

# **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO  
INTEGRAL REGIONAL UNIDAD OAXACA**

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

---

**EFFECTO DE LA ADICIÓN DE LATEX NATURAL Y JABÓN EN LA  
RESISTENCIA MECÁNICA Y ABSORCIÓN DEL ADOBE COMPACTADO**

---

## **T E S I S**

Para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias**

Presenta:

**Arq. Enrique Yahir Ríos Pérez**

Director:

**Dr. Pedro Montes García**

Santa Cruz Xoxocotlán; Oaxaca. Junio 2010



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

*ACTA DE REVISION DE TESIS*

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 30 del mes de Abril del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: **“Efecto de la adición de látex natural y jabón en la resistencia mecánica y absorción del adobe compactado”**


Ríos Pérez Enrique Yahir  
Apellido paterno materno nombre(s)  
Con registro: 

A	0	8	0	3	6	0
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA  
Director de tesis

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Pedro Montes García

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Delia Cristina Altamirano Juárez

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Yadira Gochi Ponce

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Luicita Lagunera Rivera

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Juan Rodríguez Ramírez





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESION DE DERECHOS**

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día **30** del mes **abril** del año **2010**, el (la) que suscribe **Ríos Pérez Enrique Yahir** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **A080360**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Pedro Montes García y cede los derechos del trabajo titulado: **“Efecto de la adición de látex natural y jabón en la resistencia mecánica y absorción del adobe compactado”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: [posgradoax@ipn.mx](mailto:posgradoax@ipn.mx) ó [arqueriquedemaria@gmail.com](mailto:arqueriquedemaria@gmail.com) Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
**Ríos Pérez Enrique Yahir**



## RESUMEN

En esta Investigación se evaluó el efecto de ácidos grasos emulsificados (jabón) y de un polímero (látex natural) en la resistencia a la flexión, compresión y absorción de agua en adobes compactados elaborados con suelo arenoso. El experimento se desarrolló en dos fases. En la primera se adicionaron los ácidos grasos emulsificados en dos niveles (0.5 y 1.0%) y el polímero en tres niveles (1.0, 2.0 y 3.0%) en relación a la masa seca del suelo utilizado. En la segunda fase se utilizaron los mismos porcentajes de jabón y látex pero se adicionó 10% de cemento. Los resultados obtenidos de la primer fase muestran que la adición de 1% de jabón en combinación con 2.0 y 3.0% de látex aumentaron la resistencia a la flexión, compresión y redujeron la absorción de agua con respecto al espécimen de referencia. Además, se comprobó que la adición de ácidos grasos emulsificados cumple la función de retardante de la plastificación del látex. Por lo tanto, se dispone de un mayor tiempo de mezclado y como consecuencia una mejor integración de los componentes, logrando mejorar las propiedades evaluadas en el material. Sin embargo, los resultados de la segunda fase indican que la adición de los ácidos grasos tuvo un efecto negativo provocando la disminución en las resistencias a la flexión y compresión; no obstante, en la prueba de absorción el efecto fue positivo reduciéndola de 16 a 9%. La combinación de los ácidos grasos emulsificados y el látex provocó una disminución más marcada en la resistencia mecánica de los especímenes elaborados con estas mezclas. Esto ocurrió debido a que dicha combinación inhibió la hidratación del cemento, lo cual fue corroborado mediante el uso de MEB y DRX.

## ABSTRACT

In this research the effect of emulsified fatty acids (soap) and a polymer (natural rubber) on the flexural and compressive strengths and water absorption of mud-compacted bricks made of sandy soil was evaluated. The experiment was conducted in two phases. In the first phase, emulsified fatty acids at two levels (0.5 and 1.0%) and the polymer at three levels (1.0, 2.0 and 3.0%) with respect to the dry mass of soil, was added. In the second phase similar ingredients were used but 10% of cement was added. The results of the first phase indicate that the addition of 1% of soap in combination with 2.0 and 3.0% latex increased the flexural and compressive strengths and reduced the water absorption when compared to the control specimens. In addition, it was found that the addition of emulsified fatty acids acts as a retardant agent to prevent the plastification of latex. This, allows to increase the mixing time, resulting in the improvement of the properties of the material under study. However, the results of the second phase indicate that the addition of fatty acids had a negative effect causing the decrease in flexural and compressive strengths, nevertheless, the effect on the absorption test was positive, reducing it from 16 to 9 %. The combination of fatty acids and latex emulsion caused a more marked decrease of the mechanical strength of specimens prepared with these mixtures. This occurred because such combination inhibited the hydration of cement, which was confirmed by SEM and XRD.

# *Dedicatoria*

**A Dios (a)** que es en mi experiencia de vida, el pensamiento más elevado que siempre encierra alegría, las palabras más claras que encierran verdad y el sentimiento más grandioso que engloba todos los sentimientos y que conozco como amor.

Alegría, Verdad, Amor. Los tres son intercambiables, y cada uno lleva siempre a los otros. No importa en qué orden se encuentren.

**A mi Familia**, por el apoyo incondicional y la confianza. Especialmente a mis sobrinos que se encuentran en el proceso de formación intelectual, que este trabajo les sirva como motivación.

**A mis compañeros de generación y especialidad: Marigel, Saraí, Soledad, Frank, Gerardo y Ur.** ¡Sin ustedes no habría sido divertido!

**A todas y cada una de la personas que por su curiosidad, ingenio e iniciativa**, nos han legado todo el bagaje de conocimientos del que hoy disponemos, incluso arriesgando sus propias vidas.

A todos los mexicanos que por convicción y el deseo de construir un país que merecemos lo materializan poniendo **“La Técnica al Servicio de la Patria”**

Podría escribir un libro completo sobre las personas que me influenciaron e influenciarán en mi vida, pero son tantas que quizá omitiría algunos nombres, por eso solo quiero dedicar este trabajo a todas y cada una de esas personas. Sé que están y estarán bien, porque han sido ellos quienes se volvieron mis modelos a seguir y no es posible ser menos.

Con mucho cariño para ti que me has enseñado que una promesa sin cumplir tiene consecuencias, que me hiciste recordar quién soy y me has motivado a seguir adelante y levantarme si caigo, te dedico este trabajo, y te agradezco por haber compartido conmigo ese tiempo, como pareja, como amiga y sobretodo como mujer.

Dios contigo, Dios conmigo, Dios con nosotros.

# *Agradecimientos*

A la **Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas del Instituto Politécnico Nacional** (COFAA) por beca otorgada durante los estudios de maestría, mediante el **Programa Institucional de Formación de Investigadores** (PIFI) bajo el proyecto de investigación: **“Estabilización química y mecánica del adobe compactado”**. Claves: 20080209, 20090144 y 20100266

Al **Sistema Nacional de Investigadores** (SNI) por la beca de “Ayudante de investigador”.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACYT), por la beca de estudios de maestría de febrero del 2008 a diciembre de 2009.

Al **Dr. Pedro Montes García**, por aceptar dirigir mi investigación, por el conocimiento que me compartió, la amistad, por el respaldo y apoyo otorgado durante el desarrollo del presente trabajo de tesis.

A los miembros del comité tutorial y comisión de revisión de tesis integrado por: **Dra. Delia Cristinia Altamirano Juárez, Dra. Yadira Gochi Ponce, Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, Luicita Lagunez Rivera y Dr. Francisco Castellanos León** por sus consejos, sugerencias y recomendaciones para el mejoramiento de este trabajo.

Al cuerpo docente y administrativo del **CIIDIR IPN Unidad Oaxaca**, por la atención brindada

Especialmente al Dr. Efraín por el apoyo para la obtención de las micrografías y difractogramas de las muestras que se analizaron, al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) “El Palmar” por las facilidades otorgadas para la obtención del látex de *Hevea Brasiliensis*.

A cada una de las personas que sin su apoyo, experiencia, ánimo y tiempo, no habría sido posible llegar a este punto de mis estudios. *Don Martín Arellano Romero, Julio Arellano Pérez y Lizeth Arellano Pérez*. A los Maestros: *Margarito Ortiz Guzmán, Juventino Morales, Laura Aquino, Elia Méndez y Rafael Alavez*.

Por todas y cada una de las personas que hicieron posible el desarrollo de esta investigación aprendí a cuestionarlo todo y a no asegurar nada, he aprendido que debo seguir cultivando mi

capacidad de olvidar para que siga siendo más grande que mi capacidad de aprender. Después de todo, soy parte de una raza que aun está en pañales, una raza que no fue guiada por nadie más, que ha aprendido a fuerza de prueba y error, al final de cuentas seguimos siendo niños de 2000 años que no han aprendido a derribar fronteras, sino a crearlas más fuertes, seguimos viendo diferencias sin ser capaces de comprender que son solo un truco del imaginario colectivo, y que todos somos **UNO**. Después de todo, ¿qué se puede esperar de unos niños que no han tenido guía alguno?

No podría ser de otra forma sino solo diciéndoles:

¡MUCHAS GRACIAS!



# Contenido

CAPÍTULO I.- PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....	15
1.1 Introducción .....	15
1.2 Planteamiento del problema .....	16
1.3 Justificación .....	17
1.4 Antecedentes .....	18
1.5 Objetivos .....	21
1.5.1 Objetivo General .....	21
1.5.2 Objetivos Específicos .....	21
1.6 Hipótesis .....	21
CAPÍTULO II.- MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	22
2.1 Introducción .....	22
2.2 La arcilla como materia prima del adobe .....	22
2.3 El Adobe.....	27
2.3.1 Adobe no estabilizado.....	28
2.3.2 Adobe semi-estabilizado .....	28
2.3.3 Adobe estabilizado .....	29
2.4 El adobe compactado .....	29
2.5 Aditivos para la estabilización de suelos .....	31
2.5.1 Cemento Portland .....	32
2.5.2 Aceites y grasas .....	33
2.5.3 Polímeros.....	35
2.6 Resistencia a la compresión de los materiales.....	37
2.7 Resistencia a la flexión .....	38
2.8 Absorción de agua en materiales porosos .....	40
CAPÍTULO III.- MATERIALES Y MÉTODOS .....	43
3.1 Introducción .....	43
3.2 Descripción de las fases experimentales.....	43
3.2.1 Introducción .....	43
3.2.2 Diseño del experimento .....	43
3.3 Metodología .....	47
3.4 Obtención y caracterización de materiales.....	49
3.4.1 Cemento.....	49
3.4.2 Suelo.....	50
3.4.3 Jabón .....	54
3.4.4 Látex (Hevea Brasiliensis Muel. Ar.).....	57
3.5 Equipos.....	66

CAPÍTULO IV.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	71
4.1 Resultados de la fase I.....	71
4.1.1 Resistencia a la flexión .....	71
4.1.2 Resistencia a la compresión .....	75
4.1.3 Correlación entre resistencia a flexión y compresión .....	78
4.1.4 Absorción de agua.....	80
4.1.5 Análisis de microscopía y DRX.....	83
4.2 Resultados de la fase II.....	86
4.2.1 Resistencia a la flexión .....	86
4.2.2 Resistencia a la compresión .....	89
4.2.3 Correlación entre resistencia a flexión y compresión .....	93
4.2.4 Absorción de agua.....	94
4.2.5 Análisis de microscopía y DRX.....	98
4.3 Análisis comparativo de resultados entre fase I y fase II .....	102
4.3.1 Resistencia a la flexión .....	102
4.3.2 Resistencia a la compresión .....	103
4.3.3 Absorción de agua.....	104
4.4 Contraste de resistencia a la flexión, compresión y absorción de agua .....	105
CAPITULO V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	108
5.1 Conclusiones.....	108
5.2 Recomendaciones .....	109
Bibliografía .....	111

## Índice de Tablas

Tabla 1 Principales compuestos del cemento Portland	33
Tabla 2 Diseño de experimento para las fases experimentales de la investigación	44
Tabla 3 Descripción de las variables y niveles de las mezclas de la fase I	45
Tabla 4 Diseño de mezclas de la fase I	46
Tabla 5 Descripción de variables y niveles de las mezclas de la fase II	47
Tabla 6 Diseño de mezclas de la fase II	47
Tabla 7 Densidad y composición química del cemento utilizado en esta investigación	50
Tabla 8 Principales óxidos de la arcilla obtenida del banco de San Pedro Mixtepec, Oaxaca	52
Tabla 9 Materiales y equipos utilizados para la determinación de pH y densidad en las soluciones de jabón usadas en la presente investigación	55
Tabla 10 Principales compuestos del jabón Tepeyac “La Corona”	56
Tabla 11 pH y densidad de soluciones con 0.5 y 1.0% de Jabón	56
Tabla 12 Materiales y equipos utilizados para los ensayos elaborados al látex y de reología en las soluciones de látex jabón	58
Tabla 13 pH y densidad del látex utilizado	62
Tabla 14 Principales compuestos del látex de Hevea Brasiliensis Muel, Ar. Clon I	62
Tabla 15 Resultados de la prueba de resistencia a la flexión de la fase I en mega pascales (MPa)	71
Tabla 16 Variación de las mezclas elaboradas con las adiciones de jabón y látex respecto a la mezcla control	72
Tabla 17 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para flexión en especímenes con Jabón	75
Tabla 18 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para flexión en especímenes con látex-jabón	75
Tabla 19 Resultados de resistencia a compresión de la fase I en MPa	76
Tabla 20 Variación de las mezclas elaboradas con las adiciones de jabón y látex respecto a la mezcla control	77
Tabla 21 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para compresión en especímenes con látex	78
Tabla 22 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para compresión en especímenes con jabón	78
Tabla 23 Resultados de absorción de agua de los especímenes de la fase I en porcentaje	80
Tabla 24 Variación de absorción de agua en los adobes respecto a la mezcla control	82
Tabla 25 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para absorción en especímenes con látex	82
Tabla 26 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para absorción en especímenes con jabón	83
Tabla 27 Resultados de resistencia a la flexión de la fase II (MPa)	86
Tabla 28 Variación de resistencia a la flexión de los especímenes de la fase II contra espécimen control	88
Tabla 29 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para flexión en especímenes con jabón	89
Tabla 30 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para flexión en especímenes con látex	89
Tabla 31 Resultados de resistencia compresión en especímenes elaborados con las mezclas de la fase II	90
Tabla 32 Variación de resistencia a la compresión de los especímenes de la fase II contra espécimen control	92
Tabla 33 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para compresión en especímenes con jabón	93
Tabla 34 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para compresión en especímenes con látex-jabón	93
Tabla 35 Resultados de absorción de agua en especímenes de la fase II en porcentaje	95
Tabla 36 Variación de la absorción de agua de los especímenes de la fase II respecto a los especímenes control	96

Tabla 37 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para absorción en especímenes con jabón	97
Tabla 38 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para absorción en especímenes con látex	98
Tabla 39 Variación de resistencia a la flexión entre las mezclas de la fase I y II	103
Tabla 40 Variación de resistencia a compresión entre mezclas de las fases I y II	104
Tabla 41 Valores mínimos de resistencia a la flexión, compresión y absorción de agua en adobe compactado según norma peruana, CYTED y otras fuentes	106
Tabla 42 Valores mínimos de resistencia a la flexión, compresión y absorción de agua en bloques para la construcción según la norma mexicana C-404 y otras fuentes	107
Tabla 43 Densidad de suelos para la determinación del tipo según la Norma NMX C-170	112

## Índice de figuras

Figura 1 Proceso de Tixotropía propio de algunas arcillas	26
Figura 2 Progreso de la hidratación de una partícula de cemento	33
Figura 3 Representación gráfica teórica del Lauropalmitoestearato de glicerilo (glicérido mixto) Bailey, 2003	34
Figura 4 A) enlaces de caucho o hule natural; con más de 90% de isopreno ,4 cis. B) enlaces con otra posibilidad de adición 1,4 trans (con más del 80%) Velasco, 2007	36
Figura 5 Deformación por flexión sobre una viga (Popov, 1982)	39
Figura 6 Condición dimensional del material para someterlo al ensayo de flexión	40
Figura 7 Diseño experimental para el estudio del efecto de la adición de látex y jabón en la resistencia a compresión, flexión y absorción de agua en el adobe compactado	44
Figura 8 Diagrama de etapa experimental de la investigación	48
Figura 9 Fase I en la que se explora la interacción del suelo con los aditivos propuestos	48
Figura 10 Fase II en la que se aborda la interacción de los aditivos propuestos con el sistema suelo cemento	49
Figura 11 Recolección de la arcilla en el banco de material en San Pedro Mixtepec, Oaxaca	50
Figura 12 Cuarteo de muestra para elaboración de pruebas de granulometría	51
Figura 13 Preparación de la muestra para prueba de límite líquido	51
Figura 14 Clasificación granulométrica del suelo según el SUCS	53
Figura 15 Jabón utilizado como aditivo en el adobe compactado elaborado en la presente investigación	54
Figura 16 Solución de jabón en proporciones de experimentación previa	55
Figura 17 Muestra de látex previo a la prueba de contenido de sólidos totales	59
Figura 18 Muestrasde látex después de la prueba de contenido de sólidos totales	59
Figura 19 Determinación del pH en mezcla de 0.5% de jabón y 1.0% de látex	60
Figura 20 Determinación del pH del látex	60
Figura 21 Colocación de la muestra de jabón y látex para prueba de reología	61
Figura 22 Preparación de la muestras de jabón y látex para prueba de reología	61
Figura 23 Reograma de soluciones de 1, 2 y 3% de látex con 0.5% de jabón	63
Figura 24 Reograma de soluciones de 1, 2 y 3% de látex con 1% de jabón	65
Figura 25 Posible interacción entre los aditivos propuestos y las partículas de suelo	66
Figura 26 Especímenes elaborados para la fase I de experimentación	67
Figura 27. Especímenes de adobe compactado durante la prueba de resistencia a la flexión simple.	68
Figura 28. Especímenes de adobe compactado durante la prueba de resistencia a compresión	69
Figura 29. Especímenes de adobe compactado durante la prueba de absorción de agua por inmersión total	70
Figura 30 Resultados de resistencia a la flexión de las probetas elaboradas en la fase I	72
Figura 31 Resultados de resistencia a la compresión en las mezclas de la fase I	76
Figura 32 Correlación entre resistencia a la flexión y compresión para los especímenes de las fase I	79
Figura 33 Resultados del ensayo de absorción de agua en las probetas de la fase I	81
Figura 34 Micrografía de la mezcla M3 (Suelo-2% Jabón)	84
Figura 35 Micrografía de la mezcla M9 (1.0% Jabón- 3% látex)	84
Figura 36 Patrones de Difracción de rayos X para adobes elaborados con las mezclas M3 y M9. Las fases cristalinas detectadas fueron de: oxido de silicio (Q), aluminato de calcio (1), ferroaluminatos (2) y silicato de calcio (3)	85
Figura 37 Resultados del ensayo a flexión en especímenes de la fase II	87
Figura 38 Resultados de resistencia a compresión en especímenes de la fase II	91
Figura 39 Correlación de resistencia a la flexión y compresión para los especímenes de la fase II	94
Figura 40 Resultados del ensayo de absorción en las probetas elaboradas en la fase II	96
Figura 41 Micrografía de la mezcla M10 (10% cemento)	98

Figura 42 Micrografía de la mezcla M12 (10% cemento-1%ácidos grasos)	99
Figura 43 Micrografía de la mezcla M18 (10% cemento-2%ácidos grasos-3%polimero)	100
Figura 44 Patrones de Difracción de rayos "X" para adobes elaborados con las mezclas M10, M12 y M18. Las fases cristalinas detectadas fueron: óxido de silicio (Q), aluminato de calcio (1), ferroaluminatos (2), silicato de calcio (3), óxido de hierro (4) y carbonato de calcio (5)	101
Figura 45 Efecto de la adición de los materiales de estudio en la resistencia a la flexión en las fases I y II	102
Figura 46 Efecto de la adición de los materiales de estudio en la resistencia a compresión en las fases I y II	103
Figura 47 Efecto de la adición de los materiales de estudio en la absorción de agua en las fases I y II	105

# CAPÍTULO I.- PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1 Introducción

El adobe es un material de construcción muy antiguo que se ha utilizado para abrigar al hombre de los elementos naturales y tiene sus orígenes en las construcciones a base de tierra. En el transcurso de la historia de la humanidad este material no ha sufrido modificaciones importantes en su elaboración; el aporte más significativo para dicho proceso se realizó en las últimas dos décadas; y ha sido la compactación mecánica del adobe.

Sin embargo, debido a la intervención de agentes como: lluvia, viento y sismos, además de la naturaleza propia de los suelos con los que se elaboran, -por ser arcillas en el mayor de los casos-, tienden a mostrar afinidad por el agua, lo que reduce la resistencia mecánica, así como la desintegración de los mismos al entrar en contacto con el agua, por lo que la durabilidad de las estructuras construidas con este material es relativamente corta, ya que dichos factores propician la erosión, fisuración y agrietamiento de las piezas llevándolas al desgaste parcial o total.

Esta tesis tuvo como objeto realizar mezclas de suelo y suelo cemento con la adición de soluciones de látex natural y jabón para elaborar adobe compactado y evaluar el comportamiento de dichas adiciones en la matriz de este, así como su efecto en la resistencia a la compresión, flexión y absorción de agua.

Este trabajo ha sido dividido para su presentación en cinco capítulos. En el capítulo I se presenta el diseño de la investigación. El capítulo II considera el marco teórico, en el cual se describen las leyes y teorías principales de los fenómenos que se evaluaron en la presente investigación. En el capítulo III se muestran los materiales y métodos, y en el cual se explica la procedencia y características de los materiales, así como el diseño del experimento, los equipos y pruebas de resistencia mecánica y absorción de agua. El capítulo IV contiene los resultados obtenidos y su discusión para cada uno de los casos estudiados. Por último, el capítulo V muestra las conclusiones finales y las recomendaciones para investigaciones posteriores relacionadas con este proyecto.

## 1.2 Planteamiento del problema

En México el adobe ha sido el material más empleado para la construcción de muros en la vivienda rural, debido principalmente a su economía y facilidad de fabricación, así como a sus excelentes características de aislamiento térmico. Existe una gran cantidad de viviendas construidas con este material en zonas sísmicas, -tal es el caso del Estado de Oaxaca- por lo cual merece especial atención el estudio de las características de la materia prima del mismo, ya que la principal causa de colapso en casas de adobes debido a los sismos es atribuible a las pobres propiedades mecánicas del material y a su deterioro por el tiempo y agentes climáticos.

