guerrero, 2007).

##### *a) Jugos de plantas*

El jugo de hojas de plátano mezclados con cal mejora la resistencia a la erosión y disminuye la absorción de agua (Fig. 1.4.4). Añadiendo el látex de ciertos árboles (por ejemplo euphorbia, hevea, entre otros) o jugo concentrado de sisal en forma de cola orgánica se obtiene una menor permeabilidad.

Las grasas y aceites vegetales deben secarse rápidamente para que sean efectivas y proporcionen resistencia al agua. Algunos ejemplos son aceites de linaza, coco y algodón; el aceite de ricino es muy efectivo, pero es caro. (Stultz y Mukerji, 1993).



Fig. 1.4.4.1. Jugo de hoja de plátano.

Fuente: El tesista.

*b) Mucílago de nopal*

El mucílago es una sustancia vegetal viscosa, también es una solución acuosa espesa de una goma o dextrina utilizada para suspender sustancias insolubles y para aumentar la viscosidad. Los mucílagos son semejantes a las gomas, por su composición y sus propiedades, dan con el agua disoluciones viscósas o se hinchan en ellas para formar una solución gelatinosa. Se encuentran en las algas, semillas de lino (linaza), semillas de chía, en raíces de malva, membrillo, liquen, nopal, en ciertos hongos y en muchos vegetales.

María Isabel Beas Guerrero de Luna ha hecho pruebas extensivas sobre la efectividad del mucílago de nopal como consolidante del adobe e hizo un estudio comparativo entre el mucílago, el Acryloid B-67 (Rohm and Hass Company) y el silicato de etilo de la marca Conservare OH- Stone Strengthener (de ProSoCo). (Martínez, 2007)

El mucílago de nopal se extrajo de la planta del género *opuntia ficus-indica*. El Acryloid es un polímero isobutil metacrilato que se diluyó en dietil benceno al 5%, mientras que el silicato de etilo se utilizó según las especificaciones del distribuidor.

Durante esta experimentación en laboratorio se hicieron ensayos para probar la adhesión del mortero con su sustrato, la permeabilidad ante el vapor de agua, la capilaridad y la resistencia a los factores ambientales tanto en húmedo como en seco. Las probetas se hicieron con cinco tipos de mortero diferentes: arcilla, yeso, cal, yeso-cal y arcilla-cal,

pero para los objetivos de este trabajo se hizo la referencia únicamente de los resultados de las probetas de arcilla.

Como conclusiones de las pruebas, se reporta que el mortero con propiedades más compatibles al adobe fue el de cal- arcilla, pero que el de arcilla le confirió una buena protección al sustrato, una idéntica transmisión de vapor y el mayor grado de adhesión entre sustrato y mortero. El mucílago de nopal fue el factor que modificó menos los estratos donde fue aplicado con una variación en la transmisión del vapor mínima y un cambio en la humedad por capilaridad en un rango del 10-40% permitiendo que haya aplicaciones posteriores de otros tratamientos. Tampoco generó un cambio del color del sustrato y su peso varió solo en un 0.092%. Otras ventajas reportadas de este consolidante es su bajo costo, la gran disponibilidad sin toxicidad y bajo deterioro biológico. (Martínez Camacho, 2007).

Por otra parte, se han realizado pruebas de resistencia a compresión húmeda y seca en bloques de tierra comprimidos (BTC), debido a su similitud con los bloques tradicionales; encontrándose que al añadirles mucílago de nopal se incrementó su resistencia a compresión húmeda y seca en un  $61.4 \pm 4.6\%$ ; disminuyendo la porosidad conforme se incrementa la concentración de mucílago. (Aranda y Suárez, 2013).



Fig. 1.4.4.2. Mucílago de nopal.  
Fuente: INIFAP, 2011.

### c) Resinas

Las resinas son extractos vegetales procesados tales como la savia de los árboles, o subproductos de diversos procesos industriales. Las principales ventajas son resistencia al

agua (aunque no en todos los casos), rápido fraguado y solidificación de suelos muy húmedos.

De manera más específica, la resina es una secreción orgánica que producen muchas plantas, particularmente los árboles del tipo conífera. Se denomina resina a este exudado arbóreo mientras permanece en el árbol, cuando es obtenida en su estado bruto se le denomina miera. Una vez purificada recibe el nombre de oleoresina, de ésta se le separan sus componentes sólido (colofonia) y líquido (aguarrás), que tienen diferentes usos en el mercado.



Fig. 1.4.4.3. Productos del pino. Izquierda resina de pino; derecha: colofonia. Fuente: El tesista.

En la medida en que se han descubierto nuevos derivados y usos de la resina de pino, ésta ha incrementado su valor. Los componentes primarios son separados mediante el proceso de destilación por arrastre con vapor, siendo los mismos, la colofonia y trementina. A partir de los resultados de estas investigaciones, se inició el desarrollo de la industria de transformación de resina en la obtención de productos derivados denominados colofonias modificadas. Durante muchos años la colofonia y la trementina fueron usadas sin procesar en la industria del jabón, el papel y el barniz.

Actualmente, la mayor parte de la colofonia se emplea en la obtención de más de 50 tipos de colofonias modificadas con aplicaciones diferentes. Entre los principales usos se destaca: producción de papel, adhesivos, tintas de impresión, compuestos de goma,

revestimientos superficiales, barnices, pinturas, esmaltes, soldaduras, fósforos, redes de pesca, confección de flores. Ha sido ampliamente utilizada en la preparación de materiales de limpieza, controles biológicos para luchar contra invertebrados y plagas (fitopatógenas) que afectan las plantas, construcciones, embarcaciones, agentes higiénicos y aromatizantes, derivados con acción biocida específica, polímeros termoresistentes, agentes lubricantes y precursores de fármacos, orientados hacia agentes antiulcerosos y antimicrobianos de acción general.

La trementina es de amplio uso en la industria química, como fuente de aromas, fragancias, sabor, insecticidas, disolventes, etc. La variedad de usos de la colofonia y la trementina, ilustran la importancia económica de las mismas y de la resina como materia prima en muchas aplicaciones industriales.

El empleo de la resina de pino y colofonia como potenciales precursores de materias primas estructuralmente interesantes y factibles de transformaciones sintéticas, es una variante que merece la atención, orientada hacia la transformación y obtención de genéricos, que por su naturaleza no contaminante y biodegradable, constituyen precursores sustentables de novedosos agentes útiles en la agroquímica, química fina farmacéutica, además de que su explotación contribuye al desarrollo sostenible de las regiones en donde se encuentre.

En la Sierra Norte de Oaxaca, la Destiladora de Resina y Derivados Ixtepeji, se dedica a la extracción de resina de pino. Joel León Pérez, coordinador de la Unidad Santa Catarina Ixtepeji, detalla para grupo NVI NOTICIAS (<http://old.nvinoticias.com>), que la actividad maderable se ha posicionado como la primera fuente de empleo para miles de familias en la comunidad.

“La existencia de aserraderos de pino nos ha dado al menos cuatro productos los cuales expendemos y nos ha dado ingresos: madera, aceite de pino y aguarrás de pino. La resina de pino –detalla Joel León - se extrae directamente del tronco, de una manera sencilla y amable con el bosque”.

Para las comunidades resineras de Oaxaca, este es ya un negocio que funciona, pero que de mejorar los procesos de los nuevos resineros, impactaría no sólo en los recursos de cada integrante sino de toda la comunidad.

Ellos, refiere el coordinador, están en constante capacitación para lograr una mejor extracción de la resina. Los resineros extraen la secreción de los pinos con precisión para no lastimar al árbol. Esa secreción es la resina. Cuando ésta se destila se produce aguarrás y la brea.

El principal uso del aguarrás ha sido como disolvente de pinturas o como materia prima para fabricar pinturas y barnices. Otros usos incluyen la elaboración de fragancias. Además, la brea tiene la capacidad de aumentar la fricción para el uso de violinistas, bailarinas y pitcheress de béisbol.

Por su parte, la Real Academia de la Lengua Española, da las siguientes definiciones:

**Resina:** es la sustancia sólida o de consistencia pastosa, insoluble en el agua, soluble en el alcohol y en los aceites esenciales, y capaz de solidificar en contacto con el aire, obtenida naturalmente como producto que fluye de varias plantas.

**Trementina:** es un jugo casi líquido, pegajoso, odorífero y de sabor picante, que fluye de los pinos, abetos, alerces y terebintos. Se emplea principalmente como disolvente en la industria de pinturas y barnices. También se conoce como miera y algunas veces como resina.

**Aguarrás:** Aceite volátil de trementina, usado principalmente como disolvente de pinturas y barnices. También se la conoce como trementina o esencia de trementina.

**Colofonia:** Resina sólida, producto de la destilación de la trementina, empleada en farmacia y para otros usos. A veces se utiliza el término resina para nombrar a este producto sólido.

#### *1.4.5. Estabilizantes artificiales y comerciales*

Son principalmente productos químicos manufacturados, desarrollados en un principio para estabilizar la tierra empleada en la construcción de carreteras. Estos estabilizadores químicos trabajan esencialmente como impermeabilizantes. En general, no mejoran la resistencia a compresión del suelo.

Por otro lado, Martínez Camacho (2007), comenta que el proceso de consolidación de la arquitectura de tierra ha sido ampliamente estudiado aunque a la fecha aún no se ha encontrado “el material” que restituya las propiedades mecánicas perdidas y a la vez permita la conservación del material a largo plazo.

El adobe, por tratarse de un material de naturaleza inorgánica, se comenzó experimentando con consolidantes que se utilizaban para el tratamiento de la roca, obteniendo resultados muy cuestionables donde no se resolvía por completo la problemática. Comúnmente se han usado polímeros aplicados por aspersión que en un inicio logran generar una repulsión al agua en la superficie, pero que ignoran por completo la naturaleza de la tierra como, por ejemplo, su capacidad de respiración.

Esto ocasiona que después de un periodo considerable de tiempo, la superficie de la tierra que tiene el consolidante se desprenda ya que el polímero genera una barrera a la

humedad en estado gaseoso que se acumula debajo de la superficie creando una zona húmeda y frágil. Se ha experimentado tanto con productos sintéticos industrializados como con técnicas tradicionales, siendo éstas últimas las que mejor han funcionado.

En la práctica se han utilizado las resinas sintéticas termoplásticas y ethoxysilanos con el fin de remplazar las uniones naturales del material que han sido destruidas por los factores de deterioro. Las resinas sintéticas son polímeros orgánicos de largas cadenas compuestos por un vasto rango de monómeros. Para la consolidación del adobe se ha experimentado con polisocianatos, acetatos de polivinilo y acrílicos. Éstas se utilizan en soluciones con solventes orgánicos, en emulsiones acuosas o de reacción in situ.

Las emulsiones acuosas que contienen sulfactantes como aditivos pueden incrementar la velocidad del deterioro de la resina por la oxidación, generalmente ocasionada por la incidencia de radiación ultravioleta y oxígeno, lo que resulta en un rompimiento y entrecruzamiento de cadenas poliméricas. A nivel visual, estos cambios moleculares ocasionan un cambio de color, brillo y pérdida de propiedades mecánicas como cohesión y dureza.

El uso de agua como vehículo o disolvente no es del todo recomendable para la consolidación de técnicas de arquitectura de tierra ya que la naturaleza de la arcilla, por su capacidad de adsorción, disminuye las propiedades mecánicas con el riesgo de cambios del volumen del material durante el proceso. Además, los líquidos no polares tendrán un menor ángulo de contacto ya que la atracción interna de las moléculas del líquido es menor y por lo tanto, tienen una tensión superficial más baja que los líquidos polares (como el agua).

Como método de impregnación la experiencia recomienda inyectar ya que la aplicación superficial genera capas que pueden provocar un mayor deterioro al material

por la diferencia de durezas, o por no permitir el libre tránsito de agua del corazón a la superficie. Pero ésta técnica tiene la desventaja de no permitir el control de la cantidad de consolidante que se aplica, ni tampoco la velocidad de reacción de éste, ni el área de impregnación.

La aplicación por aspersión reduce el riesgo de la formación de capas ya que habrá mayor penetración en las partes más porosas que en el resto del material, dejando una separación irregular entre las partes tratadas y las no tratadas, logrando así disminuir a su vez el riesgo de contracción que tienen las capas homogéneas. (Martínez, 2007).

*a) Uso de resinas acrílicas*

Los polímeros de origen acrílico no han tenido buenos resultados para la consolidación de adobe ya que se quedan en superficie formando capas duras que tienden a desprenderse. Éstos cambian por completo la porosidad de la superficie y son incompatibles con los cambios físicos naturales del adobe. Se han utilizado Acryloid B72 en Bolivia diluido al 5% en tolueno y aplicado con brocha con malos resultados. En la zona arqueológica de Chan Chan en Perú se utilizó un mortero con arena, tierra y Mowilith DMIH en solución acuosa al 5 y al 10%, lo que ocasionó que se formara una capa dura e hidrofóbica que causó un mayor daño al adobe. (Martínez, 2007).

*b) Solución de silicato de sodio*

El silicato de sodio, conocido como «vidrio soluble», es barato y disponible en muchas partes del mundo. Trabaja mejor con suelos arenosos, como arenas arcillosas y arenas limosas, pero no es adecuado para suelos arcillosos.

El silicato de sodio trabaja como impermeabilizante y también evita el crecimiento de hongos. Si es mezclado con el suelo, la cantidad usual es de 5%. Sin embargo, es mejor emplearlo como recubrimiento superficial, ocupando silicato de sodio comercial con agua limpia en una proporción de 1:3.

Los bloques de suelo son sumergidos en la solución aproximadamente por un minuto, después que se aplica la solución con una brocha dura. Se repite el procedimiento por segunda vez y se dejan secar los bloques en un lugar protegido por siete días como mínimo. Se obtiene una penetración más profunda de la solución, añadiendo una pequeña cantidad de algún agente activo superficial. (Martínez, 2007).

#### *c) Uso de silicato de etilo*

Este material se ha utilizado en el adobe aplicado por aspersión y por inyección. El silicato de etilo es un compuesto inorgánico (éster de silicio) formado por iones de dióxido de silicio hidratado, unidos a radicales alquilo.

El silicato de etilo no es un adhesivo, solamente un consolidante que reacciona a través de hidrólisis donde algunos grupos ethoxy interactúan con los grupos OH de las arcillas del adobe. Este tratamiento no se puede aplicar en superficies húmedas porque el exceso de agua provoca que aumente la rapidez de reacción ocasionando que se forme una capa brillante y frágil que no llega a unirse con las arcillas. Después de este tratamiento se puede hacer limpieza superficial y extracción de sales del adobe aunque se menciona que después de 20 años no lo protege de la migración de sales aunque si mantiene la repelencia a la lluvia.

Este producto se debe de aplicar con un gran control de las condiciones y forma de aplicación para obtener resultados satisfactorios, además que es de costo elevado.

Teóricamente se considera que permite subsecuentes tratamientos con el mismo tipo de material. En Europa se han hecho estudios recientes con diferentes tipos de silicatos de etilo que han demostrado gran efectividad para la consolidación de adobe en ambientes estabilizados. (Martínez, 2007).

*d) Uso de geotextiles, aplanados de sacrificio y re-enterramiento*

Ya que las diferentes técnicas constructivas de la arquitectura de tierra deben tener una cubierta para evitar su disgregación, se ha optado en los casos en que el material téreo está expuesto por reponerle sus aplanados para solucionar el problema y lograr consolidar de cierto modo su superficie. Los geotextiles son mallas hechas con mezclas de polímeros que permiten el paso de agua de un lugar a otro.

Se han utilizado como cubiertas para evitar el paso de roedores e insectos nocivos, como refuerzos estructurales en grietas o bien como interfasas cuando se opta por la restitución de aplanados también llamados capas de sacrificio. Para proteger los muros con este tipo de capas, se han hecho pruebas con mezclas de tierra y polímeros como el látex, co-polímeros de acetatos vinílicos y acrílicos, cuidando que no sean muy fuertes, ya que de ser así crean interfasas que impiden el paso de agua entre el muro y el aplanado.

Se considera que el uso de aplanados de sacrificio es un método prometedor por la eficacia que ha presentado y es el más utilizado en todo el mundo, aunque se ha de tener cuidado que estos aplanados cumplan ciertas características, como que no cambien el color del original, ya que los colores de los suelos varían entre los colores crema, verde, ocre, anaranjado, café y negro, por lo que se recomienda utilizar una mezcla que tenga una gran similitud de color tomando en cuenta que éste cambia al secar, al igual que en

sus propiedades físicas como dureza y porosidad. Esto se puede hacer recuperando los bancos de arcilla y las técnicas de preparación originales.

Se recomienda antes de colocar los nuevos aplanados eliminar primero el material disgregado y humectarlo ligeramente para colocar el nuevo enlucido y diferenciarlo del original lo que se puede hacer con un ligero cambio de color o con capas intermedias (geotextil). En casos donde la protección y la preservación del edificio no sean posibles, se recomienda el re-enterramiento de las estructuras expuestas con arenas lavadas. Este puede ser utilizando un geotextil para diferenciar las estructuras y no se recomienda que se utilice la misma tierra proveniente de la excavación ya que al ser removida se incrementa su permeabilidad y puede incrementar los deterioros por filtración de humedad. (Martínez, 2007).

*e) Cubiertas de protección*

Estas cubiertas se utilizan principalmente para disminuir los efectos del intemperismo y particularmente como aislantes para el agua de lluvia. Los diseños deberán ser analizados con cuidado por un equipo interdisciplinario para que se cumpla con los requisitos de conservación, presentación y comprensión del sitio.

Muchas veces se hacen retomando los espacios arquitectónicos originales (por ejemplo en Paquimé donde se hace la reconstrucción de las habitaciones) y que éstas no generen condiciones ambientales al interior que provoquen nuevos daños (microclimas) y que tengan una inclinación adecuada para canalizar el agua de lluvia que se acumule en ellas. (Martínez, 2007).

## **1.5. Objetivos**

### ***1.5.1. Objetivo general***

Analizar agregados naturales para que en combinación con el suelo, mejoren las propiedades de permeabilidad y mecánicas del adobe, determinando el material adecuado a adicionar y su proporción adecuada.

### ***1.5.2. Objetivos específicos***

- 1.** Clasificar el suelo con base en el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).
- 2.** Realizar pruebas de permeabilidad y de compresión en cubos con mezclas con agregados naturales para seleccionar la mejor opción a utilizar en adobes.
- 3.** Realizar pruebas mecánicas (compresión y flexión) y de permeabilidad en adobes, con un agregado natural que combinando con el adobe aumente su impermeabilidad; con base en normas reglamentarias de bloques cerámicos.





## CAPÍTULO 2. MARCO REFERENCIAL



## CAPÍTULO 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1. Caracterización del suelo para su uso como adobe

La caracterización del suelo se lleva a cabo mediante pruebas de laboratorio para determinar sus propiedades físicas y químicas. En las pruebas químicas se realiza el análisis químico cuantitativo y en las pruebas físicas se realizan actividades como: ubicación del banco de suelo, evaluación de la humedad del suelo del lugar, muestreo, secado, disgrgado, cuarteo y determinación de la humedad de la muestra. Establecidas las pruebas preliminares del suelo, se realizan las pruebas de granulometría, de Atterberg, de contracción lineal, de densidad de sólidos y la clasificación del tipo de suelo. Para determinar la clasificación del tipo de suelo se toma como base el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) con base en los índices de plasticidad y límite líquido.

#### 2.1.1. Muestreo

El muestreo del suelo se efectúa para obtener una porción representativa del material a utilizar y que éste sea representativo de toda la población. Usualmente se emplea para evaluar sus características físicas y químicas. La muestra consiste en una mezcla de porciones de suelo tomadas al azar de un terreno homogéneo. El peso mínimo de la muestra será de 40 kilogramos, la muestra deberá obtenerse representativamente, del suelo a estudiar mediante el procedimiento de “cuarteo”, que consiste en mezclar el material producto de la excavación, después formar un cono que es seccionado en cuadrantes de donde se toma la muestra para obtener la porción representativa del banco. (SAHOP, 1980).

### ***2.1.2. Secado***

El secado tiene por objeto facilitar la disagregación y manejo de las muestras, cuando su contenido de agua es tal, que no se pueden disgregar fácilmente. El secado de las muestras puede ser:

Al sol: la muestra se extiende en charolas o en un patio expuesto a la radiación solar.

En horno: la temperatura deberá ser de 60°C y mantenerse constante; es importante decir que el secado del material no debe realizarse a temperaturas altas ya que altera sus características, tales como su cohesión, plasticidad y contenido de materia orgánica. (SAHOP, 1980).

### ***2.1.3. Disgregado***

Consiste en separar las diferentes partículas aglomeradas que constituyen la muestra, para que ésta pueda ser mezclada y cuarteada y así obtener porciones representativas de la misma. Esta operación es relativamente fácil si se trata de materiales granulares con pocos finos y pocos plásticos; la dificultad aumenta si la muestra contiene una cantidad apreciable de grava alterada que ha de disgregarse, separando con el proceso las partículas que la constituyen, hasta quedar parcial o totalmente reducidas a sus fracciones más pequeñas. La disagregación de las muestras se efectuará sin romper las partículas duras, llevándose a un grado tal que permita reproducir en lo posible las condiciones de utilización del material en el campo. (SAHOP, 1980).

#### **2.1.4. Cuarteo**

Se realiza para obtener porciones representativas de tamaño adecuado de una muestra, para efectuar las pruebas de laboratorio que se requieran.

El procedimiento consiste en mezclar todo el material de la muestra disgregada hasta que presente un aspecto homogéneo, traspaleándolo de un lugar a otro aproximadamente cuatro veces, sobre una superficie horizontal, lisa y limpia, de preferencia cubierta con una lona.

Si se utiliza una lona ahulada, el material se deposita sobre ella y se mezcla levantando simultáneamente dos vértices opuestos de la lona, haciendo rodar la muestra sin que resbale y evitando que el material se salga de ella. Se repite la misma operación con los otros dos vértices y así sucesivamente, hasta lograr la mezcla homogénea del material.

Una vez homogeneizada la muestra, se forma un cono, depositando con la pala el material en el vértice del mismo, para que se acomode por sí solo y procurando a la vez que la distribución se haga uniformemente.

Se forma un cono truncado, encajando la pala en el vértice del cono original y haciéndola girar alrededor de su eje con el fin de ir desalojando el material hacia la periferia, hasta dejarlo con una altura de 15 a 20 cm. Enseguida, el cono truncado se separa en cuadrantes sensiblemente iguales, con la ayuda de una regla de dimensiones adecuadas al volumen de la muestra.

Sobre una charola se junta el material de dos cuadrantes opuestos, en caso de ser necesario, se repite el procedimiento descrito las veces necesarias para obtener la porción del tamaño requerido para la prueba de que se trate. Se debe tener cuidado de distribuir y

de no perder el material fino en cada operación de cuarteo, para lo cual se contará con la ayuda de una brocha.

El procedimiento de cuarteo también puede realizarse utilizando un cuarteador de muestras. (SAHOP, 1980).

### ***2.1.5. Pruebas de compactación***

Compactación se refiere a la aplicación de cierta energía o cantidad de trabajo por unidad de volumen, para conseguir una reducción de los espacios entre las partículas sólidas de un suelo, con el objeto de mejorar sus características mecánicas. Al obtenerse un mejor acomodo de las partículas sólidas y la expulsión de aire que contiene el suelo, se produce un aumento de su peso volumétrico o específico.

Si a un suelo cuya humedad es baja, se le van dando ciertos incrementos a su contenido de agua y se le aplica cada vez la misma energía de compactación, su peso volumétrico va aumentando, propiciado por la acción lubricante del agua, hasta que llegue a un momento en el que el peso volumétrico del material seco, calculado a partir del peso volumétrico del material húmedo y de la humedad, alcanza un valor máximo.

Al contenido de agua con el que se obtiene el mejor acomodo de partículas y el mayor peso volumétrico o específico del material seco, para una determinada energía de compactación, se le denomina **humedad óptima** y al peso volumétrico correspondiente, se le designa como **peso volumétrico o peso específico seco máximo**. (Polanco Rodríguez).

Cuando a partir de esta condición de humedad óptima y peso volumétrico seco máximo, se incrementa el agua para un mismo volumen, el agua con el aire remanente

ocuparían el lugar de algunas partículas de suelo, obteniéndose en consecuencia pesos volumétricos que van siendo menores a medida que el agua aumenta.

Si en un sistema de ejes coordenados se sitúan los puntos correspondientes a cada peso volumétrico seco con su respectiva humedad y se unen con una curva, quedará representada la variación del peso volumétrico de un material para diferentes contenidos de agua y una misma energía de compactación; esta curva adopta aproximadamente la forma de una parábola, siendo más pronunciada su curvatura en el caso de suelos arenosos que en los suelos arcillosos.

El contenido de agua óptimo y el peso volumétrico seco máximo de un suelo, también varían con la energía de compactación; cuando ésta se aumenta, se obtienen mayores pesos volumétricos secos máximos con humedades óptimas menores. A su vez, la humedad óptima y el peso volumétrico seco máximo son función del tipo de suelo; los suelos gruesos, para una misma energía de compactación, tienen en general mayores pesos volumétricos y menores contenidos de agua que los suelos finos.

De acuerdo con la naturaleza de los materiales y con el uso que se les pretenda dar, se han establecido procedimientos de prueba para llevar a cabo la compactación de los suelos en el laboratorio. Tomando en cuenta la forma de aplicar la energía al material, las pruebas de compactación que generalmente se emplean son de los siguientes tipos:

- a) Por impactos, como son las pruebas de: compactación dinámica AASHTO estándar, Proctor SOP, AASHTO modificada de 3 y 5 capas y los Métodos de California y de Texas.
- b) Por carga estática, como es la prueba de compactación Porter.
- c) Por amasado, como es el método de compactación de Hveem.

- d) Por vibración, como es el método de compactación en que se utiliza una mesa vibratoria.

**La prueba de compactación AASHTO estándar**, permite determinar el peso específico seco máximo y la humedad óptima en suelos que se emplean en la construcción de terracerías. El método consiste esencialmente en preparar especímenes utilizando una misma mezcla de material con diferentes grados de humedad, compactándolo mediante impactos. La prueba tiene 4 variantes:

**Variante A.** Se aplica para materiales que pasen por la malla Nº 4.75 y se usará un molde de 101.6 mm de diámetro interior.

**Variante B.** Se aplica para materiales que pasen por la malla Nº 4.75 y se usará un molde de 152.4 mm de diámetro interior.

**Variante C.** Se aplica para materiales que pasen por la malla Nº 4.75 y se efectuará utilizando la fracción que pasa por la malla Nº 19.0 y se compactará en un molde de 101.6 mm de diámetro interior.

**Variante D.** Se aplica para materiales que pasen por la malla Nº 4.75 y se efectuará utilizando la fracción que pasa por la malla Nº 19.0 y se compactará en un molde de 152.4 mm de diámetro interior.

Para la elección del tamaño del molde a usar se tomará en cuenta la conveniencia de utilizar especímenes más pequeños o la necesidad de emplear muestras de mayor tamaño según los problemas de la obra en particular. Para materiales que frecuentemente contengan partículas retenidas en la malla Nº 4.75, que se degraden fácilmente, o que

presentan problemas de reproductividad, es conveniente compactarlos en un molde de mayor diámetro.

De una muestra seca y disgregada se obtiene por cuarteo una porción de 4 kilogramos aproximadamente para las variantes A y C; en tanto, para las variantes, B y D se toman 7.5 kilogramos, aproximadamente.

Para las variantes A y B se verifica que la muestra de prueba pase por la malla N° 4.75 y de existir alguna partícula retenida en dicha malla se elimina. Para el caso de las variantes C y D se criba la muestra por la malla N° 19.0 y si existe retenido se elimina; a continuación se disgregan los grumos y se mezcla perfectamente el material que constituye la muestra de prueba.

Se calcula el peso específico seco máximo mediante:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{100 + w} \times 100 \dots [2.1.5.1]$$

Dónde:

$\gamma_d$  = Peso específico seco del espécimen, en kg/m<sup>3</sup>

$\gamma_w$  = Peso específico húmedo del espécimen, en kg/m<sup>3</sup>

w = contenido de agua de la muestra, en %

Con los valores obtenidos se grafica el peso específico máximo de la muestra, que consiste en dibujar mediante coordenadas el punto correspondiente a cada muestra, tomando como ordenada al peso específico seco y como abscisa la humedad respectiva definiendo así la curva del peso específico seco máximo. El punto más alto de dicha curva es el que representa el peso específico seco máximo  $\gamma_d$  máximo y la humedad óptima del material.

### ***2.1.6. Sistema unificado de clasificación de suelos***

La determinación y cuantificación de las diferentes propiedades de un suelo tienen como objetivo último el establecimiento de una división sistemática de los diferentes tipos de suelos existentes, atendiendo a la similitud de sus caracteres físicos y sus propiedades geomecánicas.

En 1942 Arthur Casagrande ideó este sistema genérico de clasificación de suelos, que empleó el Cuerpo de Ingenieros del ejército de los EE.UU. para la construcción de pistas de aterrizaje durante la II Guerra Mundial. Diez años más tarde fue modificado ligeramente por el Bureau of Reclamation, naciendo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Unified Soil Classification System (USCS)).

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) es un sistema de clasificación de suelos usado en ingeniería y geología para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo; este sistema fue adoptado por la ASTM (American Society of Testing Materials) como parte de sus métodos normalizados.

Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se representa mediante unos símbolos de grupo, consistentes en un prefijo que designa la composición del suelo y un sufijo que matiza sus propiedades. (Tabla 2.1.6.1). Para clasificar el suelo hay que realizar previamente una granulometría del suelo mediante tamizado.

Tabla 2.1.6.1.  
*Símbolos de grupo (SUCS)*

TIPO DE SUELO	PREFIJO	SUBGRUPO	SUFijo
<b>Grava</b>	G	Bien graduado	W
<b>Arena</b>	S	Pobremente graduado	P
<b>Limo</b>	M	Limoso	M
<b>Arcilla</b>	C	Arcilloso	C
<b>Orgánico</b>	O	Límite líquido alto (> 50)	L
<b>Turba</b>	Pt	Límite líquido bajo (<50)	H

Fuente: Polanco Rodríguez.

En función de estos símbolos, pueden establecerse diferentes combinaciones que definen el tipo de suelo (Tabla 2.2.6.2).

Tabla 2.1.6.2.

*Tipología de suelos (SUCS)*

SÍMBOLO	CARACTERÍSTICAS GENERALES		
<b>GW</b>	( >50% en tamiz #4 ASTM )	Limpias (finos < 5%)	Bien graduadas
<b>GP</b>			Pobremente graduadas
<b>GM</b>		Con finos (finos > 12%)	Componente limoso
<b>GC</b>			Componente arcilloso
<b>SW</b>	( >50% en tamiz #4 ASTM )	Limpias (finos < 5%)	Bien graduadas
<b>SP</b>			Pobremente graduadas
<b>SM</b>		Con finos (finos > 12%)	Componente limoso
<b>SC</b>			Componente arcilloso

<b>ML</b>	<b>LIMOS</b>	Baja plasticidad (LL < 50)
<b>MH</b>		Alta plasticidad (LL > 50)
<b>CL</b>	<b>ARCILLAS</b>	Baja plasticidad (LL < 50)
<b>CH</b>		Alta plasticidad (LL > 50)
<b>OL</b>	<b>SUELOS ORGÁNICOS</b>	Baja plasticidad (LL < 50)
<b>OH</b>		Alta plasticidad (LL > 50)
<b>PT</b>	<b>TURBA</b>	Suelos altamente orgánicos

Fuente: Polanco Rodríguez.

Como puede observarse en la tabla anterior, existe una distinción entre tres grandes grupos de suelos:

- (a) Suelos de grano grueso (G y S): Formados por gravas y arenas con menos del 50% de contenido en finos, empleando el tamiz #200 ASTM.
- (b) Suelos de grano fino (M y C): Formados por suelos con al menos un 50% de contenido en limos y arcillas.
- (c) Suelos orgánicos (O, Pt): Constituidos fundamentalmente por materia orgánica. Son inservibles como terreno de cimentación.

Asimismo, dentro de la tipología expuesta pueden existir casos intermedios, empleándose una doble nomenclatura; por ejemplo, una grava bien graduada que contenga entre un 5 y un 12% de finos se clasificará como GW-GM.

Tras un estudio experimental de diferentes muestras de suelos de grano fino, se consigue ubicarlos en un diagrama que relaciona el límite líquido (LL) con el índice de plasticidad (IP); este diagrama es conocido como carta de plasticidad (Fig. 2.1.6.1)

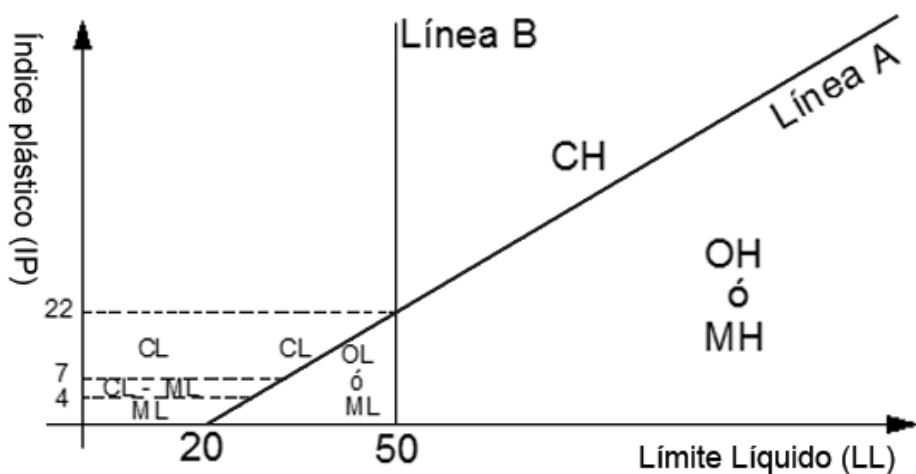


Fig. 2.1.6.1. Carta de plasticidad. Fuente: Juárez, 2007.

### 2.1.7. Granulometría

Se denomina clasificación granulométrica o granulometría, a la medición y graduación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios, así como de los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

El análisis granulométrico se emplea de forma muy habitual. Es común para la identificación y caracterización de los materiales geológicos en la Ingeniería. También se usa para determinar si esa granulometría es conveniente para producir concreto o usarlo como relleno en una construcción civil.

Esta prueba consiste en separar por tamaños las partículas de suelo, pasándolo a través de una sucesión de mallas de aberturas cuadradas y en pesar las porciones que retienen en cada una de ellas, expresando dichos retenidos como porcentajes en peso de la muestra total.

Si las partículas de un material tienen forma laminar, es decir de lajas o agujas, respectivamente, los resultados que se obtengan no serán representativos de los tamaños reales del material y en consecuencia, de su comportamiento.

Generalmente, la mayor estabilidad de un suelo se alcanza cuando la cantidad de vacíos es mínima y para que esta condición pueda lograrse, se requiere que el material tenga una sucesión adecuada de tamaños que permita que los huecos resultantes del acomodo de las partículas mayores, sean ocupadas por partículas menores y que a su vez, los huecos que dejan estas últimas sean ocupadas por partículas más finas y así sucesivamente.

#### *Análisis granulométrico por lavado*

Para conocer el porcentaje del material que pasa el tamiz N° 200 (0.075mm) la muestra de suelo seca disgregada se someterá a un lavado previo, colocándola en un recipiente previsto de vertedero y aplicándole corriente de agua en forma continua, de tal manera que derrame sobre el tamiz N° 200, convenientemente colocada; durante este proceso la muestra se removerá en forma adecuada para propiciar el arrastre de la fracción fina (SAHOP, 1980).

Posteriormente, se coloca el material en un vaso metálico con capacidad de un litro y se le agregan 500 centímetros cúbicos de agua, aproximadamente, dejándose en reposo durante doce horas como mínimo. Transcurrido este tiempo, se “lava” la muestra a través del tamiz N° 200. Inmediatamente después se decanta la suspensión sobre el tamiz N° 200 para facilitar el paso de las partículas finas a través de la malla.

A continuación se seca el material en el mismo vaso metálico en un horno que mantenga una temperatura constante de  $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , durante un lapso no menor de 16 horas,

hasta que el material alcance un peso constante, transcurrido este tiempo se saca el vaso del horno y se deja enfriar hasta una temperatura cercana o igual a la ambiente y se determina su peso.

### ***2.1.8. Límites de Atterberg***

El análisis granulométrico permite estudiar el tamaño de estas partículas y medir la importancia que tendrán según la fracción de suelo que representen (gruesos, gravas, arenas, limos y arcillas). Este análisis es suficiente para gravas y arenas, pero cuando se trata de arcillas y limos, turbas y margas se debe completar el estudio con ensayos que definan la plasticidad del material.

Los suelos que poseen algo de cohesión, según su naturaleza y cantidad de agua, pueden presentar propiedades que lo incluyan en el estado líquido, estado semilíquido, estado plástico, estado semisólido y estado sólido. El contenido de agua o humedad límite al que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro. Para determinar la plasticidad del suelo, es necesario determinar los estados de consistencia, esto es, según su contenido de agua en orden decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los estados mencionados.

Dependiendo de su contenido de agua (en porcentaje) con el que el suelo cambia de un estado líquido a un estado plástico se define como límite líquido (LL). Igualmente, los contenidos de agua (en por ciento) con el que el suelo cambia de un estado plástico a un semisólido y de un semisólido a un sólido se definen como el límite plástico (LP) y de contracción (CL), respectivamente; estos se denominan Límites de Atterberg (Casagrande, 1948).

### *Límite líquido*

Es determinado por medio de la copa de Casagrande y se define como el contenido de agua con que se cierra una ranura de  $\frac{1}{2}$ " mediante 25 golpes, es decir, se refiere al contenido de agua de la fracción del suelo que pasa la malla N° 0.425 que al ser colocada en la copa de Casagrande y efectuar una ranura trapecial de dimensiones especificadas, los bordes inferiores de la misma se ponen en contacto en una longitud de trece milímetros con los mismos números de golpes antes mencionados, dejándola caer contra una superficie dura de características especiales, desde una altura de 1 cm, a la velocidad de 2 golpes por segundo. En el método estándar, el límite líquido se determina gráficamente mediante la curva de fluidez, que se obtiene uniendo los puntos que representan los contenidos de agua correspondiente a diversos números de golpes, en que la ranura se cierra en la longitud especificada (SAHOP, 1980).

Para realizar este ensayo, la muestra de suelo debe homogeneizarse con una espátula, posteriormente se coloca una cantidad suficiente de material en la copa de Casagrande, la cual se calibra previamente, se extiende el material con la espátula hasta obtener un espesor de 8 a 10 milímetros en la parte central de la muestra colocada. Para extender el material se procede del centro hacia los lados sin aplicar una presión excesiva y con el mínimo de pasadas de la espátula. Se acciona la manivela de la copa a razón de dos golpes por segundo y se registra el número de golpes necesarios para lograr que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13 milímetros. Realizado lo anterior se toman, con la espátula, aproximadamente 10 g, de la porción cerrada de la ranura y se colocan en un vidrio de reloj para determinar su contenido de agua. La cantidad de agua que se adicione al material deberá ser tal que las cuatro determinaciones queden comprendidas entre 10 y 35 golpes.

Se seca el material en un horno que mantenga una temperatura constante de  $105 \pm 5$  grados centígrados durante 18 horas como mínimo y se calcula la humedad de cada determinación realizada con la fórmula:

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \dots [2.1.8.1]$$

Donde:

$W$  = Humedad, en %

$W_w$  = Peso de la muestra húmeda, en g

$W_s$  = Peso de la muestra seca, en g

#### *Límite plástico*

Se define como el contenido de agua con que el suelo se agrieta al formar un cilindro de  $1/8''$  (3.18 mm) de diámetro. Para determinar el límite plástico se toma una porción de suelo saturado, generalmente del que se empleó para determinar el límite líquido a la que se le da la forma de una pequeña esfera de aproximadamente doce milímetros de diámetro, que deberá moldearse con los dedos para que pierda la humedad y se forme un cilindro manipulándolo sobre la palma de la mano, aplicando con los dedos la presión necesaria. Se rola el cilindro con los dedos de la mano sobre la placa de vidrio, dándole la presión requerida para reducir su diámetro hasta que sea uniforme en toda su longitud y ligeramente mayor de tres milímetros. La velocidad de rolado debe ser de sesenta a ochenta ciclos por minuto, entendiéndose por ciclo un movimiento completo de la mano hacia delante y hacia atrás, hasta volver a la posición de partida. Si, al alcanzar dicho diámetro, el cilindro no se rompe en varias secciones simultáneamente, su humedad es

superior a la del límite plástico, en este caso se debe juntar todo el material, se forma nuevamente una pequeña esfera, manipulándola con los dedos para facilitar la pérdida de agua y lograr una distribución uniforme de la misma.

Se repiten todas las operaciones antes mencionadas, hasta que el cilindro se rompa en varios segmentos precisamente en el momento de alcanzar el diámetro de tres milímetros, dicho diámetro se verificará comparándolo con un alambre de referencia. En seguida se colocan en un vidrio de reloj los fragmentos del cilindro y se efectúa la determinación de la humedad correspondiente.

Los suelos con los que no es posible formar cilindros de diámetro especificado, con ningún contenido de agua, se consideran como no plásticos. Al igual que el límite líquido, las muestras deberán someterse al proceso de pesado y secado para el análisis correspondiente. Para calcular el límite plástico se utiliza la misma ecuación empleada para el cálculo del límite líquido.

### *Índice plástico*

El índice plástico de un suelo mide el intervalo de variación de la humedad donde el suelo presenta una consistencia plástica, los límites líquidos y plásticos corresponden a las fronteras superior e inferior de dicha consistencia, respectivamente. El índice de plasticidad está definido como la diferencia aritmética de sus fronteras que son los límites líquidos y plásticos:

$$IP = LL - LP \dots [2.1.8.2]$$

IP= Índice Plástico, en %

LL= Límite Líquido, en %

LP= Límite Plástico, en %

Cuando un suelo es arenoso y no puede determinarse el límite plástico, se reportan el límite plástico como NP (no plástico). Cuando el límite plástico es igual o mayor que el límite líquido, se reporta el índice plástico como NP.

### *Contracción lineal*

Se define como el porcentaje de contracción con respecto a la dimensión original que sufre una barra de suelo de 2cm x 2cm x 10cm al secarse en un horno a 100-110°C, desde una humedad equivalente a la humedad del límite líquido hasta el límite de contracción. Se aplica la siguiente fórmula para el cálculo de C.L.:

$$CL = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100 \dots [2.1.8.3]$$

Donde:

CL= Es la contracción lineal aproximada al décimo más cercano, en %

L<sub>1</sub>= Es la longitud inicial de la barra de suelo húmedo, que corresponde a la longitud interior del molde, en mm

L<sub>2</sub>= Es la longitud de la barra de suelo seco, en mm

## **2.2. Permeabilidad**

La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable.

La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de tres factores básicos:

- La porosidad del material;
- La densidad del fluido considerado, afectada por su temperatura;
- La presión a que está sometido el fluido.

Para ser permeable, un material debe ser poroso, es decir, debe contener espacios vacíos o poros que le permitan absorber fluido. A su vez, tales espacios deben estar interconectados para que el fluido disponga de caminos para pasar a través del material.

También hay que hablar de una "permeabilidad intrínseca" (también llamada "coeficiente de permeabilidad"); como constante ligada a las características propias o internas del terreno. Y de una "permeabilidad real" o de Darcy, como función de la permeabilidad intrínseca más las de las características del fluido. La capacidad, o medición de la capacidad de una roca, para transmitir fluidos, es medida normalmente en darcies o milidarcies.

El término fue definido básicamente por Henry Darcy, quien demostró que la matemática común de la transferencia del calor podía ser modificada para describir correctamente el flujo de fluidos en medios porosos. Las formaciones que transmiten los fluidos fácilmente, tales como las areniscas, se describen como permeables y tienden a tener muchos poros grandes y bien conectados.

Formaciones impermeables, tales como las lutitas y las limolitas, tienden a tener granos más finos o un tamaño de grano mixto, con poros más pequeños, más escasos o menos interconectados. La permeabilidad absoluta es la medición de la permeabilidad obtenida cuando sólo existe un fluido, o fase, presente en la roca.

La permeabilidad efectiva es la capacidad de flujo preferencial o de transmisión de un fluido particular cuando existen otros fluidos inmiscibles presentes en el yacimiento (por ejemplo, la permeabilidad efectiva del gas en un yacimiento de gas-agua).

Las saturaciones relativas de los fluidos, como así también la naturaleza del yacimiento, afectan la permeabilidad efectiva. La permeabilidad relativa es la relación entre la permeabilidad efectiva de un fluido determinado, con una saturación determinada, y la permeabilidad absoluta de ese fluido con un grado de saturación total.

Si existe un solo fluido presente en la roca, su permeabilidad relativa es 1,0. El cálculo de la permeabilidad relativa permite la comparación de las capacidades de flujo de los fluidos en presencia de otros fluidos, ya que la presencia de más de un fluido generalmente inhibe el flujo.

En geología la determinación de la permeabilidad del suelo tiene una importante incidencia en los estudios hidráulicos portante del sustrato (por ejemplo previo a la construcción de edificios u obras civiles), para estudios de erosión y para mineralogía, entre otras aplicaciones.

También los factores químicos tienen una influencia directa en la permeabilidad. La estructura del suelo se ve influenciada por la naturaleza y la cantidad de iones presentes, es decir, de los elementos que participan directa o indirectamente en todas las actividades hidrodinámicas, químicas y biológicas del suelo.

La permeabilidad del suelo suele aumentar por la existencia de fallas, grietas, juntas u otros defectos estructurales. Algunos ejemplos de roca permeable son la caliza y la arenisca, mientras que la arcilla, margas (rocas sedimentarias de aspecto similar a la caliza, compuestas por arcillas y carbonato de calcio a partes iguales), pizarra o el basalto son prácticamente impermeables.

La permeabilidad es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire. Un estanque construido en suelo impermeable perderá poca agua por filtración. Mientras más permeable sea el suelo, mayor será la filtración. Algunos suelos son tan permeables

y la filtración tan intensa que para construir en ellos cualquier tipo de estanque es preciso aplicar técnicas de construcción especiales.

Muchos factores afectan a la permeabilidad del suelo. En ocasiones, se trata de factores en extremo localizados, como fisuras y cárcavas, y es difícil hallar valores representativos de la permeabilidad a partir de mediciones reales. Un estudio serio de los perfiles de suelo proporciona una indispensable comprobación de dichas mediciones. Las observaciones sobre la textura del suelo, su estructura, consistencia, color y manchas de color, la disposición por capas, los poros visibles y la profundidad de las capas impermeables como la roca madre y la capa de arcilla, constituyen la base para decidir si es probable que las mediciones de la permeabilidad sean representativas.

El tamaño de los poros del suelo reviste gran importancia con respecto a la tasa de filtración (movimiento del agua hacia dentro del suelo) y a la tasa de percolación (movimiento del agua a través del suelo). El tamaño y el número de los poros guardan estrecha relación con la textura y la estructura del suelo y también influyen en su permeabilidad. Por regla general, mientras más fina sea la textura del suelo, más lenta será la permeabilidad.

### **2.3. Pruebas de laboratorio y normas relacionadas**

Existen diversas normas que definen estándares, características y/o procesos para examinar distintas características de materiales utilizados en la construcción, como bloques cerámicos, ladrillos, tabiques y tabicones; dichas normas pueden usarse como pauta para el análisis de resultados de este trabajo, ya que en México no existen normas específicas para caracterizar adobes; por lo cual, las pruebas para evaluar sus resistencias al agua, a la compresión y a la flexión se adaptaron de aquellas utilizadas para otros materiales de construcción, como bloques cerámicos, tabiques y vigas de concreto.

Por ejemplo, la norma NMX-C-006 Industria de la Construcción - Ladrillos y bloques cerámicos de barro, arcilla y/o similares, define que los ladrillos y bloques cerámicos, de barro, arcilla y/o similares son los elementos de construcción, de forma prismática rectangular, obtenidos por moldeo, secado y cocción de pastos cerámicos, de barro, arcilla y/o similares, extruidos o comprimidos. También establece las especificaciones para ladrillos y bloques, macizos y/o huecos, ya sean de pasta cerámica, de barro, arcilla y/o similares: hechos en máquina o a mano.

#### ***2.3.1. Absorción de agua***

La norma NMX - C - 037 establece el método de prueba para la determinación de la cantidad de agua que absorben los bloques, ladrillos o tabiques y tabicones de concreto para la construcción, en las condiciones que se especifican.

El procedimiento que plantea esta norma es que se deben registrar las masas de 5 especímenes ya secos y se sumergen en agua a temperatura entre 290 y 296 K (17 y 23 °C) por un período de 24 horas; terminado este período se sacan y se elimina el agua

superficial con un paño o papel absorbente; se seca también el interior de las celdas, y se vuelve a determinar su masa.

Se registra la masa del espécimen sumergido en agua y se procede de igual manera con los 5 especímenes.

Tras realizar los pasos anteriores se calcula el volumen de agua absorbida mediante la fórmula siguiente:

$$A = \frac{M_{ssss} - M_s}{M_s - P_a} \times 1000 \dots [2.3.1.1]$$

En donde:

A= el volumen de agua absorbida referido al volumen del espécimen en  $\text{dm}^3/\text{m}^3$

$M_s$ = Masa seca del espécimen en kg

$M_{ssss}$ = Masa saturada y superficialmente seca en kg

$P_a$ = Peso ahogado en kg

Y para obtener la absorción en porcentaje se utiliza la fórmula:

$$A = \frac{M_{ssss} - M_s}{M_s} \times 100 \dots [2.3.1.2]$$

### **2.3.2. Resistencia a la compresión axial**

La resistencia a compresión es el esfuerzo último alcanzado en un material antes de fallar cuando se le aplica una carga que trata de estrecharlo. El estudio de esfuerzos y deformaciones en materiales se basa en la Ley de Hooke. La fuerza por unidad de área que soporta un material se suele denominar *esfuerzo* en el material. Matemáticamente se expresa en la forma:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \dots [2.3.2.1]$$

En donde:

$\sigma$  = esfuerzo o fuerza por unidad de área, en Pa.

P = carga aplicada, en N.

A = área de la sección transversal, en m<sup>2</sup>.

El esfuerzo máximo de compresión tiene lugar en una sección perpendicular a la carga.

Los materiales como tabiques, ladrillos, bloques compactados etc., se ensayan a la compresión, debido a que en la práctica están sometidos a este tipo de esfuerzos. Estos pueden tener problemas debido a la fricción entre los extremos de la muestra y las masas de carga.

En los ensayos de compresión, la resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima P en la máquina de prueba (Newtons) entre el área promedio A de las áreas netas de las superficies de soporte superior e inferior del espécimen (m<sup>2</sup>). La resistencia a la compresión se expresa en Pascales (N/ m<sup>2</sup>).

### 2.3.3. Características de los materiales

La norma N-CMT-2-01-001/002 Parte: Materiales para estructuras, título: 01. Materiales para mamposterías, capítulo: 001 Ladrillos y bloques cerámicos, establece los requisitos de calidad de los ladrillos y bloques cerámicos que se utilizan en elementos estructurales de mampostería.

Los ladrillos y bloques cerámicos son elementos de forma paralelepípeda ortogonal, sólidos o huecos, fabricados mediante el moldeo, extrusión o compresión, secado y cocción de arcilla. Pueden ser fabricados con máquina o a mano y se clasifican en subtipos y grados de calidad (Tabla 2.3.3.1).

Tabla 2.3.3.1.

*Clasificación de los ladrillos y bloques cerámicos*

Fabricación	Subtipos	Grados de calidad
<b>Con máquina</b>	Macizos: Compactados en toda su masa. Admiten perforaciones perpendiculares a sus caras.	A-B-C-D
	Perforados: Tienen perforaciones generalmente perpendiculares a las caras mayores y su distribución sobre la superficie total es uniforme.	B-C-D
	Huecos verticales: Los huecos están dispuestos perpendicularmente a la cara mayor del ladrillo o bloque.	C-D
	Huecos horizontales: Los huecos están dispuestos paralelamente a la cara mayor del ladrillo o bloque.	D-E
<b>A mano</b>	Macizos: Usualmente no llegan a desarrollar ligas cerámicas y son solamente macizos.	E

Fuente: Norma N-CMT-2-01-001

Los ladrillos y bloques cerámicos deberán cumplir con la resistencia a la compresión simple, adherencia y absorción de agua, que se indican en las tablas de características físicas para los elaborados con máquina (Tabla 2.3.3.2) y para los elaborados a mano (Tabla 2.3.3.3).

Tabla 2.3.3.2.

*Características físicas para ladrillos y bloques cerámicos fabricados con máquina*

Características	Subtipos											
	Macizo				Perforado				Hueco vertical		Hueco horizontal	
	Grados											
	A	B	C	D	B	C	D	C	D	D	D	E
Resistencia a la compresión simple; MPa, mínima	20	12	8	4	8	6	4	10	4	4	4	2
Adherencia; MPa, mínima	0.4	0.3	0.2	0.17	0.3	0.2	0.17	0.2	0.17	0.2	0.2	0.17
Absorción de agua; %, máxima	12	16	18	20	16	18	20	16	18	18	20	

Fuente: Norma N-CMT-2-01-001

Tabla 2.3.3.3.

*Características físicas para ladrillos y bloques cerámicos fabricados a mano*

Característica	Valor
	Subtipo Macizo, Grado de calidad E
Resistencia a la compresión simple; MPa, mínima	2
Adherencia; MPa, mínima	0.15
Absorción de agua; %, máxima	24

Fuente: Norma N-CMT-2-01-001

### **2.3.4. Resistencia a la flexión**

Se conoce como resistencia a la flexión a los ensayos realizados para conocer la deformación que presentan en la dirección perpendicular a su eje longitudinal elementos estructurales alargados tales como vigas, bloques y ladrillos, es decir, elementos diseñados para trabajar principalmente por flexión. El concepto de flexión también se aplica a elementos estructurales superficiales como placas o láminas. La resistencia a la flexión es significativa en el diseño del pavimento y se utiliza para determinar el grosor de losas.

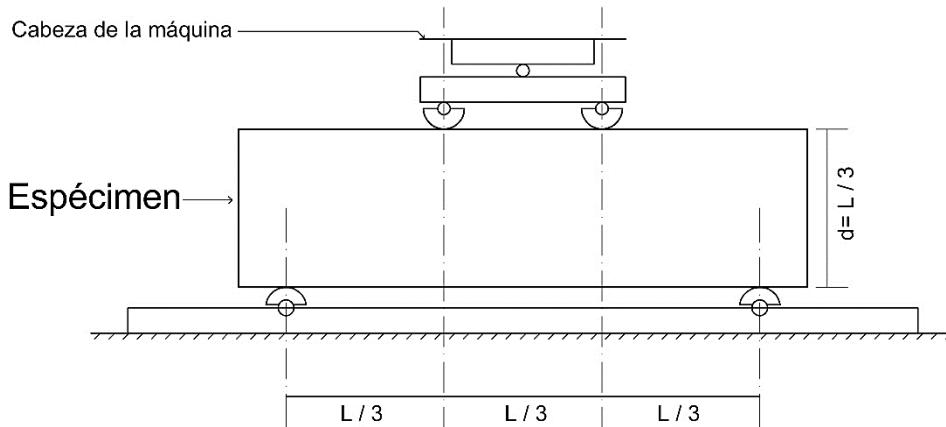
Un objeto sometido a flexión presenta un momento flector que es perpendicular al eje longitudinal a lo largo del cual se produce la flexión. Éste, es un momento de fuerza resultante de una distribución de tensiones sobre una sección transversal de un prisma mecánico flexionado o una placa.

El Método de Prueba Estándar para la Resistencia a la Flexión del Suelo-Cemento utilizando Viga Simple con Tercer Punto de Carga D 1635 - 00, norma emitida por la ASTM, cubre la determinación de la resistencia a la flexión del suelo-cemento mediante el uso de un haz simple con carga de tercer punto:

El método de carga del tercer punto utilizado en las pruebas de flexión del suelo-cemento empleará bloques de apoyo que asegurarán que las fuerzas aplicadas a la viga sólo serán verticales y aplicadas sin excentricidad (Fig. 2.3.4.1).

Las muestras de ensayo estándar serán vigas 76 x 76 x 290 mm (3 x 3 x 11 1/4 pulgadas), pero un método de prueba similar puede usarse para probar muestras de otros tamaños. Se puede probar especímenes en sus lados con respecto a su posición moldeada.

Pueden especificarse otros procedimientos de acondicionamiento, tales como remojo en agua, secado al aire o en el horno, humedecimiento y secado alternos o congelación y descongelación alternadas después de un período inicial de curado húmedo. Los procedimientos de curado y acondicionamiento se detallarán en el informe.



*Fig. 2.3.4.1. Diagrama del aparato para la prueba de resistencia a la flexión.*

Fuente: Norma D 1635 ASTM.

#### *Procedimiento*

Se debe girar el espécimen en su lado respecto a su posición moldeada y centrarlo en los soportes de acero semirrígidos inferiores, que han sido espaciados una distancia de tres veces la profundidad de la viga. Se debe colocar el conjunto de bloque de aplicación de carga en contacto con la superficie superior de la viga en los terceros puntos entre los soportes. Se tiene que alinear cuidadosamente el centro de la viga con el centro de empuje del bloque de cabeza asentado esféricamente de la máquina. Cuando este bloque se lleva a cabo sobre el conjunto de carga de haz, gire su parte móvil suavemente a mano de modo que se obtenga un asiento uniforme.

La carga se debe aplicar de forma continua y sin choque. Se puede utilizar una máquina de prueba de potencia de tornillo, con el cabezal móvil funcionando a

aproximadamente 0.02 mm/s (0.05 pulgadas/minuto) cuando la máquina esté funcionando en ralentí, puede utilizarse. Con las máquinas hidráulicas, se debe ajustar la carga a una velocidad tal que la tensión extrema de la fibra esté dentro de los límites de  $690 \pm 39$  kPa/min (100 ± 5 psi). Registre la carga total de fallo de la muestra cuando esté cerca de los 40 N (10 lbf).

#### *Medición de las muestras después de la prueba*

Se deben realizar mediciones a 0.25 mm (0.01 pul.) para determinar el ancho y la profundidad promedio de las muestras en la sección de fallo

#### *Cálculos*

Si la fractura se produce dentro del tercio medio de la longitud del tramo, se debe calcular el módulo de rotura de la siguiente manera:

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad \dots \dots [2.3.4.1]$$

Donde:

R = módulo de rotura, en kPa (psi),                    b = ancho promedio de la muestra, en

P = carga máxima aplicada, en N (lbf)                mm (pulgadas)

L = longitud del tramo, en mm (pulgadas)            d = profundidad media del espécimen, en  
mm (pulgadas)

La masa de la viga no está incluida en el cálculo anterior.

Si la fractura se produce fuera del tercio medio de la longitud del tramo en no más del 5% de la longitud del tramo, calcule el módulo de rotura de la siguiente manera:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad \dots \dots [2.3.4.2]$$

Donde:

a = Distancia entre la línea de fractura y el soporte más cercano, medido a lo largo de la línea central de la superficie inferior de la viga, en mm (pulgadas).

Si la fractura se produce fuera del tercio medio del tramo en más del 5% de la longitud del tramo, se deben desechar los resultados del ensayo.

#### *Precisión y sesgo*

Precisión: La precisión de este método de ensayo no ha sido establecida por un programa de ensayo interlaboratorio. Sin embargo, basándose en los datos de prueba disponibles, lo puede proporcionar un análisis estadístico.

En este trabajo, se realizaron pruebas en adobes; las pruebas de resistencia a la flexión se aplican generalmente sobre vigas y losas, en este sentido, las piezas que se sometieron a esta prueba cumplieron con la condición de proporcionalidad entre el largo, alto y ancho; es decir, que el espesor de los especímenes fuere al menos de un cuarto de su longitud para que se pueda realizar dicha prueba.

## 2.4. Diseño de experimentos

En ingeniería la experimentación desempeña un papel muy importante en el diseño de nuevos productos, el desarrollo de procesos de manufactura y el mejoramiento de procesos. En un sentido literal, un experimento es una prueba; de manera más formal, un experimento puede definirse como una prueba o serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema para observar e identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida. (Montgomery, 2004).

Muchas veces los experimentos incluyen varios factores, por lo que uno de los objetivos del experimentador es determinar la influencia que tienen estos factores sobre la respuesta de salida del sistema. Al enfoque general para planear y llevar a cabo el experimento se le llama estrategia de experimentación, una de ellas es el enfoque de un factor a la vez. Éste consiste en seleccionar un punto de partida o línea base de los niveles, para cada factor, para después variar sucesivamente cada factor en su rango, manteniendo constantes los factores restantes en el nivel base. Después de haber realizado todas las pruebas, se construye, generalmente, una serie de gráficas en las que se muestra la forma en que la variable respuesta es afectada al variar cada factor manteniendo los demás factores constantes.

La desventaja principal de la estrategia de un factor a la vez es que no se pueden tomar en consideración cualquier posible interacción entre los factores. Además son menos eficientes que otros métodos basados en un enfoque estadístico del diseño experimental. Para trabajar con varios factores el enfoque más adecuado es conducir un experimento factorial, que se trata de una estrategia experimental en la que los factores se

hacen variar en conjunto, en lugar de uno a la vez. El diseño factorial está compuesto de factores, niveles o tratamientos y réplicas.

Si quiere llevarse a cabo un experimento con la mayor eficiencia posible, es necesario utilizar un enfoque científico para plantearlo. El diseño estadístico de experimentos se refiere al proceso para planear el experimento de forma que se recaben datos adecuados que puedan analizarse con métodos estadísticos que llevarán a conclusiones básicas y objetivas. Cuando el problema incluye datos que están sujetos a errores experimentales, la metodología estadística es el único enfoque objetivo de análisis. Por lo tanto, cualquier problema experimental incluye dos aspectos: el diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos, los cuales están íntimamente relacionados porque el método de análisis depende directamente del diseño empleado.

Los tres principios básicos del diseño experimental son la realización de réplicas, la aleatorización y la formación de bloques. Por realización de réplicas se entiende la repetición del experimento básico; en las réplicas se reflejan las fuentes de variabilidad tanto entre las corridas como dentro de las mismas. Por aleatorización se entiende que tanto la asignación del material experimental como el orden en que se realizarán las corridas o ensayos individuales del experimento se determinan al azar. La aleatorización correcta del experimento ayuda a “sacar del promedio” los efectos de factores extraños que pudieran estar presentes. (Montgomery, 2004).

Es común el uso de programas de computadora para auxiliar a los experimentadores a seleccionar y construir diseños experimentales. En ocasiones los experimentadores se encuentran en situaciones en las que la aleatorización de un aspecto del experimento es complicada, pero existen métodos de diseño estadístico para resolver

las restricciones sobre aleatorización. La formación de bloques es una técnica de diseño que se utiliza para mejorar la precisión de las comparaciones que se hacen entre los factores de interés.