El ladrillo de barro crudo, conocido como adobe, es una mezcla de arcilla y arena, considerada ideal en una proporción 1:5, a la que ocasionalmente, se adicionan fibras.

En particular, en el adobe, la absorción de agua está directamente ligada con la porosidad del material, el tamaño de los poros así como la distribución de los mismos que determinan el grado de absorción de agua (Bentz, 2000). El efecto de la capilaridad, debido a la presencia de poros en la micro estructura, tiene un papel importante en la degradación por humedad, la cual reduce el periodo de vida del material (Calabria, 2008).

Dicha porosidad aunada con el efecto del agua en la arcilla, produce fenómenos físicos en la micro y macro estructura provocando expansión y contracción en los bloques elaborados con este material y dichos fenómenos se perciben en forma de grietas en el mismo (Xiang-qin, 2003).

Este agrietamiento es la principal causa de la disminución en la durabilidad de las estructuras construidas con dicho material, por lo que se han incluido materiales adicionales, en forma de recubrimientos para la protección de la intemperie, incrementando los costos de construcción. Además esta baja resistencia incide directamente en la seguridad estructural en los edificios construidos con este material, poniendo en riesgo la vida de los usuarios (Bahar, 2004)



### 1.3 Justificación

Cada cinco años la población urbana en África, Latino América y Asia se duplica. Sin embargo, se estima que más del 60% de dicha población vive bajo condiciones de extrema pobreza. (Peris, 2007). En contraste, la modernización constructiva en las urbes tercermundistas se entiende como la inclusión de materiales basados en la tecnología del cemento y concreto, que desplazan el consumo de materiales propios de cada región.

Aproximadamente el 78% de las emisiones de carbono proceden de combustibles fósiles que son quemados para producir cemento. (Grupta, 2000). Con eso, la industria de la construcción es responsable del 7% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Todo esto debido principalmente a la producción de concreto –aproximadamente se emite a la atmosfera 1 kg de CO<sub>2</sub> por cada kg de cemento producido-, y que al menos 2000 millones de toneladas de este material ha sido consumido durante esta década.

Por otro lado, las características de resistencia mecánica, absorción de agua y composición química, le han resultado al adobe una serie de desventajas frente a otros materiales para la construcción, sin embargo, para contrarrestar estas desventajas, se le han adicionado a estas piezas, fibras naturales, aditivos minerales tales como: cemento y cal, y se han compactado mecánicamente. Estas han demostrado ser una buena forma de estabilización que permiten conferirle a dicho material mejores prestaciones mecánicas y químicas ante el deterioro causado por agentes climáticos, sin embargo, solo la compactación mecánica y la estabilización con cemento son las más conocidas y accesibles para el usuario.

Por lo que el objetivo de la presente investigación es aportar conocimiento sobre la adición de un polímeros natural (látex) y ácidos grasos emulsificados (jabón), y su efecto en las propiedades mecánicas del adobe. De igual manera, al conferirle un mejor comportamiento ante agentes del clima y mecánicos, el material resultante se pretende que sea utilizado en la construcción de vivienda para diferentes estratos sociales a nivel local, nacional e internacional.

Los beneficios que se obtendrán se verán reflejados al realizar estudios pertinentes en los siguientes aspectos: ecológico, económico y social, que por la naturaleza de los

materiales se disponen directamente del entorno natural, con bajo consumo de energías no renovables, y procesos de producción con pequeñas emisiones de CO<sub>2</sub>, en comparación con los materiales de construcción basados en el uso masivo de cemento. En el aspecto estructural, al garantizar mayor durabilidad del material, debido a la mejoría de las propiedades mecánicas de la materia prima, se puede reducir el riesgo de colapso de las estructuras, debido al enriquecimiento de dichas propiedades.

## **1.4 Antecedentes**

La tierra es un material de origen natural y además está disponible en abundancia, por lo que ha sido utilizada alrededor del mundo y particularmente en países en vías de desarrollo. Su uso abre la posibilidad a la construcción sostenible, reduciendo el gasto en materiales de construcción industrializados, cubriendo las necesidades sociales y culturales de vivienda, al garantizar la satisfacción de demanda de vivienda a bajo costo.

En países de medio oriente, tales como Turquía, Marruecos, España y en países latinoamericanos, se ha estudiado la micro estructura y propiedades físicas de las piezas de adobe con adiciones minerales, encontraron en la mayoría de esos estudios ciertas mejorías en las propiedades estudiadas (Venkatarama, 2006).

Si bien es cierto, se han investigado las propiedades químicas y geotécnicas de los suelos estabilizados con cal (López, 2004), existen también estudios que han sido desarrollados para determinar los efectos de la adición de cal en las propiedades físicas y la micro estructura del adobe. En Marruecos (Younoussa, 2008), encontró que la adición de cal en la arcilla utilizada para elaborar adobe, induce el desarrollo de calcita y silicato hidratado de calcio, el cual se forma por la reacción de cal y sílice contenido en el suelo utilizado, y la presencia de compuestos formados posteriormente, contribuyen al refuerzo del adobe. Sin embargo, después de la adición de 10% de cal, se genera una formación excesiva de portlandita y calcita, en menor proporción de silicato hidratado de calcio que afecta negativamente la resistencia mecánica de dicho material.

Según (Al Rawas, 2005; Guettala, 2006) respecto al efecto del agua en el adobe, se ha incluido generalmente el uso de materiales industrializados, tales como cemento, cal, emulsión asfáltica y/o materiales bituminosos que contrarrestan dicho efecto en las

arcillas o suelos con los que se elabora el adobe. Además del uso de materiales industrializados, también se han realizado investigaciones sobre el uso de materiales reciclados para estabilizar el adobe (Mroueg, 2002; Juárez, 1997).

Respecto a la adición de cemento en el adobe compactado, dentro del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) dependiente del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Oaxaca; se ha investigado el efecto que tiene dicho material en adiciones del 2 al 16% respecto a la masa seca de suelo utilizado, y se encontró que después del 12% de cemento adicionado, la resistencia mecánica disminuye, y con 2% de cemento, dicha resistencia es menor que los adobes elaborados sin cemento (Ortiz, 2006; Regalado, 2007).

En el 2007 Pineda Piñón et al., investigaron los efectos de la adición de polímeros artificiales en adobes y encontraron con una serie de pruebas en la matriz del material y en las pruebas de resistencia a la compresión y absorción de agua, que los especímenes elaborados con mezclas a las que adicionaron emulsión asfáltica, aumentaron la resistencia a la compresión y redujeron la absorción de agua.

Se han realizado pruebas en adobes compactados elaborados con arcilla y cemento en 6, 8 y 12% de cemento (Venkatarama et al, 2006) durante la etapa de pruebas de resistencia a la compresión y absorción de agua, obtuvieron los siguientes resultados: las pruebas de resistencia a la compresión a los 28 días en adobes con dimensiones de 305 x 143 x 100 mm fueron; de 3.13, 5.63 y 7.19 mega pascales (MPa) para 6, 8 y 12% de contenido de cemento respectivamente. Los valores de absorción de agua (determinado en pruebas de absorción de agua en saturación durante 24 hrs) fueron; 12.1, 11.2 y 11.4% respectivamente. Encontraron también una relación directa entre el contenido de cemento del adobe y su resistencia a la compresión, mientras que el porcentaje de absorción de agua de las piezas que se probaron, se mantuvo en el mismo rango.

Respecto a la mejoría del adobe con el uso de cemento, diversos estudios recomiendan utilizar un rango entre el 8 y 12% de cemento en relación a la masa de los especímenes, debido a que la resistencia mecánica aumenta conforme la cantidad de cemento se incrementa, sin embargo, la absorción se mantiene en un promedio entre 12 y 11%, además económicamente no es recomendable rebasar ese rango de cemento, por el

impacto ambiental que esto representa, por lo que para esta investigación es recomendable utilizar un valor medio del mismo.

En Turquía (Nurhayat, 2008) encontró que la adición de yeso fosfórico producto de desperdicio de las fabricas de fertilizantes de la región y yeso natural a partir de 10% respecto a la masa de tierra utilizada para elaborar adobes, influyó en el incremento de la resistencia a la compresión, y la absorción de agua se redujo a un 60% , mientras que las muestras de control, se desintegraron, teniendo una absorción del 100%, además de poder utilizar dicha mezcla como mortero para recubrimiento de edificios construidos con este sistema constructivo.

Además del uso de materiales industrializados se ha estudiado el efecto de la adición de desperdicios agrícolas y naturales como es el caso del proyecto de investigación denominado: Sobre la estabilización de tierra con polímeros naturales (Achenza et al, 2005), estudiaron el efecto de la adición de desperdicio de jitomate, betabel y algas marinas. Para tal caso encontraron que los poros de los adobes fueron llenados por efecto de la goma y el azúcar del betabel; el almidón y la goma del betabel funcionan como adhesivo vegetal; el efecto de los polímeros que llenan los poros provoca que el adobe con estos materiales resista la absorción de agua y aumente su resistencia mecánica en relación con los adobes sin estabilizar. Las proteínas de los polímeros son absorbidas por la arcilla, teniendo efectos plásticos que mejoran la resistencia mecánica y reducen la penetración de agua; también encontraron resultados favorables que permitieron contrarrestar el efecto del daño ocasionado por la lluvia y brisa marina.

Otros investigadores evaluaron el efecto de los ácidos grasos en la resistencia a la compresión del concreto y la molienda del cemento. En dicha investigación encontraron que los ácidos grasos de origen vegetal incrementan la finura del cemento, sin embargo, disminuyen la resistencia a compresión, excepto el ácido mirístico que mantuvo los mismo valores que las muestras control (Albayrak, 2005).

Con base en lo descrito anteriormente, conocer el efecto que tiene la adición de un polímero natural y los ácidos grasos contenidos en el jabón sobre las propiedades mecánicas y la absorción de agua del adobe, puede ampliar la gama de materiales que se usen como aditivos para la mejoría del adobe.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Evaluar los efectos de la adición de ácidos grasos emulsificados y un polímero natural (látex) en la resistencia mecánica y absorción de agua del adobe compactado, y adobe compactado y estabilizado con cemento

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

Caracterizar los materiales con los que se elaborarán los especímenes de adobe para conocer su composición química, tipología y características de los adobes de acuerdo a las normas aplicables vigentes.

Determinar la resistencia mecánica de adobes de suelo-látex y/o jabón mediante pruebas de resistencia a la compresión, flexión y absorción de agua.

Determinar la resistencia mecánica de adobes de suelo-cemento-látex y/o jabón mediante pruebas de resistencia a la compresión, flexión y absorción de agua.

Evaluar los resultados de resistencia a la compresión, flexión y absorción de agua y determinar las mezclas que muestre los mejores resultados en dichas propiedades.

## **1.6 Hipótesis**

La adición de látex y/o jabón al suelo y al sistema suelo-cemento en la elaboración de adobe compactado aumenta la resistencia a la compresión y a la flexión.

La adición de látex y/o jabón al suelo y al sistema suelo-cemento reduce la absorción de agua del adobe compactado.

## **CAPÍTULO II.- MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

### **2.1 Introducción**

El adobe puede ser descrito como el producto de la mezcla de arena, arcilla y fibras. Por su origen, se dispone en la mayor parte del planeta, y no se requiere una gran cantidad de energía para su producción (Goodhew, 2005).

Este material ha sido utilizado como un material de construcción milenario y sigue siendo usado en algunos países, independientemente de su resistencia mecánica limitada, su alta absorción de agua y de la escasa legislación vigente en la mayoría de los países respecto a dicho material.

Para mejorar las propiedades físicas del adobe se han realizado una gran cantidad de adiciones de materiales suplementarios tales como: cemento, cal, fibras naturales, paja y ceniza volante. A pesar del impacto positivo de estas adiciones en la calidad del adobe, se ha puesto poca atención en los efectos sobre la microestructura de tal material (Younoussa, 2008).

Debido a este tipo de estudios y las mejorías que se han logrado con ello, dicho material está ganando importancia en la construcción en países desarrollados (Delgado, 2006; Ngowi, 1997), por lo que es necesario promover el uso de materiales suplementarios que estén disponibles en la región, así como generar conocimiento en este sentido, con el único fin de seguir promoviendo el uso de este material y disminuir el consumo de materiales basados en el cemento.

### **2.2 La arcilla como materia prima del adobe**

Existen distintas definiciones de la meteorización de la arcillas. En un sentido estricto, la arcilla es el resultado del paso del tiempo sobre los minerales que se formaron hace millones de años y que le confirieron la composición química que posee actualmente.

El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados:

Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 2 mm).

Desde el punto de vista petrológico la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas. Para un sedimentólogo, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 2 mm.

Para un ceramista una arcilla es un material natural que cuando se mezcla con agua en la cantidad adecuada se convierte en una pasta plástica. Desde el punto de vista económico las arcillas son un grupo de minerales industriales con diferentes características mineralógicas y genéticas, y con distintas propiedades tecnológicas y aplicaciones.

Por tanto, el término arcilla no sólo tiene connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula, en este sentido se consideran arcillas todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a 2 mm. Según esto todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños, incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldespatos, etc.) pueden ser considerados partículas arcillosas cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan las 2 mm. (García, 2005).

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

### **Propiedades físico químicas de las arcillas**

Las distintas aplicaciones de las arcillas radican principalmente es sus propiedades físico-químicas, que se derivan principalmente de:

- Su pequeño tamaño de partícula (inferior a 2  $\mu\text{m}$ )

- Su morfología laminar (filosilicatos)
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a aparición de carga en las laminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan por una parte, un valor elevado de área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello puede interaccionar con muy diversas sustancias, en especial con compuestos polares, por lo que tienen un comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido.

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa, con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, a esta propiedad se la conoce como capacidad de intercambio catiónico.

### **Plasticidad**

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esto se debe a que el agua forma una película de recubrimiento sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento. Dicha plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (límite líquido, límite plástico y contracción). La relación entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.



Como ya se ha descrito previamente, las arcillas presentan en su mayoría una gran afinidad por el agua, dando como resultado lo que se conoce como proceso de tixotropía.

### **Tixotropía de la arcilla**

Según Botasso et al. 2003, el proceso de estabilización de suelos mediante el uso de estabilizadores químicos se produce con la acción que realizan los mismos sobre las arcillas, neutralizando la actividad electroquímica. El fenómeno de estabilización química de suelos está asociado a la eliminación del agua pelicular adsorbida.

Para comprender este fenómeno es necesario recurrir a una analogía.

Supóngase que los edificios contruidos por las estructuras laminares de las arcillas son atacados por granadas de agua, que al chocar producen una explosión en la cual la carga es la fuerza electrostática que es causada por la naturaleza dipolar de la molécula de agua, es decir, que se comporta como un imán que se compone por un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno; como los hidrógenos se localizan en un extremo de la molécula, resulta de un lado una concentración de carga positiva y por el otro lado es de carga más negativa.

Al entrar en contacto las granadas de agua con la arcilla que también tiene una carga negativa, se produce una asociación. En el caso particular de temperatura de cero grados (°C), las partículas de agua se asocian con la arcilla logrando una densidad y viscosidad mayor que la del agua en estado natural muy similar al hielo, y se extiende por varias capas del edificio laminar de las arcillas.

Por esta razón, al añadir una pequeña proporción de arcilla al agua ésta permanece flotando sobre el líquido indefinidamente, alcanzando el estado coloidal. Sin embargo, si se añade aún más, el líquido se torna viscoso y se resiste a fluir; en cambio, si se agita vigorosamente la suspensión, el líquido recupera su fluidez, perdiéndola nuevamente al cesar la agitación. A esta propiedad se le llama tixotropía, y es típica de muchas de las arcillas comunes. Tiene su asiento en la afinidad por el agua, así como en la capacidad de hinchamiento del espacio interlaminar, el cual puede alcanzar hasta quince veces el

volumen original, a esto se le conoce como proceso de tixotropía (Figura 1) (Dominguez 1995).

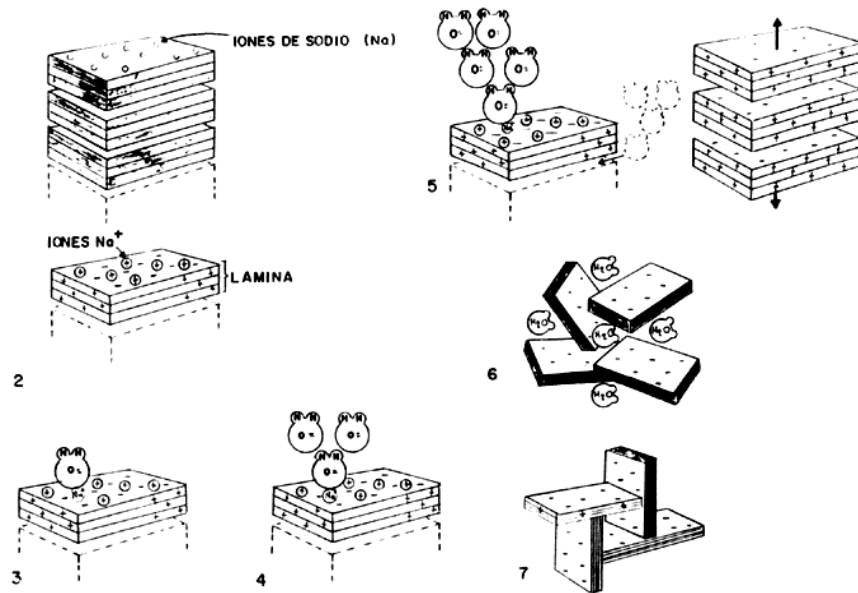


Figura 1 Proceso de Tixotropía propio de algunas arcillas

Etapa 1: la arcilla se encuentra en un estado deshidratado, son solo algunos iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) o tal vez calcio ( $\text{Ca}_2^+$ ) adsorbidos en el espacio interlaminar.

Etapa 2: desde el punto de vista electrostático, las cargas negativas en la arcilla se acumulan en las superficies planas de las laminillas, mientras que los bordes acumulan cargas positivas. Luego los iones de sodio tienden a concentrarse sobre las caras planas.

Etapa 3: al ponerse en contacto con la arcilla, las moléculas de agua son atraídas fuertemente hacia las superficies planas debido a la presencia de los iones sodio cargados positivamente. Hay que recordar que, a la escala molecular, las fuerzas electrostáticas son las más importantes.

Etapa 4: en este estado, las moléculas de agua se hacen más dipolares, atrayendo a otras de su especie.

Etapa 5: la carga negativa en la superficie de las laminillas se incrementa conforme las moléculas de agua se enlazan unas con otras al aumentar su polarización. Llega un

momento en que la carga superficial es tal, que las láminas se repelen entre sí separándose unas de otras por lo que el espacio interlaminar se expande, originando el hinchamiento característico de las arcillas.

Etapa 6: las moléculas de agua continúan llenando el espacio interlaminar, neutralizando parcialmente las superficies expuestas y manteniendo las láminas apartadas unas de otras, hasta que el agua es eliminada mediante algún procedimiento de secado, lo cual origina una contracción del volumen de la hojuela.

Etapa 7: el equilibrio de la hidratación es alcanzado cuando termina la mezcla de la arcilla con el agua, dando como resultado una estructura interna hidratada que hace coincidir los bordes cargados positivamente con las caras planas cargadas negativamente, de modo que se forma una estructura de castillo de naipes, por lo que las moléculas de agua entran y salen libremente. Este castillo puede derrumbarse mediante una agitación vigorosa de la suspensión, pero tiende a formarse de nuevo si la agitación termina, esto es, si el medio queda libre de esfuerzos mecánicos. Este último efecto se debe a que las hojas mantienen la fuerte carga electrostática que las atrae.

El comportamiento mecánico de las arcillas se ve afectado directamente por su composición mineralógica y su estructura, por lo que si se desea un comportamiento diferente de éstas es posible generarlo a partir de adicionar diversos materiales que reaccionen con las mismas.

## **2.3 El Adobe**

El adobe como comúnmente se le conoce, es elaborado por la mezcla de tierra, paja y agua, dicha mezcla es puesta en moldes de madera y se deja secar al sol hasta que se puede retirar del molde y se expone nuevamente al sol para terminar el proceso de secado de dicha pieza. Actualmente existen varios métodos para la elaboración de adobes, y las cuales se pueden dividir en tres grupos que se mencionan a continuación:

### **2.3.1 Adobe no estabilizado**

El comportamiento del adobe está ligado a las condiciones y constitución del suelo con que éste se elabora. Un suelo excesivamente arcilloso exigirá la incorporación de una mayor proporción de otros componentes para balancear su capacidad de contracción-expansión que puede conducir a fisuras y deformaciones.

Por la naturaleza de los materiales que lo constituyen, así como su proceso de fabricación, el adobe no requiere del uso de combustibles, por lo que representa un ahorro económico estimado en el 40% con relación al ladrillo de barro recocido, puesto que este material no requiere de un proceso de cocción a diferencia del ladrillo (Regalado, 2007).

Una de las desventajas más significativas del adobe tradicional, después de sus prestaciones mecánicas limitadas, está en la utilización de un gran número de obreros que se requiere para la elaboración del mismo, lo cual eleva el costo de las obras y llevó a considerar dicho material como de uso exclusivo de individuos con alto poder adquisitivo, además, requiere de áreas de secado muy extensas, así como de tiempos de secado variables en relación al clima.

Originalmente el adobe se elaboraba con paja o fibras, las cuales ayudan a mejorar su comportamiento ante el efecto de contracción y expansión del material que se evidencian principalmente con agrietamientos, sin embargo, si la consistencia del suelo con que se elabora este material está equilibrada y presenta cambios dimensionales despreciables, el uso de fibras puede ser omitido.

### **2.3.2 Adobe semi-estabilizado**

Este tipo de adobe se clasifica como una forma de block resistente a la humedad debido a la incorporación a su composición habitual un 3 a 5% de su peso en forma de estabilizante o de agente impermeable. Este estabilizador posee gran importancia en la protección del bloque de adobe durante el proceso de curado. La emulsión asfáltica es el principal estabilizador debido a su facilidad de uso y propiedades físicas, principalmente de impermeabilidad. Dicho estabilizante es adicionado desde el momento en que se

mezclan los materiales para elaborar los ladrillos y no como un acabo final sobre dichos ladrillos.

La principal desventaja del uso de emulsiones en la estabilización del adobe, es el costo económico elevado, que lo hace poco factible como material de construcción en vivienda de bajo costo, debido al tamaño masivo de los bloques y al tratamiento de los moldes en los que estos se elaboran, que deben ser recubierto con lámina melamínica (ONU, 1996).

### **2.3.3 Adobe estabilizado**

En el caso del adobe estabilizado el material estabilizador disminuye el problema técnico fundamental que presenta el adobe simple, esto es, su baja resistencia a la humedad. Estabilizar el suelo es modificar las propiedades de un sistema tierra-agua-aire para que se obtengan propiedades que le hagan compatible con su aplicación. En la estabilización intervienen numerosos parámetros, por lo que es necesario tener un conocimiento de factores tales como las propiedades del suelo que se quiere estabilizar, las propiedades finales que se requieren, la economía del proyecto, las técnicas para utilizar el suelo seleccionado en el proyecto así como el sistema constructivo y el costo de conservación (Rodríguez, 2003).

Un adobe totalmente estabilizado debe limitar la proporción de agua que asimila al 4% de su peso, requiriendo para ello la incorporación de un aditivo que fluctúe entre el 6 y el 12% de su peso total, no requiere del uso de algún tipo de recubrimiento, sin embargo, su principal desventaja es que la mayoría de las veces los usuarios de este tipo de material requieren recubrir las paredes con algún material impermeabilizado, lo que incrementa sustancialmente el costo de la obra (Jahn, 2000).

## **2.4 El adobe compactado**

La compactación en el adobe es una alternativa en la que se aprovecha las ventajas del adobe tradicional y minimizan sus desventajas, ya que al mezclar adecuadamente los ingredientes del adobe tradicional y luego a esto agregarle una fuerza de compactación con una prensa se obtiene un material más homogéneo. El efecto que la compactación produce, se refleja en el aumento en la densidad del adobe, incrementando su resistencia

mecánica, debido a que se disminuye la porosidad total y la macroporosidad -porosidad de aireación- del suelo (Riego, 2001), haciéndolo más denso en relación al adobe tradicional

El adobe compactado es elaborado con material propio de la región, para ello se emplea una prensa manual o electromecánica, sencilla, ligera, que no requieren de un consumo energético elevado.

En comparación con materiales industrializados, el adobe compactado ofrece ventajas valiosas en la conservación y aprovechamiento de los recursos naturales tales como:

Elaboración del adobe con material propio de la región y de origen natural, reduciendo con esto los costos directos e indirectos de construcción.

Mayor rendimiento por metro cuadrado de construcción y menor tiempo de elaboración que el tabique rojo recocido y el tabicón de cemento.

Mayor economía que el bloque de concreto y tabicón en relación a la cantidad de cemento utilizada para su elaboración, además de presentar mejores prestaciones térmicas y acústicas.

En comparación con el adobe tradicional, resulta más barato puesto que su producción es más rápida (Regalado, 2007).

Además, por ser un material que tiene como materia prima el suelo, puede ser reciclado, por lo que el impacto ambiental es mínimo en comparación con otros materiales industrializados.

De lo anterior se puede concluir que el uso del adobe compactado para la construcción de vivienda es una alternativa viable, amigable con el ambiente y sobre todo limpia.

## 2.5 Aditivos para la estabilización de suelos

La estabilización de suelo se define como el mejoramiento de la matriz del material mediante la compactación, al incrementar su resistencia y capacidad de carga, y al disminuir su sensibilidad al agua y cambios volumétricos durante el ciclo de humedecimiento y secado (Ugaz, 2001). Este mejoramiento es posible con la adición de diversos materiales que actúan en el aspecto físico-químico para promover tales incrementos en las propiedades que se desean mejorar.

Existen diversas formas de estabilización de suelos, desde la mecánica como la compactación en la que se logra mejorar el suelo considerablemente sin que se produzcan reacciones químicas de importancia, la estabilización física en la que se utiliza la combinación de diferentes materiales, hasta las químicas que utilizan diversos aditivos de naturaleza cementante.

Las características de los aditivos según su procedencia se clasifican como: a) derivados del petróleo, emulsionados y/o sulfonados; y b) derivados poliméricos; orgánicos; alcalinos.

La acción de dichos aditivos, tomando como base sus características expuestas generan; las del tipo:

a) Un alto potencial de intercambio iónico, en las que intercambian sus cargas positivas con las de las partículas negativas, se desprende el agua pelicular y drena (por evaporación y gravedad), por lo que las partículas se aglomeran por atracción electroquímica, sellando la estructura porosa capilar, aumentando la resistencia, la capacidad portante, y disminuyen la permeabilidad que es una reacción permanente en general.

b) Forman polímeros tridimensionales hidrofóbicos en los capilares del material compactado, rechazando el agua. Ambos procesos se complementan con control de humedad y compactación (Botasso, 2003).

### **2.5.1 Cemento Portland**

Se da el nombre de Portland a un cemento obtenido por la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales asociados con sílice, alúmina y óxido de hierro, que son calentados a temperaturas que provocan que se formen escorias, para posteriormente moler el producto resultante. Cuando la escoria se enfría, se muele hasta convertirla en un polvo fino y se le agrega un poco de yeso, este producto resultante es el cemento Portland comercial que se usa en todo el mundo (Kosmatka, 2004).

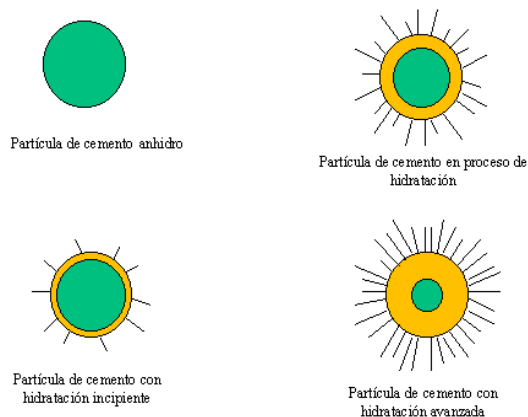
Para efectos de construcción, el significado del término cemento se restringe a materiales aglutinantes utilizados con piedras, arenas, ladrillos, bloques de construcción etc. Los principales componentes de este tipo de cemento son compuestos de cal, de modo que en construcción se trabaja con cementos calcáreos, los cementos que se utilizan en la fabricación del concreto tienen la propiedad de fraguar y endurecer bajo o sumergidos en agua, en virtud de que experimentan una reacción química con ésta y, por lo tanto, se denominan cementos hidráulicos (Neville, 1998).

El cemento Portland puede ser usado también para mejorar la calidad del suelo o transformar la matriz del suelo para incrementar la resistencia y durabilidad del mismo. La cantidad de cemento utilizada depende en gran medida del tipo de suelo o el grado de estabilización que se pretende conferirle al suelo (ARMY, 1994)

#### **Hidratación del cemento**

Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta. La hidratación comienza cuando el cemento entra en contacto con el agua. En la superficie de cada partícula de cemento se forma una capa fibrosa que gradualmente se propaga hasta que se enlace con la capa fibrosa de otra partícula de cemento o se adhiera a las sustancias adyacentes (Figura 2). El crecimiento de las fibras resulta en la rigidización, endurecimiento y desarrollo progresivo de resistencia (Kosmatka, 1992).





**Figura 2 Progreso de la hidratación de una partícula de cemento**

Las reacciones químicas que se presentan durante el fraguado del cemento, forman cuatro compuestos principalmente en el producto final (pasta), los cuales se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1 Principales compuestos del cemento Portland**  
Fuente: Brooks, 1998

<i>Nombre del compuesto</i>	<i>Composición óxida</i>	<i>Abreviatura</i>
Silicato Tricalcico	3CaO. SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Silicato bicalcico	2CaO. SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Aluminio de tricalcio	3CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Aluminoferrato	4CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

Agregar cemento Portland a los suelos es un método bueno para suelos con contenidos bajos de partículas finas, es decir, que en suelos granulares este es un método recomendable, aunque relativamente caro por el precio del cemento.

El principal efecto que tiene el cemento en el adobe es unir las partículas del suelo entre sí con los productos de hidratación del propio cemento. En dicho proceso de unión están implicadas las fuerzas intermoleculares del suelo mismo (Sowers, 1995).

### **2.5.2 Aceites y grasas**

Respecto al uso de aceites o grasas para la estabilización de suelos se ha evaluado el efecto de aceites sulfonados y el uso de aceite automotriz (Reyes, 2001), por lo que con

la incorporación de ácidos grasos de origen animal se pretende generar conocimiento respecto al efecto de dicho material en la estabilización de suelos.

Una de las aplicaciones más antiguas de los aceites y grasas -mediante una reacción química conocida como saponificación- ha sido en la elaboración de jabón (Sanz, 2002).

Las grasas son ésteres glicéridos en los que predominan los componentes ácidos de una cadena larga y saturada. Son sólidas o semisólidas y principalmente de origen animal. De estas grasas los ácidos obtenidos por hidrólisis son: el láurico,  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$ , el palmítico,  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$  y el esteárico,  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$ . Son prácticamente insolubles en agua pero solubles en disolventes orgánicos. Es posible que coexistan los tres en un glicérido mixto como el representado por la fórmula de la Figura 3

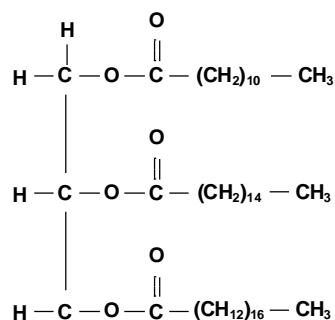


Figura 3 Representación gráfica teórica del Lauropalmitoestearato de glicerilo (glicérido mixto) Bailey, 2003

Los ácidos grasos son moléculas anfipáticas, es decir, tienen una región apolar hidrófoba (la cadena hidrocarbonada) que repele el agua y una región polar hidrofílica (el extremo carboxílico) que interactúa con el agua. Los ácidos grasos de cadena corta son más solubles que los ácidos grasos de cadena larga porque la región hidrófoba es más corta.

Si se colocan ácidos grasos en agua o en otro disolvente polar forman una capa superficial debido a su baja densidad. Formarán una película con sus colas (la parte no polar) orientadas hacia arriba, fuera del agua, de manera que no quedan en contacto con la misma y la cabeza polar dentro del agua. Si se agita, las colas tienden a relacionarse entre sí mediante interacciones hidrofóbicas creando ambientes donde no hay agua, como es el caso de una micela ya sea monocapa o bicapa.

La inclusión de aceite en el suelo tiene un efecto de mejora en la resistencia mecánica, así como en el incremento en la densidad máxima de suelos granulares, además, por las características hidrofobas del aceite, tiende a reducir la absorción de agua en dicho material (Reyes, 2001).

### **2.5.3 Polímeros**

Un polímero (del griego poly, muchos; meros, parte, segmento) es una sustancia cuyas moléculas son, por lo menos aproximadamente, múltiplos de unidades de peso molecular bajo. La unidad de bajo peso molecular es el monómero. Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas. Algunas parecen agujas, otras tienen ramificaciones.

Según Peláez, hay polímeros naturales como ciertas proteínas globulares y polícarbohidratos, cuyas moléculas individuales tienen todas, el mismo peso molecular y la misma estructura molecular; pero la gran mayoría de los polímeros sintéticos y naturales importantes son mezclas de componentes poliméricos homólogos. La pequeña variabilidad en la composición química y en la estructura molecular es el resultado de la presencia de grupos finales, ramas ocasionales, variaciones en la orientación de unidades monómeras y la irregularidad en el orden en el que se suceden los diferentes tipos de esas unidades en los copolímeros (Peláez, 2007).

La incorporación de polímero en suelos se hace de dos maneras: o se añaden los monómeros junto con un sistema catalizador que produce la polimerización posterior o el polímero se añade ya formado, sólido, en solución o en emulsión.

Su función es estabilizar la mezcla ante la acción del agua. Esa es en general la reacción de todas las resinas y polímeros, incrementando incluso la resistencia. Los contenidos de resina y polímeros fluctúan entre 1 y 2%.

Según Rico, los polímeros pueden ser catiónicos, aniónicos y no aniónicos. Los catiónicos poseen cargas positivas que crean nexos eléctricos muy fuertes con las negativas de las

partículas de arcilla o de arenas muy finas silíceas; por este mecanismo pueden aumentar la resistencia del suelo.

Los polímeros aniónicos tienen la misma carga eléctrica que los minerales de arcilla, por lo que su incorporación más bien tiende a disminuir la resistencia de los suelos tratados; correspondientemente favorecen la compactación. La efectividad de estos productos es variable, según el tipo de suelo.

Los polímeros no iónicos generan puentes de hidrogeno importantes entre las partículas de arcilla, asociando los grupos OH con el oxígeno de dichos polimeros (Rico, 2005).

### Látex natural

El látex de *Hevea brasiliensis* se conoce también como caucho natural y está clasificado como poli-isopreno elastómero. Las características físicas de este material son resultado de una configuración cis-trans-unión 1, 2 y 3, 4, (Figura 4) (Velasco, 2007).

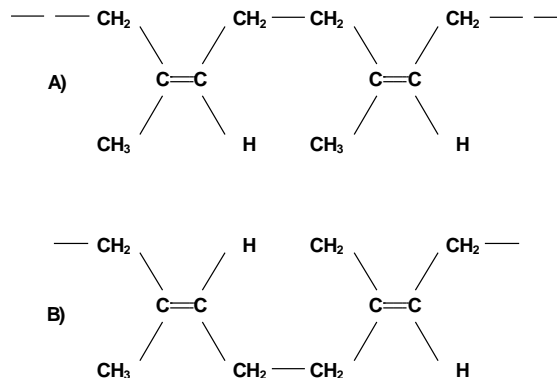


Figura 4 A) enlaces de caucho o hule natural; con más de 90% de isopreno ,4 cis. B) enlaces con otra posibilidad de adición 1,4 trans (con más del 80%) Velasco, 2007

El caucho natural es uno de los polímeros naturales biológicamente inactivos más importantes. Además de utilizar el látex del árbol de hule para la impermeabilización de tejidos, también lo utilizaban para elaborar pelotas de este material que eran utilizadas para practicar un juego llamado tlachtli (Seymour, 1996).

El látex que es una suspensión acuosa de cis 1,4.poliisopreno del 30 al 35% se encuentra en los capilares microscópicos entre la corteza y capa de cambium de la planta de hevea, dicho material se obtiene de la planta al raspar la corteza de la misma.

La forma en que los latexes interactúan con algunos materiales ocurre solamente a nivel físico entre el sistema y, muchas veces una película polimérica que se forma fuera del compósito. Lo que lleva a la consecuente mejoría de las propiedades de morteros y concretos (Sakai, 1995), otros investigadores sostienen que ocurre una interacción física y química entre los polímeros y el cemento Portland (Su, 1991). La interacción química puede resultar en la formación de complejas estructuras y cambios en la morfología, composición y calidad de las fases del cemento hidratado, especialmente del hidróxido de calcio (Janotka, 1996).

## **2.6 Resistencia a la compresión de los materiales**

Uno de los ensayos a los que se sometió a los adobes que se elaboraron en esta investigación, es la resistencia a compresión, de forma que se describe a continuación ciertos fenómenos que se presentan en los mecanismos de la prueba, para poder planear la parte experimental e interpretar adecuadamente los resultados obtenidos.

Cuando una fuerza actúa sobre un cuerpo, se presentan fuerzas resistentes en las fibras del cuerpo que se denominan fuerzas internas. Fuerza interna es la resistencia interior de un cuerpo a una fuerza externa. Así que cuando se usa el término esfuerzo, se refiere a la magnitud de la fuerza por unidad de área. De tal forma, que la resistencia de un material es la propiedad que tiene para resistir la acción de las fuerzas.

El esfuerzo de compresión es una presión que tiende a causar una reducción de volumen. Cuando se somete un material a una fuerza de flexión, cizalladora o torsión actúan simultáneamente fuerzas de torsión y compresión.

Los materiales quebradizos, como el concreto, -y para este caso el adobe- suelen probarse por compresión ya que éste tipo de esfuerzo es al cual generalmente se encuentran sometidos. En ellos no se produce formación de cuello, pero pueden surgir problemas debido a la fricción entre los extremos de la muestra y las masas de carga. La

fricción produce deformación no uniforme y la muestra suele adoptar forma de barril, especialmente cuando se someten a prueba materiales dúctiles (Juárez, 1997).

En física y disciplinas afines, la presión también llamada presión absoluta se utiliza en aquellos casos que es necesario evitar interpretaciones ambiguas, se define como la fuerza por unidad de superficie (Ec. 1):

$$P = \frac{F}{A}$$

Ecuación 1

Donde:

P es la presión (N/m<sup>2</sup>)

F es la fuerza normal (N)

A es el área sobre la que se aplica la fuerza (m<sup>2</sup>)

En el Sistema Internacional de Unidades se mide en newton por metro cuadrado, unidad derivada que se denomina pascal (Pa).

## 2.7 Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión en los materiales está regida por una serie de comportamientos físicos y mecánicos de éstos, así como de su morfología, por lo que para comprender este fenómeno se describe a continuación su naturaleza.

En ingeniería se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El término "alargado" se aplica cuando una dimensión es preponderante frente a las otras. Un caso típico son las vigas, las que están diseñadas para trabajar, principalmente, por flexión (Figura 5). Igualmente, el concepto de flexión se extiende a elementos estructurales superficiales como placas o láminas.

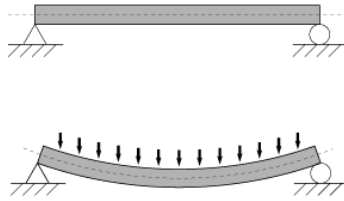


Figura 5 Deformación por flexión sobre una viga (Popov, 1982)

Se dice que una viga trabaja a flexión simple y cuando en cualquier sección de esa viga existe un momento flector y un esfuerzo cortante; cuando en cualquier sección de esa viga solo existe momento flector se dice que la viga trabaja a flexión pura; y si en cualquier sección de la misma viga existe momento flector, esfuerzo cortante y esfuerzo normal, la viga trabaja a flexión compuesta.

En flexión simple, en una sección cualquiera existirá momento flector y esfuerzo cortante. El momento flector origina tensiones que se calculan, por la formula de Navier (Ecuación 2). Como en sección simple el momento flector no permanece constante a lo largo de la viga, cada sección tendrá una curvatura diferente.

$$\sigma(x, y) = -\frac{M_f(x)y}{I_f}$$

Ecuación 2

Donde:

$\sigma$  es la tensión según el eje

$M_f$  es el momento aplicado

$y$  es la distancia desde el baricentro (centro de gravedad de la sección) a la fibra considerada

$I_f$  es el segundo momento de inercia de la sección con respecto al eje de flexión.

Usualmente el módulo resistente, se calcula como:

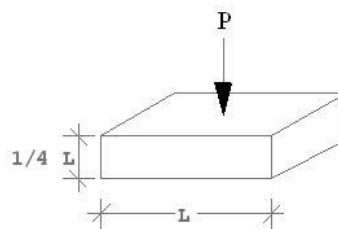
$$W_c = \frac{I_f}{Y_c}$$

Ecuación 3

Donde

$Y_c$  es la distancia máxima del baricentro al cordón superior o al cordón inferior, según se quiera calcular compresiones o tracciones máximas.

Puesto que en el presente proyecto se trabajará con adobes estabilizados y las pruebas de flexión se aplican sobre vigas o losas, las piezas que se someterán a esta prueba deberán cumplir con la siguiente condición de proporcionalidad entre largo, alto y ancho, es decir, que el espesor de los especímenes sea al menos de un cuarto de su longitud, para poder realizar las pruebas de flexión a los mismos (Figura 6).



**Figura 6 Condición dimensional del material para someterlo al ensayo de flexión**

## 2.8 Absorción de agua en materiales porosos

La meteorización por el ataque del agua capilar procedente de la lluvia, ha comprometido en muchos casos la construcción con tierra. El agua al entrar de nuevo en contacto con la estructura aglomerante de las arcillas, reduce las fuerzas de tensión superficial del agua ínter laminar, los débiles enlaces de Wan der Waals, y los enlaces electro covalentes en segunda instancia e incluso en determinadas condiciones de alcalinidad o acides se rompen los fuertes enlaces covalentes. Por ello se hace indispensable revocar el material o bien estabilizar su estructura para generar uniones de carácter covalente e irreversible (Grupta, 2000).

La teoría del movimiento del agua en el suelo está basada en una generalización de la Ley de Darcy, deducida para la circulación en un medio poroso, que expresa que " la velocidad de circulación de agua en un medio poroso saturado, es directamente proporcional a la diferencia de presión hidráulica entre dos puntos y a la conductividad del suelo al agua, e inversamente a la distancia entre los dos puntos".



$$Q = k \frac{h_3 - h_4}{L} A = k \cdot i \cdot A$$

Ecuación 4

Donde:

Q = Gasto, descarga o caudal (m<sup>3</sup>/s)

L = Longitud de la muestra (m)

k = Constante, conocida como coeficiente de permeabilidad de Darcy, variable en función del material de la muestra (m/s)

A = área de la sección transversal de la muestra (m<sup>2</sup>)

h<sub>3</sub> = altura, sobre el plano de referencia que alcanza el agua en un tubo colocado a la entrada de la capa filtrante

h<sub>4</sub> = altura sobre el plano de referencia que alcanza el agua en un tubo colocado a la salida de la capa filtrante

$$i = \frac{h_3 - h_4}{L} \text{ el gradiente hidráulico}$$

Este principio es aplicable tanto a flujos saturados como insaturados, sí bien en suelos no saturados, la conductividad depende mucho del potencial mátrico existente y del tipo de suelo.

El movimiento del agua a través del interior del perfil del suelo, es dominado por las características de dicho sistema poroso. El flujo de agua es gobernado por un factor hidráulico, un factor gravitacional y un factor de capilaridad del suelo. En un suelo no saturado el movimiento del agua está dado por la conductividad hidráulica y la sortividad.

Como el agua solo se trasmite a través de los poros, el flujo que circula será proporcional al diámetro de los poros, disminuyendo conforme los diámetros se reducen, pero esta disminución de velocidad, aparte del efecto geométrico, es aun en mayor grado para los pequeños poros, debido a que la movilidad de las moléculas de agua unidas a las partículas sólidas, es muy baja por los efectos de adsorción (sortividad). Conforme el contenido de humedad baja, disminuye el potencial mátrico y la conductividad tiende a disminuir con mayor rapidez.