Para aplicar el enfoque estadístico en el diseño y análisis de un experimento, es necesario que se tenga desde el principio una idea clara de qué es exactamente lo que va a estudiarse, cómo van a colectarse los datos y al menos, una compresión cualitativa de la forma en que van a analizarse estos datos. De manera general, el procedimiento recomendado es:

1. Identificación y exposición del problema.
2. Elección de los factores, los niveles y los rangos.
3. Selección de la variable respuesta.
4. Elección del diseño experimental.
5. Realización del experimento.
6. Análisis estadístico de los datos.
7. Conclusiones y recomendaciones.

En la práctica, los pasos 2 y 3 suelen hacerse simultáneamente o en el orden inverso. Los pasos 1, 2 y 3, componen la planeación previa al experimento. Gran parte de la investigación, en diferentes ramas, es empírica y hace un uso extensivo de la experimentación. Los métodos estadísticos pueden incrementar en gran medida la eficiencia de estos experimentos y con frecuencia pueden fortalecer las conclusiones así obtenidas, por lo que se debe tener presente el uso de conocimientos no estadísticos del problema, mantener el diseño y análisis tan simple como sea posible, tener en cuenta la diferencia entre significación práctica y significación estadística y que generalmente los experimentos son iterativos. (Montgomery, 2004).

### ***2.4.1. Conceptos básicos de la estadística***

Es importante revisar y recordar varios de los conceptos básicos de la estadística, como variables aleatorias, distribuciones de probabilidad, muestras aleatorias, distribuciones de muestreo y pruebas de hipótesis.

A las observaciones de un experimento se le llama corrida; las corridas individuales difieren entre ellas por lo que existen fluctuaciones o ruido en los resultados, comúnmente se le llama error experimental o error. Se trata de un error estadístico, lo cual significa que se origina por la variación que no está bajo control y que generalmente es inevitable. La presencia del error implica que la variable respuesta es una variable aleatoria. Ésta puede ser discreta o continua. Si el conjunto de todos los valores posibles de la variable aleatoria es finito o contablemente infinito, la variable aleatoria es discreta y mientras que si el conjunto de todos los valores posibles de la variable aleatoria es un intervalo, entonces la variable aleatoria es continua.

Para resumir la información de una muestra de datos son útiles los diagramas de puntos, los histogramas y los diagramas de caja (o diagrama de caja y bigotes).

La estructura de la probabilidad de una variable, por ejemplo  $\gamma$ , aleatoria se describe mediante su distribución de probabilidad. Cuando  $\gamma$  es discreta, es común hacer referencia a su distribución de probabilidad, por ejemplo  $p(\gamma)$ , como la función de probabilidad de  $\gamma$ ; cuando  $\gamma$  es continua, es común hacer referencia a su distribución de probabilidad, por ejemplo  $f(\gamma)$ , como la función de densidad de probabilidad de  $\gamma$ .

La media ( $\mu$ ) de una distribución de probabilidad es una medida de su tendencia central o localización. La variabilidad o dispersión de una distribución de probabilidad

puede medirse con la varianza ( $\sigma^2$ ). La media poblacional es un estimador de la media y la varianza poblacional es un estimador de la varianza.

Para los experimentos con un solo factor, suponiendo que se tienen  $a$  tratamientos o niveles diferentes de un solo factor que quieren compararse, la respuesta observada de cada uno de los  $a$  tratamientos es una variable aleatoria.

El procedimiento correcto para probar la igualdad de varias medias es el análisis de varianza, el cual tiene un rango de aplicaciones bastante amplio, siendo probablemente, la técnica más útil en el campo de la inferencia estadística. El nombre análisis de varianza se deriva de la partición de la variabilidad total en sus partes componentes. La suma de cuadrados total corregida se usa como una medida de la variabilidad global de datos, de manera simplificada se representa:

$$SS_T = \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^s y_{ij}^2 - \frac{y^2}{N} \quad \dots [2.4.1.1]$$

La suma de cuadrados entre los tratamientos está representada por:

$$SS_{Tratamientos} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^S y_i^2 - \frac{y^2}{N} \quad \dots [2.4.1.2]$$

Y el error dentro de los tratamientos es la diferencia entre la suma de cuadrados total y la suma de cuadrados entre los tratamientos:

$$SS_E = SS_T - SS_{Tratamientos} \quad \dots$$

Dentro de cualquier tratamiento hay  $n$  réplicas que proporcionan  $n-1$  grados de libertad con los cuales estimar el error experimental. Puesto que hay  $a$  tratamientos, se tienen  $a(n-1) = an-a = N-a$  grados de libertad para el error. Hay  $an = N$  observaciones en total.

Se les llama cuadrados medios a las siguientes cantidades:

$$MS_E = \frac{SS_E}{N - a} \quad \dots \dots [2.4.1.4]$$

$$MS_{Tratamientos} = \frac{SS_{Tratamientos}}{a - 1} \quad \dots \dots [2.4.1.5]$$

Si el cuadrado medio del error (2.4.1.4) estima  $\sigma^2$  y, si no hay diferencias en las medias de los tratamientos, el cuadrado medio de los tratamientos (2.4.1.5) también estima  $\sigma^2$ . Por tanto, es posible hacer una prueba de hipótesis de que no hay diferencias entre los tratamientos comparando  $MS_{Tratamientos}$  y  $MS_E$ .

El teorema de Cochran es útil para establecer la independencia de  $SS_E$  y  $SS_{Tratamientos}$ , ya que implica que  $SS_{Tratamientos}/\sigma^2$  y  $SS_E/\sigma^2$  son variables aleatorias jí-cuadrada con una distribución independiente. Por lo tanto, si la hipótesis nula de que no hay diferencias en las medias de los tratamientos es verdadera, el cociente

$$F_0 = \frac{SS_{Tratamientos}/(a - 1)}{SS_E/(N - a)} = \frac{MS_{Tratamientos}}{MS_E} \quad \dots \dots [2.4.1.6]$$

Se distribuye como  $F$  con  $a - 1$  y  $N - a$  grados de libertad. La ecuación 2.4.1.6 es el estadístico de prueba para la hipótesis de que no hay diferencias en las medias de los tratamientos.





### CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA



## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología que se siguió en el trabajo para alcanzar los objetivos planteados inicialmente.

El desarrollo experimental se llevó a cabo en las instalaciones del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional (CIIDIR-Oaxaca-IPN), donde se realizaron las pruebas de: granulometría, límites de consistencia, contenido óptimo de humedad, resistencia mecánica, degradación por agua y absorción de agua.

### **3.1. Diagrama de las fases del proyecto**

Como resultado de la recopilación e interpretación de la información obtenida en el marco referencial, este trabajo se divide en 3 fases con el fin de alcanzar el objetivo deseado.: las fases I y II corresponden al desarrollo para encontrar qué agregado es mejor combinar con el adobe, mientras que en la fase III se desarrollan y analizan las pruebas en los adobes resultantes de la fase previa (Fig. 3.1.1).

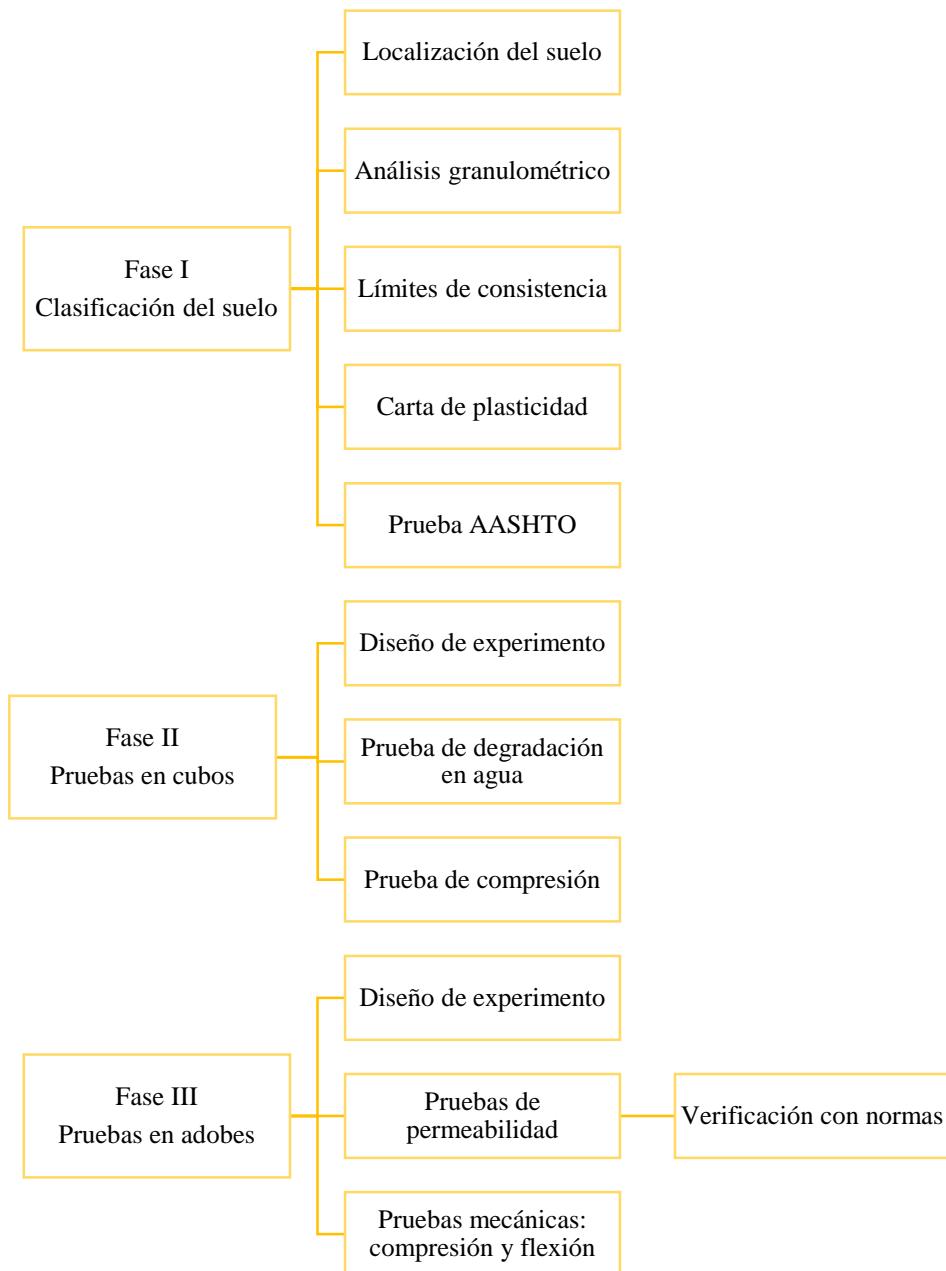


Fig. 3.1.1. Diagrama de las fases del trabajo.

### **3.2. Fase I. Clasificación del suelo con base en el SUCS**

#### ***3.2.1. Localización del suelo***

El suelo seleccionado para elaborar los adobes de este trabajo fue el de San Agustín Yatareni, localidad ubicada en la parte central del estado, en la región de los Valles Centrales, perteneciente al distrito del Centro. Su distancia aproximada a la capital del estado es de 5 kilómetros.

Limita al norte con San Andrés Huayapam, al poniente con Oaxaca de Juárez, al oriente con Tlalixtac de Cabrera y al sur con Santa Lucía del Camino y San Sebastián Tutla. El tipo de suelo localizado en el municipio es el vértisol pélico. Es un suelo muy arcilloso, de color oscuro. Su uso agrícola es muy extenso, variado y altamente productivo, aunque su manejo es en ocasiones problemático, debido a su dureza y consistencia (Fig. 3.2.1).



*Fig. 3.2.1. Suelo de San Agustín Yatareni, utilizado para la elaboración de adobes y ladrillos.*  
Fuente: El tesista.

En esta zona, en los lugares de San Agustín Yatareni, Santa Lucía del Camino, Santa Cruz Amilpas, San Sebastián Tutla, se dedican a la elaboración de ladrillos, mientras que sólo realizan adobes por encargo.

El suelo que se encuentra en los lugares antes mencionados, es adecuado para la elaboración de adobes, ya que cuenta con el respaldo de la experiencia de las personas que se dedican a la elaboración de ladrillos y adobes, pero para contar con un sustento avalado por normativas, en el suelo seleccionado se realizaron pruebas de granulometría, límites de consistencia (límites de Atterberg) y se recurrió a la carta de plasticidad para la clasificación del mismo, de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCCS). A continuación se describe cómo se realizaron las pruebas mencionadas.

### **3.2.2. Análisis granulométrico**

#### *Procedimiento*

##### *Secado*

Primeramente se puso a secar el suelo (Fig. 3.2.2.1), en una superficie lisa y limpia, cada 2 horas, se movía el suelo para que seca completamente. Con ayuda de un mazo se disgregaban los cúmulos de tierra.



*Fig. 3.2.2.1. Secado del suelo. Fuente: El tesista.*

Nota: Debido a las lluvias, se movió el suelo a un lugar techado.

#### *Muestreo*

Una vez seco, se juntó la tierra y se fue esparciendo uniformemente con la pala, de tal manera que se formara un cono. Posteriormente, se seccionó la tierra con la pala, cortándola como si fueran rebanadas de pastel y sin tocar las orillas del mismo, sólo su interior tal como si dibujáramos radios en la tierra. Formado un círculo más extenso en diámetro que del cono anterior, la tierra se dividió en 4 partes, dejando espacios entre ellos. Tomando los vértices interiores de las secciones formadas, se tomó tierra de dos

secciones contrarias (formando ángulos opuestos) con ayuda de un cucharón, depositando la tierra a 20 cm de la base en forma de cruz en una tara (Fig. 3.2.2.2).

Este procedimiento se realizó hasta llenar por completo toda la tara.

El excedente de la tara se quitó con la cuchilla de una segueta, sin mover la tara y sin ejercer presión a la tierra. Esta parte tomada del suelo secado se denominó “muestra”, mientras que de donde se tomó se le llamó población.



Fig. 3.2.2.2. Depósito de tierra en forma de cruz en la tara la tierra. Fuente: El tesista.



Fig. 3.2.2.3. Tamices utilizados para cribar. Fuente: El tesista

#### *Cálculo de agregado grueso*

Se pesó la tara, dando un peso de tara y suelo de 16.980 kg. Después se pasó la tierra por las cribas del número 3", 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", hasta la número 4 para ver qué porcentaje de la muestra pasaba cada tamiz y cada parte retenida en cada criba se pesó, también se pesó la cantidad de tierra que pasó la malla número 4 (Fig. 3.2.2.3).

### *Granulometría fina*

Se repitió el proceso de muestreo pero utilizando solamente la tierra que pasó la malla núm. 4. Con ayuda de un mini cucharón se llenó la cápsula número 10 casi al ras, (2mm antes del borde) y se dejó secar hasta que perdiera su humedad, poniéndolo a calentar en una parrilla, con ayuda de un vidrio se checó si aún contaba con presencia de humedad. En el vaso número 31 se vertió 200 gramos del suelo, se le agregó agua hasta 1.5 cm antes de que se llenara el vaso y se dejó reposando 3 días.

Se procedió a lavar la muestra del vaso 31, poniendo el mismo sobre una charola y con una varilla punta de bala de diámetro 6mm y 20 cm de longitud, se movió la mezcla de agua y suelo en forma de “ochos” de manera rápida y por 15 segundos. Por 30 segundos se dejó reposar la mezcla movida. Se vertió en la malla número 200 cuidando de no tirar lo que quedara retenido para volverlo a vaciar al vaso, con la ayuda de una piseta. Y se llenó hasta 1.5 cm antes del borde del vaso con agua (Fig. 3.2.2.4).



*Fig. 3.2.2.4.* Lavado de la muestra mediante movimientos en forma de “8s” pasando por la malla núm. 200. a) Muestra en vaso b) Mezclado c) Vaciado de la muestra revuelta en tamiz d) Uso de piseta para verter el material retenido en el vaso e) Lavado de la muestra en el tamiz.

Fuente: El tesista.

Se repitió el proceso de lavado hasta que el agua quedó clara. Nota: el agua que se juntaba en la charola se vació a un bote para que el sedimento, basura del lavado no tapara la tubería. Cuando el agua salió clara, se puso sobre una parrilla la muestra hasta que se secó el suelo del interior; con un vidrio se checó si aún contaba con presencia de humedad. Una vez seca la muestra, se pesó, obteniéndose el peso seco del vaso. La muestra de la cápsula número 10, se vació a un matraz de 500 ml (número 2) y se le agregó agua para ponerla a hervir (Fig. 3.2.2.5). Después de hervir se dejó enfriando y se pesó, arrojando el peso F seco con agua. Se midió la temperatura del mismo, siendo de 42° C. Con la mezcla

ya enfriada, se pasó por los tamices apilados del número: 4,10, 20, 40, 60, 100 y 200, quedando el tamiz #4 arriba y el tamiz #200 abajo.

Se pesó lo que quedó en cada malla (Fig. 3.2.2.6.), conforme se pesaba una, se movían los tamices para asegurar que pasara el material o no en la respectiva malla, obteniendo así la granulometría fina.



*Fig. 3.2.2.5. Muestra de la cápsula 10 puesta a hervir. Fuente: El tesista.*



*Fig. 3.2.2.6. Obtención de la granulometría fina pesando el material que pasó cada malla utilizada.  
Fuente el tesista.*

### **3.2.3. Límites de consistencia**

#### *Límite líquido*

Del sobrante de la segunda vez que se realizó el cribado con el cono truncado, se tomó tierra y se pasó por la malla 200, hasta llenar un vaso (de 500 ml), al cual se le agregó un poco de agua y se dejó reposando un día.

Se calibró la copa de Casagrande con un “tubular” de 1 cm para cerciorarse de que la caída de la copa estuviera a la medida adecuada (que es de 1 cm). Con el suelo

humedecido por un día, se llenó una cápsula y con una espátula plana se movió el suelo. La mezcla se vertió a la copa de Casagrande, con ayuda de la espátula plana se emparejó la mezcla en la copa y con el ranurador para suelo arcilloso se partió a la mitad la mezcla dentro de la copa (Fig. 3.2.3.1).

Se prendió la máquina y empezó a golpear, se paró hasta que se unieran las dos paredes de la muestra. Una vez unidas se retiró la muestra, dejando sólo la parte unida; se midió la parte unida (Fig. 3.2.3.2.) con un vernier. Lo que se requiere es que a los 25 golpes se una la muestra y la unión mida 1 cm (1/2 in), sino cumple esta medida no sirve la muestra aunque se dé a los 25 golpes.

La primera vez se unió a los 17 golpes, por lo cual se le quitó el exceso de humedad (puede ser colocando encima un papel, moviendo al sol o extendiéndolo en un vidrio). Si sobrepasa los 25 golpes se requiere agregar agua (entre más cerca de los 25 golpes requiere agregarse menos agua o mover por más tiempo) la cual se puede agregar con la ayuda de una piseta o de una pipeta.

Este procedimiento se realizó por 5 horas hasta alcanzar la muestra requerida, se tomaron los valores de las muestras a 30, 28, 26 y 25 golpes. Cada muestra que cumplía con los requerimientos se pesaba sobre un vidrio de reloj (Fig. 3.2.3.3). Una vez obtenidas las muestras deseadas, se metieron al horno por 24 horas para su secado.



*Fig. 3.2.3.1.* Copa de Casagrande con la mezcla de suelo humedecido.

Fuente: El tesista.



*Fig. 3.2.3.2.* Medición de la muestra unida a los 25 golpes.

Fuente: El tesista.

### *Contracción lineal*

Con la muestra que cumplía con los requerimientos del límite líquido se llenaron dos cajas rectangulares pequeñas (previamente medidas), se golpeaban contra una base para cerciorarse que estuviera llenado correctamente (Fig. 3.2.3.4). Estas muestras se metieron a secar en el horno por 24 horas.



*Fig. 3.2.3.3.* Muestras obtenidas del límite líquido. Fuente: El tesista.



*Fig. 3.2.3.4.* Elaboración de muestras para contracción lineal. Fuente: El tesista.

### *Límite plástico*

Con el suelo de la muestra (25 golpes) obtenida del límite líquido, se moldearon cilindros de 3 mm de diámetro: en un vidrio se moldeaba con la mano la tierra formando “churritos” (Fig. 3.2.3.5).



Fig. 3.2.3.1. Muestra en forma de mini cilindros para límite plástico. Fuente: El tesista.

Cuando se empezaban a cuartear los mini cilindros, se colocaban sobre vidrio de reloj y se pesaban. Se sacaron dos muestras colocando varios cilindros sobre cada vidrio de reloj. Estas muestras se metieron a secar en el horno por 24 horas (Fig. 3.2.3.6).



Fig. 3.2.3.2. Muestras de límites de consistencia puestos a secar en horno. Fuente: El tesista.

### *Secado y medición*

Transcurridas las 24 horas de secado (Fig. 3.2.3.7) se sacaron las muestras del horno y se prosiguió a pesar las muestras del límite líquido (copa de Casagrande, muestra de 25 golpes y de longitud  $\frac{1}{2}''$ ) y las del límite plástico (cilindros de 3mm de diámetro).

Respecto a las muestras de contracción lineal se midió su longitud con la ayuda de un vernier. Así, se obtuvieron los valores de peso seco de las muestras del límite líquido y del límite plástico y el valor de la contracción lineal de las barras.

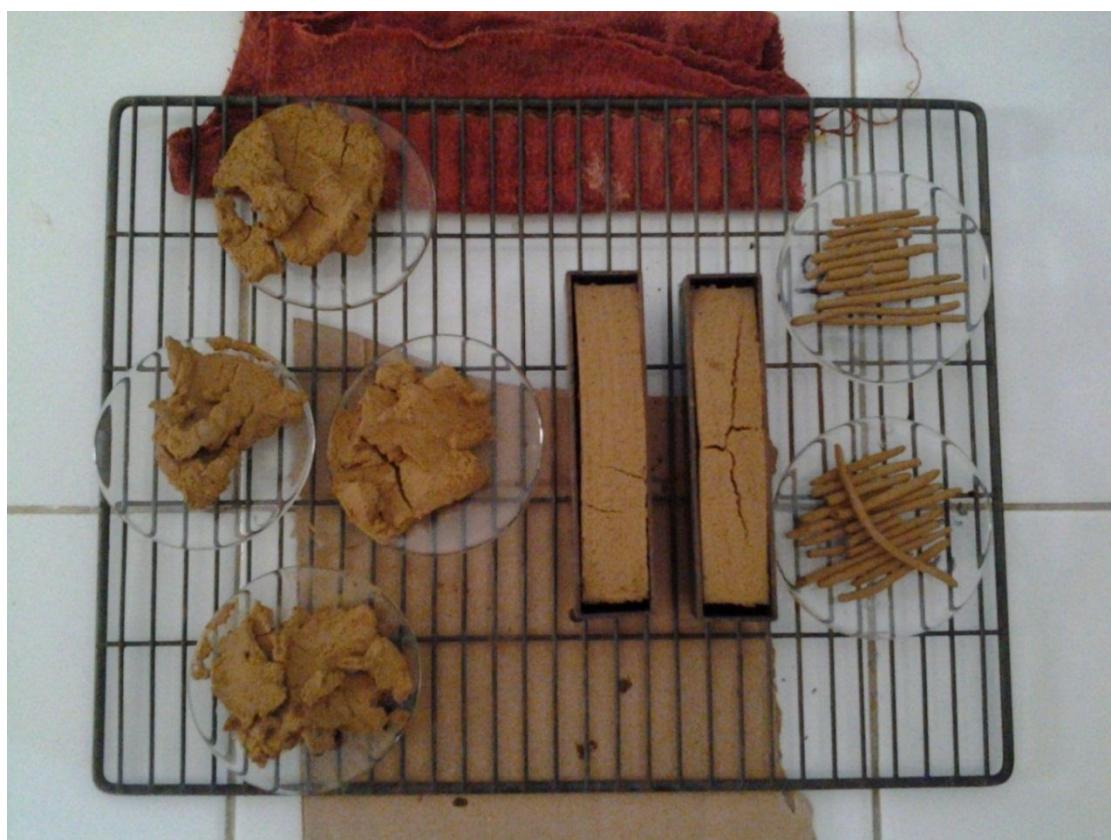


Fig. 3.2.3.3. Muestras salidas del horno a las 24 horas.

Fuente: El tesista.

### **3.2.4. Carta de plasticidad**

Se consultó la carta de plasticidad para ver a qué categoría pertenecía el suelo analizado.

### **3.2.5. Prueba AASHTO estándar variante A**

La prueba Proctor estándar o también llamada prueba AASHTO estándar variante A, tiene como finalidad determinar el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima, ésta se utilizó para determinar el óptimo proporcionamiento de las mezclas, ya que debido a las diferentes características de los agregados la demanda de agua en cada caso es diferente.

Para realizarla se utilizaron cápsulas de aluminio, regla para enrasar, agua, aceite y brocha, probeta de 100 ml, charola de 40cm x 60cm, horno, molde de compactación de 0.94 l y su extensión, pisón de 2.5kg de peso y 3 kg del suelo seleccionado que pasara por la malla no. 4.

Primero se pesaron las cápsulas de aluminio y el molde de compactación, anotando estos datos y 3kg de suelo seleccionado, vertiéndola en una charola, se le incorporó 200 ml de agua (Fig. 3.2.5.1) y se revolvió para uniformizar la humedad, se vació el suelo húmedo a la primera cápsula pesada hasta 3/4 de su capacidad, se pesó y se registró el resultado. Las cápsulas con muestra se introdujeron al horno para determinar el contenido de agua.

Con el material restante se llenó el molde, compactándolo en 3 capas aproximadamente iguales, dándole 25 golpes a cada una de éstas con el pisón (Fig. 3.2.5.2). Entre capas se revolvió un poco para que las capas se juntaran. La última capa no debió salir del molde más de 2.5 cm (Fig. 3.2.5.3), se enrasó y se pesó, registrando el dato.



Fig. 3.2.5.1. Suelo seleccionado con 200 ml de agua.

Fuente: El tesista.



Fig. 3.2.5.2. Compactación del suelo utilizando el pisón. Fuente: El tesista.

Se vació el contenido del cilindro en una charola, tomando una muestra del centro del cilindro, se pesó y metió al horno (Fig. 3.2.5.4), anotando los datos. Se revolvió la tierra agregando 2% de agua respecto al peso de la tierra, es decir, 60 ml y se repitió la compactación como se describió anteriormente.



Fig. 3.2.5.3. Molde con el suelo ya compactado, sin pasar los 2.5 cm. Fuente: El tesista.



Fig. 3.2.5.4. Cápsulas con la muestra de suelo compactado. Fuente: El tesista.

Esto se realizó hasta que el peso del molde + suelo húmedo dio un valor menor que el inmediato anterior. Y tras 24 horas, se sacaron las muestras del horno para volverlas a pesar (Fig. 3.2.5.5), obteniendo así los datos necesarios para el cálculo de la humedad óptima y el volumen seco máximo.



Fig. 3.2.5.5. Cápsulas con las muestras de suelo compactado. Fuente: El tesista.

### 3.3. Fase II. Pruebas en cubos

En el capítulo 2 se habló acerca de los estabilizantes que se le agregan al adobe para fortalecerlo en distintos aspectos, eligiéndose como propuestas para elaborar las muestras iniciales, al jugo de hoja de plátano y su fibra, engrudo de trigo, excremento de burro y resina de pino (cap. 1.4 Agregados en el adobe págs. 28-47).

Estas elecciones se debieron a las características que presentan, como por ejemplo el jugo de hojas de plátano mejora la resistencia a la erosión y disminuye la absorción de agua, con la resina las principales ventajas son resistencia al agua, rápido fraguado y solidificación de suelos muy húmedos; y el trigo porque es uno de los refuerzos más comunes del suelo, como la paja.

Además, su obtención es más accesible: la resina de pino se puede conseguir en aserraderos cercanos a la ciudad de Oaxaca, el excremento de burro de granjas de Valles Centrales. El trigo (harina) se vende en mercados, tiendas de conveniencia y plantas de plátano también se encuentran en la ciudad.

Se elaboraron cubos de 5cm x 5cm x 5cm con el suelo seleccionado, tanto solo, como combinado en distintas proporciones con los agregados electos, para observar la reacción de la combinación y comparar sus características, tales como el tiempo que tarda en degradarse cada uno cuando se sumergen en agua y su resistencia a la compresión; para así poder elegir un agregado; tomando en cuenta los resultados de la prueba proctor estándar en el suelo seleccionado, ya que de esta forma se puede tener un control de la humedad en las muestras.

### ***3.3.1. Diseño de experimentos para cubos***

Para evaluar el efecto de los agregados naturales en las propiedades de permeabilidad y de compresión en cubos, se desarrolló un experimento factorial teniendo en cuenta el tipo de mezcla y dividiéndose en 3 etapas:

#### *Etapa 1. Pruebas iniciales (selección de agregado)*

En esta etapa se realizaron las pruebas de permeabilidad y resistencia a compresión para seleccionar un agregado. Para las pruebas de permeabilidad el experimento factorial fue de 1x5x3, es decir, se consideró un factor (mezcla), utilizando 5 diferentes tipos de mezclas (niveles o tratamientos) y por cada una de ellas se realizaron 3 réplicas, que se enumeraron por letra (A, B, C). En cambio, para las pruebas de resistencia a compresión, el diseño del experimento fue de 1x5x6, realizándose 6 réplicas numeradas de A a F.

Los niveles de la variable tipo de mezcla fueron SS, 5JHP, 5HP, 10ET y 10RP, es decir, adobe sin agregado (o suelo solo), jugo de hoja de plátano (5%), hoja de plátano (5%), engrudo de trigo (10%) y resina de pino (10%).

*Etapa 2. Pruebas intermedias (proporcionamiento)*

Para la etapa 2 el diseño del experimento factorial fue de 1x5x3 para las pruebas de permeabilidad y de 1x5x6 para las pruebas a compresión, utilizando en estas últimas la mezcla que obtuvo mejores resultados en la etapa 1 y variando el porcentaje del agregado, por lo cual, los niveles del tipo de mezcla fueron variaciones en el porcentaje de resina de pino (5%, 10%, 15%, 20% y 25%) abreviándose como 5RP, 10RP, 15RP, 20RP, 25RP.

Las réplicas se enumeraron por letra.

*Etapa 3. Pruebas finales (en cubos)*

Para la etapa 3 se utilizó el mejor proporcionamiento obtenido de la etapa 2 para combinarlo con la mezcla tradicional del adobe, que consiste en combinar suelo con estiércol de burro. Por lo que el diseño de experimentos contó con 2 niveles, suelo con estiércol de burro sin resina y suelo con estiércol de burro con 15% resina de pino (nomenclatura SE y SERP15 respectivamente). Para pruebas de permeabilidad, el diseño fue de 1x2x3 y para pruebas de resistencia a compresión fue de 1x2x6.

Cabe mencionar que los porcentajes de los agregados fueron respecto al peso del suelo. Los porcentajes de adiciones de los agregados para elaborar las mezclas fueron aquellos reportados en la literatura que mejoran las propiedades mecánicas de los adobes, por las entrevistas realizadas o por practicidad para el mezclado (cap. 1.4. Agregados en el adobe pág. 28, Anexos pág. 155).

En cuanto a la variable edad, se consideró solo un nivel que fue a los 28 días, para conocer el incremento de resistencia con el tiempo; al ser el mismo tiempo para todas las mezclas (tratamientos) no se consideró como un factor más. Las variables de respuesta fueron la resistencia a compresión y absorción. Esta última se realizó con la finalidad de

conocer su comportamiento de degradación. Los detalles del diseño experimental se muestran en la Tabla 3.3.1.1.

Tabla 3.3.1.1. *Diseño de experimento de cubos*

Factor	Niveles o tratamientos	Descripción	Réplicas	Respuesta			
<b>Etapa 1. Pruebas iniciales (selección de agregado)</b>							
<b>Mezcla</b>	5	SS	9 por mezcla*	Degrado en agua (prueba de permeabilidad).			
		5JHP					
		5HP					
		10ET					
		10RP					
<b>Etapa 2. Pruebas intermedias (proporcionamiento)</b>							
<b>Mezcla</b>	5	5RP	9 por mezcla*	Resistencia a la compresión.			
		10RP					
		15RP					
		20RP					
		25RP					
<b>Etapa 3. Pruebas finales en cubos</b>							
<b>Mezcla</b>	2	SE					
		SERP15					
SS: Suelo solo, 5JHP: +5% jugo de hoja de plátano, 5HP: +5% hoja de plátano, 10ET: +10% engrudo de trigo diluido, 10RP: +10% resina de pino, 5RP: +5% resina de pino, 15RP: +15% resina de pino, 20RP: +20% resina de pino, 25RP: +25% resina de pino, SE: suelo y excremento de burro, SERP15:suelo +excremento de burro +15% resina de pino.							
<b>Total de muestras:= 99 ; Edad utilizada: 28 días</b>							
*Para las pruebas, de las 9 réplicas de cada mezcla, se utilizaron: 3 réplicas para permeabilidad y 6 réplicas para resistencia a la compresión.							

Fuente: El tesista.

En primera instancia se elaboraron cubos sólo con suelo, cubos con suelo y hoja de plátano (fibra y jugo), suelo con engrudo de trigo y suelo con resina. A partir de los resultados que se obtuvieron, se realizaron más mezclas con resina para observar qué

sucedía con menos o más de ella en la mezcla. Con la proporción que brindó mejores resultados, se le agregó a la mezcla de suelo y estiércol de burro, realizándose también cubos sólo con suelo y excremento para una mejor comparación; de esta manera se conoció el comportamiento de los materiales empleados, logrando obtener las bases para la realización de pruebas en adobes.

Tomando en cuenta las características de los agregados, se planteó de diferente forma el mezclado con el suelo:

En el caso del jugo de plátano, se realizaron muestras mezclando el suelo con el jugo de su hoja y muestras mezclando la tierra con el jugo de la hoja más la hoja machacada, esto con la finalidad de observar qué características le brinda esta fibra al suelo. Se utilizó 5% de jugo de hoja de plátano con fibra y sin ella, respecto al peso del suelo.

El engrudo de trigo se realizó de manera convencional, poniendo a hervir agua agregando harina de trigo y revolviendo; esto se diluyó en agua para evitar la aparición de grumos al mezclarlo con el suelo, asegurando así un mezclado uniforme. Se utilizó 10% de engrudo de trigo diluido respecto al peso del suelo.

Con la resina se cuidó que el mezclado fuera uniforme, porque debido a su consistencia, si no se revuelve bien, unas partes de suelo cuentan con más resina que otros, formándose grumos. Se utilizaron proporciones de 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de resina de pino más suelo y excremento de burro; al utilizar este último el mezclado fue parecido a cuando sólo se usó suelo.

Las muestras elaboradas para cada mezcla, se nombraron por M (muestra), seguido de la nomenclatura acorde al tipo de mezcla (SS, 5JHP,...) y se enumeraron por letra (A, B, C,...).

### ***3.3.2. Elaboración de cubos para obtener proporciones adecuadas***

Para elaborarlos se utilizaron moldes de 5 cm x 5 cm x 5 cm, espátula, varilla o desarmador para enrasar, probeta de 250 ml a 1000 ml, charolas, taras, pisón pequeño, cucharón, brochas, aceite recocido y báscula; además del suelo y agregados seleccionados (Fig. 3.3.2.1).



Fig. 3.3.2.1. Material utilizado para la elaboración de cubos: molde para cubos, taras, pisón pequeño, varilla pequeña o desarmador, cuña y probeta. Fuente: El tesista.

Primeramente se pesaron 500g de suelo, agregando poco a poco agua con ayuda de la probeta hasta obtener la consistencia necesaria (variaba según la humedad del ambiente y tomando en cuenta la humedad óptima obtenida). Inmediatamente se agregó la mezcla en el molde de cubos hasta poco más de la mitad y con el pisón pequeño se golpeó (Fig. 3.3.2.2), repitiendo estas dos operaciones una vez más. Esto se debe a que los cubos se hacen con dos capas y a cada capa se le dan 32 golpes; entre capas se raspa para que se adhieran bien las capas. Al excedente de suelo en la parte superior, se quita y/o nivela con ayuda de la varilla o desarmador.

De esta primera prueba se obtuvieron 2 cubos y 1/3, por lo cual se estimó que con 700g se obtenían 3 cubos y de 1400g se obtenían 6 cubos.



Fig. 3.3.2.2. Compactación de la mezcla en los cubos usando el pisón pequeño. Fuente: El tesista.

#### *Etapa 1. Pruebas iniciales (selección de agregado)*

Para la prueba de degradación en agua se pesaron:

MSS: 700g de suelo para los “adobes solos” (Fig. 3.3.2.3).



Fig. 3.3.2.3. Cubo de suelo solo. Fuente: El tesista.

M5JHP: 700g de suelo + 5% de jugo de hoja de plátano (35 g) (Fig.3.3.2.4).



Fig. 3.3.2.4. Cubo de suelo + jugo de hoja de plátano. Fuente: El tesista.

Cuando se realizó esta mezcla, se observó que al poner en contacto el jugo y suelo se ponía duro el material y conforme se iban secando, los cubos quedaban lisos.

M5HP: 700g de suelo + 5% de hoja de plátano molida (35 g) (Fig. 3.3.2.5).



Fig. 3.3.2.5. Cubo de suelo + hoja de plátano. Fuente: El tesista.

M10ET: 700g de suelo + 10% de engrudo de trigo diluido (70 g) (Fig. 3.3.2.6).

Al secarse los cubos, se observó que el agregado más fino se separó de las partes más gruesas.

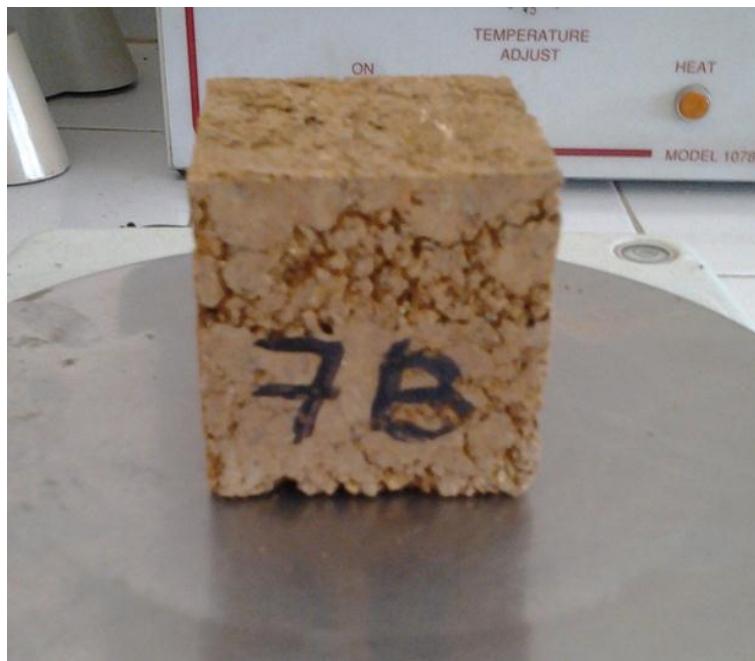
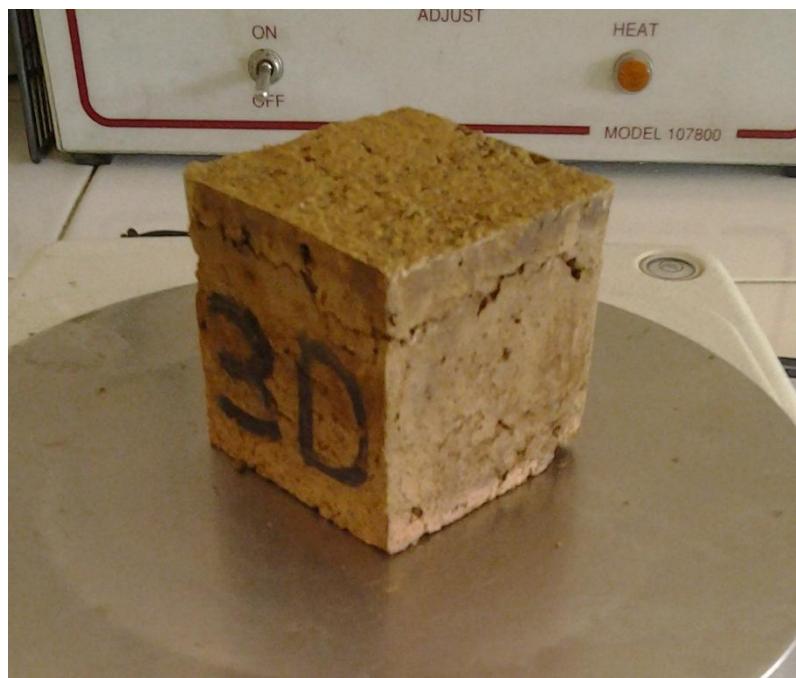


Fig. 3.3.2.6. Cubo de suelo + engrudo de trigo diluido. Se puede observar cómo se separó el material. Fuente: El tesista.

M10RP) 700g de suelo + 10% de resina de pino (70 g) (Fig. 3.3.2.7).



*Fig. 3.3.2.7. Cubo de suelo + 10% resina de pino, se puede observar un color más oscuro que en los demás cubos. Fuente: El tesista.*

Al verter la resina en la tierra el mezclado fue más sencillo, ya que tomó una consistencia más espesa pero sin ser pegajosa. Y al ir secando los cubos agarraban un color más oscuro que los de suelo solo.

Para la prueba de compresión se pesaron:

MSS: 1400g de suelo para los “adobes solos”

M5JHP: 1400g de suelo + 5% de jugo de hoja de plátano (70 g)

M5HP: 1400g de suelo + 5% de hoja de plátano molida (70 g)

M10ET: 1400g de suelo + 10% de engrudo (140 g)

M10RP: 1400g de suelo + 10% de resina de pino (140 g)

Y se siguió el mismo proceso descrito con cada muestra hasta obtener la cantidad de cubos necesarios, que se dejaron secando por 28 días (Fig. 3.3.2.8).

Nota: Cada grupo de muestras deben realizarse en la misma fecha para que los datos que se obtengan partan de las mismas condiciones iniciales.



Fig. 3.3.2.8. Cubos secando; se observan distintos colores en las muestras. Fuente: El tesista.

#### *Etapa 2. Pruebas intermedias (proporcionamiento)*

Debido a los resultados obtenidos, que se explican con más detalle en el capítulo 4, se elaboraron 36 bloques más con resina (muestras etapa 2), siendo:

M5RP: 9 cubos de: suelo + 5% de resina de pino (Fig. 3.3.2.9).

M15RP: 9 cubos de: suelo + 15% de resina de pino (Fig. 3.3.2.10).

M20RP: 9 cubos de: suelo + 20% de resina de pino (Fig. 3.3.2.11).

M25RP: 9 cubos de: suelo + 25% de resina de pino (Fig. 3.3.2.12).



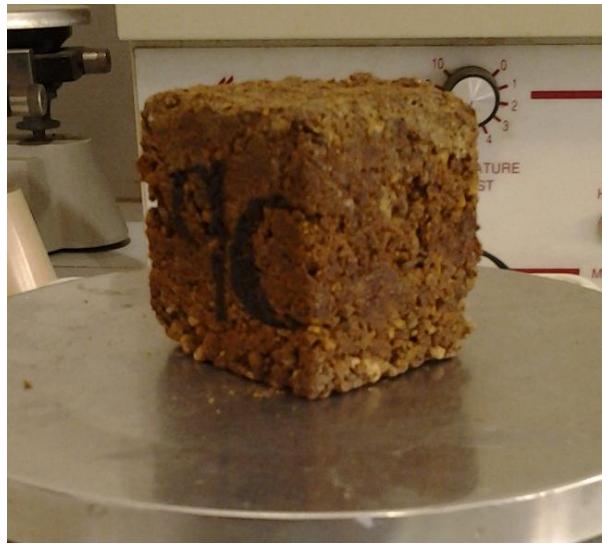
Fig. 3.3.2.9. Cubo de suelo y 5% de resina de pino (M5RP). Fuente: El tesista.



Fig. 3.3.2.10. Cubo de suelo y 15% de resina de pino (M15RP). Fuente: El tesista.



Fig. 3.3.2.11. Cubo de suelo y 20% de resina de pino (M20RP). Fuente: El tesista.



Entre más resina se agregaba a la tierra se conseguía que la mezcla alcanzara para realizar más cubos de los esperados, pero al añadir más de 15% de resina respecto al suelo, era más difícil mezclar, ya que quedaba más pegajosa la mezcla, esto debido a que se rebasaba la humedad óptima del suelo.

*Fig. 3.3.2.12. Cubo de suelo y 25% de resina (M25RP).*  
Fuente: El tesista.

### *Etapa 3. Pruebas finales en cubos*

A partir de los resultados obtenidos de las muestras, se eligió la proporción de 15% de resina (cap. 4) y se elaboraron 18 últimos cubos agregando excremento de burro (muestras etapa 3), para observar si mejoraba la consistencia, la impermeabilidad y la resistencia a la compresión:

MSE: 9 cubos de: suelo + excremento de burro (Fig. 3.3.2.13).

MSERP15: 9 cubos de: suelo + excremento de burro + 15% de resina de pino (Fig. 3.3.2.14).

Los pesos totales empleados en la elaboración de los cubos, así como la cantidad de agua utilizada pueden verse en ANEXOS B. Materiales utilizados.

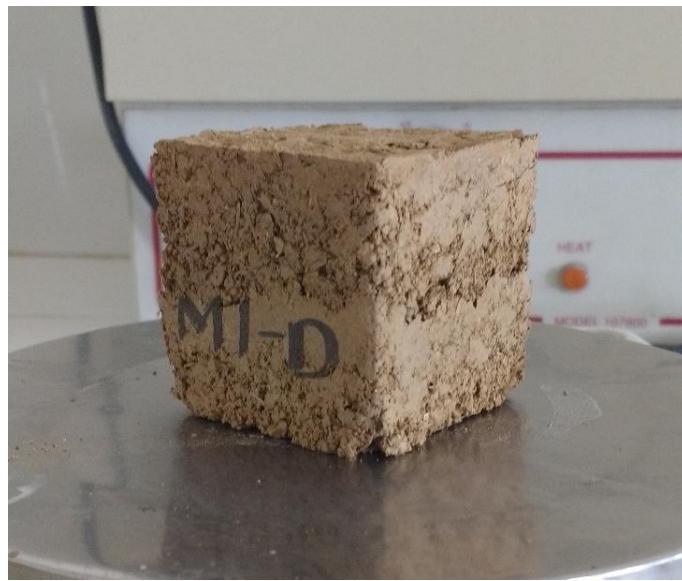


Fig. 3.3.2.13. Cubo de suelo y excremento de burro (MSE). Fuente: El tesista.



Fig. 3.3.2.14. Cubo con suelo, excremento de burro y 15% de resina de pino (MSERP15).

Fuente: El tesista.

### 3.3.3. Prueba de degradación en agua

Transcurridos los 28 días de secado, se tomaron 3 cubos de cada muestra para sumergir en agua, esto con la finalidad de observar su proceso de desintegración y la reacción de cada muestra.

Para realizar esta prueba se utilizaron bandejas transparentes de 30cm x 15cm x 10cm, agua y 3 cubos por muestra. Se llenaron las bandejas lo suficiente para cubrir completamente a los cubos (8 cm aproximadamente), después se sumergieron las muestras en las bandejas; cada muestra, que consta de 3 cubos, en bandejas separadas (Fig. 3.3.3.1).



Fig. 3.3.3.1. Proceso de inmersión de los cubos: por bandeja se sumergieron los tres cubos de cada muestra. Fuente: El tesista.

### **3.3.3.1. Observaciones por muestra**

#### *Muestras de la Etapa 1*

MSS.- Suelo solo: En el instante en que se sumergieron los cubos se empezaron a deshacer rápidamente (Fig. 3.3.3.1.1), tardando 16 minutos en perder su forma de cubos y a los 27 minutos ya eran montículos de polvo.



*Fig. 3.3.3.1.1. Cubo de suelo solo al momento de haberse sumergido completamente.*  
Fuente: El tesista.

M5JHP.- Suelo + 5% de jugo de hoja de plátano: Lenta y gradualmente se van deshaciendo conservando su forma inicial (Fig. 3.3.3.1.2), a los 25 minutos de su inmersión se hicieron un montículo de tierra, quedando totalmente deshechos lo cubos (Fig. 3.3.3.1.3).



*Fig. 3.3.3.1.2. Cubos de suelo + 5% jugo de hoja de plátano, su degradación fue gradual.*  
Fuente: El tesista.



Fig. 3.3.3.1.3. Cubos de suelo + 5% jugo de hoja de plátano. Cuando ya estaban deshechos empezaron a sacar burbujas. Fuente: El tesista.

M5HP.- Suelo + 5% de hoja de plátano molida: Se deshicieron más lento que los cubos de suelo solo (Fig.3.3.3.1.4), pero más rápido que los cubos con 10% de resina; 19 minutos después de sumergirlos se deshicieron las 3 muestras.



Fig. 3.3.3.1.4. Cubos de suelo + 5% hoja de plátano molida. Fuente: El tesista.

M10ET.- Suelo + 10% de engrudo de trigo: A los 6 minutos en seguida de sumergir los cubos empezaron a romperse y 11 minutos después ya eran montículos de tierra (Fig. 3.3.3.1.5).



Fig. 3.3.3.1.5. Cubos de suelo + 10% engrudo de trigo ya deshechos. Fuente: El tesista.

M10RP.- Suelo + 10% de resina de pino: Poco a poco fueron deformándose, sólo un cubo se deshizo un 70% en 10 minutos, los otros dos se volvían más anchos (Fig. 3.3.3.1.6). 1 hora 18 minutos después ya no se desboronaba, quedó fragmentado pero sin hacerse lodo; lentamente se desprendía polvo de los cubos. A las 24 horas siguientes se fragmentaron más y sólo quedó un fragmento grande de un cubo. Y al segundo día sólo quedaban trozos pequeños pero ya sin forma de cubo (Fig. 3.3.3.1.7).

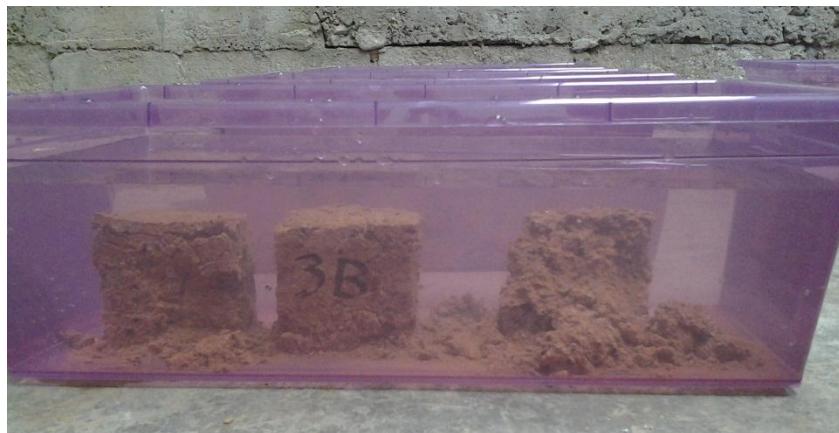


Fig. 3.3.3.1.6. Cubos de suelo + 10% de resina de pino sumergidos. Fuente: El tesista.



Fig. 3.3.3.1.7. Cubos de suelo + 10% de resina, su degradación fue gradual. Fuente: El tesista.

### *Muestras de la Etapa 2*

M5RP.- Suelo + 5% de resina de pino: Se deshicieron más lento que los cubos de suelo solo. Transcurridos 24 minutos después de sumergirlos, se fragmentaron pero sin hacerse lodo. Después de 24 horas se encontraron más deshechos, casi haciéndose lodo pero con algunos trozos medianos de muestra. 24 horas después los residuos se encontraron más deshechos pero sin ser polvo; ya no presentaron cambios los residuos. (Fig. 3.3.3.1.8).



Fig. 3.3.3.1.8. Cubos de suelo + 5% de resina de pino. Fuente: El tesista.

M15RP.- Suelo + 15% de resina de pino: Al introducir los cubos en agua, sólo la base de los cubos se deshacen lentamente, poco a poco se caen pequeños fragmentos pero no se hace lodo (Fig. 3.3.3.1.9). A los 17 minutos siguientes a su inmersión ya no se siguieron deshaciendo los cubos.

24 horas después los cubos se “esponjaron”, aún no se deshacían los cubos por completo, quedando trozos grandes de los mismos. Fue hasta las 48 horas después que las muestras perdieron su forma de cubo (Fig. 3.3.3.1.10).



Fig. 3.3.3.1.9. Cubos de suelo + 15% de resina de pino al estar sumergidos en el agua. El tesista.



Fig. 3.3.3.1.10. Cubos de suelo + 15% de resina de pino ya deformados. Fuente: El tesista.

M20RP.- Suelo + 20% de resina de pino: Después de sumergir los cubos, lentamente había un ligero desprendimiento de tierra (polvo) en la base de los cubos; 24 horas después seguían conservando su forma de cubo pero esponjados (Fig. 3.3.3.1.11) y mostrando en la cara superior unas manchas blancas. Hasta los 5 días y medio después de sumergirse los cubos, éstos se deshicieron parcialmente, quedando pedazos grandes y con una tenue capa blanca (Fig. 3.1.3.1.12).



Fig. 3.3.3.1.11. Cubos de suelo + 20% de resina de pino al estar sumergidos en el agua.  
Fuente: El tesista.



Fig. 3.3.3.1.12. Cubos de suelo + 20% de resina de pino ya deformados. Fuente: El tesista.

M25RP.- Suelo + 25% de resina de pino: Después de sumergir los cubos, lentamente había un ligero desprendimiento de tierra (polvo) en la base de los cubos; 24 horas después un cubo ya había deshecho (Fig. 3.3.3.1.13), 10 horas después ya habían perdido la forma de cubos y, 48 horas después de ser sumergidos ya estaban desboronados y en la parte superior se observó una ligera capa blanca sobre los restos (Fig. 3.3.3.1.14).



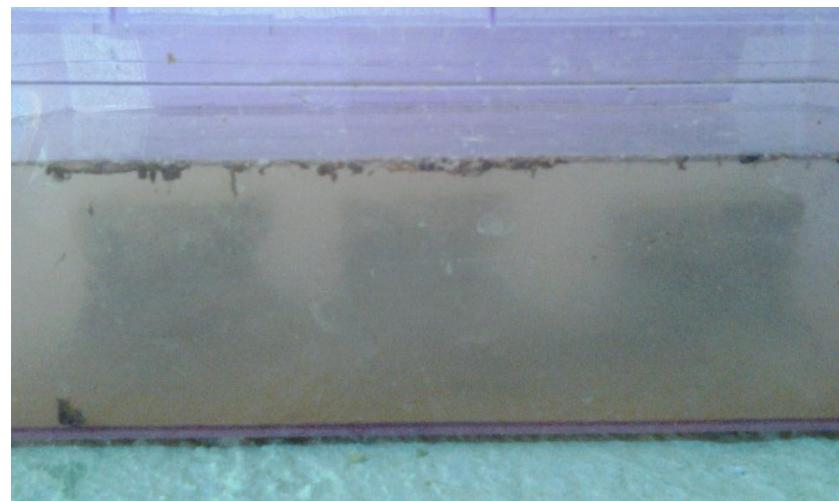
Fig. 3.3.3.1.13. Cubos de suelo + 25% de resina de pino al estar sumergidos en el agua.  
Fuente: El tesista.



Fig. 3.3.3.1.14. Cubos de suelo + 25% de resina de pino ya deformados. Se puede observar la capa blanca en la parte superior de los cubos. Fuente: El tesista.

### *Muestras de la Etapa 3*

MSE.- Suelo + excremento de burro: Al sumergir los cubos empezaron a burbujejar y poco a poco se deshacían de los bordes (Fig. 3.3.3.1.15), a los 20 minutos empezaron a perder su forma de cubos y a los 46 minutos ya eran montículos de tierra. (Fig. 3.3.1.16).



*Fig. 3.3.3.1.15. Cubos de suelo + excremento de burro al sumergirse en el agua.*  
*Fuente: El tesista.*



*Fig. 3.3.3.1.16. Cubos de suelo + excremento de burro ya deshechos.* Fuente: El tesista.

MSERP15.- Suelo + excremento de burro + 15% de resina de pino: Al introducir los cubos en agua, empezaron a burbujejar sin deshacerse. A los 354 minutos los tres cubos perdieron su forma inicial, conservándose trozos grandes (Fig. 3.3.3.1.17). 24 horas después de su inmersión, se empieza a formar espuma en la superficie. A las 48 horas el agua luce turbia y los trozos son de menor tamaño, quedando restos dispersos. A las 52 horas se ven montículos de tierra con una ligera película en la superficie del agua. (Fig. 3.3.3.1.18).



Fig. 3.3.3.1.17. Cubos de suelo + excremento de burro + 15% de resina de pino al estar sumergidos en el agua. Fuente: El tesista.



Fig. 3.3.3.1.18. Cubos de suelo + excremento de burro + 15% de resina de pino ya deformados. Fuente: El tesista.

### **3.3.4. Prueba de resistencia a la compresión**

Transcurridos los 28 días de secado, se realizaron pruebas de compresión en los cubos, para lo cual se necesitaron taras, brocha, cuadrados de cartón de 5.5 cm x 5.5 cm, máquina para pruebas de compresión, báscula y vernier.

Se pesaron las muestras y se midieron, registrando en una tabla dichos datos. La prueba se realizó individualmente, es decir, cubo por cubo, colocando la cara superior en posición lateral y, en las “nuevas” caras superiores e inferiores se colocó un cuadrado de cartón (Fig. 3.3.4.1) para después acomodarlo en la máquina, ajustándola a la medida del cubo (Fig. 3.3.4.2) y colocando el micrómetro en 0 (Fig. 3.3.4.3).



*Fig. 3.3.4.1. Colocación de los cuadrados de cartón en el cubo. Fuente: El tesista.*



*Fig. 3.3.4.2. Ajuste de la altura de la máquina al tamaño del cubo. Fuente: El tesista.*



*Fig. 3.3.4.1. Colocación en 0 del micrómetro de la máquina.*

Fuente: El tesista.

Posteriormente se encendía la máquina (Fig. 3.3.4.4), subiéndose el plato donde se colocó el cubo: de esta manera el cubo está soportando un peso y al elevar su base éste se comprime hasta romperse.



*Fig. 3.3.4.2. Máquina de compresión siendo encendida. Fuente: El tesista.*

Cada línea que marca el micrómetro es la deformación que sufre el cubo. La máxima carga soportada es la última línea que marcó antes de ir de reversa, es decir, la última línea marcada en sentido de las agujas del reloj antes de marchar en contra de las manecillas del reloj.

Y se registraban los datos, para después con ayuda de la tabla correspondiente al anillo utilizado, las líneas se convierten a kg y se calcularon los datos restantes de la resistencia a la compresión.

También se realizó un Análisis de la Varianza por cada etapa, utilizando los datos obtenidos en esta prueba, con la ayuda del programa MiniTab para analizar el comportamiento de las mezclas empleadas.

### **3.4. Fase III. Pruebas en adobes**

Con base en los resultados obtenidos en los cubos, se procedió a elaboración de adobes para realizar pruebas de permeabilidad, de resistencia a la compresión y de resistencia a la flexión; estas últimas con la finalidad de corroborar la permeabilidad, ya que entre más resistente es un material, hay menos “huecos” en el material y por lo tanto menos permeable.

Se mandaron a elaborar adobes para cubrir los especímenes necesarios para las pruebas de permeabilidad y de compresión; la mitad de adobes de suelo solo y la otra mitad con 15% de resina de pino. Pero todos se fragmentaron, incluyendo los de suelo solo (Fig. 3.4.1).

Por lo cual se descartó el uso de solo tierra y se le agregó estiércol de burro, mandando a hacer 14 nuevos adobes de 30 cm x 22 cm x 10 cm; 7 adobes de suelo + estiércol de burro y 7 adobes con suelo + estiércol de burro + 15% de resina de pino; y

28 adobes de 22 cm x 15 cm x 10 cm; 14 adobes de suelo + estiércol de burro y 14 adobes con suelo + estiércol de burro + 15% de resina de pino. (Fig. 3.4.2).



Fig. 3.4.1. Adobes fragmentados: los del lado izquierdo son de suelo solo, mientras que los de la derecha son de suelo + resina. Fuente: El tesista.



Fig. 3.4.2. Cinco de los segundos adobes elaborados. Los que se muestran son de suelo + excremento de burro + resina. Fuente: El tesista.

Para hacer 10 adobes (de 45 cm x 25 cm x 10 cm) con la combinación que se propone, se requiere de aproximadamente 80 kg de tierra, 4 kg de estiércol de burro y 12 kg de resina de pino (15% respecto al peso de la tierra), (Fig. 3.4.3).



*Fig. 3.4.3. Resina de pino utilizada para la elaboración de adobes. Fuente: El tesista.*

### **3.4.1. Diseño de experimentos para adobes**

Para evaluar el efecto de los agregados naturales en las propiedades de permeabilidad y mecánicas, se desarrolló inicialmente un experimento factorial  $1 \times 4 \times 18$ , teniendo en cuenta el tipo de mezcla y los resultados observados con los cubos, de las 18 réplicas por nivel, 5 réplicas se utilizaron para pruebas de permeabilidad, 6 réplicas se utilizaron para resistencia a la compresión y 7 para resistencia a la flexión. Los niveles de la variable tipo de mezcla fueron: SS, S15RP, SE y SE15RP, es decir: adobe sin agregado, resina de pino 15%, suelo con estiércol de burro y suelo con estiércol de burro y resina de pino (15%).

Pero debido a que los adobes sin estiércol de burro se fragmentaron, el experimento factorial quedó de  $1 \times 2 \times 18$ , donde el factor fue mezcla, los niveles fueron los dos tipos de mezcla (SE Y SE15RP), con 18 réplicas por cada tratamiento.

Los porcentajes de los agregados fueron respecto al peso del suelo. Los porcentajes de adiciones de los agregados para elaborar las mezclas fueron resultado de las pruebas preliminares en cubos y por las entrevistas realizadas (cap. 4.2 Pruebas en cubos, ANEXOS A. Entrevistas). Los pesos totales de los materiales empleados en la elaboración de adobes pueden verse en ANEXOS B. Materiales utilizados.

En cuanto a la variable edad, se consideró solo un nivel que fue a los 14 días por ser el tiempo de secado; al ser el mismo tiempo para todas las mezclas (niveles), no se consideró como un factor más. Las variables de respuesta fueron la permeabilidad, la resistencia a compresión y flexión. Los detalles del diseño experimental se muestran en la Tabla 3.4.1.1.