En condiciones de saturación (o casi saturación), los suelos de textura gruesa presentan una mayor conductividad, como consecuencia del mayor tamaño de sus poros, que permiten una más fácil transmisión del agua. Sin embargo, a potenciales mátricos bajos, las mayores conductividades se logran en suelos de texturas finas, ya que poseen una sección efectiva de transmisión en esas condiciones, superior a los suelos de textura gruesa.

La cantidad total de agua que entra en un suelo, es mayor cuando el suelo se encuentra inicialmente seco que cuando está húmedo; no obstante, la velocidad de avance del agua (conductividad) a lo largo del perfil del suelo, es inferior en el caso de suelo seco.

El cambio porcentual de peso o agua absorbida se calcula como:

$$M \% = \frac{M_t - M_0}{M_0} 100$$

Ecuación 5

Donde:

$M_0$  Masa de la probeta seca

$M_t$  Masa de la probeta a cada tiempo

Por lo tanto y a partir de la comprensión de los fenómenos: esfuerzos-deformaciones, momentos flexionantes y difusión, así como de los materiales propuestos como aditivos para la presente investigación es posible plantear un diseño experimental que permita obtener resultados que pueden ser analizados e interpretados siguiendo un modelo estadístico que nos permita conocer el efecto de dichos aditivos en el adobe compactado, y adobe compactado y estabilizado con cemento.

## **CAPÍTULO III.- MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1 Introducción**

En el presente capítulo se describe: el diseño del experimento, las características físico-químicas de los materiales que se utilizaron en esta investigación, así como la metodología que se siguió. Las pruebas químicas y mecánicas de los materiales usados como aditivos se realizaron en las instalaciones del CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca y las de composición química del suelo que se utilizó fueron elaboradas en el laboratorio del Servicio Geológico Mexicano sede Oaxaca.

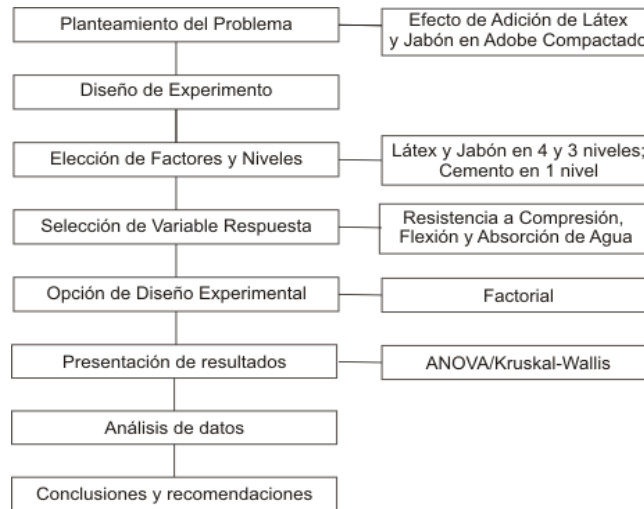
### **3.2 Descripción de las fases experimentales**

#### **3.2.1 Introducción**

Para el desarrollo de esta investigación se planteó la adición de los materiales que se presentaron previamente en la Tabla 2 en los niveles propuestos, con la finalidad de conocer el efecto de estas adiciones en la resistencia a la compresión, flexión y absorción de agua por inmersión total del adobe compactado y compactado-estabilizado (fase I y fase II). Para tal efecto se elaboraron especímenes de 8 x 15 x 28 cm, a los que se realizaron las pruebas propuestas a los siete días de su elaboración.

#### **3.2.2 Diseño del experimento**

Para que un experimento se realice en la forma más eficiente, es necesario emplear métodos científicos en su planeación. El diseño estadístico de experimentos es el proceso de planear un experimento para obtener datos apropiados, que pueden ser analizados mediante métodos estadísticos, con el objeto de producir conclusiones válidas y objetivas Figura 7 (Montgomery, 2005). Además los métodos estadísticos ofrecen un acercamiento objetivo para analizar resultados cuando los datos están sometidos a error experimental.



**Figura 7** Diseño experimental para el estudio del efecto de la adición de látex y jabón en la resistencia a compresión, flexión y absorción de agua en el adobe compactado

En la Tabla 2 se muestra el diseño estadístico de experimento de las dos fases propuestas, y en las que se hizo variar la cantidad de los materiales adicionados, para conocer la interacción entre ellos con el suelo, y posteriormente en la fase II evaluar el efecto de la adición de estos materiales en el sistema suelo-10% de cemento.

**Tabla 2** Diseño de experimento para las fases experimentales de la investigación

<b>Fase I Adición de Látex y Jabón al Sistema Suelo - Agua</b>				
<b>Factores</b>	<b>Nº Niveles</b>	<b>Descripción Niveles</b>	<b>Réplicas</b>	<b>Variable Respuesta</b>
Látex	4	0,1, 2, 3%	5	Compresión, Flexión, Absorción de Agua
Jabón	3	0, 0.5, 1.0%	5	

<b>Fase II Adición de Látex y Jabón al Sistema Suelo - Agua - 10% Cemento</b>				
<b>Factores</b>	<b>Nº Niveles</b>	<b>Descripción Niveles</b>	<b>Réplicas</b>	<b>Variable Respuesta</b>
Látex	4	0, 1, 2, 3%	5	Compresión, Flexión, Absorción de Agua
Jabón	3	0, 0.5, 1.0%	5	

En la Tabla 3 se muestra la combinación de las variables propuestas en los niveles establecidos para la fase I de experimentación, así como el número de especímenes elaborados para cada mezcla.

Tabla 3 Descripción de las variables y niveles de las mezclas de la fase I

### Fase I de experimentación

0			1		2		3	
			Látex					
			Jabón					
0	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1
+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+

En lo que respecta a la adición de látex natural se considero adicionar este material en un rango de 1 a 5% de sólidos totales, ya que según un estudio previo, (Stancato, 2005) se establece como porcentaje óptimo el 5% de adición de látex (*Estireno Butadieno*) en relación al cemento en morteros. Para este caso se combinó con el agua de mezclado y a partir de la adición de agua para compactación se adicionó látex en un rango de 1 a 5% para establecer los niveles de adición que permitieran mezclar dicha solución con el suelo.

Con base en las pruebas exploratorias que se realizaron se establecieron los porcentajes de 1, 2 y 3% de látex (sólidos totales) en relación a la masa seca del suelo a utilizar por espécimen, considerando que el látex contiene 50% de sólidos totales y el resto de sus componentes son agua y otros compuestos, como se verá en el apartado de resultados.

Por otra parte la humedad contenida en el jabón, se incluyó en el experimento, debido a que dicho material fue adicionado al agua de mezclado, considerando el jabón con su humedad propia.

Una vez determinado el contenido de humedad de los materiales se procedió a elaborar pruebas exploratorias para determinar la humedad de compactación en la maquina compactadora que se utilizó para elaborar adobes con el suelo utilizado en la presente investigación, en dichas pruebas se estableció como humedad de compactación – a base de prueba y error, controlando siempre las variables- el 3.5% de agua respecto a la masa seca del adobe y un contenido de suelo de 6200gr por adobe sin aditivo (considerando

que el suelo contenía 1.5% de humedad, el porcentaje de humedad de compactación del adobe se estableció como del 5%) .

Es necesario aclarar que existe una diferencia significativa entre la humedad óptima de compactación del suelo y la humedad de compactación para la elaboración del adobe compactado, debido a que la relación humedad óptima-densidad máxima, puede variar para un mismo tipo de suelo y contenido de cemento si se cambia la energía de compactación (IMCYC, 2008).

Con base en lo descrito en el párrafo anterior, se establecieron las cantidades de material a utilizar por mezcla, con el fin de lograr elaborar especímenes con la misma masa y los porcentajes determinados para esta fase, las cantidades de material a utilizar por mezcla se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4 Diseño de mezclas de la fase I**

<b>Mezcla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Suelo (gr)</b>	<b>Agua (ml)</b>	<b>Jabón (gr)</b>	<b>Látex (ml)</b>
M1	Control	6200	217	-	-
M2	0.5% Jabón	6180	216	31	-
M3	1.0% Jabón	6150	215	62	-
M4	Jabón 0.5% - Látex 1.0%	6033	211	30	121
M5	Jabón 0.5% - Látex 2.0%	5921	207	30	237
M6	Jabón 0.5% - Látex 3.0%	5814	203	29	349
M7	Jabón 1.0% - Látex 1.0%	6033	211	60	121
M8	Jabón 1.0% - Látex 2.0%	5921	207	59	237
M9	Jabón 1.0% - Látex 3.0%	5814	203	58	349

## **FASE II**

En esta fase de investigación, se utilizaron los datos de los porcentajes de mezclas obtenidos en la fase I, así como los materiales previamente caracterizados y se incluyó la adición del 10% de cemento en todos los especímenes elaborados para esta etapa. (Tabla 5)

Tabla 5 Descripción de variables y niveles de las mezclas de la fase II

**Fase II de experimentación**

0			1		Látex	2		3	
0	0.5	1	0.5	1	Jabón	0.5	1	0.5	1
+	+	+	+	+		+	+	+	+
+	+	+	+	+		+	+	+	+
+	+	+	+	+		+	+	+	+
+	+	+	+	+		+	+	+	+
+	+	+	+	+		+	+	+	+

Para este caso se elaboraron adobes compactados y estabilizados con 10% de cemento Portland compuesto, y con una humedad de compactación del 10% -que es casi el doble de la humedad de compactación utilizada en la fase I, debido a que se requiere de mayor humedad para hidratar el cemento incluido en las mezclas de esta fase-, quedando las mezclas de materiales como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6 Diseño de mezclas de la fase II

Mezcla	Descripción	Suelo (gr)	Cemento (gr)	Agua (ml)	Jabón (gr)	Látex (ml)
M10	Cem. 10%	6000	600	600	-	-
M11	Cem. 10% - Jabón 0.5%	5974	597.4	597	30	-
M12	Cem. 10%- Jabón 1.0%	5949	594.9	595	59	-
M13	Cem. 10% - Jabón 0.5% - Látex 1.0%	5923	592.3	592	30	118
M14	Cem. 10% - Jabón 0.5% - Látex 2.0%	5824	582.4	582	29	233
M15	Cem. 10% - Jabón 0.5% - Látex 3.0%	5682	568.2	568	28	341
M16	Cem. 10% - Jabón 1.0% - Látex 1.0%	5923	592.3	592	59	118
M17	Cem. 10% - Jabón 1.0% - Látex 2.0%	5800	580	580	58	232
M18	Cem. 10% - Jabón 1.0% - Látex 3.0%	5658	565.8	566	57	339

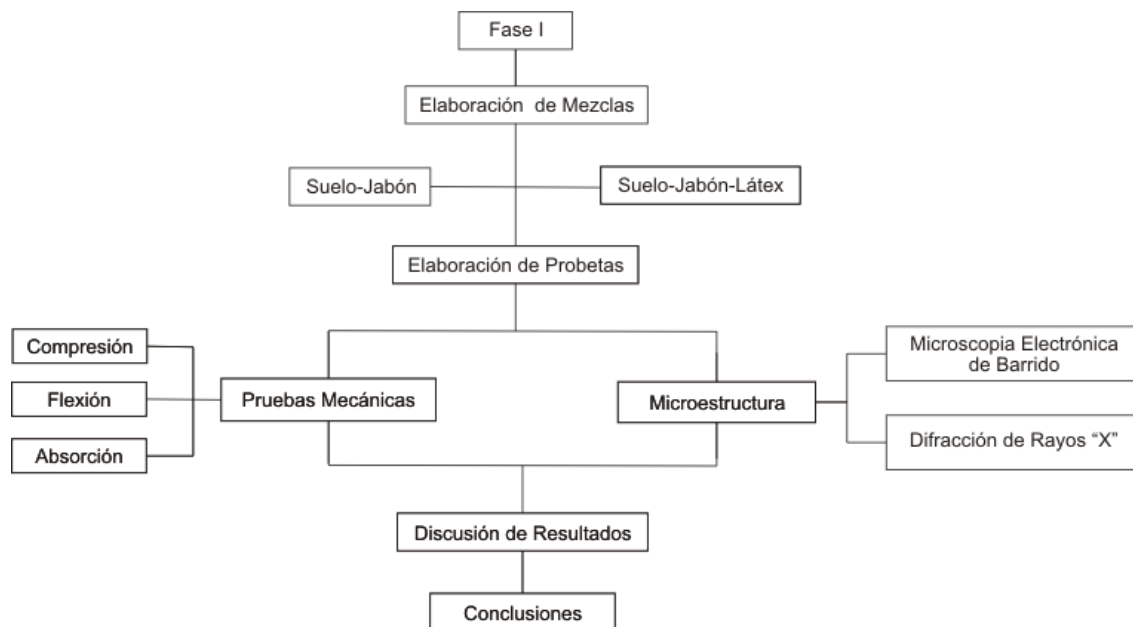
### 3.3 Metodología

Con el fin desarrollar la presente investigación y a partir de haber definido el experimento, se planteó la metodología de trabajo como se indica en la Figura 8.



**Figura 8 Diagrama de etapa experimental de la investigación**

Posterior a la clasificación del suelo que se utilizó como materia prima del adobe evaluado en este trabajo de tesis, se dividió la fase experimental en dos fases, que se muestran en la Figura 9, donde se puede observar el desarrollo de la fase I del experimento y en la que se establecieron los porcentajes de adición de los materiales complementarios propuestos. Por otra parte la Figura 10 presenta el procedimiento de la fase II del experimento, en dicha fase se aborda el estudio del efecto de las adiciones de los materiales suplementarios en mezclas de suelo cemento.



**Figura 9 Fase I en la que se explora la interacción del suelo con los aditivos propuestos**



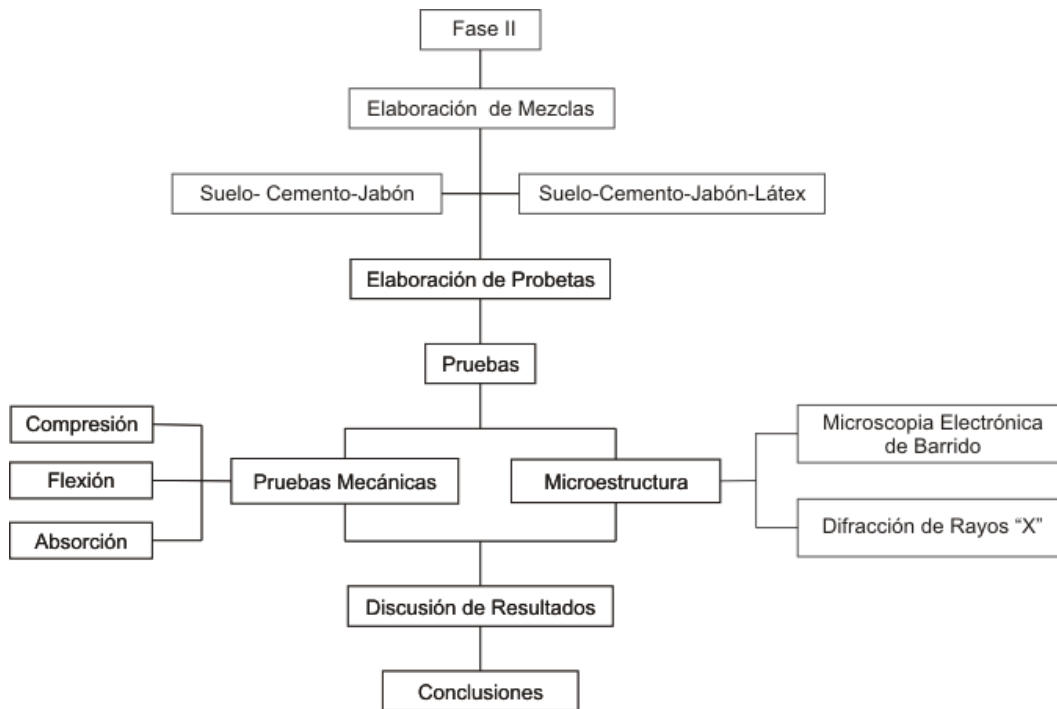


Figura 10 Fase II en la que se aborda la interacción de los aditivos propuestos con el sistema suelo cemento

## 3.4 Obtención y caracterización de materiales

### 3.4.1 Cemento

Los materiales que se emplearon para la ejecución de la fases experimentales I y II, fueron básicamente los mismos, salvo que en la fase II se utilizó además cemento portland compuesto Holcim Apasco clase resistente 30 de resistencia rápida (CPC 30R) y de fabricación mexicana. Bajo el análisis de composición química (Tabla 7), se encontró un contenido de óxido de calcio de 64.75 % y óxido de silicio de 16.46%. Para determinar la clasificación del cemento utilizado conforme la norma ASTM C15007 se consultó en la literatura (Ramachandran, 2000) y se comparó la cantidad de óxidos presentes en la composición química del cemento en mención. La literatura marca un rango para establecer dichas clasificaciones, cuando el óxido de silicio se encuentra entre 16.4 y 22.0 % y el óxido de calcio entre 60.6 y 66.3 %, por lo tanto, se trata de un cemento puzolánico en donde el contenido de puzolanas es menor a 15 % de la masa del cemento final.

**Tabla 7 Densidad y composición química del cemento utilizado en esta investigación**

Cemento Portland Compuesto Holcim Apasco (30R)														
Material	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PxC (950°C)	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
C P C	3.02	5.16	64.75	2	1.43	1.28	0.62	1.66	0.04	1.88	0.08	5.67	16.46	0.14

Fuente: Martínez, 2007

### 3.4.2 Suelo

Se recolectaron muestras de quince bancos de suelo en la región costa del estado de Oaxaca, los bancos de donde se tomaron las muestras pertenecen a los municipios de San Pedro Mixtepec y Sta. María Colotepec (Figura 11).



**Figura 11 Recolección de la arcilla en el banco de material en San Pedro Mixtepec, Oaxaca**

De los quince bancos se eligieron tres, todo esto basado en las características físicas, disponibilidad y factibilidad de uso de éstos, y se realizó el análisis de la composición química del suelo en el Servicio Geológico Mexicano, utilizando los métodos de digestión total y volumetría para conocer la composición química del suelo elegido con el objetivo de facilitar la elección de los materiales suplementarios capaces de integrarse al suelo utilizado y mejorar sus propiedades físicas.

Con base en lo anterior se determinó utilizar solo uno de los bancos de material, el cual se encuentra ubicado en el municipio de San Pedro Mixtepec, Oaxaca. Una vez que se determinó en banco de suelo a utilizar, se comenzó con la recolección de las muestras para iniciar el proceso de caracterización del suelo obtenido en dicho banco, mediante las

siguientes pruebas de acuerdo a Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) 2003. Normas de Construcción. Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales (Anexo 1).

- a) Secado Parcial
- b) Disgregación
- c) Cuarteo de muestras
- d) Peso volumétrico seco suelto
- e) Granulometría
- f) Humedad
- g) Densidad
- h) Límites de consistencia
  - 1) Límite líquido
  - 2) Límite plástico
  - 3) Índice plástico
  - 4) Contracción lineal

En la etapa de caracterización del suelo se realizaron los ensayos de límites de consistencia de Atterberg: límite líquido, límite plástico, índice plástico (Figura 12 y 13), contracción lineal, humedad y densidad, para la clasificación del material de acuerdo al Sistema Único para Clasificación de Suelos (SUCS), los cuales por la naturaleza del suelo utilizado, no presentaron cambios que pudieran ser evaluados para las pruebas de límites de consistencia.



**Figura 12 Cuarteo de muestra para elaboración de pruebas de granulometría**



**Figura 13 Preparación de la muestra para prueba de límite líquido**

En la Tabla 8 se muestra el contenido de los tres principales óxidos que componen el suelo usado para esta investigación, los cuales son: trióxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de hierro ( $\text{FeO}$ ) y dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Los resultados muestran que la suma de estos tres óxidos representa el 80.41% del total de la muestra analizada, por las características de la composición química de este material, es posible anticipar y establecer la compatibilidad con los materiales suplementarios que se adicionaron, así como la reacción de estos entre sí. Por lo que con base en los resultados de composición del suelo se obtuvo un indicador que marca la pauta para realizar más estudios para determinar sobre su reactividad puzolanica.

**Tabla 8 Principales óxidos de la arcilla obtenida del banco de San Pedro Mixtepec, Oaxaca**

<b>Suelo</b>	
Nomenclatura: Suelo	
Elemento/Compuesto	Unidad
	%
<b><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>	<b>13.70</b>
Cao	1.55
Fe	4.57
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5.00
<b>FeO</b>	<b>1.38</b>
$\text{K}_2\text{O}$	2.59
MgO	0.59
MnO	0.11
$\text{Na}_2\text{O}$	2.05
$\text{P}_2\text{O}_5$	N.D.
PxC a 950°C	5.28
<b><math>\text{SiO}_2</math></b>	<b>65.33</b>
$\text{TiO}_2$	1.47

Fuente: SGM, 2008

Respecto a las características de tamaño de grano del suelo, los ensayos de granulometría en conjunto con los ensayos de límites de consistencia y densidad del material, permitieron clasificar el suelo según el SUCS (Sistema Unificado para la Clasificación de Suelos) (SCT, 2003) como: Arena mal graduada (SW).

La Figura 14 muestra la curva granulométrica del suelo ensayado y en la que se aprecia que solo el 10% del material presenta un tamaño de grano de 0.2 mm, mientras que el 80% del material está constituido de granos de 0.9 mm y solo el 10% son granos en un

rango de 1 a 9 mm, las cual es una de las principales características de los suelos arenosos.