Tabla 3.4.1.1.

*Diseño de experimento de adobes*

Factor	Niveles o tratamientos	Descripción	Réplicas	Respuesta
Mezcla	2	SE SE15RP	18*	Permeabilidad (prueba de absorción). Resistencia a la compresión y a la flexión.

SE: Suelo y excremento de burro, SE15RP: suelo + excremento de burro + 15% resina de pino.

**Total de muestras:= 36; Edad utilizada: 14 días**

\*Para las pruebas, de las 18 réplicas por mezcla, se utilizaron: 5 réplicas para permeabilidad, 6 réplicas para resistencia a la compresión y 7 réplicas para resistencia a la flexión.

Fuente: El tesista.

### 3.4.2. Prueba de permeabilidad

Se realizó la prueba de permeabilidad en los adobes basándose en la Norma Mexicana MX-C-037-ONNCCE-2005, referente a la determinación de absorción de agua en bloques, ladrillos o tabiques y tabicones. El procedimiento para realizar esta prueba en los adobes fue similar a la realizada con los cubos, difiriendo en el proceso de interpretación de los resultados.

Para la prueba de permeabilidad se necesitaron 10 especímenes ya secos de adobes: 5 sin resina y 5 con resina, báscula, charolas rectangulares de 60 cm x 30 cm x 15 cm, franela y agua. Se registraron las masas de los especímenes y se sumergieron en agua por 24 horas (Fig. 3.4.2.1); terminado este periodo se sacaron y con ayuda de la franela se quitó el agua superficial y se volvieron a pesar los adobes (Fig. 3.4.2.2).



Fig. 3.4.2.1. Adobes sumergidos por 24 horas: los de la derecha son de suelo, estiércol y resina, mientras que los del lado izquierdo son de suelo y estiércol; éstos se deshicieron durante el tiempo que permanecieron sumergidos. Fuente: El tesista.



Fig. 3.4.2.2. Adobe con resina en báscula. Los especímenes de suelo, estiércol y resina no se deshicieron y pudieron pesarse pasadas las 24 horas. Fuente: El tesista.

Mientras que los adobes sin resina no se pudieron pesar por segunda vez ya que se deshicieron, los adobes con resina sí lo consiguieron y con los datos obtenidos se procedió a calcular el porcentaje de absorción.

### 3.4.3. Prueba de resistencia a la compresión

Similar a lo realizado con los cubos, se realizó pruebas de compresión en los adobes; se necesitaron azufre, varillas cuadradas, aceite recocido, parrilla, contenedor, mazo, máquina para pruebas de compresión manual y flexómetro. Se midieron las muestras, registrando los datos. Para esta prueba se requiere que las caras superiores (las más grandes) de los bloques estén lo más planas posible, para que la carga se distribuya

proporcionalmente, por lo cual se les puso una capa de azufre; este proceso se conoce como *cabeceo* (Fig. 3.4.3.1).



*Fig. 3.4.3.1.* Cabeceo de adobes. a) Se calienta azufre a flama baja hasta que esté líquido. b) Mientras se calienta se coloca el marco para el adobe con unas varillas rectangulares, evitando dejar huecos. c) Ya disuelto el azufre se vierte dentro del marco elaborado. d) Rápidamente se coloca el adobe. e) Se espera a que seque el azufre para que con ayuda de un mazo, se despegue el marco del adobe ya nivelado. Se repite el proceso dos veces por adobe (dos caras a nivelar por adobe). Fuente: El tesista.

Para realizar el cabeceo, primero se puso a calentar azufre a flama baja hasta quedar líquido; mientras se calentaba se colocó el marco para el adobe con unas varillas rectangulares, cuidando de que el marco no quedara muy justo ni muy holgado y de no dejar huecos. Cuando el azufre estuvo disuelto se vertió dentro del marco elaborado y rápidamente se colocó el adobe. Se esperó a que secara el azufre para que con ayuda de un mazo, se despegara el marco del adobe ya nivelado. Se repitió el proceso dos veces por adobe, ya que se requiere nivelar sus caras inferior y superior.

Una vez que los adobes estuvieron cabeceados, se metieron uno por uno en la máquina de compresión manual con una placa de metal debajo del adobe y por encima, ajustando la máquina a la medida del adobe; se bombeó la máquina para que la carga empezara a aplicarse en el adobe, se registró la carga máxima que resistió el espécimen mostrado en el lector (Fig. 3.4.3.2) y se realizaron los cálculos necesarios.



Fig. 3.4.3.2. Pruebas de compresión en adobe utilizando máquina de compresión manual.

Fuente: El tesista.

También se realizó un Análisis de la Varianza para analizar el comportamiento de las mezclas empleadas, basándose en las resistencias a la compresión obtenidas de los adobes ensayados, utilizando el programa MiniTab.

#### **3.4.4. Prueba de resistencia a la flexión**

Para realizar esta prueba se colocó el bloque en una placa encima de la máquina de ensaye, con su ancho frente al ensayista, sobre soportes semirrígidos a 12.5 cm del centro de la placa cada uno, siendo la distancia de soporte a soporte de 3 veces el espesor del adobe. Arriba del adobe se colocaron 2 soportes (barras semicirculares), a una distancia de 4.2 cm del centro del mismo, la distancia de soporte a soporte fue de 1/3 de



*Fig. 3.4.4.1. Colocación de bloque para prueba de resistencia a la flexión.*

Fuente: El tesista

la distancia entre los soportes de la base del adobe.

Sobre los soportes superiores se colocó una placa metálica de manera que quedara centrada, encima de ella se colocó un soporte (barra rectangular) que hacía contacto con la cabeza de la máquina (Fig. 3.4.4.1). Colocado correctamente el adobe se le aplicó carga hasta su fallo, ubicando en qué tercio de la longitud del tramo sucedió la fractura para poder realizar los cálculos del módulo de rotura (Fig. 3.4.4.2). Se repitió el proceso con cada adobe ensayado, registrando los datos en la tabla correspondiente.



*Fig. 3.4.4.2. Ubicación de la fractura.*  
Fuente: El tesista.

Finalmente se realizó un Análisis de la Varianza para analizar el comportamiento de las mezclas empleadas, basándose en las resistencias a la flexión obtenidas de los adobes ensayados, utilizando el programa MiniTab.



## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS



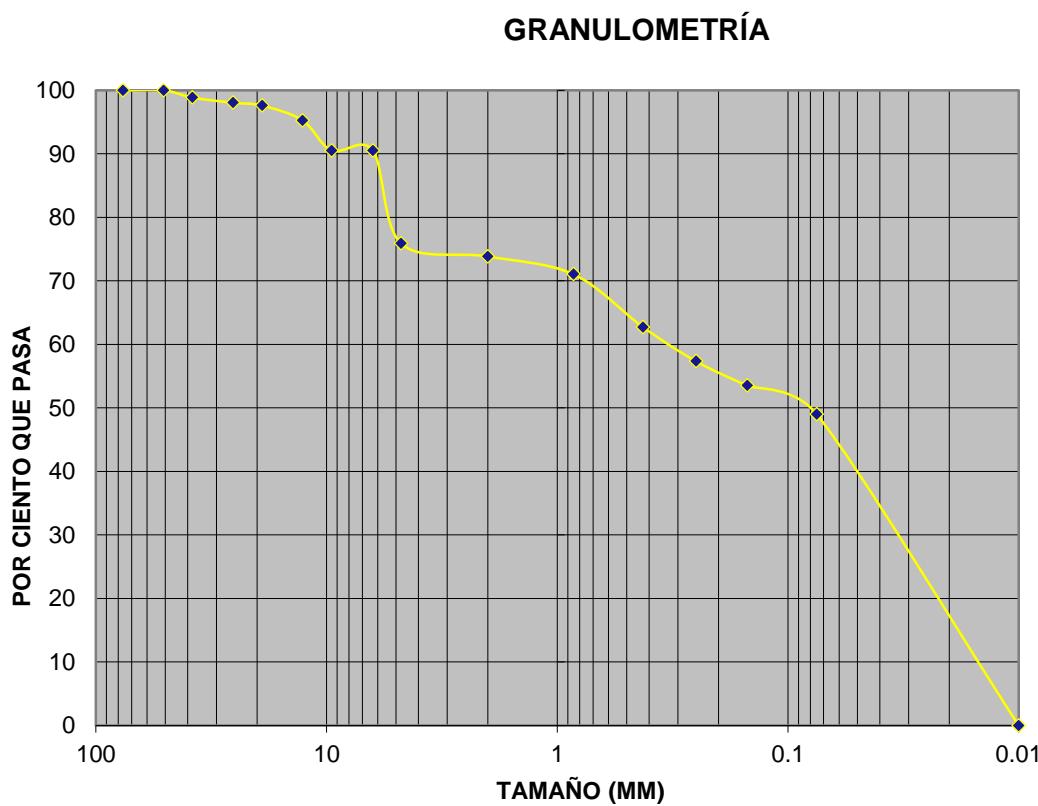
## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el capítulo anterior, Metodología.

### 4.1. Fase I. Clasificación del suelo con base en el SUCS

#### 4.1.1. Análisis granulométrico

De los datos obtenidos del análisis granulométrico se obtuvo la gráfica granulométrica (*Fig. 4.1.1.1*). El suelo estudiado presentó un 49% de finos en su constitución.



*Fig. 4.1.1.1. Gráfica de la curva granulométrica resultante. Fuente: El Tesista.*

#### 4.1.2. Límites de consistencia

Los datos obtenidos de los límites de Atterberg se registraron en la tabla correspondiente (Tabla 4.1.2.1), obteniendo así el límite plástico.

Tabla 4.1.2.1.

*Valores de los límites de consistencia*

Límite líquido								
Ensaye No.	Recipiente No.	No. de Golpes	Peso h + recipiente (g)	Peso s + recipiente (g)	Agua (g)	Peso recipiente	Peso seco (g)	%w
4	15	25	56.27	49.82	6.45	27.02	22.80	28.29

Límite plástico								
Ensaye No.	Recipiente No.	No. de Golpes	Peso h + recipiente (g)	Peso s + recipiente (g)	Aqua (g)	Peso recipiente	Peso seco (g)	%w
1	5	25	36.05	34.80	1.25	27.56	7.24	17.27

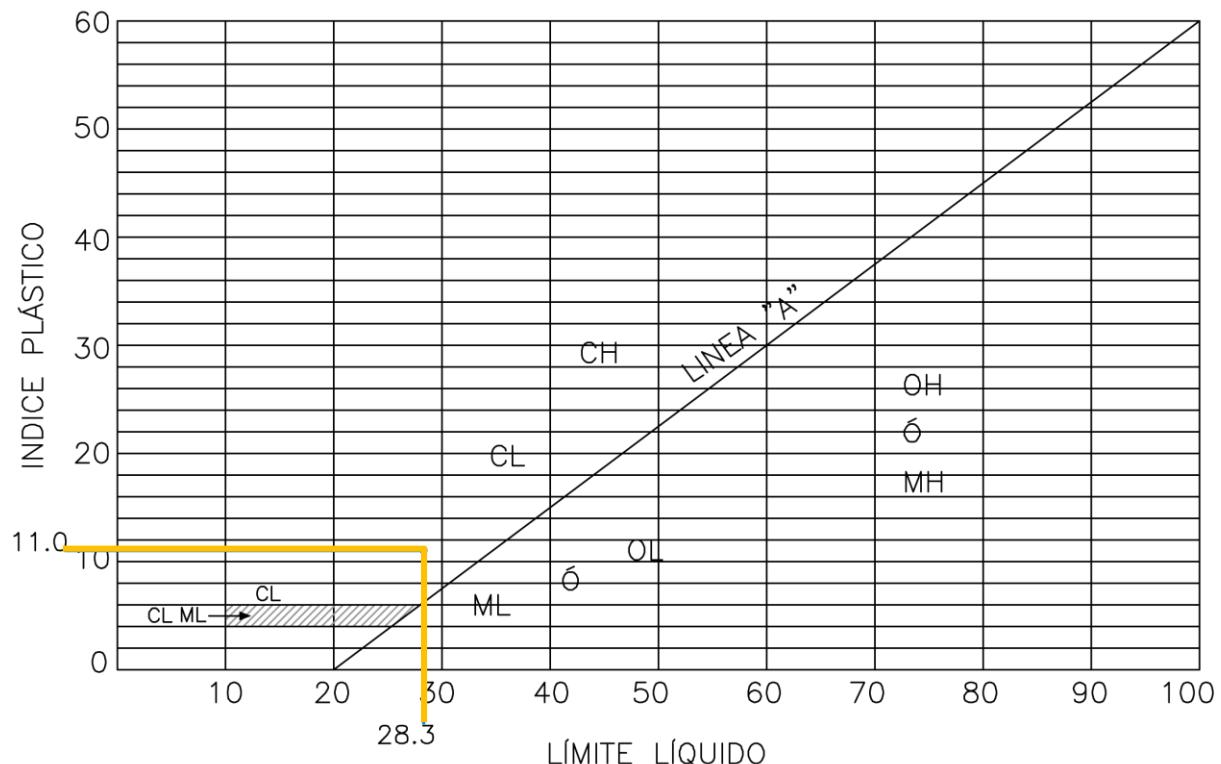
Índice plástico
IP= Límite líquido – Límite plástico= 28.29-17.27= 11.02

Contracción lineal					
Ensaye No.	Recipiente No.	No. de Golpes	Long. del molde (mm)	Long. barra m. seco (mm)	% Contracción lineal
1	5	25	995	930	6.53

Fuente: El tesista.

#### 4.1.3. Carta de plasticidad

Con los límites de plasticidad y líquido obtenidos, se graficaron los datos dentro de la carta de plasticidad, lo cual indica, de acuerdo al SUCS, que el suelo corresponde al tipo CL, ya que se ubica arriba de la línea A (Fig. 4.1.3.1).



*Fig. 4.1.3.1. Clasificación del suelo seleccionado para la elaboración de adobes, de acuerdo a la carta de plasticidad. Fuente: El tesista.*

El suelo tipo CL cuenta con un límite líquido menor de 50 y se ubica arriba de la línea A, indicando que es un suelo con arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, lo cual la hace idónea para la elaboración de adobes.

#### **4.1.4. Prueba AASHTO estándar variante A**

Se obtuvieron los datos necesarios para el cálculo de la humedad óptima y el volumen seco máximo (Tabla 4.1.4.1) y al graficar los puntos obtenidos, el punto máximo indica los valores buscados (Fig. 4.1.4.1). La humedad óptima resultante fue de 15.8% mientras que el peso específico fue de  $815 \text{ kg/cm}^3$ .

Tabla 4.1.4.1.

*Determinación del peso específico seco máximo y porcentaje de humedad*

TIPO DE PRUEBA:		AASHTO STD. Var. "A"						
NUM DE CAPAS	3	PESO PIZON:	2.5	Kgs.	MOLDE NUM.	1		
NUM. DE GOLPES POR CAPA	25	ALTURA DE CAIDA:	30.5	cm	VOLUMEN	0.94345	I	
<b>PRUEBA NUMERO</b>								
Peso molde + suelo húmedo, g.	nd	3989	4054	4069	4074	4031	3987	3950
Peso del molde, g.	3190	3190	3190	3190	3190	3190	3190	3190
Peso suelo húmedo, g (Wm)	-	799	864	879	884	841	797	760
Peso específico húmedo(kg/m <sup>3</sup> ):	-	847	916	932	937	891	845	806
Cápsula número	7	11	18	21	22	8	10	16
Peso de la cápsula+suelo húmedo, g	153.44	119.56	130.31	143.19	152.35	179.03	167.8	177.14
Peso de la cápsula + suelo seco, g	142.01	109.7	117.84	129.17	135.56	156.41	145.03	151.53
Peso del agua, g	11.43	9.86	12.47	14.02	16.79	22.62	22.77	25.61
Peso cápsula, g	23.27	29.91	23.74	33.97	33.8	34.21	31.99	35.51
Peso suelo seco, g	118.74	79.79	94.1	95.2	101.76	122.2	113.04	116.02
Contenido de agua, % w	9.6	12.4	13.3	14.7	16.5	18.5	20.1	22.1
Peso específico seco(kg/m <sup>3</sup> )	-	754	809	812	804	752	703	660

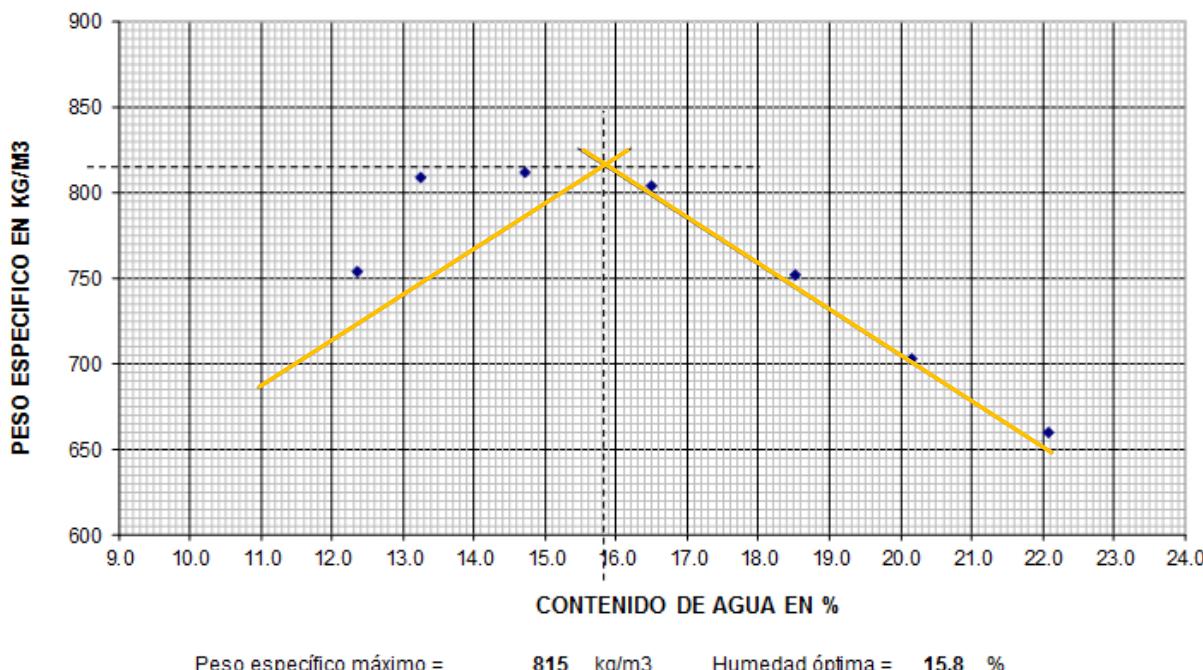


Fig. 4.1.4.1. Gráfica de los datos obtenidos, mostrando el valor del peso específico máximo y el porcentaje de humedad óptima. Fuente: El tesista.

## 4.2. Fase II. Pruebas en cubos

### 4.2.1. Cubos muestra

El total de cubos muestra elaborados para las pruebas preliminares fue de **99 cubos muestra** (45 cubos muestra iniciales + 36 cubos de resina de pino en otras proporciones + 18 cubos con estiércol de burro y suelo (9 con 15% de resina de pino y 9 sin resina de pino)).

De las muestras de la Etapa 1, el combinar suelo y resina (M10RP) dio mejores resultados, además de que el mezclado fue más uniforme y fácil que con las demás (M5JHP, M5HP y M10ET). Debido a esto, se decidió realizar más muestras con diferentes proporciones de resina (muestras Etapa 2): al 5% (M5RP), 15% (M15RP), 20% (M20RP) y 25% (M25RP); al agregar más del 15% de resina el mezclado se dificultaba, aumentando su impermeabilidad pero disminuyendo su resistencia a la compresión, por lo que la mezcla de suelo con 15% de resina fue la que obtuvo resultados más altos tanto en la prueba de degradación como en la de compresión. Por lo cual, la proporción de 15% de resina se empleó para combinar con suelo + excremento de burro y a su vez se comparó con muestras de suelo + excremento de burro sin estiércol (muestras Etapa 3).

A continuación se describen los resultados obtenidos de cada mezcla en las pruebas de degradación en agua y de resistencia a la compresión.

#### **4.2.2. Prueba de degradación en agua**

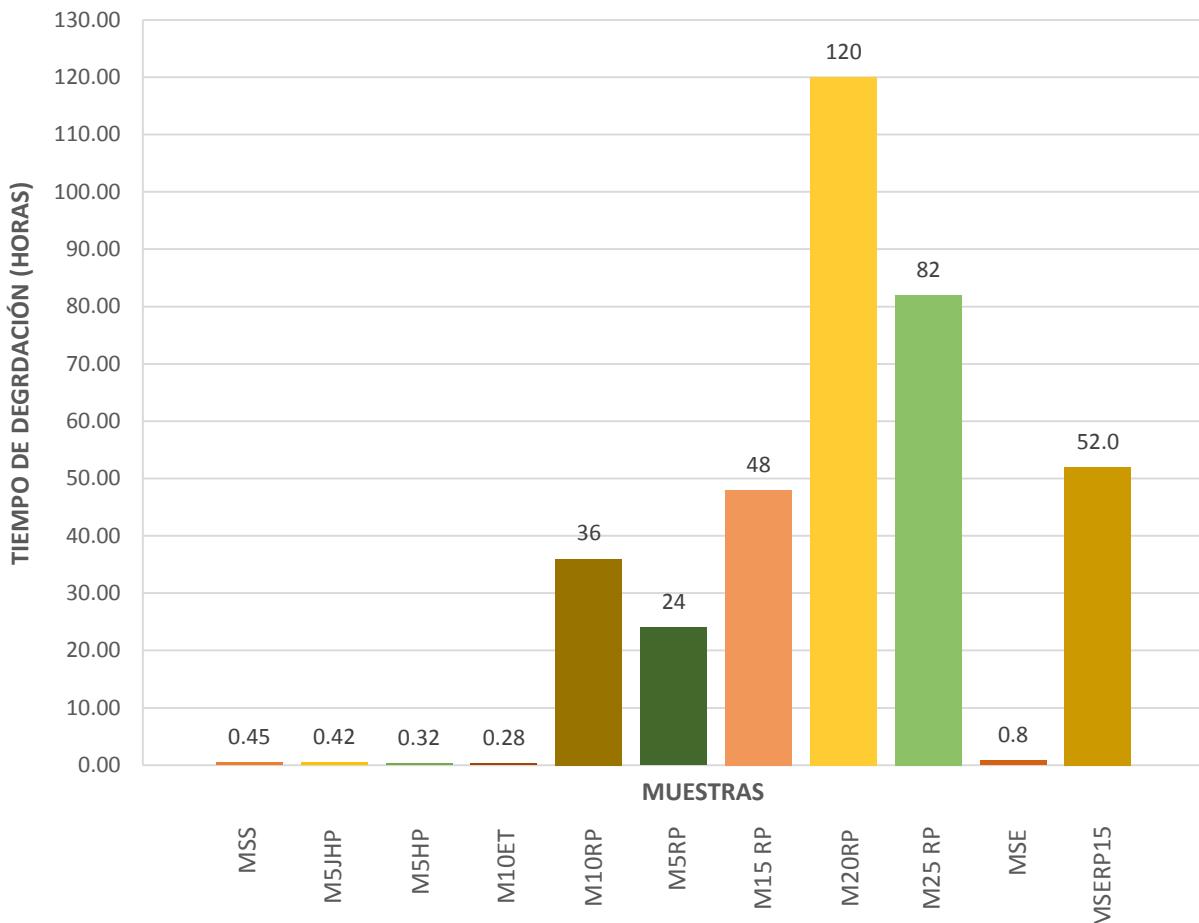
Tras sumergir las muestras, se tomaron los tiempos de degradación para compararlos entre sí. Promediando los tiempos de las réplicas por mezcla, de la Etapa 1 la mezcla que tardó más tiempo en deshacerse (36 horas) fue la de suelo + 10% de resina de pino y con gran diferencia a las demás mezclas, ya que las demás tardaron no más de media hora. De la Etapa 2, aunque los niveles (mezclas utilizadas) tuvieron resistencias altas al agua, la mezcla de suelo + 20% de resina de pino fue la que tardó más tiempo en deshacerse (120 horas) y de la Etapa 3, la mezcla de suelo + excremento de burro + 15% de resina de pino, se deshizo al último (52 horas).

Para visualizar con mayor claridad el efecto del agua en los cubos elaborados, se analizarán todos los cubos conjuntamente:

De las diferentes mezclas las que mayor tiempo tardaron fueron las de resina 20%, resina 25% y en tercer lugar general las de resina al 15% (3er. lugar con excremento y 4to. lugar sin excremento) (Fig. 4.2.2.1).

Hasta la muestra con 20% de resina, se observa que la resistencia al agua va en aumento, pero al llegar al 25% de resina, esta resistencia se pierde, debido a que rebasa en demasiada la humedad óptima, es decir, hay demasiada agua la cual reduce la cantidad de suelo que es la base de la matriz. Lo cual se manifiesta desde la elaboración de las muestras, ya que con las muestras de 20% y 25% fue más complicado el mezclado uniforme.

## DEGRADACIÓN EN AGUA DE CUBOS



M= muestra. SS: Suelo solo, 5JHP: suelo+5% jugo de hoja de plátano, 5HP: suelo+5% hoja de plátano, 10ET: suelo+10% engrudo de trigo diluido, 10RP: suelo+10% resina de pino, 5RP: suelo+5% resina de pino, 15RP: suelo+15% resina de pino, 20RP: suelo+20% resina de pino, 25RP: suelo+25% resina de pino, SE: suelo y excremento de burro, SERP15:suelo +excremento de burro +15% resina de pino.

*Fig. 4.2.2.1.* Promedio de los tiempos que tardan las muestras en deshacerse completa o casi completamente. Fuente: El tesista.

#### **4.2.3. Prueba de resistencia a la compresión**

Se registraron los datos obtenidos por cada Etapa de las pruebas de resistencia a la compresión (Tabla 4.2.3.1, Tabla 4.2.3.3 y Tabla 4.2.3.5), y los resultados del Análisis de la Varianza, los cuales indican la cercanía entre réplicas, es decir, que tan homogéneas resultaron y el nivel de confianza que presentaron los datos.

Tabla 4.2.3.1.

*Datos obtenidos de la prueba de resistencia a la compresión en las muestras elaboradas de la Etapa 1. Pruebas iniciales (selección de agregado).*

<b>Factor</b>	<b>Niveles</b>	<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>					
		A	B	C	D	E	F
<b>Tipo de mezcla</b>	SS	3.25	3.26	3.44	2.97	3.44	3.39
	5JHP	3.22	2.80	3.77	3.31	2.83	3.43
	5JHP	2.42	3.02	2.59	3.28	3.12	2.99
	10ET	2.23	2.40	3.45	2.59	2.78	2.21
	10RP	4.16	4.42	4.62	4.83	3.51	4.56
SS: Suelo solo, 5JHP: +5% jugo de hoja de plátano, 5HP: +5% hoja de plátano, 10ET: +10% engrudo de trigo diluido, 10RP: +10% resina de pino							

Fuente: El tesista.

En la Etapa 1 (Tabla 4.2.3.2), de acuerdo a los resultados, se observó que las resistencias obtenidas fueron homogéneas, en otras palabras, que los valores entre las muestras fueron lo más parecidos entre ellos, ya que se obtuvo un valor  $R^2$  de 74.55%, cercano al 100%, lo cual indica un óptimo ajuste de los valores al comportamiento del material. La resistencia a la compresión promedio más alta de esta etapa, la presentó la mezcla de suelo con 10% de resina con 4.35 MPa (Fig. 4.2.3.1).

Tabla 4.2.3.2.

*ANOVA de la Etapa 1. Pruebas iniciales (selección de agregado).*

Variable	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Valor P
		Ajustados	Ajustado		
<b>Tipo de mezcla</b>	4	10.432	2.6079	18.30	0.000
<b>Error</b>	25	3.562	0.1425		
<b>Total</b>	29	13.993			
<b>S</b>		0.377463	<b>R<sup>2</sup></b>		74.55%

Fuente: El tesista.

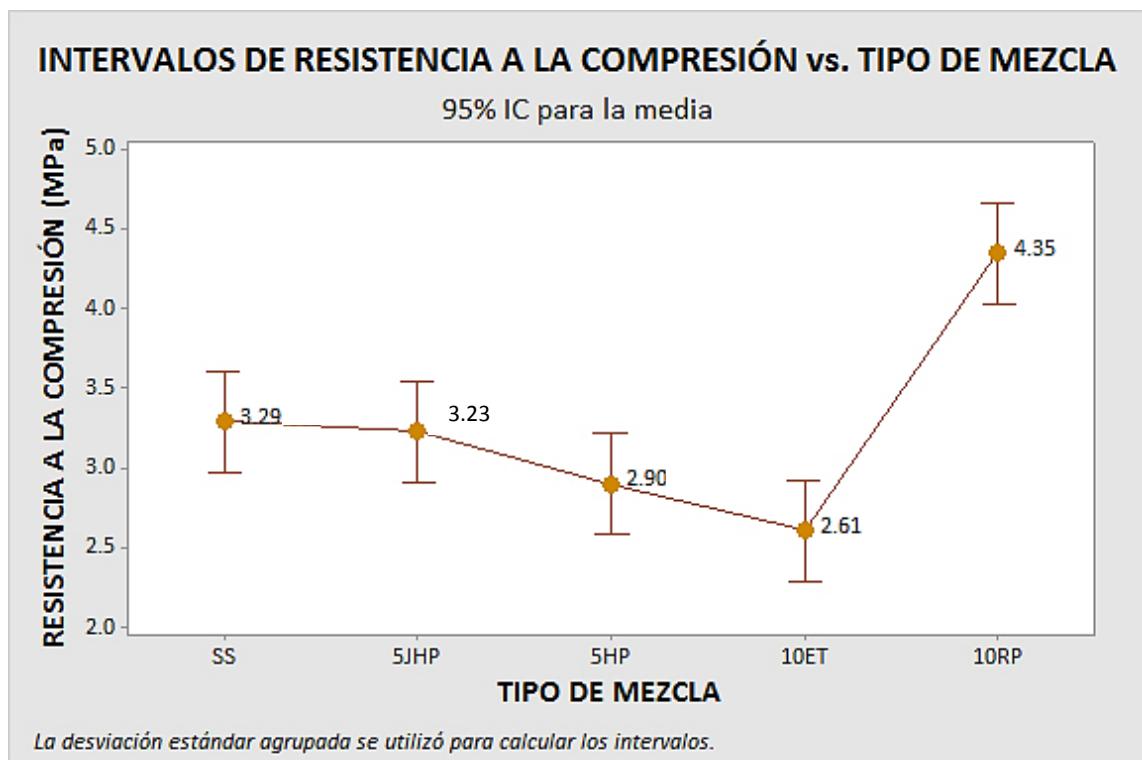


Fig. 4.2.3.1. Gráfica de intervalos de resistencia a la compresión de la Etapa 1. La mezcla 5JHP tuvo una resistencia casi igual a la mezcla patrón SS, mientras que las mezclas 5HP y 10ET obtuvieron resistencias menores, pero todas fueron superadas por la mezcla 10RP.

Fuente: El tesista.

En la Etapa 2 (Tabla 4.2.3.4), de acuerdo a los resultados del Análisis de la Varianza se obtuvo un valor  $R^2$  de 89.80%, el cual es cercano al 100%, lo cual indica un valor constante entre los valores del comportamiento de la resistencia a la compresión. La mezcla 15RP presentó la resistencia más alta con 4.82 MPa en promedio (Fig. 4.2.3.2).

Tabla 4.2.3.3.

*Datos obtenidos de la prueba de resistencia a la compresión en las muestras elaboradas de la Etapa 2. Pruebas intermedias (proporcionamiento).*

Factor	Niveles	Resistencia a la compresión (MPa)					
		A	B	C	D	E	F
Tipo de mezcla	5RP	3.12	3.27	3.10	3.18	3.04	3.52
	10RP	4.16	4.42	4.62	4.83	3.51	4.56
	15RP	5.17	4.07	5.22	4.98	4.16	5.30
	20RP	2.47	3.26	2.65	3.14	2.60	2.80
	25RP	1.22	1.81	1.85	0.26	1.71	1.01
5RP: +5% resina de pino, 10RP: +10% resina de pino, 15RP: +5% resina de pino, 20RP: +5% resina de pino, 25RP: +25% resina de pino.							

Fuente: El tesista.

Tabla 4.2.3. 4.

*ANOVA de la Etapa 2. Pruebas intermedias (proporcionamiento).*

Variable	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados Ajustados	Cuadrado Medio Ajustado	Valor F	Valor P
Tipo de mezcla	4	45.614	11.4035	55.05	0.000
Error	25	5.178	0.2071		
Total	29	50.792			
S	0.455126	$R^2$	89.80%		

Fuente: El tesista.

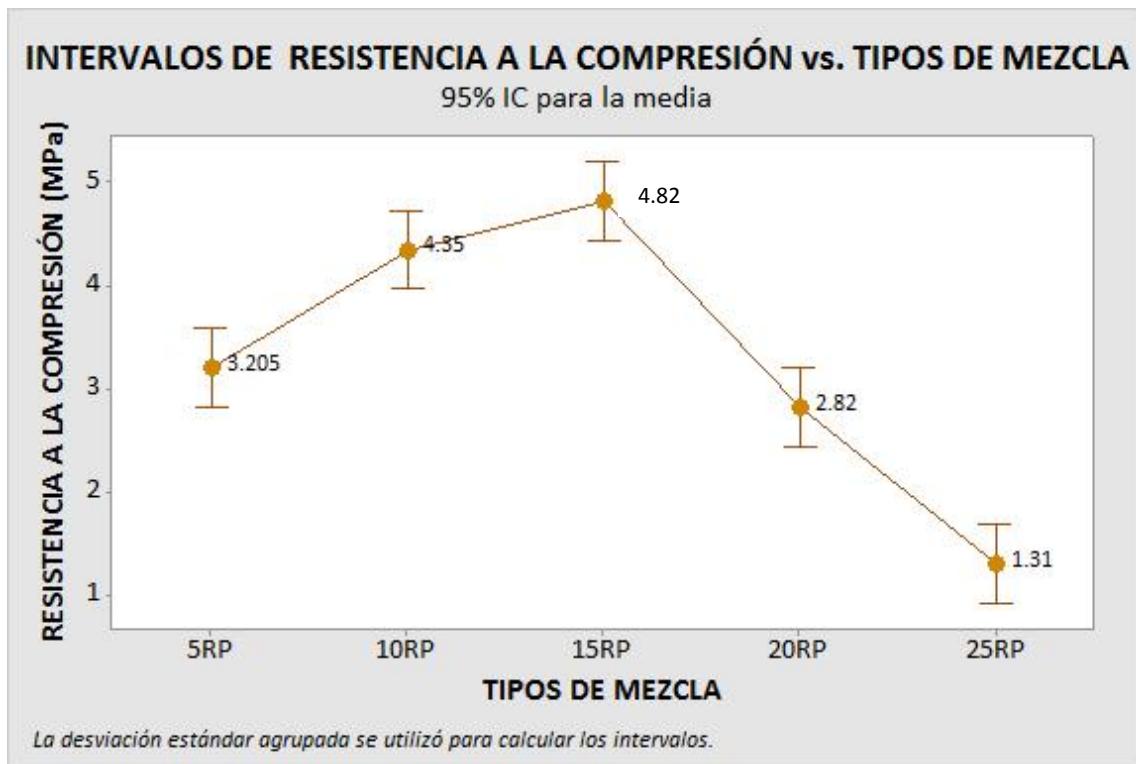


Fig. 4.2.3.2. Gráfica de intervalos de resistencia a la compresión de la Etapa 2. Las resistencias a la compresión iban aumentando conforme al aumento de % de resina, pero después del 15% fueron disminuyendo. Fuente: El tesista.

En la Etapa 3 (Tabla 4.2.3.6), se observó que los valores de los resultados de las resistencias fueron homogéneos, ya que con el Análisis de la Varianza se obtuvo un valor  $R^2$  de 80.12%, el cual al ser cercano al 100%, indica un óptimo ajuste de los valores al comportamiento del material. La resistencia a la compresión promedio más alta de esta etapa, la presentó la mezcla de suelo con 15% de resina con 4.04 MPa (Fig. 4.2.3.3).

Tabla 4.2.3.5.

*Datos obtenidos de la prueba de resistencia a la compresión en las muestras elaboradas de la Etapa 3. Pruebas finales en cubos.*

Factor	Niveles	Resistencia a la compresión (MPa)					
		A	B	C	D	E	F
Tipo de mezcla	SE	1.62	2.23	2.40	1.85	1.94	1.63
	SERP15	3.61	4.20	5.28	3.99	3.04	4.10
SE: suelo y excremento de burro, SERP15: suelo +excremento de burro +15% resina de pino.							

Fuente: El tesista.

Tabla 4.2.3. 6.

*ANOVA de la Etapa 3. Pruebas finales en cubos.*

Variable	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados Ajustados	Cuadrado		
			Medio	Valor F	Valor P
Tipo de mezcla	1	13.125	13.1252	40.31	0.000
Error	10	3.256	0.3256		
Total	11	16.381			
S	0.570639		R <sup>2</sup>	80.12%	

Fuente: El tesista.

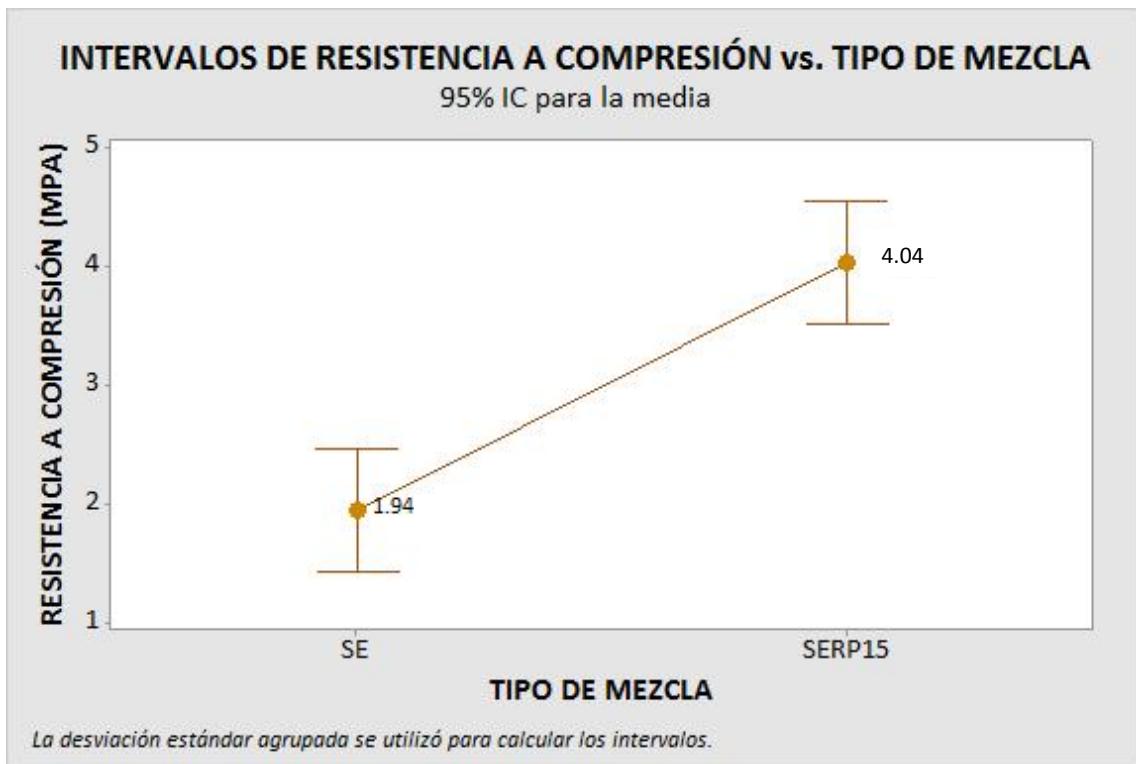
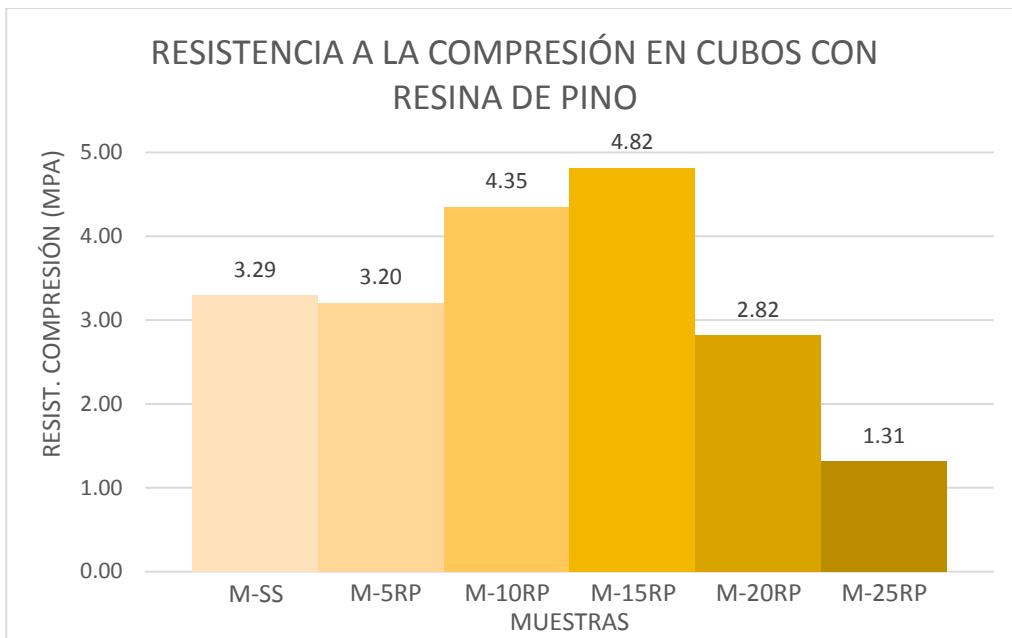


Fig. 4.2.3.3. Gráfica de intervalos de resistencia a la compresión de la Etapa 3. Las mezclas SE y SERP15 mostraron gran diferencia en la resistencia a la compresión (casi el doble).

Fuente: El tesista.

Para conocer las resistencias a la compresión, las medidas y otros detalles de las réplicas de cada una de las mezclas elaboradas, se puede consultar la sección ANEXOS C. Muestras de la prueba de resistencia a compresión en cubos.

La resistencia a la compresión en las muestras de suelo con 5% a 15% de resina, fueron en aumento conforme más resina se les agregaba, mientras que en las muestras que contenían mayor porcentaje de resina, sus valores fueron disminuyendo (Fig. 4.2.3.4). Comparándolas con la MSS, la resistencia a la compresión fue M15RP > M10RP > MSS > M5RP > M20RO > M25RP.



M= muestra. SS: Suelo solo, 5RP: suelo+5% resina de pino, 10RP: suelo+10% resina de pino, 15RP: suelo+15% resina de pino, 20RP: suelo+20% resina de pino, 25RP: suelo+25% resina de pino.

*Fig. 4.2.3.4. Resistencia a compresión promedio resultante en las muestras de suelo solo y en las muestras de distintas proporciones de resina de pino.*

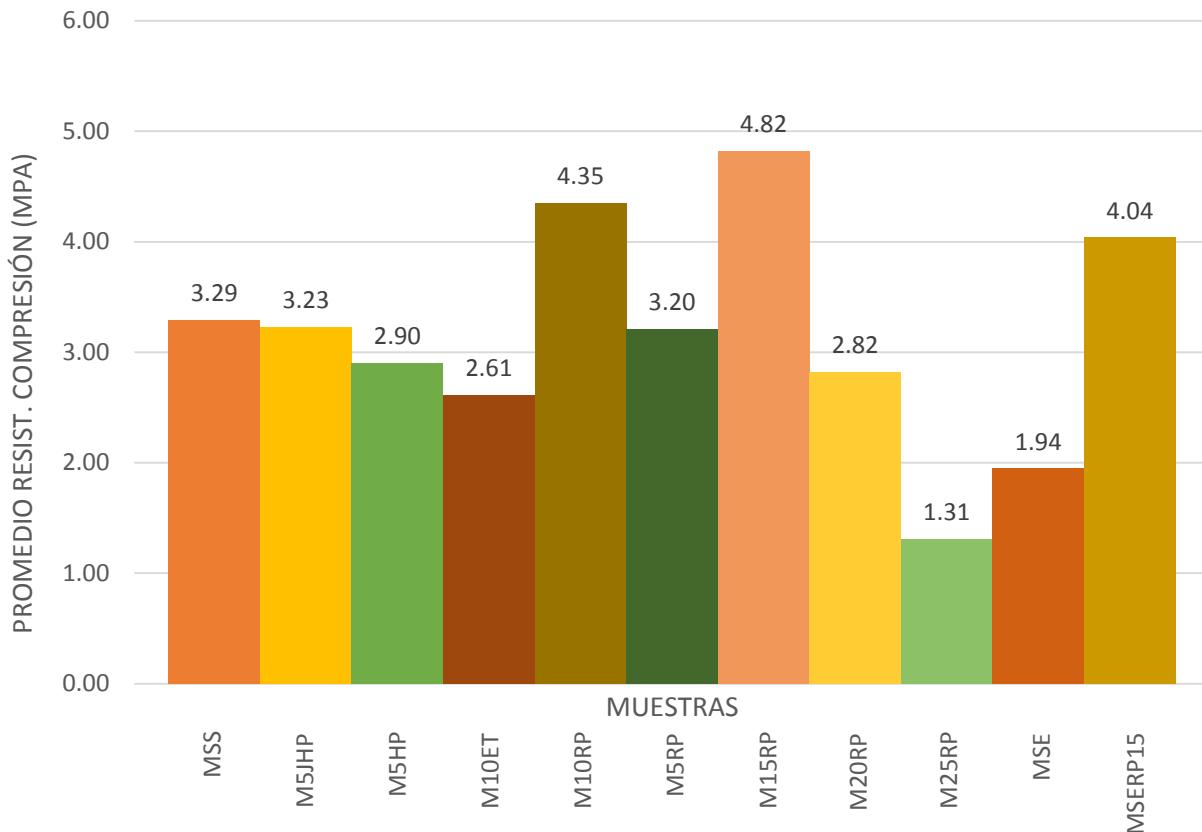
Fuente: El tesista.

La resistencia a la compresión en los cubos promedio, se dio de la siguiente manera:

**M15RP > M10RP > MSERP15 > MSS > M5RP > M5JHP > M5HP > M20RP >  
M10ET > MSE > M25RP**

Las muestras de suelo con 15% de resina, 10% de resina y 15% de resina combinada con excremento de burro, son, respectivamente, las que cuentan con las resistencias a la compresión más altas respecto a las demás (Fig. 4.2.3.5).

## RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS



M= muestra. SS: Suelo solo, 5JHP: suelo+5% jugo de hoja de plátano, 5HP: suelo+5% hoja de plátano, 10ET: suelo+10% engrudo de trigo diluido, 10RP: suelo+10% resina de pino, 5RP: suelo+5% resina de pino, 15RP: suelo+15% resina de pino, 20RP: suelo+20% resina de pino, 25RP: suelo+25% resina de pino, SE: suelo y excremento de burro, SERP15:suelo +excremento de burro +15% resina de pino.

*Fig. 4.2.3.5. Resistencia a la compresión promedio de todas las muestras realizadas.*

Fuente: El tesista.

Los resultados de los cubos a los que se les agregó estiércol de burro fueron similares a los de sus proporciones sin este aditamento, siendo las muestras con resina las que tardaron más tiempo en deshacerse y presentaron mayor resistencia a la compresión.

Por lo cual, de las pruebas de degradación de agua y de compresión, la que mejores resultados en conjunto obtuvo, fue la muestra de suelo + 15% de resina de pino, ya que

fue la tercera en conservar su forma por más tiempo sumergida en agua (48 horas sin excremento y 52 horas con excremento en la mezcla) y la que mayor resistencia a la compresión presentó (suelo y resina: 4.97 MPa; suelo + resina + excremento: 4.04 MPa).

#### **4.3. Fase III. Pruebas en adobes**

Los adobes que se mandaron a hacer con 15% de resina y suelo solo acabaron fracturándose, por lo cual no se les pudieron realizar las pruebas planteadas. Éstos se rompieron por exceso de agua, además, por lo común, al utilizar ese tipo de tierra le agregan excremento de burro, que cumple la función de aglomerante. Así que se elaboraron adobes con suelo, excremento de burro y resina de pino; los adobes resultantes ya no se cuartearon y se realizaron las pruebas de permeabilidad y de resistencia a la compresión.

##### **4.3.1. Prueba de permeabilidad**

Para calcular el porcentaje de absorción de agua, que es una forma de decir que tan permeable o no es un material, se utilizó la fórmula 2.2.3.2:

$$A = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s} \times 100$$

En donde:

A= % de volumen de agua absorbida referido al volumen del espécimen

M<sub>s</sub>= Masa seca del espécimen en kg

M<sub>sss</sub>= Masa saturada y superficialmente seca en kg

Los adobes de suelo y excremento de burro no se conservaron durante las 24 horas, volviéndose lodo, por lo que no hubo porcentaje que calcular; mientras que los adobes de suelo + excremento de burro + 15% resina de pino sí lo consiguieron y el promedio de porcentaje de absorción fue de 18.95%. (Tabla 4.3.1.1).

Tabla 4.3.1.1.

*Datos recabados de la prueba de permeabilidad en los adobes*

MUESTRA	Masa seca (Ms)	Masa saturada y superficialmente seca (Mss)	Absorción (A)
	(kg)	(kg)	%
<b>ADOBÉ (SUELO + EXCREMENTO DE BURRO)</b>			
1-SE	3.84	-	-
2-SE	3.78	-	-
3-SE	3.52	-	-
4-SE	3.91	-	-
5-SE	3.94	-	-
<b>ADOBÉ (SUELO + EXCREMENTO DE BURRO + RESINA DE PINO)</b>			
1-SE15RP	3.90	4.81	23.24
2-SE15RP	3.58	4.30	20.08
3-SE15RP	3.88	4.38	13.00
4-SE15RP	3.54	4.10	15.72
5-SE15RP	3.93	4.82	22.71
		PROMEDIO	<b>18.95</b>

Fuente: El tesista.

#### **4.3.2. Prueba de resistencia a la compresión**

Se registraron las resistencias a la compresión obtenidas de esta prueba (Tabla 4.3.2.1), siendo más altos los valores de los adobes con resina, con una resistencia a la compresión promedio de 5.88 MPa (Tabla 4.3.2.2). Para más detalles de las réplicas utilizadas ver la sección ANEXOS D. Detalles en pruebas en adobes.

Tabla 4.3.2. 1. *Datos conseguidos de la prueba de compresión en los adobes.*

Factor	Niveles	Resistencia a la compresión (MPa)					
		A	B	C	D	E	F
Tipo de mezcla	SE	4.18	5.71	5.44	4.01	4.36	3.23
	SE15RP	6.18	5.77	5.76	4.65	6.13	6.80
SE: suelo y excremento de burro,							
SE15RP: suelo +excremento de burro +15% resina de pino.							

Fuente: El tesista.

Tabla 4.3.2.2. *Resistencia a la compresión promedio de los adobes elaborados.*

MUESTRA	RESISTENCIA A COMPRESIÓN PROMEDIO (Mpa)
ADOBE (SUELO + EXCREMENTO DE BURRO)	4.49
ADOBE (SUELO + EXCREMENTO DE BURRO + 15% RESINA DE PINO)	5.88

Fuente: El tesista.

Los resultados del Análisis de la Varianza indican la homogeneidad de las réplicas, es decir que tan parecidos resultaron los valores entre las muestras. Para las pruebas de resistencia a compresión en adobes no se obtuvo un valor constante en cuanto al comportamiento del material, ya que fue del 45.92% (Tabla 4.3.2.3), lo cual indica que se tendría este mismo porcentaje de probabilidad de obtener los mismos resultados si se repitiera la prueba. Hubo un factor, como pudieran ser las dimensiones o que la carga pudo

no haberse distribuido uniformemente, que hizo variar las resistencias y por ende se obtuvo un valor bajo del  $R^2$ , ya que está lejos del 100% y una varianza alta al ser cercana a 1.00.

Tabla 4.3.2.3. ANOVA de las pruebas de resistencia a la compresión en adobes.

<b>Variable</b>	<b>Grados de Libertad</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Cuadrado Ajustado</b>		
		<b>Ajustados</b>	<b>Medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor P</b>
<b>Tipo de mezcla</b>	1	5.824	5.8241	8.49	0.000
<b>Error</b>	10	6.860	0.6860		
<b>Total</b>	11	12.684			
<b>S</b>		0.828261	<b>R<sup>2</sup></b>		45.92%

Fuente: El tesista.

Los adobes con suelo y excremento de burro (SE) obtuvieron una resistencia a la compresión superior a los 4 MPa exceptuando a la muestra 6-SE, ya que consiguió 3.23 MPa. El valor promedio de resistencia a la compresión fue de 4.49 MPa (Fig. 4.3.2.1).

Mientras que los adobes de suelo, excremento de burro y 15% de resina de pino (SE15RP), su valor promedio fue de 5.88 MPa; la resistencia a la compresión más baja la presentó la muestra 4-SE15RP con 4.65 MPa, la muestra 6-SE15RP obtuvo casi 7 MPa siendo la más alta y los demás adobes estuvieron alrededor de los 6 MPa (Fig. 4.3.2.2).

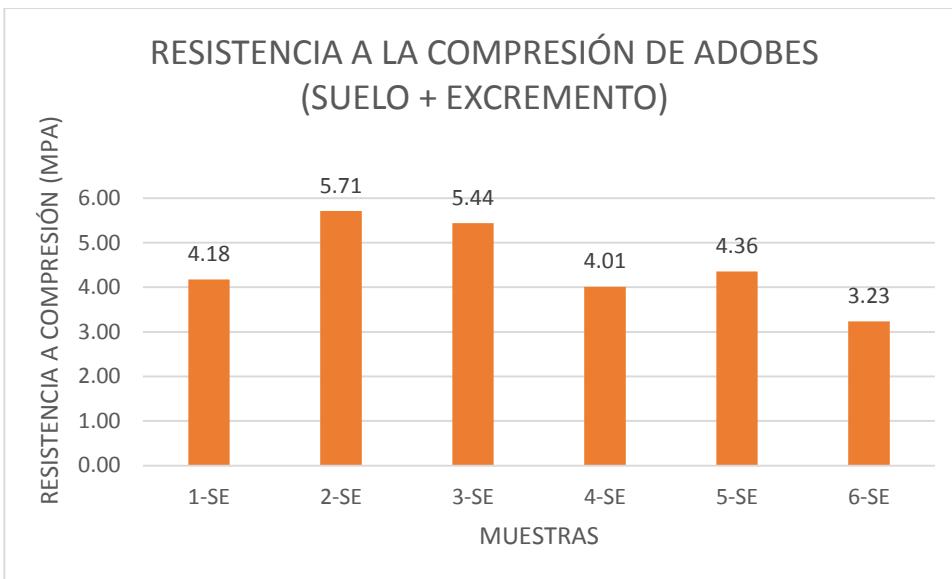


Fig. 4.3.2.1. Resistencia a la compresión de los adobes de suelo + excremento de burro (MSE).

Fuente: El tesista.

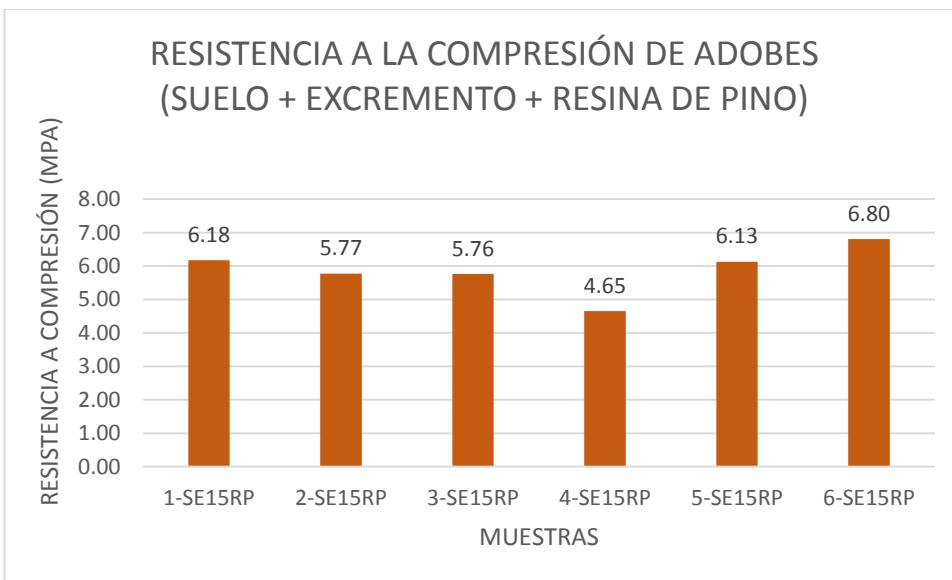
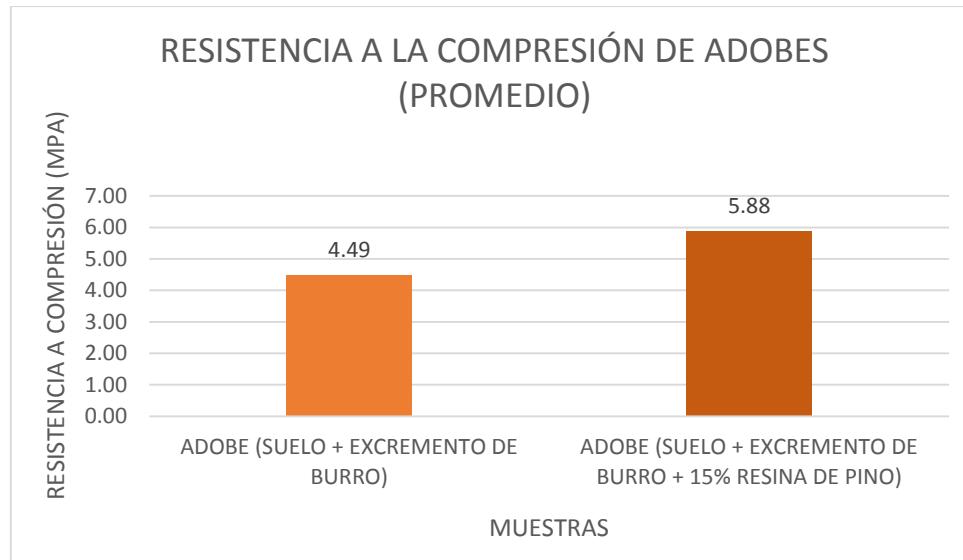


Fig. 4.3.2.2. Resistencia a la compresión de los adobes de suelo + estiércol de burro + 15% de resina de pino (MSERP15). Fuente: El tesista.

Comparando los dos grupos de adobes, aunque el adobe tradicional obtuvo un buen valor promedio de resistencia a la compresión, el adobe con resina de pino alcanzó un valor mayor, con 1.39 MPa de diferencia (Fig. 4.3.2.3).



*Fig. 4.3.2.3. Resistencia a la compresión de los adobes ensayados. Fuente: El tesista.*

#### **4.3.3. Requisitos de calidad**

Como se mencionó anteriormente, la norma N-CMT-2-01-001/002 *Parte: Materiales para estructuras, título: 01. Materiales para mamposterías, capítulo: 001 Ladrillos y bloques cerámicos*, establece los requisitos de calidad de los ladrillos y bloques cerámicos, siendo los más parecidos a los adobes.

Esta norma establece que los materiales elaborados a mano de subtipo macizo, que es en el subtipo donde encajan los adobes, son de calidad E, siendo los de menor calidad dentro de la escala de A a E. Y los valores que pide la norma para el subtipo macizo, grado de calidad E son mínimamente 2 MPa para resistencia a compresión simple y un porcentaje de 24% de absorción de agua.

El adobe planteado en este trabajo con 15% de resina, supera los pedidos en la norma para el grado de calidad E, ya que resiste a la compresión 5.88 MPa y el porcentaje

de absorción con el que cuenta es de 18.95%. Si comparamos este adobe dentro del subtipo macizo, con el grado de calidad superior, es decir, el D, se supera lo requerido y, comparando con el grado de calidad C, el adobe con resina casi se acerca al porcentaje de absorción de agua de 18% requerido pero le faltan 2.22 MPa para alcanzar los 8 MPa de resistencia a la compresión. (Tabla 4.3.3.1).

Tabla 4.3.3.1.

*Comparación de algunos requerimientos de calidad entre ladrillos y bloques cerámicos y adobe con resina de pino.*

Característica	Valor			
	Subtipo Macizo			
	Fabricado a mano	Fabricado con máquina	<b>Adobe con 15% resina de pino</b>	Fabricado con máquina
	Grado de calidad E	Grado de calidad D		Grado de calidad C
Resistencia a la compresión simple; MPa, mínima	2	4	5.88	8
Absorción de agua; %, máxima	24	20	18.95	18

Fuente: El tesista.

El adobe elaborado con resina de pino, excremento de burro y suelo se encontraría entre los bloques de calidad D y E del subtipo macizo fabricados con máquina; observando que al agregarle resina al adobe tradicional sí aumenta su impermeabilidad, ya que absorbe menos agua y además, mejora su resistencia a la compresión.

#### 4.3.4. Prueba de resistencia a la flexión

Se registraron las resistencias a la flexión de las réplicas empleadas (Fig. 4.3.2.1). Los resultados de este ensayo fueron casi iguales para los adobes con suelo y excremento y los adobes con suelo, excremento y resina de pino (Tabla 4.3.4.2). Las medidas y cargas de las réplicas utilizadas pueden verse en la sección ANEXOS C. Detalles de pruebas en adobes.

Tabla 4.3.4.1.

*Datos recopilados de la prueba de resistencia a la flexión.*

Factor	Niveles	Módulo de ruptura (MPa)						
		A	B	C	D	E	F	G
Tipo de mezcla	SE	0.884	0.764	0.900	0.828	0.760	0.881	0.851
	SE15RP	0.847	0.720	0.853	1.003	0.681	0.930	0.846
SE: suelo y excremento de burro,								
SE15RP: suelo +excremento de burro +15% resina de pino.								

Fuente: El tesista.

Tabla 4.3.4.2. *Valor promedio de resistencia a la flexión por muestra*

MUESTRA	MÓDULO DE RUPTURA PROMEDIO (MPa)
ADOBE (SUELO + EXCREMENTO DE BURRO)	0.838
ADOBE (SUELO + EXCREMENTO DE BURRO + RESINA DE PINO)	0.840

Fuente: El tesista.