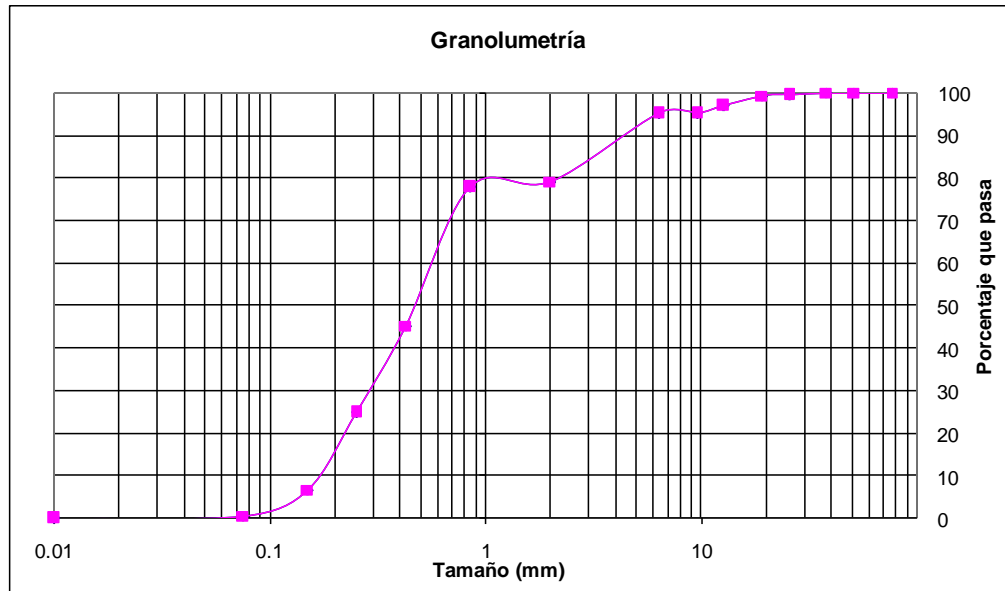


Figura 14 Clasificación granulométrica del suelo según el SUCS

Por otra parte, en lo que respecta a la prueba de contracción lineal se observó que el material no presentó contracción, siendo esta una característica de los suelos arenosos, mientras que el resto de las pruebas que complementan el procedimiento para determinar el tipo de suelos según el SUCS presentaron resultados que indican cualidades de los suelos arenosos (Anexo 2).

La principal característica de este tipo de suelos es que posee tamaños de grano uniformes y menos del 5% de partículas finas que podría producir cambios apreciables en las características de resistencia de la fracción gruesa y no inferen con su capacidad de drenaje (Juárez, 1997). Están compuestos principalmente por óxido de Silicio (cuarzos, feldespatos, micas, etc.) y tiene una superficie específica promedio de  $15\text{cm}^2/\text{g}$ , aproximadamente; no se expande ni se contrae con el agua, y su capacidad de intercambio catiónico es prácticamente nula.

La principal función de la arena es estructurar o contribuir en la formación de la matriz del suelo (Farías, 1994).

Este tipo de suelo es recomendable estabilizarlo con porcentajes de 6 a 12% de cemento respecto a la masa seca del suelo (ARMY, 1994).

### 3.4.3 Jabón

Se adoptó un sistema de impermeabilización a base de jabón en solución aplicadas en capas (SAHOP, 2002), utilizado para la restauración de edificios históricos, dicha solución es elaboradas con jabón amarillo, para este caso se utilizó el jabón “Tepeyac” de la marca “Tres Coronas”. (Figura 22)



**Figura 15** Jabón utilizado como aditivo en el adobe compactado elaborado en la presente investigación

El procedimiento de elaboración de la solución de jabón se describe a continuación:

En un recipiente metálico se mezcló el jabón y agua en una proporción de 1:10 (un kilogramo de jabón en diez litros de agua), y se colocó al fuego para diluir el jabón en el agua hasta lograr una mezcla homogénea (Figura 16), que es aplicada en la superficie que se desea “impermeabilizar” para lograr un efecto de sellado de poros de la misma. Esta solución es aplicada una vez por día durante tres días.

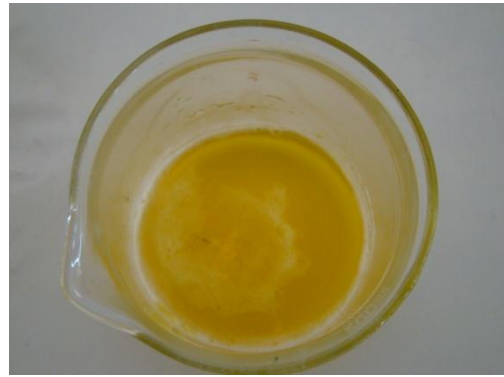


Figura 16 Solución de jabón en proporciones de experimentación previa

Para conocer las características de acides en las soluciones de jabón que se utilizaron para la presente investigación, se realizó la prueba para determinación de pH en soluciones acuosas, utilizando la Norma ASTM E-70-90, mientras que la información de la composición química fue proporcionada por el fabricante del material.

### Materiales y equipos

Para la realización de las pruebas de pH y densidad en el jabón se utilizaron los materiales y equipos que se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9 Materiales y equipos utilizados para la determinación de pH y densidad en las soluciones de jabón usadas en la presente investigación

<i>Ensayo:</i>	<b>pH</b>
<b>Materiales y Equipos</b>	Potenciometro Orion mod. 420A
	Buffer's
	Vasos de precipitado de 100 mL
	Agua destilada

### Procedimiento de la prueba para la determinación del pH

La prueba de pH se realizo según lo establece la norma, previamente al inicio de dicha prueba se calibró el potenciómetro con dos soluciones buffer, uno con valor de 3 y otro de 7 pH. Posteriormente se limpió el electrodo del potenciómetro con agua destilada y se sumergió en la solución de jabón y se esperó entre 30 y 60 segundos, que es el tiempo en el que potenciómetro determina el valor de pH de la solución en prueba.

Una vez determinado el valor de la primera solución, se retiró el electrodo del potenciómetro y se sumergió en agua destilada para lavarlo. Posteriormente se procedió a realizar la prueba en el resto de las soluciones en estudio, y se realizaron repitiendo en tres ocasiones las pruebas a cada solución para corroborar el resultado obtenido.

Los resultados de las pruebas realizadas al jabón y la solución utilizada en esta investigación se presentan en la Tabla 10, en la que se observan los compuestos principales del jabón "Tepeyac", proporcionada por el fabricante, mientras que en la Tabla 11 se muestran los valores de pH y densidad de las dos soluciones de jabón con 0.5 y 1.0% de adición de este material.

**Tabla 10 Principales compuestos del jabón Tepeyac "La Corona"**  
Fuente: Fabrica de jabón La Corona S.A de C.V.

<b>Jabón "TEPEYAC LA CORONA"</b>	
<b>Componente</b>	<b>Especificación</b>
<sup>1</sup> Acidos Grasos Totales	66.00%
Equivalente a Jabón Anhidro	71.28%
Humedad	26.50%
Cloruro de Sodio	0.60%
Sosa Caustica Libre (NaOH)	0.04%
Perfume, Color, Otros Aditivos	1.58%

**Tabla 11 pH y densidad de soluciones con 0.5 y 1.0% de Jabón**

<b>Material</b>	<b>% Adición</b>	<b>pH</b>	<b>Densidad gr/ml<sup>3</sup></b>
Jabón	0.5%	10.0	1.00
Jabón	1.0%	10.0	1.06

Una vez que se estableció que el jabón utilizado en la investigación está compuesto principalmente por ácidos grasos, los cuales tienen como una de principales características, poseer propiedades hidrófobas, por lo que, se consideró que podría

<sup>1</sup> Es la cantidad de materia prima requerida para la elaboración de jabón, al combinarse con sosa cáustica resulta el jabón anhidro que es el 71.28% de la materia final.



reducir la absorción de agua del adobe compactado, al recubrir cada una de las partículas del suelo, confiriéndole dichas propiedades desde el interior mismo de las mezclas que incluyeran este tipo de material.

#### **3.4.4 Látex (*Hevea Brasiliensis* Muel. Ar.)**

Con la intención de conocer el efecto de la adición de un polímero natural en el adobe compactado elaborado con el tipo de suelo utilizado, se optó por incluir en su elaboración, látex (*Hevea Brasiliensis* Muell. Arg. Clon I) obtenido del árbol de caucho. Dicho látex fue proporcionado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) localizado en El Palmar, Tezonapa, Veracruz.

La planta de látex clon I, presenta un rendimiento mayor a la planta común de látex, por una parte la primera planta tiene un rendimiento de 50% de contenido de sólidos, mientras que la segunda rinde entre 30 y 36% de contenido de sólidos, dependiendo de la temporada en que se recolectan las muestras (INIFAP, 2008).

Una de las propiedades del látex es que al ser extraído de la planta tiene un periodo de coagulación de seis horas, en el cual pasa de estado líquido a sólido (plastificación) y dicho cambio de fase es irreversible, por lo que para conservarlo en estado líquido durante un periodo aproximado de tres años en almacenamiento se le adiciona amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) al 2% del volumen total a conservar.

Con el fin de conocer la composición físico-química del látex, se realizaron ensayos para determinar los siguientes parámetros: contenido de sólidos, potencial de hidrogeno (pH) y densidad con base en las normas: ASTM E-70-90 y NMX-AA-034-SCFI-2001; todas estas pruebas se realizaron en el laboratorio de secado de alimentos del CIIDIR Oaxaca. Los resultados obtenidos en estas pruebas fueron comparados con los aportados por el proveedor del material.

Posteriormente, con la finalidad de establecer los niveles de adición de látex para el adobe compactado, se desarrolló un experimento previo para conocer la interacción de este material con el resto de los que se utilizaron para las fases experimentales definitivas. En dicho experimento previo se observó que al adicionar el látex al suelo se

plastificó al entrar en contacto con éste, imposibilitado el mezclado uniforme, por lo que se decidió combinarlo con jabón -con base en experimentación previa realizada durante la presente investigación- para conocer la interacción con este y a su vez con el suelo, dicha combinación permitió el mezclado homogéneo con el suelo, logrando un efecto retardante en la plastificación del látex

Por lo que, con la finalidad de conocer las características físicas y mecánicas - comportamiento de flujo de la materia- de la mezcla de jabón y látex se realizaron pruebas de caracterización reológica a las mezclas de estos dos materiales en los niveles de estudio en el laboratorio de reología del CIIDIR Oaxaca y con base en la norma ASTM D 5099-399.

### **Materiales y equipos**

Para la elaboración de las pruebas elaboradas al látex y las pruebas de reología a la solución de látex jabón, se utilizó el equipo que se muestra en la Tabla 12

**Tabla 12 Materiales y equipos utilizados para los ensayos elaborados al látex y de reología en las soluciones de látex jabón**

<i>Ensayo:</i>	<b>Sólidos Totales</b>	<b>pH</b>	<b>Densidad</b>	<b>Reometria</b>
<b>Materiales y Equipos</b>	Cápsulas de evaporación	Potenciómetro Orion mod. 420A	Termómetro	Reometro Anton Paar MCR mod. 301
	Horno de secado	Buffer's	Vaso de precipitado	Geometria Cono/Plato
	Balanza analítica con precisión de 0,1 mg	Vasos de precipitado	Balanza analítica con precisión de 0,1 mg	Vasos de precipitado
	Pinzas para crisol			Parilla eléctrica
	Desecador	Agua destilada		Agitador magnético

### **Procedimientos de las pruebas**

## Determinación de sólidos totales

Se prepararon las capsulas de evaporación para incorporarles el material de la prueba (látex), dichas cápsulas fueron pesadas -sin y con el látex- en la balanza analítica previamente calibrada.

Posteriormente fueron llevadas al horno de secado, se retiraron a las 24 horas y se dejaron enfriar a temperatura ambiente dentro del desecador para posteriormente pesarlas y se regresaron al horno de secado, repitiendo el procedimiento hasta alcanzar peso constante.

Esta prueba fue realizada por triplicado (Figura 17 y 18), habiendo una variación de las pruebas del 1% del promedio de los resultados.



Figura 17 Muestra de látex previo a la prueba de contenido de sólidos totales

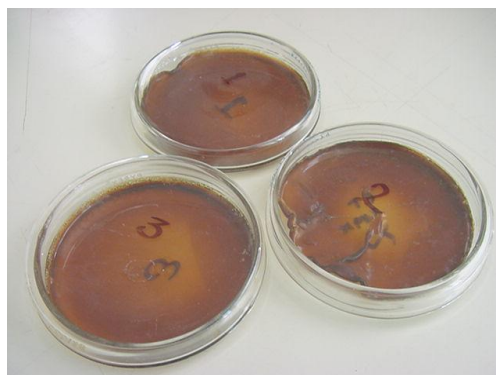


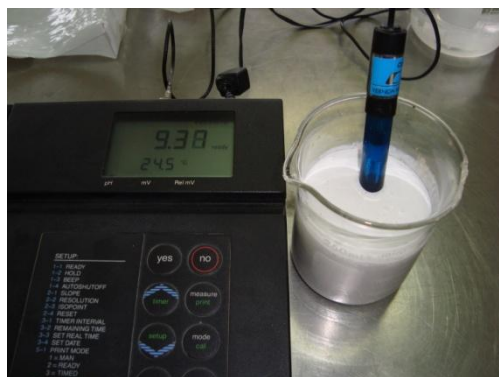
Figura 18 Muestras de látex después de la prueba de contenido de sólidos totales

## Determinación del pH

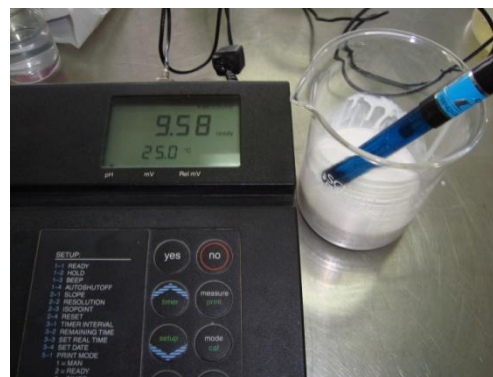
La prueba de pH se realizó según lo establece la norma, previamente al inicio de dicha prueba se calibró el potenciómetro con dos "buffers", uno con valor de 3 y otro de 7 pH. Posteriormente se limpió el electrodo del potenciómetro con agua destilada y se sumergió en la primera mezcla de jabón y látex y se esperó el tiempo en el que el potenciómetro determina el valor de pH de la solución en prueba.

Una vez determinado el valor de la primera solución, se retiró el electrodo del potenciómetro y se sumergió en agua destilada para lavarlo. Posteriormente se procedió a

realizar la prueba en el resto de las soluciones en estudio, se realizaron y repitieron en tres ocasiones las pruebas a cada solución para corroborar el resultado obtenido (Figura 19 y 20) y calibrando el equipo entre cada corrida de pruebas de las mezclas de jabón y látex; en dichas corridas de prueba hubo una variabilidad del 2%.



**Figura 19** Determinación del pH en mezcla de 0.5% de jabón y 1.0% de látex



**Figura 20** Determinación del pH del látex

### **Determinación de densidad**

Se limpiaron los equipos para la prueba y se calibró la balanza, posteriormente se lavo y seco tres vasos de precipitado a los que se determinó su masa (M1), posteriormente se colocó el vaso de precipitado con 50mL de látex en su interior para determinar su masa.

Una vez que el vaso de precipitado estuvo en reposo, se colocó el termómetro sin tocar las paredes del vaso de precipitado, para determinar la temperatura de la muestra, y se obtuvo la densidad por la relación, masa/volumen, dando una variabilidad entre las pruebas del 0.7%.

### **Determinación de comportamiento reológico**

Se revisó que en la línea de aire hubiera una presión de 5 bares. El aire utilizado debe estar libre de contaminantes y humedad. Posteriormente se calibró el reómetro y se preparó para realizar la prueba.

Una vez calibrado el equipo y mezclada la muestra, se colocó esta sobre el plato de prueba del equipo, evitando derrames (Figura 21). Posteriormente se eliminaron todas las burbujas de aire de la muestra, esto se hizo con ayuda de una varita de vidrio.

Ya que se retiró todo el aire de las muestras, se procedió a preparar el equipo para iniciar la prueba, se limpió todo el exceso de muestra procurando dejar un empaque líquido entre el plato y la geometría (Figura 22).



**Figura 21 Colocación de la muestra de jabón y látex para prueba de reología**



**Figura 22 Preparación de la muestra de jabón y látex para prueba de reología**

Finalmente se inició la prueba con ayuda del software Reo Plus. En este se especifican todos los parámetros deseados. Se indicó que se aplicaría el esfuerzo cortante en un intervalo de velocidades de corte de  $0.01 \text{ s}^{-1}$  a  $1000 \text{ s}^{-1}$ , con 25 puntos de lectura. El equipo generó estos datos y otros más como la viscosidad. Las pruebas fueron ejecutadas por triplicado en cada mezcla.

En relación a los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al látex utilizado en esta investigación, se obtuvo primeramente el valor de pH del mismo, el cual fue de 9.4 (Tabla 13), lo que lo hace un material alcalino (base), que posee características de pH cercanas al valor del cemento cuyo valor de pH se encuentra entre 12 y 14 puntos de alcalinidad; además, las soluciones de jabón usadas en este caso también tienen características alcalinas, al igual que el resto de los materiales. Es importante conocer esto, ya que si pretende generar una mezcla entre materiales, las características químicas deben ser similares si lo que se desea es conservar las cualidades de ambos materiales, ya que de

lo contrario se pueden nulificar dichas propiedades al combinar materiales con pH diferente.

**Tabla 13 pH y densidad del látex utilizado**

<b>Material</b>	<b>pH</b>	<b>Densidad gr/ml<sup>3</sup></b>
Látex	9.4	1.90

Por otra parte, respecto a los resultados de los ensayos para determinar el contenido de sólidos totales, se observó que el material presenta el mismo contenido determinado por el proveedor, dichos valores se muestra en la Tabla 14 en la que se puede ver que el contenido de sólidos totales es del 50.7%, mientras que el 41.6% es agua, y el 7.7% restante de este material está conformado por lípidos, proteínas, carbohidratos, etc.

**Tabla 14 Principales compuestos del látex de Hevea Brasiliensis Muel, Ar. Clon I**

<b>Látex (Hevea Brasiliensis Muell Arg.)</b>	
<b>Componente</b>	<b>Porcentaje</b>
(Sólidos totales)	50.7
Proteína	1-1.8
Carbohidratos	1-2
Lípidos neutros	0.4-1.1
Lípidos polares	0.5-0.5
Constituyentes inorgánicos	0.4-0.6
Aminoácidos, aminas, etc	0.4
Agua	41.6-38.9

Fuente: INIFAP, 2008

Es importante conocer la composición del material, porque se pueden conocer los elementos que integran al mismo y el efecto que se puede presentar al combinarlo con otro material. De igual forma, al incluir los porcentajes del material que se proponen en la experimentación, nos conduce a considerar el agua contenida en él y que se debe restar del agua de mezclado que se requiere, para no alterar las mezclas con la inclusión de más material del considerado, de igual forma con la cantidad de látex que se considera como los sólidos que contiene.

Debido al fenómeno que se describió en el capítulo anterior -en el que el jabón tuvo un efecto de retardante en la plastificación del látex, que permitió un mejor mezclado entre el látex y el suelo- se realizaron pruebas de reología al látex y a las mezclas de látex-jabón en los niveles experimentales propuestos.

Los resultados de las pruebas de reología al látex no fue posible ejecutarlas con las geometrías que se utilizaron (cono-plato), debido a que el látex se plastificó al iniciar las pruebas, por lo que se procedió a ejecutar las mismas pruebas en las mezclas de jabón-látex utilizadas en esta investigación.

En la Figura 23 se muestran las curvas de la relación de velocidad de corte ( $\tau$ ) versus viscosidad ( $\eta$ ), para las mezclas de látex en 1, 2 y 3% con 0.5% de jabón y de las cuales se estudia el comportamiento reológico en función del incremento de látex en las mismas.

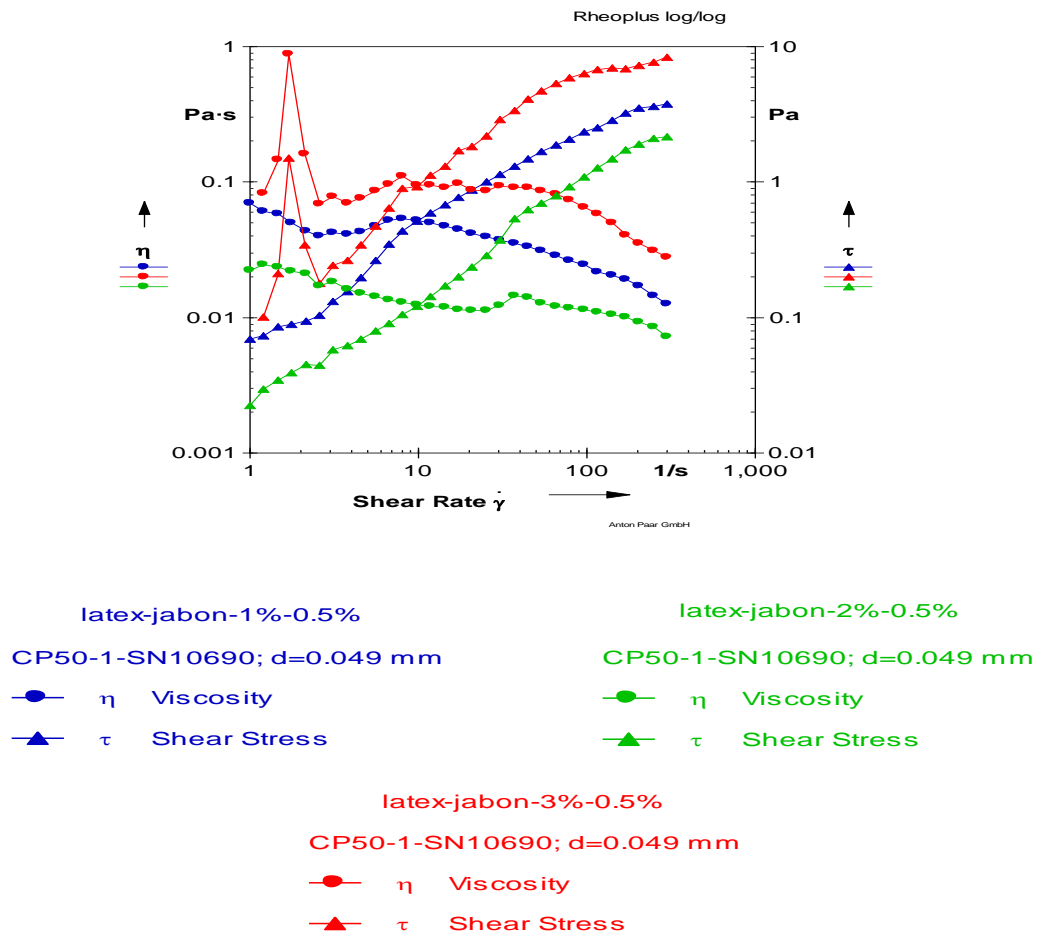


Figura 23 Reograma de soluciones de 1, 2 y 3% de látex con 0.5% de jabón

En la Figura 23 se aprecia como con el aumento de la cantidad de látex en las mezclas, el comportamiento reológico varía, ya que la viscosidad en la mezcla con 3% de látex fue la más alta (0.09 Pa\*s) y disminuye cuando el contenido de látex es del 2%, en relación con la mezcla de 1% látex y la misma cantidad de jabón. Respecto al esfuerzo cortante se observó un comportamiento similar, siendo la mezcla con 3% de látex la que presentó el mayor valor en este aspecto. Este efecto también se avaluó en las mezclas con un contenido de 1.0% de jabón y el incremento del látex, para conocer el efecto del incremento de jabón en las mezclas, respecto a los mismos niveles de látex.