Los resultados del Análisis de la Varianza indican la cercanía o semejanza entre los valores de resistencia a flexión de las réplicas, para las pruebas de resistencia a flexión en adobes no se obtuvo un valor constante en cuanto al comportamiento del material, ya que fue del 0.01% (Tabla 4.3.4.3). En esta prueba se obtuvo una diferencia significativa entre las lecturas, habiendo un factor, que pudieron haber sido las dimensiones de los adobes o que la carga pudo no haberse distribuido de manera homogénea, que hizo variar las resistencias, demostrando también que no hay diferencia si se agrega o no resina de pino para la resistencia a la flexión.

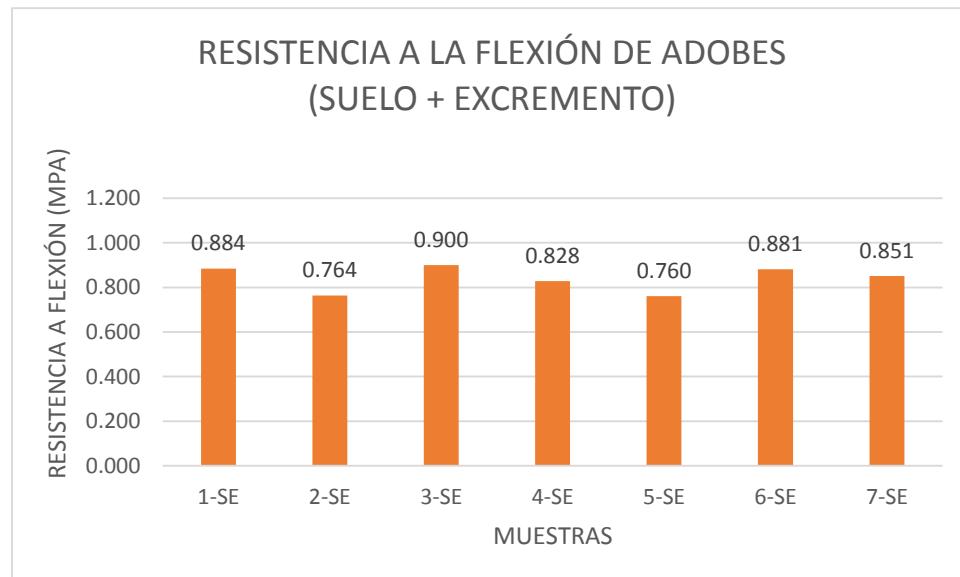
Tabla 4.3.4.3.

*ANOVA de la prueba de resistencia a la flexión en adobes.*

<b>Variable</b>	<b>Grados de Libertad</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Cuadrado</b>		
		<b>Ajustados</b>	<b>Medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor P</b>
<b>Tipo de mezcla</b>	1	0.000010	0.000010	0.00	0.972
<b>Error</b>	12	0.094241	0.007853		
<b>Total</b>	13	0.094252			
<b>S</b>	0.0886197		<b>R<sup>2</sup></b>	0.01%	

Fuente: El tesista.

El módulo de ruptura obtenido de los 7 adobes de suelo y excremento de burro (SE), estuvo entre 0.760 MPa y 0.900 MPa, con un valor promedio de 0.838 MPa (Fig. 4.3.4.1). Mientras que el valor promedio de los adobes con suelo, excremento de burro y 15% de resina de pino (SE15RP), fue de 0.840 MPa, aunque los resultados por muestra, en su mayoría, fueron más altos que los obtenidos en los adobes sin resina de pino (Fig. 4.3.4.2). No hubo una mejora significante en el adobe propuesto, siendo prácticamente igual al adobe tradicional (Fig. 4.3.4.3).



*Fig. 4.3.4.1. Gráfica de los datos obtenidos de la prueba de resistencia a la flexión de los adobes con suelo + excremento de burro. Fuente: El tesista.*

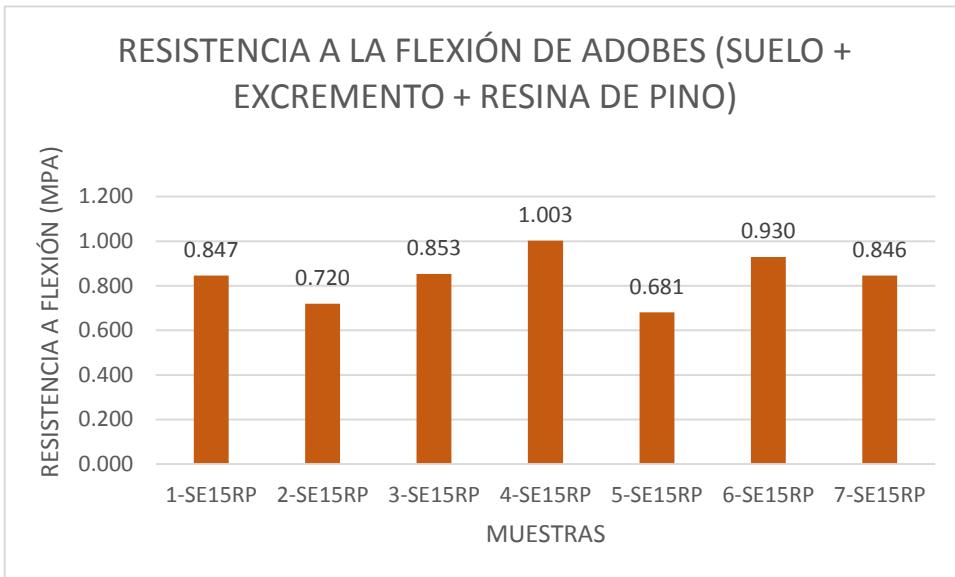


Fig. 4.3.4.2. Gráfica de los datos obtenidos de la prueba de resistencia a la flexión de los adobes con suelo + excremento de burro + 15% resina de pino. Fuente: El tesista.

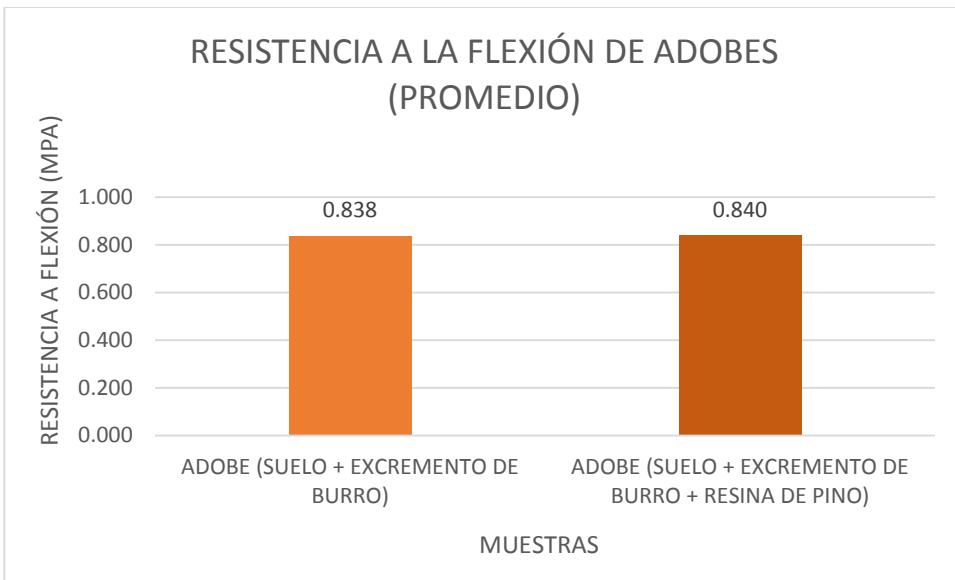


Fig. 4.3.4.3. Promedio de resistencia a la flexión de los adobes ensayados. El módulo de ruptura de las dos muestras es prácticamente igual. Fuente: El tesista.

## CONCLUSIONES

Con base en el análisis y en los resultados obtenidos en el trabajo expuesto, se puede concluir que el suelo utilizado para la elaboración de las muestras manejadas en este trabajo fue, de acuerdo a la clasificación del SUCS, del tipo CL, lo cual indica que es un suelo con arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, haciéndolo apto para la elaboración de adobes. La muestra de suelo estudiada presentó un 49% de finos en su composición.

Al experimentar con distintas mezclas mediante la elaboración de cubos, en la prueba de permeabilidad las muestras que mayor tiempo tardaron en deshacerse fueron las de resina 20%, resina 25% y en tercer lugar general las de resina al 15% (3er. Lugar con excremento y 4to. Lugar sin excremento). Por otra parte, en las pruebas de resistencia a la compresión en cubos, las muestras que presentaron los valores más altos fueron los cubos de suelo con 15% de resina, 10% de resina y 15% de resina combinada con excremento de burro, respectivamente. Además, el Análisis de la Varianza de esta prueba indicó un óptimo ajuste de las mediciones al comportamiento del material. De las dos pruebas realizadas en los cubos, la muestra que obtuvo mejores resultados fue la de suelo + 15% de resina de pino, ya que fue la tercera en conservar su forma por más tiempo sumergida en agua (48 horas sin excremento y 52 horas con excremento en la mezcla) y la que mayor resistencia a la compresión presentó (suelo y resina: 4.82 MPa; suelo + resina + excremento: 4.04 MPa).

También se observó cómo quitando un material o agregando otro, las características cambiaban, por ejemplo la resistencia con las muestras con y sin excremento o el acabado de las muestras visto en los cubos con jugo de hoja de plátano;

o como la presencia de mayores cantidades de humedad (agua) respecto a la base (suelo), reducen la resistencia del material, aunque, como en el caso de los cubos con 20 y 25% de resina, fueran más impermeables.

Los resultados en las pruebas en adobes indicaron que la impermeabilidad del adobe elaborado con suelo, estiércol de burro y 15% de resina de pino aumentó (porcentaje de absorción de agua alcanzado: 18.95%), incluyendo su resistencia a la compresión ya que obtuvo un valor de 5.88 MPa, mientras que su resistencia a la flexión se mantuvo casi igual a la conseguida en los adobes sin resina (0.838 MPa y 0.840 MPa respectivamente).

En cuanto a la prueba de permeabilidad realizada en los adobes, adicionar 15% de resina de pino a la mezcla de suelo y excremento, sí disminuye la permeabilidad del adobe, ya que se presentó un decremento del 21.04% respecto al porcentaje de absorción de agua establecido para los adobes por la norma N-CMT-2-01-001. Cabe mencionar que la resistencia a la compresión obtenida en el laboratorio es un indicador de la permeabilidad del adobe, ya que entre mayor resistencia, el adobe es menos permeable.

Los adobes elaborados con la mezcla propuesta aumentaron su resistencia a la compresión en un 194%, es decir, 3.88 MPa más que lo solicitado por la norma N-CMT-2-01-001. Mientras que en los resultados obtenidos en la prueba de flexión no hubo un aumento considerable en la resistencia, a diferencia de los adobes sin resina, los resultados en los que sí se les adicionó, fueron más altos en su mayoría. Respecto al Análisis de la Varianza, tanto para la prueba de flexión como de compresión, el ajuste de los resultados no fue óptimo.

Asimismo, se conocieron distintos tipos de agregados que se utilizan para compensar y/o mejorar características del adobe, cómo intervienen en el adobe y

referencias de los resultados que autores han experimentado con alguno de estos aditamentos. La variedad de los mismos es amplia y continúa en aumento.

Por lo tanto el agregado idóneo para mejorar la impermeabilidad del adobe, es la resina de pino al 15%, la cual también aumenta la resistencia a la compresión en comparación con los adobes tradicionales.

## **RECOMENDACIONES**

Basándose en los resultados del presente trabajo se recomienda analizar el uso de resina de pino en otro sistema de construcción base tierra para tener más opciones de técnicas con cero o poco impacto ambiental; así como continuar con el estudio de otras propiedades del material como con resistencia al intemperismo y propiedades termofísicas.

La utilización de la mezcla con resina de pino al 15%, puede efectuarse en comunidades donde se extraiga resina de pino o cercanas a ésta, en caso contrario, la obtención del material sería costoso. Para minimizar los costos, se recomienda el uso de los bloques en la parte inferior y superior de la construcción, debido a que son zonas con mayor contacto con el agua.





ANEXOS



## ANEXOS

### **A. Entrevistas**

#### ***Entrevista 1. A Ramiro García López. Región Mixteca***

1. ¿Cómo aprendió a hacer adobes?

Por la experiencia de mis abuelos y tíos, ya que sus hogares estaban hechos de adobe.

2. ¿Desde cuándo elabora adobes?

Desde hace 30 años.

3. ¿Qué materiales necesita para elaborarlos?

Tierra arcillosa, y estiércol de ganado equino, caballos, mulas, burros, de machos.

4. ¿De dónde los obtiene?

De la región. Por ejemplo, la tierra del camino cercano a la casa.

5. ¿Describa la forma en la que elabora los bloques?

Primero se elabora un molde de madera con las medidas deseadas, después se tritura el estiércol con una madera hasta convertirlo en polvo, se mezcla con el lodo y se le pone agua hasta lograr la consistencia deseada, vertiéndolo en el molde, llenando los moldes, al sacarlos se les deja asolear de 5 a 10 días hasta que queden duras; una vez duras y secas se pueden ocupar para la construcción.

#### ***Entrevista 2. A Matilde Hernández. Región Valles Centrales (Etla).***

1. ¿Cómo aprendió a hacer adobes?

Me enseñó mi compadre, el Sr. Efrén Espinoza.

2. ¿Desde cuándo elabora adobes?

Aprendí desde hace 60 años.

3. ¿Qué materiales necesita para elaborarlos?

Se necesita excremento de toro, pasto, tierra y agua.

4. ¿De dónde los obtiene?

Los materiales la tierra la conseguía en el cerro en la Col. Benito Juárez (cerro del Fortín, ubicado en la cd. De Oaxaca), al igual que el pasto. La caca de toro me la vendía una vecina que criaba animales.

5. Describa la forma en la que elabora los bloques.

- Primero hay que colar la tierra (asegurarse que la tierra no tenga vidrio u otros materiales, ya que se moldeará con las manos y no debe tener arena).
- Colar el excremento, que queden "finos".
- Se juntan tierra y excremento y se vuelven a colar junto con el pasto.
- Se agrega a la mezcla agua suficiente para poder "amasar" muy bien los materiales.
- Se vacían en un molde con la forma de bloque (de 60 cm aproximadamente).
- Se van aplastando los materiales.
- Se desmolda y se ponen a secar por 10 días, se orea, lejos de donde haya animales y en un lugar limpio para evitar daños al bloque.

### ***Entrevista 3. A Bonifacio Santos. Región Valles Centrales (Santa María Atzompa).***

1. ¿Cómo aprendió a hacer adobes?

Por enseñanzas de mi padre.

2. ¿Desde cuándo elabora adobes?

Desde hace 50 años.

3. ¿Qué materiales necesita para elaborarlos?

Tierra arcillosa, cenizas de madera.

4. ¿De dónde los obtiene?

De la región.

5. ¿Describa la forma en la que elabora los bloques?

Primero se elabora un molde de madera con las medidas deseadas, después se mezclan las cenizas con el lodo utilizando pala y los pies y se le pone agua hasta lograr la mezcla deseada, se hecha en el molde, se rellena bien, al sacarlos se les deja asolear una semana o dos, hasta que queden duros; una vez duros y secos ya se pueden utilizar.

***Entrevista 4. A Benito Zárate. Región Valles Centrales (San Sebastián Tutla).***

1. ¿Cómo aprendió a hacer adobes?

Por las enseñanzas de mi padre y porque un tiempo trabajé en esto.

2. ¿Desde cuándo elabora adobes?

Desde hace 40 años más o menos.

3. ¿Qué materiales necesita para elaborarlos?

Pura tierra de preferencia, sino con poca grava. Y excremento de burro. Para 100 adobe se necesitan 6 botes de 20 litros de excremento.

4. ¿De dónde los obtiene?

De mis terrenos, es la ventaja del adobe, que solo se necesita la tierra, claro, si se tiene terreno.

5. ¿Describa la forma en la que elabora los bloques?

Primero moja la tierra, se padea; ya que toda esté mojada se echa el abono. Se pisonea y se le da vueltas a esa mezcla, se le da una barreteada, como si se cortara el barro. Se vuelve a recoger, se tapa con nylon, se queda a reposar y al día siguiente ya se puede usar la tierra. Se deja un día el molde remojando en agua para que se pueda despegar o en el barro. Se cortan los adobes a las 6, 6:30 a.m. Se moja un trapo y se le pasa al molde, se manotea para sacar piedras. Se le echa la mezcla al molde, asegurando las esquinas, se empareja con la mano y el sobrante se echa al otro lugar donde se hará el otro adobe. Se alza el molde primero de una esquina y luego de otra. Para el secado se dejan todo un día. Luego se raspa, se emparejan los adobes con un cuchillo viejo y se deja parado el adobe de su lado corto, otro día más. Al tercer día se apilan y se dejan secando en el sol.

***Entrevista 5. A Raimundo Jiménez. Región Valles Centrales (Santa Lucía del Camino).***

1. ¿Cómo aprendió a hacer adobes?

Aprendí desde chico, porque empecé a trabajar haciendo ladrillos. Aún me dedico a esto, también hago adobes, aunque ahora sólo los hago por encargo.

2. ¿Desde cuándo elabora adobes?

Desde hace 50 años., empecé a los 15 años.

3. ¿Qué materiales necesita para elaborarlos?

Tierra arcillosa y estiércol de burro, porque de otros animales no sale igual. A veces le agrego otras cosas pero luego no salen bien, una vez agregué hojas del pino y quedaron bien pero muy picudos, rasposos.

4. ¿De dónde los obtiene?

De la región, de San Agustín Yatareni.

5. ¿Describa la forma en la que elabora los bloques?

Primeramente revolver muy bien la tierra, agregar el agua necesaria y después el excremento de burro, mezclar muy bien, Dejar reposar la mezcla y usarla hasta el día siguiente. Mojarse las manos para tomar la mezcla, sacar piedras si hay, luego echar la mezcla en el molde, echarla bien, checar las esquinas, emparejando con la mano y arrojando lo que sobre al otro lugar donde se hará el otro adobe. Para desmoldar se alza el molde con cuidado, primero de una esquina y se va moviendo lentamente de arriba a abajo el molde hasta sacarlo. Hay que enjuagar el molde cada 4 adobes más o menos, porque por eso luego no salen completos. Se dejan secando por 8 a 10 días más o menos, dependiendo del clima.

## B. Materiales utilizados

Los pesos totales utilizados de suelo, agua y agregado(s) natural(es) tanto para la elaboración de los cubos como para los adobes, se presentan en la Tabla B.1.

Tabla B.1. *Materiales utilizados*.

MEZCLA	SUELO	AGUA		JUGO DE HOJA DE PLÁTANO	HOJA DE PLÁTANO	RESINA DE PINO	ENGRUDO DE TRIGO	ESTIÉRCOL DE BURRO	SUMA DE PESOS
CUBOS	(g)	(ml)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
SS	2100	340	339.99						2439.99
5JHP	2100	280	279.99	105					2484.99
5HP	2100	320	319.99		105				2524.99
10ET	2100	70	70.00				210		2380.00
5RP	2100	345	344.99			105			2549.99
10RP	2100	288	287.99			210			2597.99
15RP	2100	274	273.99			315			2688.99
20RP	1900	130	130.00			380			2410.00
25RP	1700	80	80.00			425			2205.00
SE	1710	330	329.99					90	2129.99
SERP15	1520	250	249.99			228		80	2077.99
ADOBES	(kg)	(l)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
SE	80	15.12	15.12					4	99.12
SE15RP	80	13.13	13.12			12		4	109.12
CUBOS									
SS: Suelo solo, 5JHP: +5% jugo de hoja de plátano, 5HP: +5% hoja de plátano, 10ET: +10% engrudo de trigo diluido, 10RP: +10% resina de pino, 5RP: +5% resina de pino, 15RP: +15% resina de pino, 20RP: +20% resina de pino, 25RP: +25% resina de pino, SE: suelo y excremento de burro, SERP15:suelo +excremento de burro +15% resina de pino.									
ADOBES									
SE: Suelo y excremento de burro, SE15RP: suelo + excremento de burro + 15% resina de pino.									

Fuente: El tesista.

### C. Muestras de la prueba de resistencia a compresión en cubos

Se registraron los datos obtenidos en las pruebas de resistencia a la compresión (Tabla C.1), tales como longitud, peso, líneas marcadas por la máquina, obteniendo los valores de resistencia a la compresión de cada muestra elaborada y se calcularon los promedios por mezcla (Tabla C.2).

Tabla C.1. *Datos de la prueba de resistencia a la compresión en las muestras elaboradas.*

Muestra	Peso muestra (g)	Medidas (cm)			Líneas (anillo A10061)	Carga (kg)	Resistencia a la compresión (MPa)	Densidad (peso volumétrico) (g/cm³)
		Largo	Ancho	Alto				
<b>ADOBE (SUELO SOLO)</b>								
MSS-A	212.10	4.80	4.79	4.75	135	725.81	3.25	1.94
MSS-B	219.59	4.85	4.85	4.82	139	747.35	3.26	1.94
MSS-C	215.01	4.75	4.80	4.78	144	774.27	3.44	1.97
MSS-D	213.53	4.81	4.79	4.77	124	666.59	2.97	1.94
MSS-E	215.78	4.82	4.80	4.71	142	763.50	3.44	1.98
MSS-F	210.04	4.72	4.72	4.69	137	736.58	3.39	2.01
<b>ADOBE (SUELO + 5% JUGO DE HOJA DE PLÁTANO)</b>								
M5JHP-A	210.11	4.80	4.76	4.68	131	704.28	3.22	1.96
M5JHP-B	210.39	4.79	4.81	4.68	115	618.13	2.80	1.95
M5JHP-C	209.79	4.75	4.76	4.77	156	838.87	3.77	1.95
M5JHP-D	207.66	4.74	4.78	4.70	136	731.19	3.31	1.95
M5JHP-E	215.05	4.89	4.79	4.71	116.5	626.21	2.83	1.95
M5JHP-F	217.19	4.83	4.90	4.71	144.5	776.96	3.43	1.95
<b>ADOBE (SUELO + 5% HOJA DE PLÁTANO)</b>								
M5HP-A	200.65	4.76	4.76	4.73	99.5	534.68	2.42	1.87
M5HP-B	208.16	4.84	4.79	4.74	125	671.97	3.02	1.89
M5HP-C	203.04	4.76	4.82	4.75	108	580.45	2.59	1.86
M5HP-D	207.34	4.82	4.82	4.73	136.5	733.89	3.28	1.89
M5HP-E	212.69	4.86	4.83	4.77	131	704.28	3.12	1.90
M5HP-F	206.66	4.78	4.80	4.76	124.5	669.28	2.99	1.89
<b>ADOBE (SUELO + 10% ENGRUDO DE TRIGO)</b>								
M10ET-A	228.44	4.88	4.95	4.87	98	526.61	2.23	1.94
M10ET-B	225.79	4.83	4.95	4.92	107	575.06	2.40	1.92
M10ET-C	229.49	4.81	4.89	4.92	151.5	814.65	3.45	1.98
M10ET-D	222.20	4.83	4.89	4.85	112	601.98	2.59	1.94
M10ET-E	219.10	4.81	4.80	4.85	118	634.28	2.78	1.95

M10ET-F	208.11	4.79	4.82	4.82	93.5	502.38	2.21	1.87
<b>ADOBÉ (SUELO + 5% RESINA DE PINO)</b>								
M5RP-A	194.56	4.72	4.72	4.69	126	677.36	3.12	1.86
M5RP-B	198.08	4.79	4.89	4.74	138.5	744.67	3.27	1.78
M5RP-C	198.42	4.71	4.82	4.70	128	688.12	3.10	1.86
M5RP-D	192.74	4.80	4.72	4.71	129	693.51	3.18	1.81
M5RP-E	194.35	4.75	4.72	4.70	123	661.20	3.04	1.84
M5RP-F	194.48	4.75	4.75	4.71	143.7	772.65	3.52	1.83
<b>ADOBÉ (SUELO + 10% RESINA DE PINO)</b>								
M10RP-A	208.28	4.89	4.95	4.90	184	989.62	4.16	1.76
M10RP-B	212.31	4.96	4.95	4.90	195.5	1051.54	4.42	1.76
M10RP-C	207.10	4.89	4.90	4.85	200.3	1077.38	4.62	1.78
M10RP-D	207.05	4.89	4.86	4.90	209.9	1129.06	4.83	1.78
M10RP-E	208.56	4.95	4.97	4.86	154.8	832.41	3.51	1.74
M10RP-F	205.73	4.88	4.89	4.88	198.5	1067.69	4.56	1.77
<b>ADOBÉ (SUELO + 15% RESINA DE PINO)</b>								
M15RP-A	205.45	4.91	4.99	4.81	226.2	1216.82	5.17	1.74
M15RP-B	202.62	4.85	4.99	4.82	178.5	960.01	4.07	1.74
M15RP-C	195.48	4.81	4.81	4.89	224.1	1205.52	5.22	1.73
M15RP-D	199.92	4.85	4.86	4.89	216	1161.91	4.98	1.73
M15RP-E	197.91	4.85	4.90	4.81	179	962.70	4.16	1.73
M15RP-F	196.21	4.85	4.81	4.82	224	1204.98	5.30	1.74
<b>ADOBÉ (SUELO + 20% RESINA DE PINO)</b>								
M20RP-A	214.21	5.19	5.11	5.17	119	639.60	2.47	1.56
M20RP-B	207.18	5.06	5.06	5.06	152	817.34	3.26	1.60
M20RP-C	206.04	5.12	5.05	5.05	123	661.20	2.65	1.58
M20RP-D	205.04	5.06	5.08	5.09	148	795.80	3.14	1.57
M20RP-E	211.51	5.01	5.19	5.07	125	671.97	2.60	1.61
M20RP-F	209.15	5.02	5.20	5.08	135	725.81	2.80	1.58
<b>ADOBÉ (SUELO + 25% RESINA DE PINO)</b>								
M25RP-A	207.70	5.07	5.09	5.10	58	311.25	1.22	1.58
M25RP-B	210.96	5.10	5.04	5.19	76.5	464.69	1.81	1.58
M25RP-C	210.28	5.14	5.04	5.17	78	472.77	1.85	1.57
M25RP-D	213.56	5.10	5.08	5.16	31	65.89	0.26	1.60
M25RP-E	211.64	5.09	5.07	5.16	81.5	437.78	1.71	1.59
M25RP-F	209.30	5.12	5.07	5.10	48	257.41	1.01	1.58
<b>ADOBÉ (SUELO SOLO + ESTIÉRCOL DE BURRO)</b>								
MSE-A	182.02	4.91	4.92	4.87	71	381.24	1.62	1.55
MSE-B	182.54	4.92	4.91	4.96	99	531.99	2.23	1.53
MSE-C	193.30	4.96	5.05	4.88	108	580.45	2.40	1.58
MSE-D	185.41	4.99	4.98	5.00	84	451.23	1.85	1.49
MSE-E	190.73	5.07	5.05	4.97	89	478.15	1.94	1.50

MSE-F	184.59	4.98	4.99	4.99	74	397.39	1.63	1.49
<b>ADOBE (SUELO + ESTIÉRCOL DE BURRO + 15% RESINA DE PINO)</b>								
MSERP15-A	187.21	5.03	5.02	5.04	167	898.10	3.61	1.47
MSERP15-B	194.34	5.04	5.10	5.13	200	1075.76	4.20	1.47
MSERP15-C	192.87	5.05	4.99	5.08	244	1312.65	5.28	1.51
MSERP15-D	183.62	5.00	4.98	5.02	182	978.85	3.99	1.47
MSERP15-E	179.20	5.05	5.02	5.03	140	752.73	3.04	1.41
MSERP15-F	188.78	5.02	5.11	4.97	190	1021.92	4.10	1.48

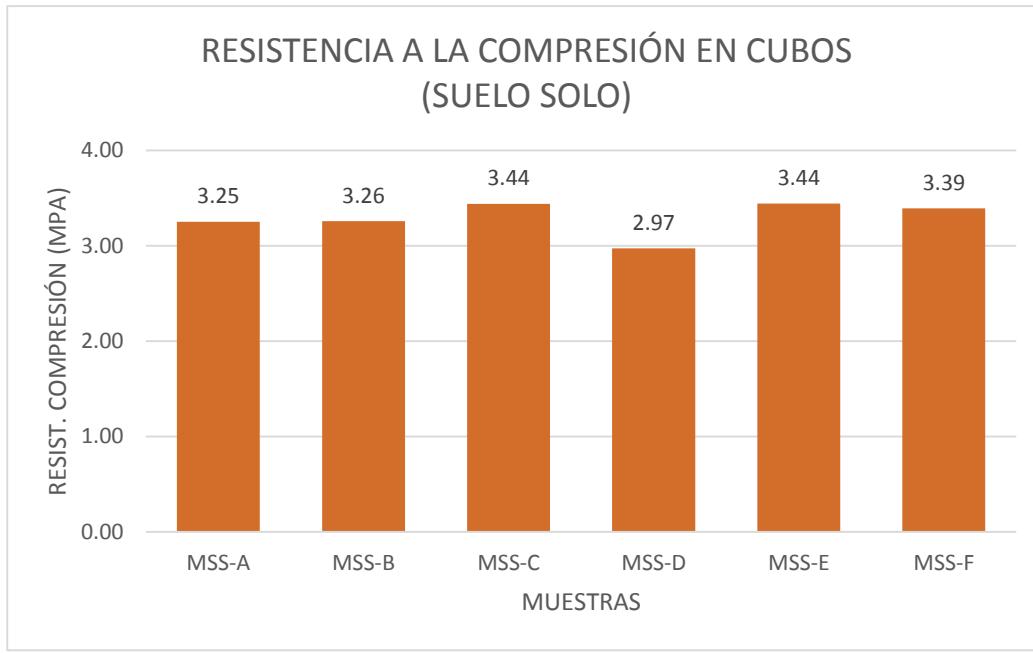
Fuente: El tesista.

Tabla C.2. Promedios de la resistencia a la compresión de las muestras elaboradas.

MUESTRA	RESIST. A COMPRESIÓN PROMEDIO (MPa)
M-SUELO SOLO	3.29
M-SUELO+JUGO HOJA PLÁTANO 5%	3.23
M-SUELO+HOJA PLÁTANO 5%	2.90
M-SUELO+ENGRUDO DE TRIGO 10%	2.61
M-SUELO+RESINA10%	4.35
M-SUELO+ 5%RESINA	3.20
M-SUELO+15%RESINA	4.82
M-SUELO+20%RESINA	2.82
M-SUELO+25%RESINA	1.31
M-SUELO + ESTIÉRCOL DE BURRO	1.94
M-SUELO + ESTIÉRCOL DE BURRO + 15%RESINA	4.04

Fuente: El tesista.

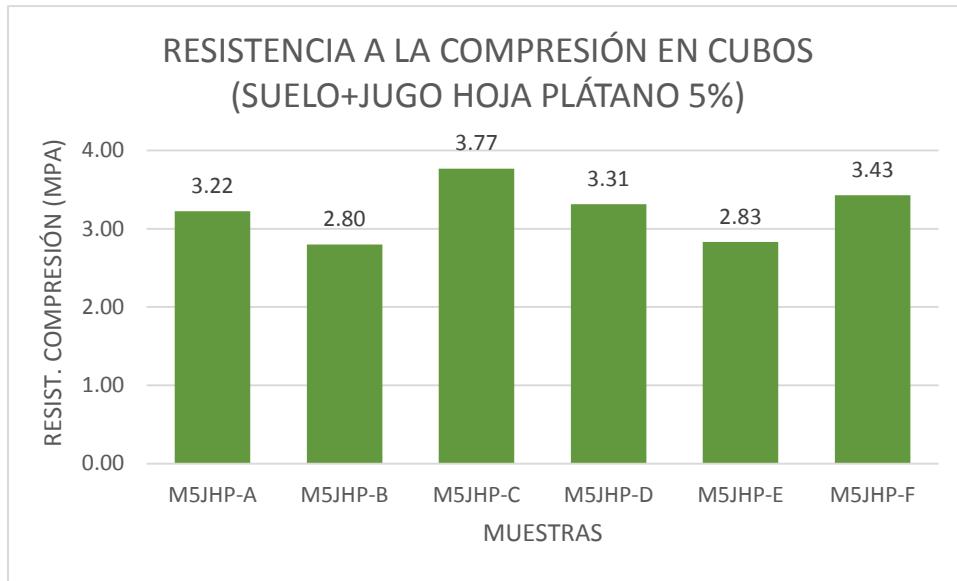
En las muestras de suelo solo (MSS), se observó que la resistencia a la compresión es casi homogénea ya que rondan entre los 3.25 MPa a 3.44, salvo en la muestra MSS-D cuya resistencia es casi 3MPa (Fig. C.1). La resistencia a la compresión promedio de las 6 muestras fue de 3.29 MPa y, descartando la muestra MSS-D el promedio fue de 3.36 MPa.



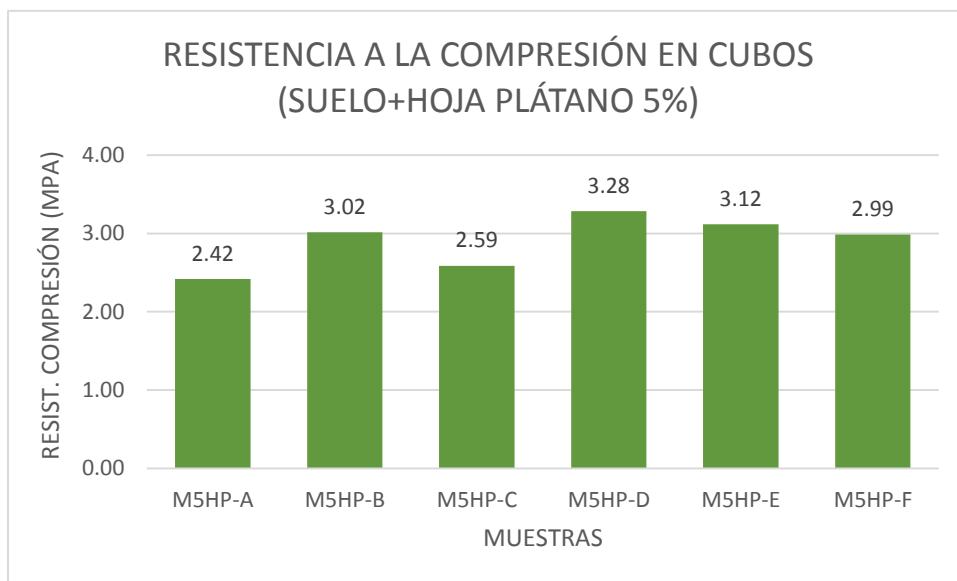
*Fig. C.1.* Resultados por muestra, de la prueba de resistencia a la compresión en cubos de suelo solo. Fuente. El tesista.

Por otra parte, el valor promedio de las 6 muestras de la mezcla de suelo y 5% de jugo de hoja de plátano (M5JHP) fue de 3.23 MPa; observando que las muestras oscilaron entre 2.80 MPa y 3.45 MPa, salvo la muestra M5JHP-D, que obtuvo una mayor resistencia a la compresión de 3.77 MPa (Fig. C.2). Descartando a la muestra D, el valor promedio de resistencia a la compresión fue de 3.12 MPa.

Para la mezcla de suelo y 5% de hoja de plátano (M5HP), las muestras tuvieron una resistencia a la compresión entre 3 MPa y 3.3 MPa, seguidas de la muestra M5HP- C con 2.59 MPa y de la muestra M5HP- A con 2.42 MPa (Fig. C.3). El promedio de resistencia a la compresión de las 6 muestras fue de 2.90 MPa.

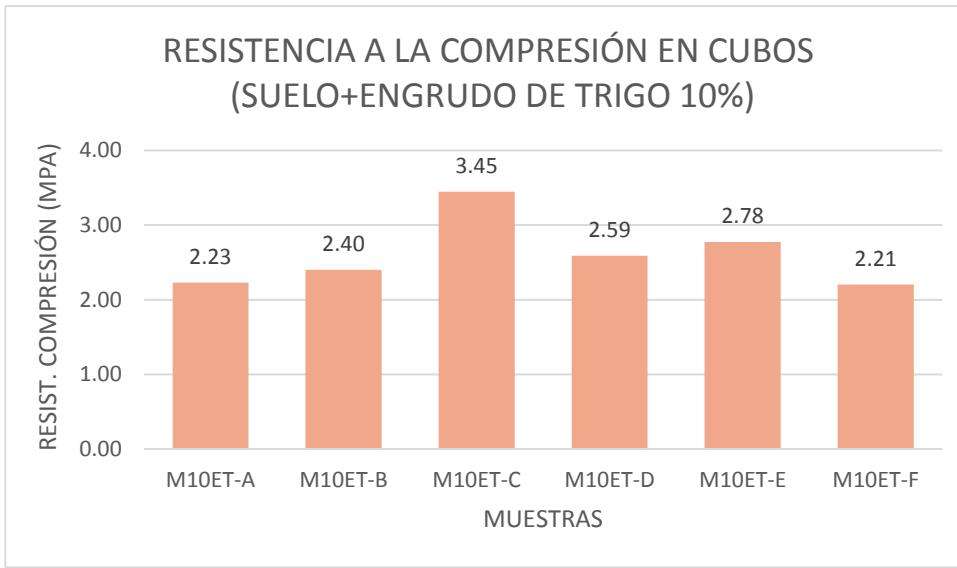


*Fig. C.2.* Resultados por muestra, de la prueba de resistencia a la compresión en cubos de suelo y 5% de jugo de hoja de plátano (M5JHP). Fuente: El tesista.



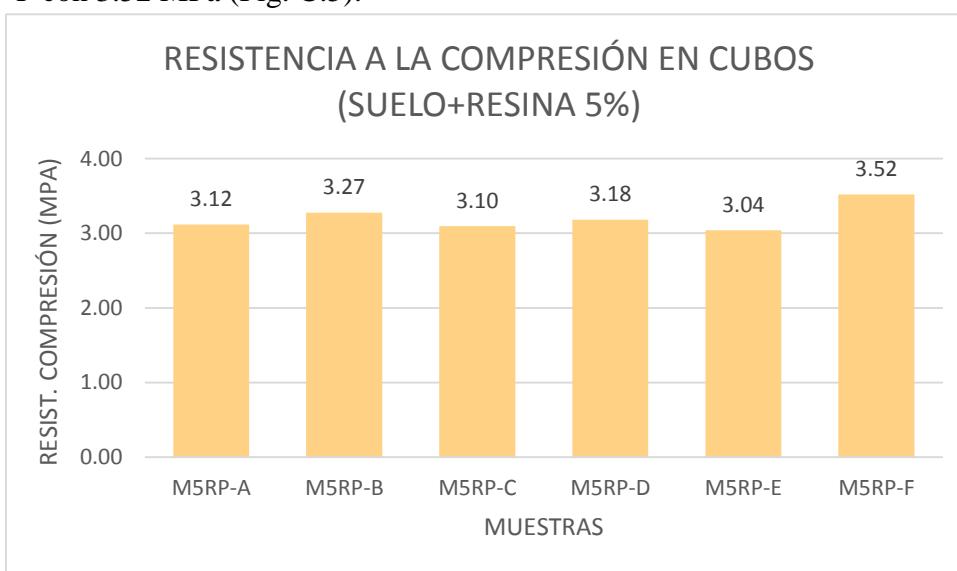
*Fig. C.3.* Resultados por muestra, de la prueba de resistencia a la compresión en cubos de suelo y 5% de hoja de plátano (M5HP). Fuente: El tesista.

Mientras que para las 6 muestras de suelo y engrudo de trigo (M10ET), su resistencia a la compresión estuvo entre los 2.20 MPa y los 2.80 MPa, aumentando o disminuyendo alrededor de 0.20 MPa en cada muestra, excepto la M10ET-C, ya que ésta alcanzó 3.45 MPa (Fig. C.4). El valor promedio fue de 2.61 MPa.



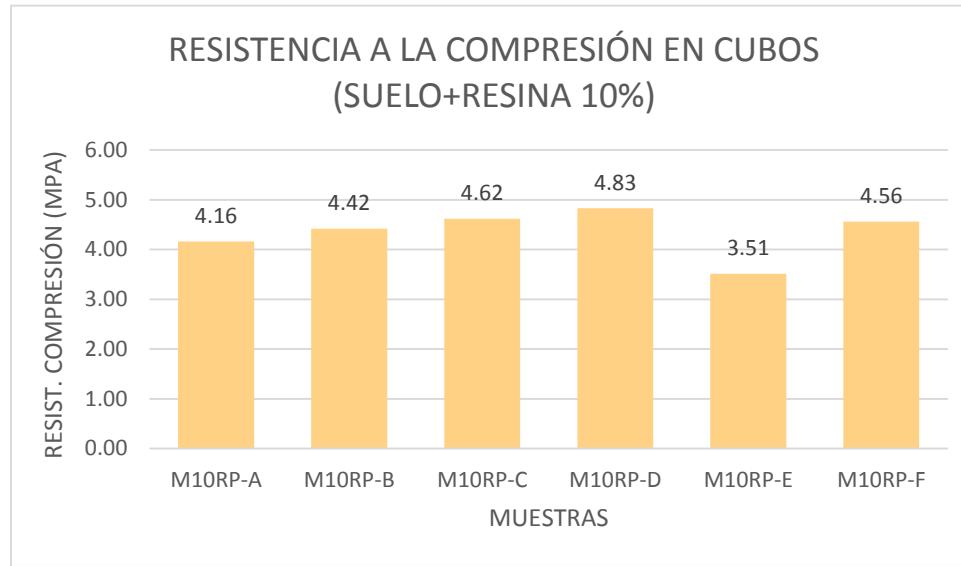
*Fig. C.4.* Resultados por muestra, de la prueba de resistencia a la compresión en cubos de suelo y 10% de engrudo de trigo (M10ET). Fuente: El tesista.

En las muestras de la mezcla suelo y 5% de resina de pino (M5RP), los resultados fueron más homogéneos ya que todos estuvieron arriba de 3 MPa, con un valor promedio de resistencia a compresión de 3.20 MPa, pero 2 de las 6 muestras estuvieron un poco más alejadas de los valores de las demás, siendo la muestra M5RP-E con 3.04 MPa y la muestra M5RP-F con 3.52 MPa (Fig. C.5).



*Fig. C.5.* Resultados por muestra, de la prueba de resistencia a la compresión en cubos de suelo y 5% de resina de pino (M15RP). Fuente: El tesista.

El valor promedio de las 6 muestras de suelo y 10% de resina de pino (M10RP) fue de 4.53 MPa; sólo la muestra M10RP-E tuvo una resistencia de 3.51 MPa mientras que las demás estuvieron arriba de 4 MPa, de estas 6, la muestra M10RP-G alcanzó 5.58 MPa (Fig. C.6). El promedio de las 5 muestras cuya resistencia estuvo entre 4 MPa y 5 MPa fue de 4.52 MPa.



*Fig. C.6. Resultados por muestra, de la prueba de resistencia a la compresión en cubos de suelo y 10% de resina de pino (M10RP). Fuente: El tesista.*

De las 6 muestras de la mezcla suelo y 15% de resina de pino (M15RP), la resistencia a la compresión promedio fue de 4.82 MPa. La muestra M15RP-B obtuvo la resistencia más baja ya que apenas rebasó los 4 MPa seguida de la muestra M15RP-F con 4.16 MPa, mientras que las demás obtuvieron valores entre los 5 MPa y 5.30 MPa (Fig. C.7).

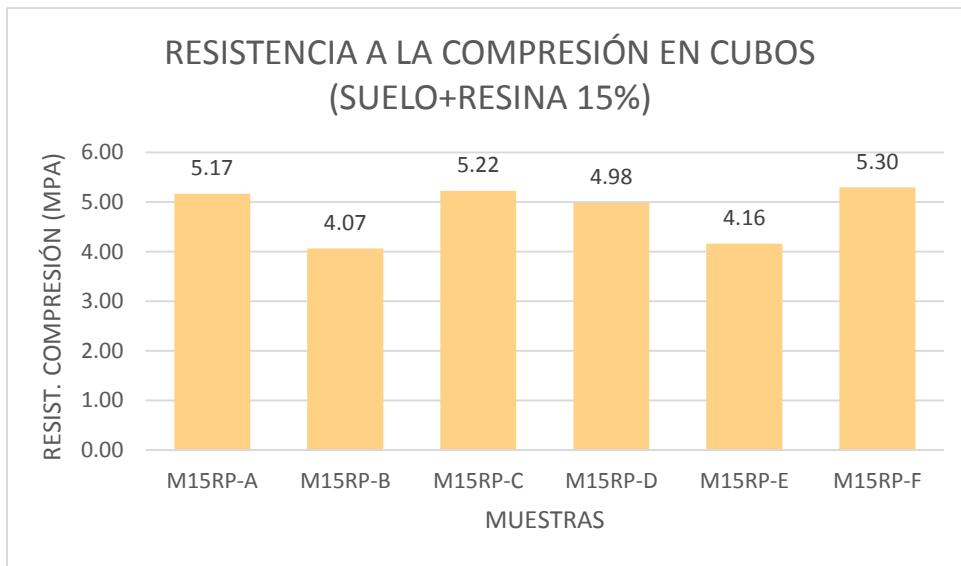


Fig. C.7. Resultados por muestra, de la prueba de resistencia a la compresión en cubos de suelo y 15% de resina de pino (M15RP). Fuente: El tesista.

Por otra parte, el valor promedio de las muestras de suelo y 20% de resina de pino (M20RP) fue de 2.82 MPa. Los valores individuales de resistencia a la compresión estuvieron entre 2.5 MPa y 3 MPa, exceptuando a la muestra M20RP-B cuyo valor fue casi 3.3. MPa (Fig. C.8).

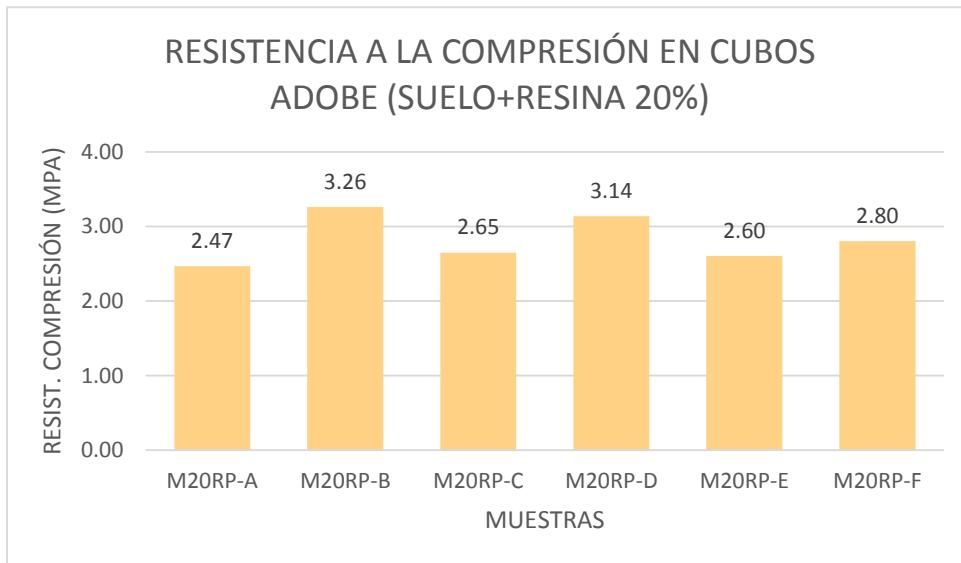
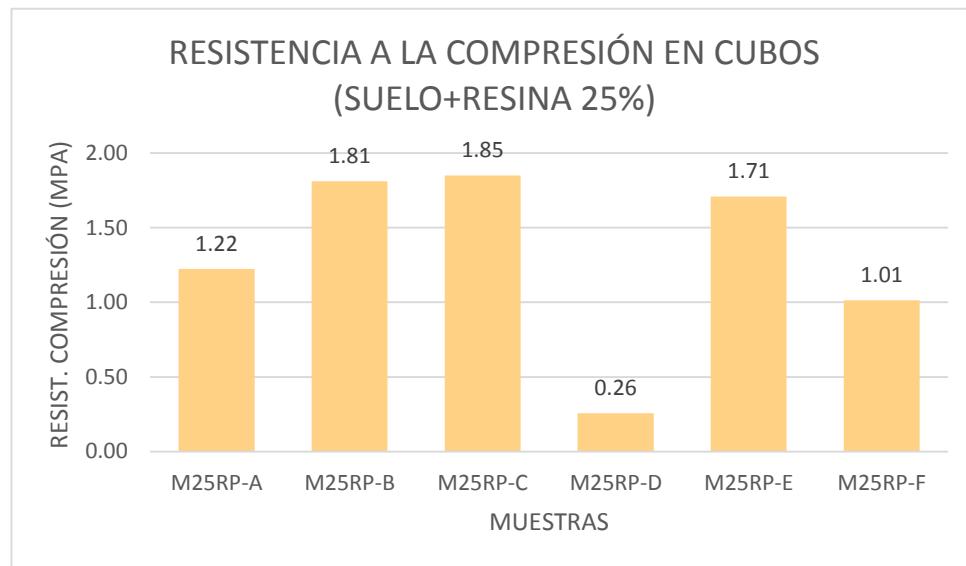


Fig. C.8. Resultados por muestra, de la prueba de resistencia a la compresión en cubos de suelo y 20% de resina de pino (M20RP). Fuente: El tesista.

En cambio, para la mezcla de suelo y 25% de resina de pino (M25RP) el valor promedio fue de 1.31 MPa, siendo la muestra M25RP-D la más baja ya que no alcanzó ni 0.5 MPa (Fig. C.9).



*Fig. C.9.* Resultados por muestra, de la prueba de resistencia a la compresión en cubos de suelo y 25% de resina de pino (M25RP). Fuente: El tesista.

El valor promedio de resistencia a la compresión obtenido de la mezcla de suelo y estiércol de burro (MSE) fue de 1.94 MPa, donde los valores individuales fueron mayores a 1.6 MPa y menores a 2.5 MPa; el más alto lo obtuvo la muestra MSE-C con 2.40 MPa (Fig. C.10).

En las muestras de suelo, estiércol de burro y 15% de resina de pino (MSERP15) el promedio de resistencia a la compresión fue de 4.04 MPa; el valor más bajo lo obtuvo la muestra MSERP15-E con 3.04 MPa y el más alto la muestra MSERP15-C con 5.28 MPa, mientras que las demás muestras estuvieron entre 3.6 MPa y 4.2 MPa (Fig. C.11).

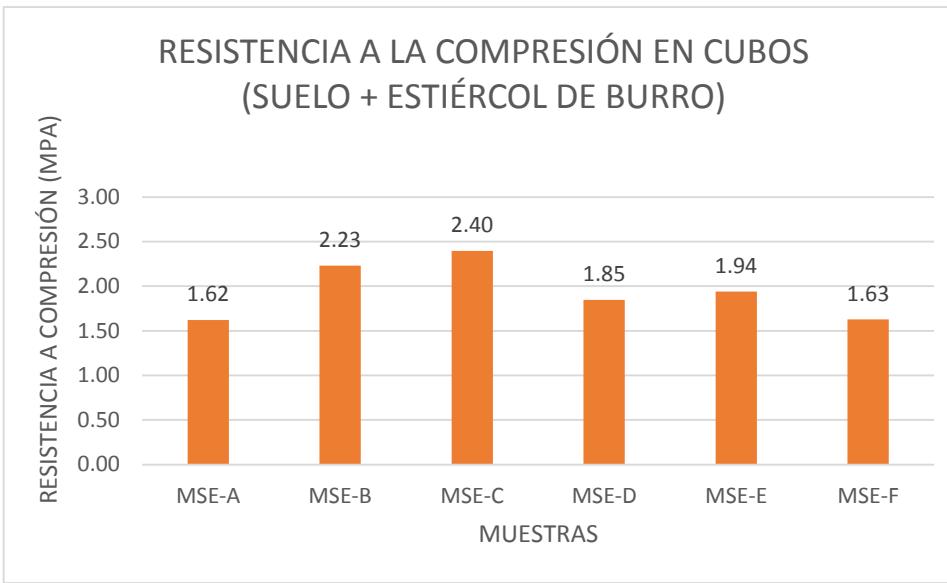


Fig. C.10. Resistencia a la compresión en los cubos muestra de suelo y estiércol de burro (MSE).

Fuente: El tesista.

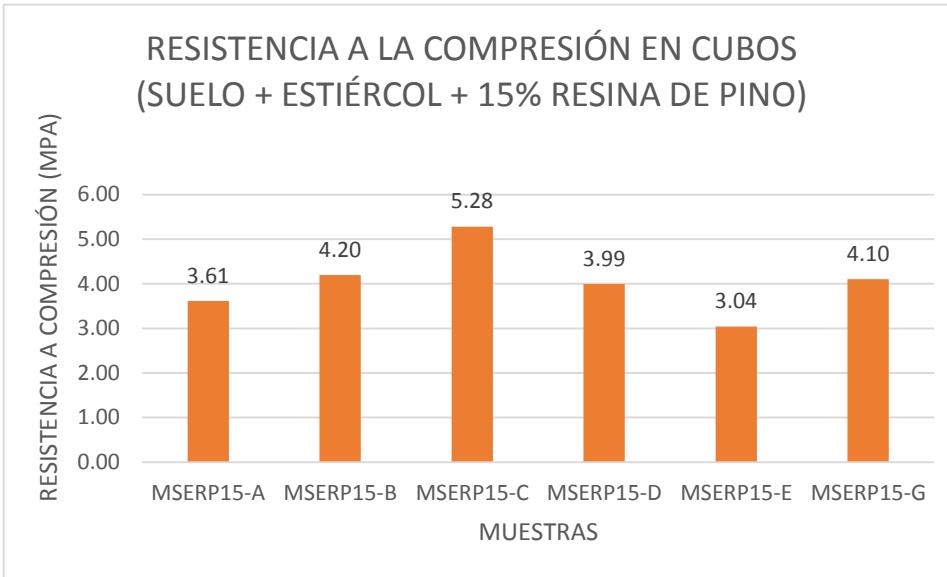


Fig. C.11. Resistencia a la compresión en los cubos muestra de suelo, estiércol de burro y 15%

de resina de pino (MSERP15) Fuente: El tesista.

## D. Detalles de pruebas en adobes

Se registraron los datos obtenidos en la prueba de resistencia a la compresión, tales como medidas, carga soportada y resistencia a la compresión (Tabla D.1).

Tabla D.1. *Datos conseguidos de la prueba de compresión en los adobes.*

MUESTRA	Medidas (cm)			Carga (kg)	Resistencia a la compresión Kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a la compresión (MPa)
	Largo	Ancho	Alto			
<b>ADOBE (SUELO + EXCREMENTO DE BURRO)</b>						
1-SE	20.80	13.70	8.50	11680.44	40.99	4.18
2-SE	20.00	13.70	8.50	15347.76	56.01	5.71
3-SE	20.30	13.80	8.50	14940.28	53.33	5.44
4-SE	20.50	16.00	8.50	12902.88	39.34	4.01
5-SE	21.30	13.50	8.50	12291.66	42.75	4.36
6-SE	20.60	16.00	8.50	10458.00	31.73	3.23
<b>ADOBE (SUELO + EXCREMENTO DE BURRO + 15% RESINA DE PINO)</b>						
1-SE15RP	20.50	13.30	8.60	16521.16	60.59	6.18
2-SE15RP	20.60	15.50	8.60	18072.62	56.60	5.77
3-SE15RP	20.70	17.60	8.60	20599.08	56.54	5.76
4-SE15RP	20.80	16.60	8.30	15745.43	45.60	4.65
5-SE15RP	19.40	14.00	8.60	16327.23	60.11	6.13
6-SE15RP	19.70	13.30	8.40	17490.82	66.76	6.80

Fuente: El tesista.

Se registraron los datos obtenidos en la prueba de resistencia a la flexión, como peso medidas, carga soportada y el módulo de ruptura (Tabla D.2).

Tabla D.2. *Datos conseguidos de la prueba de flexión en los adobes.*

Muestra	Peso muestra (Kg)	Medidas (mm)			Líneas (anillo A10061)	Carga (kg)	Módulo de ruptura Mpa
		Largo	Ancho	Alto			
<b>ADOBÉ (SUELO + EXCREMENTO DE BURRO)</b>							
1-SE	9.02	296.00	215.00	85.00	118	634.28	0.884
2-SE	8.46	297.00	211.00	85.00	100	537.37	0.764
3-SE	9.00	297.00	213.00	85.00	119	639.67	0.900
4-SE	8.85	297.00	212.00	85.00	109	585.83	0.828
5-SE	8.72	295.00	214.00	85.00	101	542.76	0.760
6-SE	8.84	294.00	214.00	85.00	117	628.90	0.881
7-SE	8.51	296.00	207.00	84.00	108	580.45	0.851
<b>ADOBÉ (SUELO + EXCREMENTO DE BURRO + RESINA DE PINO)</b>							
1-SE15RP	8.57	312.00	222.00	86.00	118	634.28	0.847
2-SE15RP	8.58	314.00	219.00	86.00	99	531.99	0.720
3-SE15RP	8.63	308.00	224.00	86.00	120	645.05	0.853
4-SE15RP	8.38	302.00	214.00	83.00	130	698.89	1.003
5-SE15RP	8.83	310.00	222.00	86.00	95	510.46	0.681
6-SE15RP	8.41	303.00	213.00	83.00	120	645.05	0.930
7-SE15RP	8.26	309.00	216.00	84.00	112	601.98	0.846

Fuente: El tesista.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Alavéz-Ramírez, R., Montes-García, P., Martínez-Reyes, J., Altamirano-Juárez, D. C., Gochi-Ponce, Y. (April 2012). The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Construction and Building Materials.* (34) pp. 296-305.
- Alavéz, R. R. (2012). *Desarrollo de un material compuesto a base de suelo compactado estabilizado con puzolanas.* Tesis Doctoral. Instituto Tecnológico de Oaxaca, México.
- Algin, H.M., Turgut, P. Cotton and limestone powder wastes as brick material. *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 1074–1080,  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.006>.
- Aranda-Jiménez, Yolanda Guadalupe, Suárez-Domínguez, Edgardo Jonathan. Octubre 2013. Efecto de la impermeabilidad del mucílago de nopal en bloques de tierra comprimidos.
- Argüello, T. y Cuchí, B. (2008). Análisis del impacto ambiental asociado a los materiales de construcción empleados en las viviendas de bajo coste del programa 10 x10 Con Techo-Chiapas del CYTED. Informes de la Construcción. 60(509), 25-34.
- Buchan, A. y Honey, B. (1994). Energy and carbon dioxide implications of building construction. *Energy and Buildings,* 20(3), 205-217.
- Calabria, J., Vasconcelos, W., Daniel, D., Chater, Richard. (September 2009). Synthesis of sol-gel titania bactericide coatings on adobe brick. *Construction and Building Materials.* (24) pp. 384-389.

Domínguez, José Manuel e Isaac Shifter. *Las arcillas: el barro noble, Colección la ciencia desde México*. FCE-SEP-CONACyT, no. 109, México, 1992.

Galán-Marín, C., Rivera-Gómez. C., Petric, J. (February, 2010). Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and Building Materials*. (24) pp. 1462-1468.

Global Seismic Hazard Map. (2007). *Mapas de Sismicidad. Sismicidad en el mundo*.

Obtenido en septiembre del 2017, desde  
[https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_06\\_07/io3/public\\_html/Mapas/Mapas.html](https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Mapas/Mapas.html)

Guerrero Baca, Luis Fernando. 2007. Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva.

Houben, H; Hubert, G. (1984). *Earth construction, a comprehensive guide*. Bourton on Dunsmore: Centre For technology and Development.

Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITEC). *Información ambiental de productos y sistemas*. Obtenido en septiembre del 2017, desde  
<https://itec.es/metabase/productos-sostenibles/14/173/1274/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Censo de población y Vivienda del año 2010, México*. Obtenido en diciembre del 2015, desde  
<http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2010/>

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2011). *Extracción y purificación de mucílago de NOPAL*. Obtenido en mayo del 2016, desde <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/extMuNopal.pdf>

Juárez-Badillo, Eulalio, Rico-Rodríguez (2007). *Mecánica de suelos. Tomo I. Fundamentos de la mecánica de suelos*. Editorial Limusa.

- Klein, M y Donald, R. (1998). Development of CME National Emission Guidelines for Cement Kilns in CANMET/ACZ International Symposium on Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry, editor V.M. Malhotra, Ottawa, pp. 16-30.
- Laborel-Préneron, A., Aubert, J., Magniont, C., Tribout, C., Bertron A. (March 2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials.* (111) pp. 719-734.
- Martínez, Camacho Fernanda (2007). *La consolidación de adobe con mucílago de nopal. Estudio de un caso: el templo de la Antigua Misión de Nuestra Señora del Pilar y Santiago de Cocóspera, Sonora.*
- Montgomery, Douglas C. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos.* Limusa - Wiley.
- McHenry, Paul Graham (2000). *Adobe: cómo construir fácilmente.* México: Trillas.
- Normas de construcción mexicanas emitidas por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE).
- Polanco Rodríguez, Abraham. Manual de prácticas de laboratorio de mecánica de suelos II, Chihuahua.
- Rice, Prudence M. *Pottery analysis. A sourcebook.* The University of Chicago Press, USA, 1987.
- Ríos Pérez, Enrique Yahir (2010). *Efecto de la adición de látex natural y jabón en la resistencia mecánica y absorción del adobe compactado.* Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional unidad Oaxaca. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.

Rivera, A. y Muñoz, C. (2012). *EL ADOBE manual audiovisual de reforzamiento.*

Obtenido en julio del 2016, desde <http://eladobe.cl/proyecto/>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (1982). Normas de construcción,

Muestreo y pruebas de materiales, parte primera. (pp. 465-472). México: Primavera México.

Secretaría de Gobernación, Instituto Nacional para el federalismo y el Desarrollo

Municipal, Sistema Nacional de Información Municipal. México 2002.

Serrano, S., Barreneche, C., Cabeza, L.F. (December 2016). Use of by-products as additives in adobe bricks: Mechanical properties characterization. *Construction and Building Materials.* (108) pp. 105-111.

Subsecretaria de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. (SAHOP)(1980). Manual de pruebas de laboratorio de mecánica de suelos. Vol. 1. México.

Stulz, Roland, Mukerji, Kiran (1993). *Materiales de construcción apropiados. Catálogo de soluciones potenciales.* Londres: IT Publications.

Taallah, B., Guettala, A., Guettala, S., Kriker, A. Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers.

Constr. Build. Mater. 59 (2014) 161–168,

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.058>.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). *Listado del Patrimonio Mundial.* Obtenido en enero del 2017, desde <http://whc.unesco.org/es/list/>

Vargas Neumann, Julio, Heredia Zavoni, Ernesto, Bariola Bernales, Juan. (Mayo 1986). Preservación de las construcciones de adobe en áreas lluviosas.