El comportamiento de velocidad de corte, así como de viscosidad que presentan dichas soluciones es el característico de los fluidos de tipo pseudoplástico de adelgazamiento a la cizalla, ya que la viscosidad aparente depende en ellos de las velocidad de deformación por cizalladura, pero no del tiempo durante el que están sometidos a la tensión cizallante (Nuñez, 2001).

La Figura 24 muestra los reogramas para las mezclas de látex en 1, 2 y 3% mezclados con 1.0% de jabón, se aprecia el mismo tipo de comportamiento –de aumento y reducción en la viscosidad en las mezclas con 3 y 2% de látex- que se presentó en las mezclas de látex con 0.5% de jabón. Se observa también que la adición de jabón al 1% tiene un efecto de incremento de la viscosidad, como de esfuerzo cortante, con relación a las soluciones con 0.5% de jabón. Otro aspecto que se aprecia, es que en las soluciones con 1% de jabón, los puntos de origen de las dos propiedades estudiadas, se encuentran más próximos entre ellos, que las en las soluciones en preparadas con 0.5% de jabón.

Una de las características que se observa en el reograma de la Figura 24 es que el aumento en la cantidad de jabón provoca la formación de un meseta newtoniana más evidente en las mezclas con 2 y 3% de látex, que muestra la tendencia de retrasar el efecto del comportamiento pseudoplástico del látex, convirtiéndolo por un lapso de tiempo mayor en un fluido newtoniano, por lo que se puede considerar que a mayor cantidad de jabón, mayor tiempo de estabilización del látex.



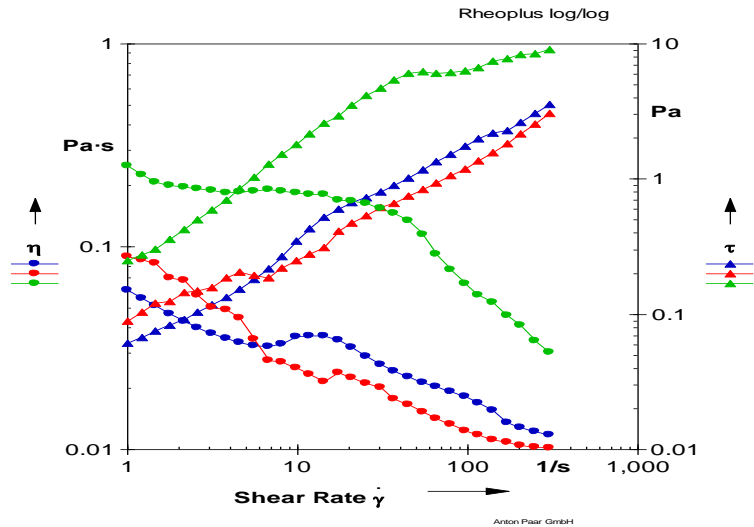


Figura 24 Reograma de soluciones de 1, 2 y 3% de látex con 1% de jabón

De los reogramas obtenidos en ambos grupos de mezclas, se puede notar que al aumentar la cantidad de látex el fluido se vuelve más viscoso y tiende a formar un reograma típico de las soluciones poliméricas, ya que es el látex el que comienza a gobernar en el contenido de dichas soluciones.

Con base en lo anterior, se observó que el jabón tiene un efecto de retardo en la plastificación del látex, provocando que el mismo pierda sus propiedades durante un lapso de tiempo, -al provocar la formación de micelas, orientando las partes hidrófoba e hidrofila de ambos materiales en direcciones opuestas- y las recubre al solidificarse los ácidos grasos, lo cual permite que esta mezcla se puede combinar con el suelo de forma homogénea, no así al hacerlo con las sustancias de forma separada.

De la observación del material durante el mezclado en la etapa de experimentación previa, en la Figura 25 se ilustra la posible interacción del suelo con los aditivos, por una parte en la figura a) la estructura de los granos de suelo sin aditivo, b) el efecto del látex en las partículas de suelo y c) el efecto retardante del jabón sobre el látex y la interacción con las partículas de suelo.

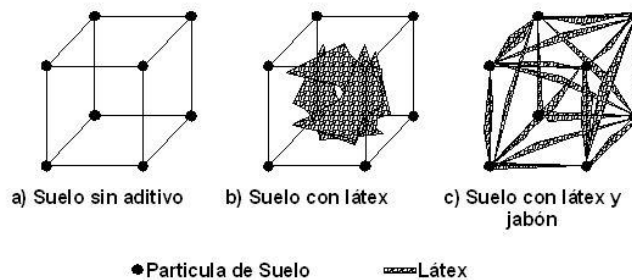


Figura 25 Posible interacción entre los aditivos propuestos y las partículas de suelo

### 3.5 Equipos

Para la fase I, se elaboraron adobes compactados con una prensa manual que ejerce una presión necesaria sobre el suelo de 59.62 MPa, con la que se obtendría un peso volumétrico cercano al máximo Proctor. Para lograr esta presión a través del palanqueo, es suficiente una fuerza aplicada por el usuario de 784 N, transmitida por una longitud de palanca calculada en 1.5 m (Investigación y Desarrollo, 1999).

Los adobes compactados elaborados con dicha maquina tienen dimensiones de 8 x 15 x 28cm (Figura 26), de los cuales se utilizaron cinco réplicas para cada una de las pruebas y mezcla realizadas, dichas probetas se secaron a la intemperie durante siete días y posteriormente fueron sometidos a pruebas de resistencia a la flexión, compresión simple y absorción de agua por inmersión total.



Figura 26 Especímenes elaborados para la fase I de experimentación

## **FASE II**

Al igual que en la fase I, también se elaboraron cinco adobes por cada mezcla propuesta, con las siguientes dimensiones: 8 x 15 x 28 cm.

Las probetas elaboradas para este caso se curaron en cuarto húmedo durante siete días, teniendo esta consideración de curado debido a que dichas probetas incluían cemento, para lo cual fue necesario el curado en dicho lapso de tiempo con el fin de permitir la formación de compuestos del cemento hidratado.

Posterior al curado, las probetas fueron secadas a temperatura constante en horno a 105°C durante 24 horas, una vez secas se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se sometieron a las pruebas propuestas

### **Resistencia a la flexión**

Una vez sometidos a los procesos de curado y secado todos los especímenes de cada fase experimental se sometieron a la prueba de resistencia a la flexión en una prensa hidráulica multicarga con anillo de carga de 2.5 ton de capacidad de carga (Figura 27).



Figura 27. Especímenes de adobe compactado durante la prueba de resistencia a la flexión simple.

La resistencia ( $R$ ) ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) en la prueba a flexión fue calculada con la fórmula:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $P$  es la carga máxima indicada en la máquina de prueba (kg),  $L$  es la distancia entre los apoyos del espécimen (cm),  $b$  es el ancho promedio del espécimen (cm), y  $d$  es el espesor o peralte promedio del espécimen (cm) (SCT, 2003).

Para el caso del ensayo de resistencia a la flexión, se utilizó el mismo equipo y metodología en ambas fases experimentales.

### Resistencia a la compresión

Para realizar las pruebas de resistencia a la compresión se tomaron los fragmentos producto de la prueba de resistencia a la flexión, los cuales se afinaron para tener figuras geométricas regulares, dichas piezas fueron medidas y “cabeceadas” con azufre fundido para uniformizar las caras de las mismas en las que se aplicó la carga de compresión (SCT, 2003).

Las probetas de ambas fases experimentales fueron ensayadas en una prensa hidráulica de la marca HELVEC con capacidad de 120 Ton, provista de una bomba eléctrica que permite mantener una velocidad de carga constante y con un manómetro digital con aproximación de 10kg. (Figura 28)



Figura 28. Especímenes de adobe compactado durante la prueba de resistencia a compresión

La resistencia a la compresión de los especímenes fue calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde P es la carga aplicada (kg) y A es el área de aplicación de la carga P (cm<sup>2</sup>) para después convertir dicha resistencia de kg/cm<sup>2</sup> a MPa .

### Absorción de agua

Las mitades que resultaron de la prueba de flexión y que no se usaron para las pruebas de resistencia a la compresión, fueron sometidas a un proceso de secado a temperatura constante de 105°C hasta alcanzar peso constante, para tal caso fue necesario introducirlas a un horno de secado durante 24 horas y posteriormente se retiraron del horno, para pesarlas e introducirlas en un recipiente con agua durante un periodo de 24 horas y así determinar el porcentaje de absorción en cada espécimen (Figura 29).



Figura 29. Especímenes de adobe compactado durante la prueba de absorción de agua por inmersión total

Una vez transcurrido ese tiempo los especímenes se retiraron del recipiente, y se dejaron escurrir durante cinco minutos para posteriormente pesarlos y calcular el porcentaje de humedad para determinar la absorción de cada uno de ellos.

La absorción de agua para este ensayo fue calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Abs} = \frac{100 (P_2 - P_1)}{P_1} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde  $P_1$  es el peso seco del espécimen (g),  $P_2$  es el peso del espécimen saturado de una inmersión de 24 horas en agua (g) (SCT, 2003)

## CAPÍTULO IV.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 Resultados de la fase I

#### 4.1.1 Resistencia a la flexión

En la Tabla 15 se presentan los resultados de resistencia a la flexión de los especímenes ensayados, así como la media de cada grupo y las desviaciones estándar. Para el caso de la presentación de los resultados -en tablas- de los ensayos a los que se sometieron los especímenes de ambas fases de experimentación, se presentan en valores de medias aritméticas que resumen en un valor las características de una variable teniendo en cuenta todos los casos; mientras que, los resultados que se presentan en las figuras a manera de gráficas, son valores de las medianas, que son menos sensibles que la media a oscilaciones de los valores de la variables, haciendo los resultados más representativos debido a que la población muestral es bastante heterogénea.

**Tabla 15 Resultados de la prueba de resistencia a la flexión de la fase I en mega pascales (MPa)**

	Látex								
	0			1		2		3	
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
	0	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1
	0.09	0.07	0.09	0.13	0.10	0.13	0.23	0.12	0.18
	0.07	0.07	0.08	0.17	0.10	0.16	0.26	0.12	0.18
	0.09	0.09	0.10	0.13	0.10	0.13	0.26	0.12	0.20
	0.09	0.09	0.10	0.13	0.13	0.14	0.23	0.12	0.20
	0.07	0.09	0.09	0.16	0.12	0.14	0.23	0.12	0.18
<b>Media</b>	<b>0.08</b>	<b>0.08</b>	<b>0.09</b>	<b>0.15</b>	<b>0.11</b>	<b>0.14</b>	<b>0.24</b>	<b>0.12</b>	<b>0.19</b>
<b>Desv. Stdr.</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>0.00</b>	<b>0.01</b>
<b>Coef. Var.</b>	<b>0.10</b>	<b>0.10</b>	<b>0.07</b>	<b>0.10</b>	<b>0.09</b>	<b>0.07</b>	<b>0.07</b>	<b>0.00</b>	<b>0.04</b>

En la Figura 30 se observa que la adición de jabón no afecta significativamente la resistencia a la flexión. Con respecto a la adición de látex se aprecia que la resistencia aumenta en los especímenes con mayor cantidad de dicho aditivo; sin embargo, en los especímenes con 3% de látex, la resistencia disminuye en relación a los especímenes con 2% de látex - 0.5 y 1.0% de jabón, que son los que presentan los valores más altos de resistencia flexión.

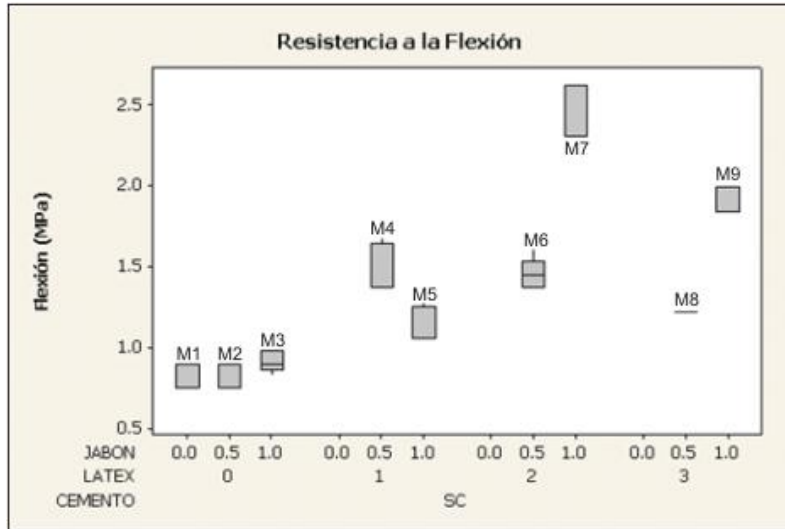


Figura 30 Resultados de resistencia a la flexión de las probetas elaboradas en la fase I

En la Tabla 16 se muestran los valores de las diferencias en porcentajes de todas las mezclas en relación con la mezcla control. Es evidente que las mezclas M7 y M9 presentaron un incremento del doble de la resistencia de la mezcla control.

Tabla 16 Variación de las mezclas elaboradas con las adiciones de jabón y látex respecto a la mezcla control

Relación de Crecimiento de Resistencia a la Flexión en Fase I								
Mezcla	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
% Crecimiento	0.00	9.23%	75.83%	34.79%	72.06%	188.45%	44.35%	125.64%

Respecto al efecto provocado por el látex y jabón se observó que la interacción entre estos materiales con el suelo es positiva, ya que aumenta la resistencia la flexión respecto a la muestra control. Sin embargo, las mezclas que contienen 0.5% de jabón se mantuvieron en el mismo rango de resistencia a la flexión para los tres niveles de adición



de látex, mientras que las mezclas con 1.0% de jabón, se observó un comportamiento de incremento de la resistencia conforme se incrementa la cantidad de látex. Sin embargo, contrario al fenómeno de relación de incremento de látex, a partir de 3% de la adición de dicho material, esta relación se pierde, quedando como la de mayor valor de resistencia a la flexión la mezcla M7 (1.0% jabón – 2.0% látex) y las mezclas M8 y M9 comienzan a presentar una franca disminución de la resistencia.

Lo anterior puede deberse principalmente a que los polímeros reducen la porosidad de los materiales compósitos, la distribución de poros con ello es modificada porque los poros son llenados total o parcialmente, lo que disminuye el tamaño de los mismos y provoca una mayor densificación en el material haciendo más resistente mecánicamente, tal y como es reportado en la literatura (Achenza, 2005).

Dicho fenómeno tiene su explicación en la cantidad de látex que interactúa en el sistema de suelo compactado, ya que se modifica la energía de cohesión (cohesividad) que favorece o rompe la aglutinación de látex y ácidos grasos emulsificados, dando como resultado la modificación del tamaño de las partículas, ya que al modificarse este, los espacios intersticiales se modifican también.

Este fenómeno también puede ser atribuido al efecto aglomerante que tiene el látex poliisopreno en las partículas de suelo, como ocurre en bloques de suelo estabilizado con yeso y látex de estireno butadieno (Rubio Et. Al, 2005).

Respecto al análisis estadístico de los datos obtenidos para cada ensayo ejecutado en las fases experimentales de esta investigación y debido a que éstos no cumplieron con al menos una de las tres condiciones (homogeneidad de varianza) para el análisis estadístico de los datos mediante ANOVA (Montgomery, 2005), se recurrió al uso del método Kruskal-Wallis que establece que: *cuando el análisis de la varianza no es aplicable debido al incumplimiento de las suposiciones del mismo modelo (ANOVA), es necesario aplicar la prueba de Kruskal-Wallis para el contraste de k medianas.*

El método de Kruskal-Wallis es el método no paramétrico más adecuado para comparar poblaciones cuyas distribuciones no son normales. Incluso cuando las poblaciones son

normales, este contraste funciona muy bien. También es adecuado cuando las desviaciones típicas de los diferentes grupos no son iguales entre sí.

Las hipótesis nulas y alternativa de la prueba de kruskal-Wallis para esta fase de la investigación son las siguientes:

H<sub>0</sub>: La adición de látex y jabón al suelo **no influye positivamente** en la resistencia a la compresión, flexión y absorción de agua del adobe compactado (Las k medianas son todas iguales)

H<sub>1</sub>: La adición de látex y jabón al suelo **influye positivamente** en la resistencia a la compresión, flexión y absorción de agua del adobe compactado (Al menos una de las k medianas es diferente)

El análisis con dicho método se presenta para cada una de las pruebas ejecutadas en ambas fases del experimento, y fueron elaboradas utilizando el programa MINITAB 14®, un ejemplo de cálculo se puede visualizar en el Anexo 3.

La forma de reportar los resultados de una prueba de hipótesis es estableciendo que la hipótesis nula sea rechazada o no para un valor de  $\alpha$  ó nivel de significancia específico igual a  $P= 0.05$ , donde P es la probabilidad de error, que es del 5%, es decir: la probabilidad de cometer un error en 20 muestras (1/20) lo que representa un intervalo de confianza de 95%.

Los valores de la prueba Kruskal-Wallis para la resistencia a la flexión en especímenes con la adición de jabón se muestran en la Tabla 17, en ella se nota que el valor de probabilidad de error P es 0.282, que resulta mucho mayor al establecido previamente, por lo que no existe una diferencia altamente significativa entre dichos especímenes y las muestras control.

**Tabla 17 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para flexión en especímenes con Jabón**

<b>Kruskal-Wallis Test: Flexión/Jabón</b>				
Jabón	N	Median	Rank	Z
0	5.00	0.90	6.70	-0.80
0.5	5.00	0.90	6.70	-0.80
1	5.00	0.90	10.60	1.59
Overall	15		8	
H= 2.53		DF= 2	<b>P=0.282</b>	
H= 3.05		DF= 2	<b>P= 0.217</b>	

Por otra parte, en la Tabla 18 se observa que el valor de la prueba para los especímenes con látex-jabón es: 0.001, lo que confirma que dichas adiciones tiene un efecto significativo en la resistencia a la flexión del adobe, respecto a la mezcla control.

**Tabla 18 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para flexión en especímenes con látex-jabón**

<b>Kruskal-Wallis Test: Flexión/Látex-Jabón</b>				
Látex	N	Median	Rank	Z
0	5	0.9	3	-3.54
1	10	1.325	15	-1.1
2	10	1.96	26.8	3.2
3	10	1.53	19.8	0.64
Overall	35		18	
H= 19.15		DF= 3	<b>P= 0.001</b>	
H= 19.36		DF= 3	<b>P= 0.001</b>	

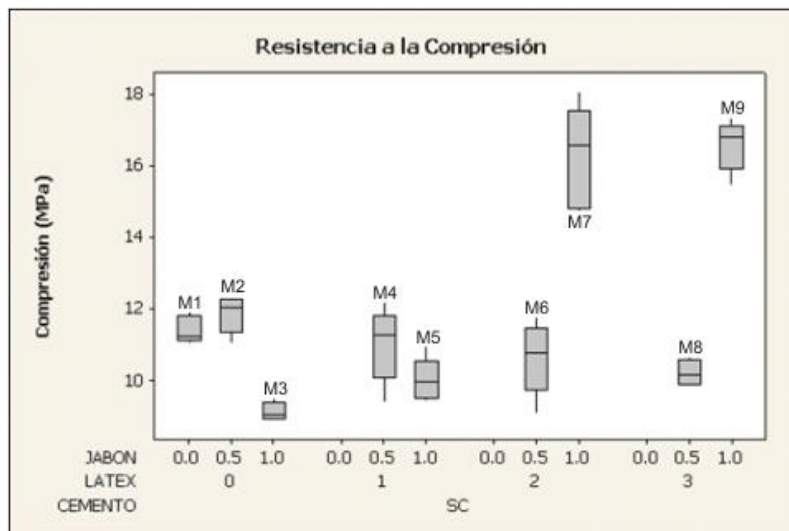
#### 4.1.2 Resistencia a la compresión

En la Tabla 19 se distinguen los valores obtenidos en cada uno de los especímenes ensayados en esta prueba, media estadística, la desviación estándar de los grupos de cada mezcla y los coeficientes de variación.

**Tabla 19 Resultados de resistencia a compresión de la fase I en MPa**

	Látex								
	0			1		2		3	
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
	0	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1
	1.10	1.08	0.88	0.92	1.07	0.89	1.67	0.97	1.65
	1.10	1.21	0.87	1.20	0.94	1.16	1.45	1.03	1.61
	1.08	1.20	0.93	1.12	0.92	1.06	1.63	1.05	1.51
	1.17	1.18	0.91	1.06	0.98	1.02	1.46	0.98	1.70
	1.15	1.14	0.89	1.10	0.99	1.10	1.77	1.00	1.65
<b>Media</b>	<b>1.12</b>	<b>1.16</b>	<b>0.89</b>	<b>1.08</b>	<b>0.98</b>	<b>1.04</b>	<b>1.60</b>	<b>1.00</b>	<b>1.63</b>
<b>Desv. Stdr.</b>	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>	<b>0.03</b>	<b>0.10</b>	<b>0.06</b>	<b>0.10</b>	<b>0.14</b>	<b>0.03</b>	<b>0.07</b>
<b>Coef. Var.</b>	<b>0.03</b>	<b>0.04</b>	<b>0.03</b>	<b>0.09</b>	<b>0.06</b>	<b>0.09</b>	<b>0.09</b>	<b>0.03</b>	<b>0.04</b>

La Figura 31 muestra los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de los especímenes elaborados con las mezclas de esta fase experimental y en la que se percibe el efecto negativo de la adición de jabón, mientras que la adición de látex aumenta la resistencia conforme se adiciona este material; sin embargo, con 3% de látex la resistencia disminuye.



**Figura 31 Resultados de resistencia a la compresión en las mezclas de la fase I**

Respecto a la adición del látex y jabón combinados, puede notarse que al igual que en la resistencia a la flexión los especímenes con 0.5% de jabón presentan resultados dentro del mismo rango de valores de resistencia, mientras que a los que se adicionó 1.0% de jabón la resistencia aumentó, excepto los de la mezcla M5, que al igual que el resto de las mezclas jabón-látex con 0.5%-2.0% y 0.5%-3.0%, presentaron una resistencia menor que los especímenes control.

La adición de los materiales suplementarios en la mezcla original tuvo efectos combinados, como se vio en la Figura 31. El efecto positivo mayor se presentó en la mezcla M9 y M7 con un incremento del 44.94 y 42.24% respectivamente. En otro sentido, el efecto negativo más marcado se presentó en la mezcla M3 con una disminución de 20.21% menos que la mezcla original (Tabla 20).

**Tabla 20 Variación de las mezclas elaboradas con las adiciones de jabón y látex respecto a la mezcla control**

Relación de Crecimiento de Resistencia a la Compresión en Fase I								
Mezcla	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
% Crecimiento	3.73	-20.21	-3.63	-12.31	-6.98	42.24	-10.57	44.94

Esto puede ser atribuido a las características de la mezcla de látex y jabón, -ya que como se puede observar durante las pruebas de reología, así como durante el proceso de mezclado de dicha solución con el suelo- la viscosidad aumenta, conforme se incrementa la cantidad de látex, dando paso a que en dicha solución se perciba más claramente las características del látex sobre las del jabón, lo que provocó que las mezclas de suelo, látex y jabón con mayor cantidad de látex, resultaran menos húmedas.

El efecto de las adiciones puede deberse también a que el látex se plastifica en el composito y dicha plastificación contribuye a mejorar la resistencia tanto a compresión como flexión y absorción de los especímenes, similar a estudios previos (Mitchell, 1976)

En la prueba Kruskal-Wallis para el conjunto de datos de los especímenes con jabón, se observa que los datos presentan un valor altamente significativo ( $P= 0.007$ ) respecto a la muestra control Tabla 21, lo que puede contrastarse con la Figura 31.

**Tabla 21 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para compresión en especímenes con látex**

<b>Kruskal-Wallis Test: Compresión/Jabón</b>				
Jabón	N	Median	Rank	Z
0	5	11.26	9.4	0.86
0.5	5	12.05	11.6	2.2
1	5	9.04	3	-3.06
Overall	15		8	
H= 9.98		DF= 2	<b>P= 0.007</b>	
H= 9.98		DF= 2	<b>P= 0.007</b>	

En la Tabla 22 se observan los valores obtenidos en la prueba Kruskal-Wallis en los especímenes con adiciones de látex, puede apreciarse que el valor p (probabilidad de error) es muy pequeño, lo que nos permite establecer que existe una diferencia significativa entre los tratamientos con las adiciones propuestas y las mezclas control.

**Tabla 22 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para compresión en especímenes con jabón**

<b>Kruskal-Wallis Test: Compresión/Látex-Jabón</b>				
Látex	N	Median	Rank	Z
0	5	11.26	8	-1.09
1	5	9.9	3	-3.27
2	5	16.59	15.2	2.05
3	5	16.81	15.8	2.31
Overall	20		10.5	
H= 16.10		DF= 3	<b>P= 0.001</b>	
H= 16.10		DF= 3	<b>P= 0.001</b>	

#### **4.1.3 Correlación entre resistencia a flexión y compresión**

La resistencia mecánica de los materiales está determinada por las pruebas de: resistencia a la compresión, flexión, torsión y cortante. En el caso del concreto según la *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA, 2008), se cree que existe una correlación entre la resistencia a compresión y flexión (Módulo de Ruptura), que equivale al 10-20% de la resistencia a compresión, en dependencia del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado, sin embargo, la mejor correlación para los

materiales específicos es obtenida mediante ensayos de laboratorio para los materiales dados y el diseño de la mezcla en cuestión.

Con base en lo anterior se determinó establecer la correlación existente entre los resultados de resistencia a flexión y compresión de los especímenes ensayados para ambas fases experimentales. En la Figura 32 se muestra la correlación simple de dichas pruebas, en la que se observa la ecuación de la línea de tendencia (recta) cuyo valor es  $R^2 = 0.640$ .

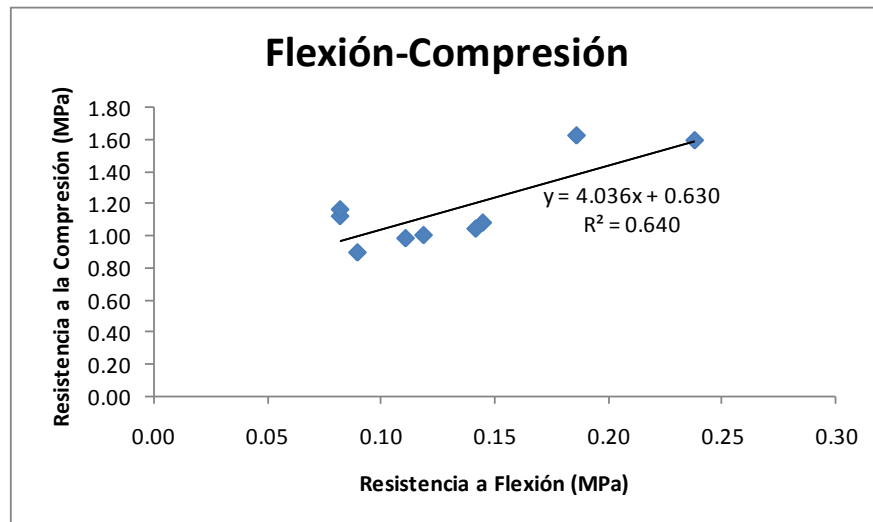


Figura 32 Correlación entre resistencia a la flexión y compresión para los especímenes de las fase I

Como se ha descrito previamente la ecuación de la recta para este caso es de  $r^2 = 0.640$ , que resulta muy bajo en relación al que se obtiene en el concreto de  $r^2 = 0.917$  (García, 2009), que por ser un material más homogéneo presenta esa correlación, mientras que en los adobes la correlación es menor debido principalmente a que los especímenes en esta fase no consideran la adición de cemento que es la materia prima del concreto, y en el caso de suelo cemento, suele transferir sus propiedades a dicho material.

#### 4.1.4 Absorción de agua

En la Tabla 23 se aprecia el porcentaje de absorción de agua de cada uno de los especímenes elaborados con las nueve mezclas de esta fase experimental, dichos valores presentan la media y desviación estándar obtenida en este ensayo por grupo.

**Tabla 23 Resultados de absorción de agua de los especímenes de la fase I en porcentaje**

	Látex								
	0			1		2		3	
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
	0	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	16.39	15.06	16.73	16.54
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	15.98	15.61	16.49	15.38
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	17.60	16.96	16.96	15.53
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	16.20	16.54	16.60	15.39
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	8.13	16.35	16.83	17.13
<b>Media</b>	<b>100</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>14.86</b>	<b>16.11</b>	<b>16.72</b>	<b>15.99</b>
<b>Desv. Stdr.</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>3.82</b>	<b>0.76</b>	<b>0.18</b>	<b>0.80</b>
<b>Coef. Var.</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.26</b>	<b>0.05</b>	<b>0.01</b>	<b>0.05</b>

Como se puede ver en la Tabla 23, se presentan valores de las medias estadísticas igual a 100% de absorción, lo que significa que los especímenes con dichos valores, se desintegraron total o parcialmente durante el transcurso del ensayo, mientras que las mezclas M6 a la M9, tuvieron valores de absorción en un rango de 14.86 a 16.72% respecto a la masa seca de los especímenes ensayados.

Los resultados de los ensayos de absorción de agua se muestran en la Figura 33, donde se aprecia que la adición de jabón no tiene efecto significativo en la absorción, pues los especímenes ensayados presentaron resultados similares a la muestra control, desintegrándose total o parcialmente (100% de absorción); mientras que la adición de látex y jabón tienen un efecto significativo a partir de la adición de 2.0-0.5%, 2.0-1.0% y 3.0-0.5%, 3.0-1.0% con lo cual se logra reducir la absorción de agua en un rango de medianas de 15 al 17%.



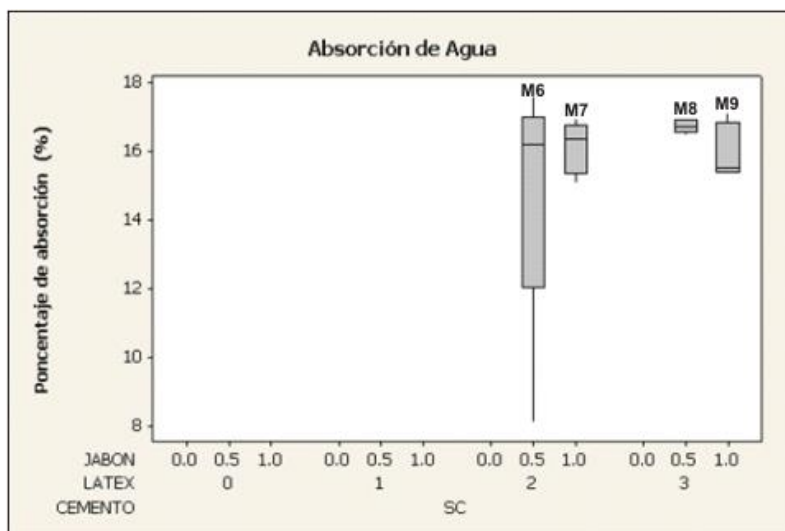


Figura 33 Resultados del ensayo de absorción de agua en las probetas de la fase I

Los resultados de la prueba de absorción dependen esencialmente del sistema de poros capilares y la distribución de los mismos en los especímenes, lo que se hace evidente en la figura anterior, ya que la porosidad está en función del incremento del polímero adicionado (látex). Esto se debe principalmente a que una de las características de los polímeros, es que tienen la propiedad de dispersar sus partículas entre otras más pequeñas. Esta distribución de partículas incrementa la resistencia de los materiales compósitos por el efecto de llenado de poros que producen, llenando poros vacíos en la estructura original del material (Stancato, 2005).

En relación a los especímenes con adiciones de jabón y látex en cantidades iguales o menores al 1%, no genera las condiciones suficientes de llenado de poros para mejorar la rigidez de la matriz del material, por que los enlaces fuertes entre el látex y las partículas del suelo son suficientes para evitar la reorientación y floculación de las partículas de suelo, de forma similar a lo que se reporta en la literatura (Bahar, 2004).

Las mezclas M6 a M9 tuvieron una absorción de agua en un rango entre 14.86 y 16.72% , siendo la mezcla M6 la que obtuvo el valor más bajo de absorción, mientras que el resto de las mezclas con menos de 2% de látex, se desintegraron total o parcialmente durante el periodo de prueba, dando como resultado un porcentaje de 100%, de absorción (Tabla 24).

**Tabla 24 Variación de absorción de agua en los adobes respecto a la mezcla control**

<b>Relación de Crecimiento de Porcentaje de Absorción en Fase I</b>								
<b>Mezcla</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>	<b>M9</b>
<b>% Absorción</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>14.86</b>	<b>16.11</b>	<b>16.72</b>	<b>15.99</b>

Los resultados de las pruebas estadísticas para el conjunto de datos obtenidos en la prueba de absorción se muestran en la Tabla 25 para los especímenes con jabón. Puede verse que el valor de P es 1, debido a que no hay variación en los resultados de los especímenes elaborados con jabón y la mezcla control. Se puede observar también que el programa agrega una nota, en la que refiere que todos los valores son idénticos en la columna de resultados, lo que confirma que no hay variación que resulte en una significancia.

**Tabla 25 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para absorción en especímenes con látex**

<b>Kruskal-Wallis Test: Absorción-Jabón</b>				
<b>Jabón</b>	<b>N</b>	<b>Median</b>	<b>Rank</b>	<b>Z</b>
0	5	100	8	0
0.5	5	100	8	0
1	5	100	8	0
Overall	15		8	
H= 0.00		DF= 2		<b>P=1</b>
Note: All values in column are identical				

En la Tabla 26 para los especímenes con látex-jabón dichas tablas que existe un valor de significancia muy pequeño, en relación a la muestra control. Dichos valores confirman que existe un efecto positivo en los especímenes con contenido de látex-jabón, ya que como se vio previamente, los especímenes de los grupos de 2 y 3% de látex adicionado presentaron porcentajes de absorción en un rango entre 12 y 18%.

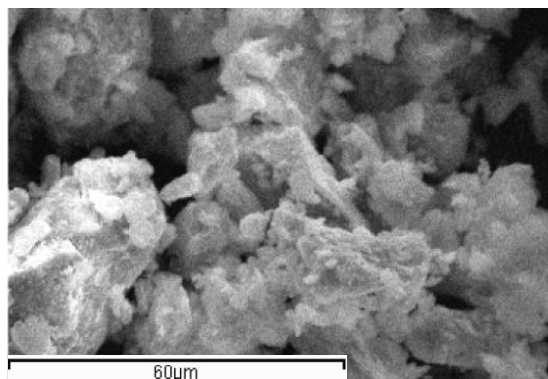
**Tabla 26 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para absorción en especímenes con jabón**

<b>Kruskal-Wallis Test: Absorción/Látex-Jabón</b>				
Látex	N	Median	Rank	Z
0	5	100	28	2.36
1	10	100	28	3.65
2	10	16.28	9.3	-3.18
3	10	16.57	11.7	-2.3
Overall	35		18	
H= 25.27		DF= 3	<b>P= 0.000</b>	
H= 27.43		DF= 3	<b>P= 0.000</b>	

#### 4.1.5 Análisis de microscopía y DRX

Se obtuvieron micrografías en un microscopio electrónico de barrido de las mezclas M3 de esta fase experimental, en estas se puede observar que el tamaño de los granos del suelo es variable, ya que van desde los 10 hasta los 40 micrones ( $\mu\text{m}$ ), es también perceptible que en la estructura en general existe una relación de poros entre 30 y 40% respecto a la muestra, siendo de tamaño variables dichos poros. Lo anterior se debe principalmente a que las partículas de arcilla, interactúan entre sí, dando como resultado la unión de partículas de distintas dimensiones provocando una topografía bastante accidentada y heterogénea en la matriz del material (Figura 34).

Otra de las características propias de la muestra analizada en la micrografía de la Figura 34, es que no se percibe una fuerte unión entre partículas, sino que estas se mantienen unidas entre sí apenas por las propias fuerzas de cohesividad. Este tipo de unión puede ser vulnerada, -como se ha descrito con anterioridad- por compuestos polares que rompen los débiles enlaces de Van der Waals y separan las partículas del suelo. Este es el caso de la interacción del agua con los adobes elaborados con dicha mezcla (M3).



**Figura 34 Micrografía de la mezcla M3 (Suelo-2% Jabón)**

La Figura 35 muestra la micrografía tomada a la muestra M9 (1.0 % jabón – 3.0% látex) con un microscopio estereoscópico SZx10 zoom, en el Laboratorio de Control Biológico del CIIDIR Oaxaca y con un aumento de 3X.



**Figura 35 Micrografía de la mezcla M9 (1.0% Jabón- 3% látex)**

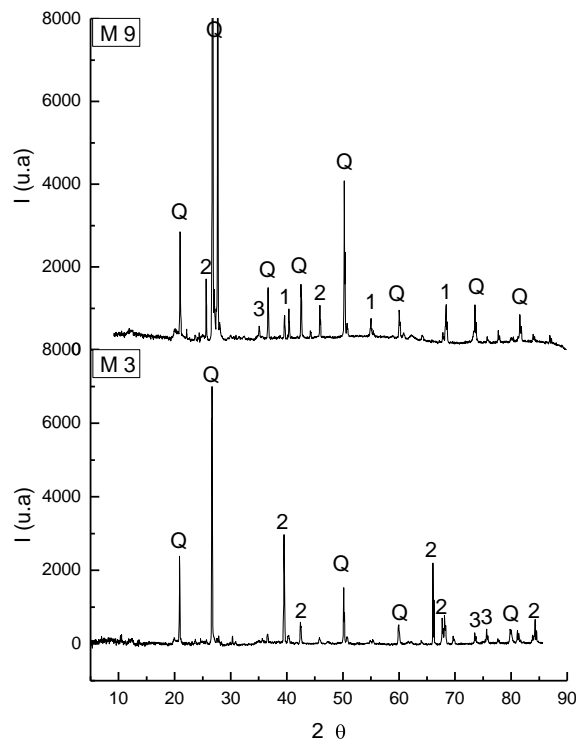
En la Figura 35 se pueden ver las partículas del suelo formando una masa densa , además puede verse también que existen espacios -poros- que varían en dimensiones y orientación, al igual que las partículas del suelo, sin ser de mayor tamaño que estas.

Por otra parte, al realizar un acercamiento en la muestra, se distinguen claramente dentro del área del rectángulo en la micrografía de la Figura 35, la interacción física entre los granos del suelo con el látex plastificado y en la que el látex forma una especie de red que

mantiene unidos los granos del suelo, lo que hace que el material sea más denso, reduciendo la cantidad de poros disponibles en la matriz del mismo y con eso se modifican las características de resistencia mecánica y absorción de agua del material.

### **Difracción de Rayos "X"**

Se realizó a las muestras M3 y M9 un análisis global de difracción de rayos X, en estos se percibe la presencia de oxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), aluminato de calcio ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ), algunos ferroaluminatos de calcio ( $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2$ ,  $\text{Ca}_5\text{Al}_9\text{Fe}_{18}$ ,  $\text{Ca}_2\text{Al}_5\text{Fe}_7\text{O}_{20}$ ) y silicato de calcio ( $\text{CaSiO}_3$ ). Todos estos compuestos son propios del suelo utilizado para la elaboración de las mezclas utilizadas.



**Figura 36 Patrones de Difracción de rayos X para adobes elaborados con las mezclas M3 y M9. Las fases cristalinas detectadas fueron de: oxido de silicio (Q), aluminato de calcio (1), ferroaluminatos (2) y silicato de calcio (3)**

En la Figura 36 se observa que la mezcla M9 (2% jabón-3% látex) presenta algunas variaciones en intensidad, así como en la cantidad de compuestos respecto a la mezcla M3, lo cual puede deberse a la reacción del látex con los ferroaluminatos para formar aluminato de calcio, y con ello reducir la formación de ferroaluminatos. Este compuesto -

-aluminato de calcio- es muy común en cementos aluminosos, sin embargo, interacciona con otros compuestos para obtener las características propias de un material cementante. Es evidente que la combinación de ácidos grasos y polímero, inducen planos cristalográficos característicos del cemento, generando cambios de fase sin ser un material cementante, debido a que los silicatos y aluminio silicatos son potenciados por estas adiciones en el suelo, dando cualidades a los adobes elaborados con dichas mezclas, características químicas de adobes compactados y estabilizados con cemento.

## 4.2 Resultados de la fase II

### 4.2.1 Resistencia a la flexión

En esta segunda fase experimental se evaluó el efecto de la adición de jabón y látex en adobe compactado estabilizado con 10% de cemento, el cual, comparado con adobe compactado sin estabilizar tiene propiedades de resistencia a la flexión, compresión y absorción de agua, muy superiores.

Los resultados del efecto de la adición de látex y jabón en adobe compactado y estabilizado con 10% de cemento, en la resistencia a la flexión se presentan en la Tabla 27, en ella se pueden apreciar los valores obtenidos en cada uno de los especímenes según el tipo de mezcla con las que se elaboraron, también muestra los valores de la media aritmética por grupo de mezcla, desviación estándar y el coeficiente de variación.

Tabla 27 Resultados de resistencia a la flexión de la fase II (MPa)

										Látex													
										0		1		2		3							
										Jabón													
M10			M11			M12			M13		M14		M15		M16		M17		M18				
0			0.5			1			0.5		1		0.5		1		0.5		1				
0.86			0.64			0.64			0.46		0.42		0.47		0.55		0.27		0.28				
0.77			0.68			0.65			0.52		0.49		0.44		0.54		0.23		0.26				
0.90			0.64			0.62			0.44		0.41		0.51		0.57		0.20		0.26				
0.71			0.64			0.64			0.48		0.41		0.47		0.52		0.30		0.24				
0.72			0.62			0.59			0.44		0.41		0.43		0.52		0.28		0.28				
<b>Media</b>			<b>0.79</b>			<b>0.64</b>			<b>0.63</b>			<b>0.47</b>		<b>0.43</b>		<b>0.46</b>		<b>0.54</b>		<b>0.26</b>		<b>0.26</b>	

Desv. Stdr.	0.08	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.02
Coef. Var.	0.10	0.03	0.04	0.07	0.08	0.07	0.04	0.16	0.06

En la tabla anterior, se puede observar que los coeficientes de variación son muy dispersos, abarcando valores de 0.03 a 0.16, lo que refiere a dispersiones muy altas entre los resultados de cada grupo. Con base en esto, se representan a manera de figura, los resultados en los que se grafican las medianas, en lugar de medias aritméticas, para expresar, la dispersión y robustez de los resultados obtenidos Figura 37.

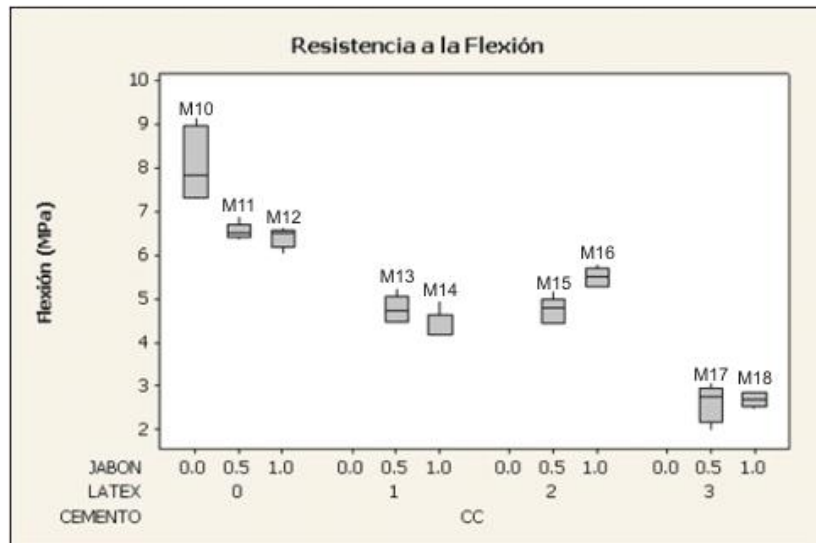


Figura 37 Resultados del ensayo a flexión en especímenes de la fase II

En la Figura 37 se observa que la adición de jabón en las mezclas elaboradas con el suelo arenoso y 10% de cemento, disminuye la resistencia conforme se aumenta la cantidad de jabón en la mezcla, tal es el caso de las mezclas M11 y M12 con 0.5 y 1.0% de jabón adicionado.

Lo anterior puede ser atribuido a que la adición de agentes hidrofóbicos reduce la resistencia en especímenes elaborados con cemento, puesto que la insolubilidad de los ácidos grasos contribuye a retrasar la hidratación del cemento (Saija, 1995)

Referente a la adición de látex, se observa una clara tendencia a disminuir la resistencia a la flexión conforme se incrementa la cantidad de látex en la mezclas, dicha disminución

puede tener origen en el efecto de los polímeros sobre el cemento contenido en los materiales compósitos, ya que se ha observado que la inclusión de algunos polímeros provocan la reducción de hidróxido de calcio (CH), lo que puede ser atribuido a la acumulación de dichos polímeros en la región de transición entre el agregado y el cemento, provocando la acumulación de agua y consecuentemente, altas cantidades de polímero en dicha zona, sin permitir que se presente el efecto de adherencia entre el cemento hidratado y el agregado (Sakai, 1995).

Por otra parte, en el efecto provocado por el látex y jabón se observa también una tendencia a disminuir la resistencia a la flexión, sin embargo, no se aprecia una relación de mayor impacto conforme se incrementa la cantidad de jabón, pero si menor dispersión en los resultados de las mezclas con 1.0% de jabón respecto a las que se adicionó 0.5% de jabón y la misma cantidad de látex

Este efecto de la disminución en la resistencia a la flexión, puede ser atribuido a la combinación del látex y el cemento, ya que por sus propiedades químicas se presentan dos fases: orgánica e inorgánica de ambos materiales, de manera similar al efecto encontrado en morteros modificados con polímeros (Ru Wang, 2004). Ya que pueden presentarse reacciones que favorezcan el desarrollo de las propiedades de un material sobre el otro, tomando predominancia el que reacciona con más rapidez, que para este caso es el látex.

La Tabla 28 muestra la variación en porcentajes de cada mezcla elaborada en esta fase en relación con la mezcla control, en dicha tabla se observa que la mezclas M17 y M18 son las que tuvieron mayor reducción de resistencia a la flexión, -67.63 y -66.65% respectivamente, por otra parte, las mezclas que solo contienen jabón tuvieron unas disminución de resistencia de 18.88 y 20.61% para 0.5 y 1% respectivamente.

**Tabla 28 Variación de resistencia a la flexión de los especímenes de la fase II contra espécimen control**

<b>Relación de Crecimiento de Resistencia a la Flexión en Fase II</b>								
<b>Mezcla</b>	<b>M11</b>	<b>M12</b>	<b>M13</b>	<b>M14</b>	<b>M15</b>	<b>M16</b>	<b>M17</b>	<b>M18</b>
<b>% Crecimiento</b>	<b>-18.88</b>	<b>-20.61</b>	<b>-41.03</b>	<b>-46.04</b>	<b>-41.42</b>	<b>-31.98</b>	<b>-67.63</b>	<b>-66.65</b>



La Tabla 29 y la Tabla 30 muestran los resultados del análisis estadístico mediante el método Kruskal-Wallis para los grupos de datos de esta fase, y en las que se pueden apreciar que los valores de P se encuentran por debajo del valor de significancia  $P= 0.05$  por lo que se acepta la hipótesis alternativa y se rechaza la hipótesis nula, lo que confirma que existe un efecto negativo marcado, provocado por las adiciones hechas a la mezcla control.

**Tabla 29 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para flexión en especímenes con jabón**

<b>Kruskal-Wallis Test: Flexión/Jabón</b>				
Jabón	N	Median	Rank	Z
0	5	7.83	13.00	3.06
0.5	5	6.51	6.10	-1.16
1	5	6.51	4.90	-1.90
Overall	15		8	
H= 9.56		DF= 2	<b>P= 0.008</b>	
H= 9.93		DF= 2	<b>P= 0.007</b>	

**Tabla 30 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para flexión en especímenes con látex**

<b>Kruskal-Wallis Test: Flexión/Látex-Jabón</b>				
Látex	N	Median	Rank	Z
0	5	7.83	33.00	3.54
1	10	4.49	17.40	-0.24
2	10	5.22	23.70	2.06
3	10	2.74	5.50	-4.56
Overall	35		18	
H= 28.68		DF= 3	<b>P= 0.000</b>	
H= 28.73		DF= 3	<b>P= 0.000</b>	

#### 4.2.2 Resistencia a la compresión

La Tabla 31, muestra los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de cada uno de los especímenes elaborados con las mezclas de esta fase experimental.

Al igual que los resultados de la prueba de resistencia a la flexión de esta misma fase, los resultados de resistencia a la compresión muestran valores de medias aritméticas de los

grupos de las mezclas realizadas, en ellos se puede apreciar que la mezcla control M10, tuvo los valores de resistencia más altos de los grupos de mezclas (8.16 MPa), en lo referente a el coeficiente de variación se notan valores que van de 0.04 a 0.24 en los grupos de las mezclas.

**Tabla 31 Resultados de resistencia compresión en especímenes elaborados con las mezclas de la fase II**

	<b>Látex</b>									
	0			1		2		3		
	<b>M10</b>	<b>M11</b>	<b>M12</b>	<b>M13</b>	<b>M14</b>	<b>M15</b>	<b>M16</b>	<b>M17</b>	<b>M18</b>	
	0	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	
	9.01	6.31	6.12	3.69	3.59	3.33	3.81	2.61	1.72	
	8.31	6.17	6.80	4.48	4.46	4.48	3.85	2.34	2.37	
	8.21	7.67	5.38	4.12	3.89	3.99	4.18	2.41	2.23	
	7.98	6.47	7.04	4.37	3.67	3.68	4.01	3.96	2.03	
	7.31	5.90	4.70	4.04	4.03	4.09	4.11	2.69	2.72	
<b>Media</b>	<b>8.16</b>	<b>6.50</b>	<b>6.01</b>	<b>4.14</b>	<b>3.93</b>	<b>3.92</b>	<b>3.99</b>	<b>2.80</b>	<b>2.21</b>	
<b>Desv. Stdr.</b>	<b>0.61</b>	<b>0.69</b>	<b>0.97</b>	<b>0.31</b>	<b>0.34</b>	<b>0.43</b>	<b>0.16</b>	<b>0.66</b>	<b>0.37</b>	
<b>Coef. Var.</b>	<b>0.08</b>	<b>0.11</b>	<b>0.16</b>	<b>0.07</b>	<b>0.09</b>	<b>0.11</b>	<b>0.04</b>	<b>0.24</b>	<b>0.17</b>	

En la Figura 38 se representan en forma gráfica, los valores de las medianas obtenidas en cada mezcla elaborada, muestra también el efecto negativo que provoca la adición de jabón, lo que puede deberse a que el jabón contiene principalmente ácido láurico, palmítico y ácido esteárico, que son prácticamente insolubles en agua, y que contribuyen a retardar el proceso de hidratación del cemento, resultando en resistencias menores que en las mezclas donde no se adiciona dicho material (Albayrak, 2005).

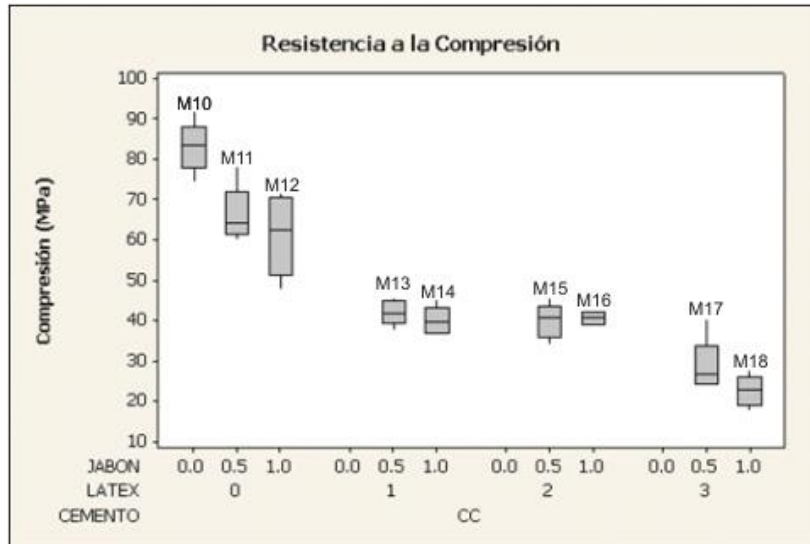


Figura 38 Resultados de resistencia a compresión en especímenes de la fase II

Aunque los ácidos grasos que se adicionaron en dicha investigación, fueron obtenidos directamente de fuentes naturales y adicionados como aditivos para mejorar la molienda del clínker y en la elaboración de especímenes de concreto, en este caso el objetivo fue evaluar el efecto en una matriz de suelo-cemento.

Respecto a la adición de látex es evidente también la tendencia negativa en la resistencia conforme se aumenta el porcentaje de dicho material. Esto puede deberse a dos factores que se presentan de forma similar en concreto con polímero *estireno butadieno*: la interacción química entre las partículas del polímero y algunos productos de hidratación del cemento, especialmente el hidróxido de calcio (CH); y la porosidad generada en la zona de transición entre el cemento y el agregado (suelo), puesto que en esta área se presentan grandes cantidades de agua que generan un efecto de barrera, provocado por la acumulación del polímero en esa zona (Ollitrauly et al., 1998). En este caso aunque el látex utilizado fue de otro tipo se buscó evaluar el efecto de un polímero de origen natural (*poli-isopreno*) en la matriz de suelo-cemento, que a diferencia del concreto, el material predominante es suelo.

Conjuntamente otra de las posibles causas de la disminución en la resistencia a compresión en este experimento, puede ser comparada analógicamente con lo que

sucede en morteros poliméricos, en los que una vez que se hidrata el cemento, las capas de látex que se forman, -particularmente en la etapa de coalescencia<sup>2</sup>- proporcionan al material mayor resistencia al agua, evitando con esto la hidratación posterior de cemento en la matriz del material, dando como resultado una disminución en la resistencia mecánica (Jenni, 2005).

Mientras que con la adición conjunta de ambos materiales se nota el efecto negativo que provocan en la resistencia conforme se aumentan los porcentajes de ambos aditivos, aunque de igual forma que en la resistencia a flexión, en este caso las mezclas M15 y M16 se mantuvieron en el mismo rango que las que fueron elaboradas con 1.0% de látex, y las mezclas M17 y M18 cumplen con esta tendencia de proporcionalidad -mayor cantidad de jabón y látex adicionado resulta en menor resistencia a compresión-.

**Tabla 32 Variación de resistencia a la compresión de los especímenes de la fase II contra espécimen control**

<b>Relación de Crecimiento de Resistencia a la Compresión en Fase II</b>								
<b>Mezcla</b>	<b>M11</b>	<b>M12</b>	<b>M13</b>	<b>M14</b>	<b>M15</b>	<b>M16</b>	<b>M17</b>	<b>M18</b>
<b>% Variación</b>	<b>-20.32</b>	<b>-26.42</b>	<b>-49.29</b>	<b>-51.88</b>	<b>-52.04</b>	<b>-51.10</b>	<b>-65.67</b>	<b>-72.88</b>

En la Tabla 32 se distinguen los índices de variación en porcentaje de cada una de las mezclas respecto a la mezcla control, puede apreciarse que las mezclas que solo contienen jabón (M11 y M12) fueron las que tuvieron un porcentaje menor de reducción de la resistencia, mientras que las mezclas con el mayor contenido de látex (M17 y M18) tuvieron una disminución de resistencia a la compresión de 65.67 y 72.88% menos que los especímenes control, haciendo evidente que la inclusión de látex afectó significativamente esta propiedad evaluada en las mezclas.

---

<sup>2</sup> Proceso en que dos dominios de fase de composición esencialmente idéntica entran en contacto para formar un dominio mayor. El fenómeno principal que entra en juego es que los materiales optimizan su superficie de manera que minimizan su energía

En la Tabla 33 y en Tabla 34 se observa que el valor de probabilidad de error P es menor que 0.05 para la prueba Kruskal-Wallis, tanto para las adiciones de jabón y látex- jabón, por lo que se acepta la hipótesis alternativa, confirmando que existe una diferencia significativa en cuanto a la resistencia a compresión de los adobes compactados cuando se adiciona cualquiera de estos dos materiales. Los especímenes elaborados con látex fueron los que mostraron los rangos de significancia más altos y se nota distinto del jabón.

**Tabla 33 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para compresión en especímenes con jabón**

<b>Kruskal-Wallis Test: Compresión/Jabón</b>				
Jabón	N	Median	Rank	Z
0	5	83.76	12.80	2.94
0.5	5	64.39	6.40	-0.98
1	5	62.46	4.80	-1.96
Overall	15		8	
H= 8.96		DF= 2		<b>P= 0.011</b>

**Tabla 34 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para compresión en especímenes con látex-jabón**

<b>Kruskal-Wallis Test: Compresión/Látex-Jabón</b>				
Látex	N	Median	Rank	Z
0	5	83.76	33.00	3.54
1	10	41.17	20.60	0.95
2	10	40.83	19.60	0.58
3	10	24.40	6.30	-4.27
Overall	35		18	
H= 24.64		DF= 3		<b>P= 0.000</b>

### 4.2.3 Correlación entre resistencia a flexión y compresión

Como se describió previamente, existe una correlación lineal directa entre la resistencia a compresión y flexión en el concreto, teniendo en cuenta que los especímenes que se elaboraron en esta fase experimental contienen un 10% de cemento, se espera una correlación más alta que la encontrada en la fase I. La Figura 39 muestra la buena correlación según la ecuación de la recta ( $R^2= 0.926$ ) para los especímenes de las mezclas analizadas, así como la ecuación de la línea de tendencia.

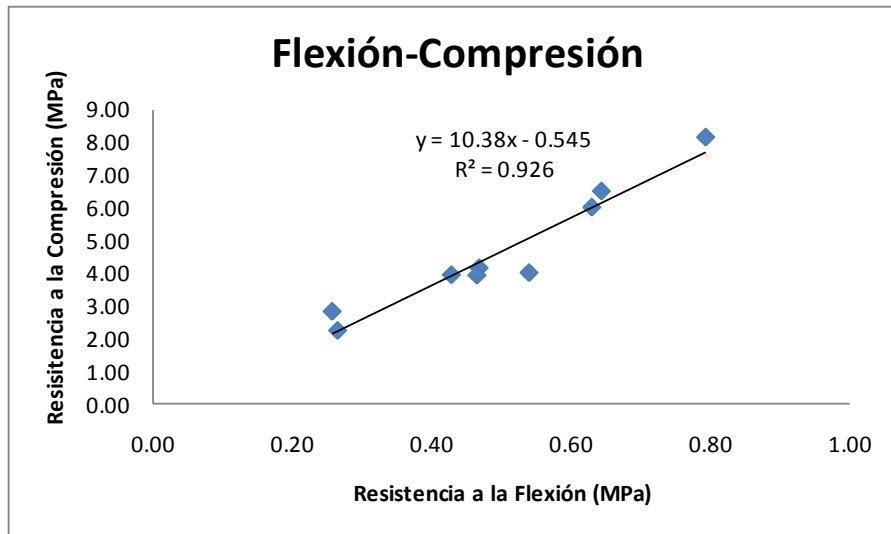


Figura 39 Correlación de resistencia a la flexión y compresión para los especímenes de la fase II

#### 4.2.4 Absorción de agua

La absorción de agua está determinada principalmente por el tamaño y distribución de poros en los materiales, esta propiedad de los mismos es deseable reducirla en muchos materiales compósitos, ya que el agua, puede causar daños irreversibles en ellos, como es el caso del concreto armado, en caso del adobe compactado y estabilizado con cemento es recomendable un valor de absorción “bajo” que permita resguardar los edificios construidos con ellos, de los agentes del clima y garantice una durabilidad prolongada de los mismos.

Los valores obtenidos en los especímenes de esta etapa experimental se muestran en la Tabla 35. Puede verse que las medias aritméticas de cada grupo de mezclas se encuentran en un rango de 9.04 a 16.58% de absorción de agua y que los valores de los coeficientes de variación van de 0.04 a 0.19, lo que nos refiere a variaciones altas entre cada grupo.

**Tabla 35 Resultados de absorción de agua en especímenes de la fase II en porcentaje**

	<b>Látex</b>									
	0			1		2		3		
	<b>M10</b>	<b>M11</b>	<b>M12</b>	<b>M13</b>	<b>M14</b>	<b>M15</b>	<b>M16</b>	<b>M17</b>	<b>M18</b>	
	0	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	
	16.14	8.17	8.99	16.67	15.75	17.24	15.38	15.02	12.63	
	15.86	11.47	9.62	16.66	12.71	16.72	15.12	15.63	14.95	
	14.61	9.51	8.26	15.25	15.24	16.47	15.75	16.73	16.84	
	14.93	13.04	8.97	16.79	12.17	17.07	10.07	14.76	14.19	
	18.19	8.99	9.39	13.58	15.15	15.39	15.21	18.18	14.99	
<b>Media</b>	<b>15.95</b>	<b>10.23</b>	<b>9.04</b>	<b>15.79</b>	<b>14.21</b>	<b>16.58</b>	<b>14.31</b>	<b>16.07</b>	<b>14.72</b>	
<b>Desv. Stdr.</b>	<b>1.40</b>	<b>1.98</b>	<b>0.52</b>	<b>1.39</b>	<b>1.64</b>	<b>0.73</b>	<b>2.38</b>	<b>1.40</b>	<b>1.52</b>	
<b>Coef. Var.</b>	<b>0.09</b>	<b>0.19</b>	<b>0.06</b>	<b>0.09</b>	<b>0.12</b>	<b>0.04</b>	<b>0.17</b>	<b>0.09</b>	<b>0.10</b>	

En la Figura 40 se observan los resultados en los que se representan las medianas del ensayo de absorción de agua de cada grupo de mezclas para la fase II de la investigación, en dicha figura se distingue el efecto favorable de la adición de jabón, pues en las mezclas M11 y M12 con 0.5 y 1.0% de jabón se redujo la absorción a un 9% respecto a los especímenes elaborados con la mezcla control que presentó un valor de 15%, esto es: una reducción de 35% de absorción con la adición de jabón respecto a la mezcla control .

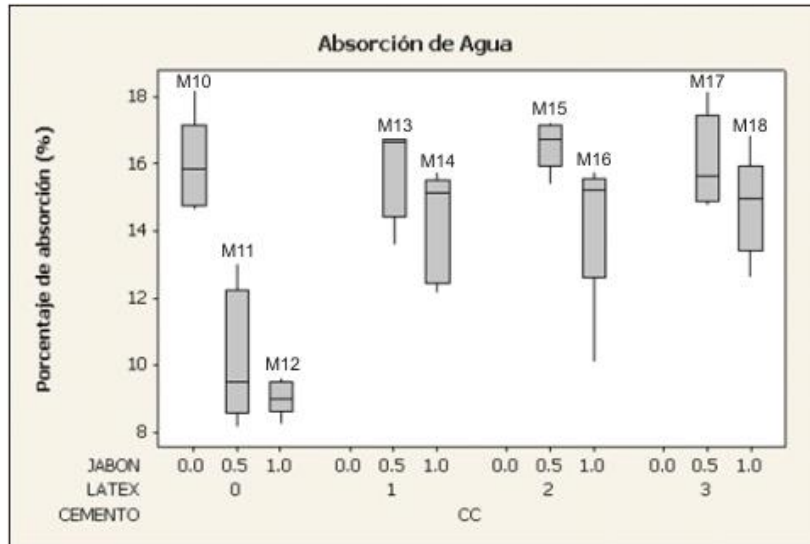


Figura 40 Resultados del ensayo de absorción en las probetas elaboradas en la fase II

Esto puede deberse principalmente a la naturaleza propia del jabón, que está compuesto básicamente por ácidos grasos saponificados cuya principal característica es su carácter hidrófobo (Sanz, 2002).

En relación con la adición de látex, el efecto de éste propició un impacto ligeramente positivo que provocó la reducción de absorción de agua, conforme se aumentó la cantidad de dicho material, como es el caso de las mezclas M14, M16 y M18; sin embargo, con adiciones de 0.5% de jabón dicha absorción es similar a la mezcla control (mezclas M13, M15 y M17). En la Tabla 36 se observan en forma de porcentaje, las diferencias entre las mezclas de esta fase y la mezcla control (M10).

Tabla 36 Variación de la absorción de agua de los especímenes de la fase II respecto a los especímenes control

Relación de Crecimiento de Porcentaje de Absorción en Fase II								
Mezcla	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18
% Absorción	-35.82	-43.28	-0.99	-10.92	3.96	-10.29	0.75	-7.71

El fenómeno que se observa respecto a la adición de jabón y látex es muy interesante puesto que la resistencia a flexión y compresión muestran una clara tendencia a disminuir, sin embargo, la absorción de agua se reduce en las mezclas elaboradas con jabón y se mantiene en las mezclas que se elaboran látex, respecto a las mezclas control, eso puede ser atribuido a que los polímeros llenan total o parcialmente los poros en los materiales, y



eso reduce el grado de conectividad de los poros y también la velocidad de penetración, tal como demostrara Ohama en un estudio en que la adición de látex en mortero, disminuyó la porosidad total y la profundidad de carbonatación (Ohama, 1987)

Según Mahyuddin el látex en ferrocemento disminuye la absorción de agua debido principalmente a la dispersión de los sólidos del polímero que tienden a formar películas que rodean a las partículas de agregado en ferrocemento y sellan los poros reforzando la matriz del material (Mahyuddin R., 2001)

La prueba Kruskal-Wallis para absorción de agua muestra que el valor de significancia en las mezclas que contienen jabón es alto, por lo que en este caso se acepta la hipótesis alternativa y se rechaza la nula (Tabla 37)

**Tabla 37 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para absorción en especímenes con jabón**

<b>Kruskal-Wallis Test: Absorción/Jabón</b>				
Jabón	N	Median	Rank	Z
0	5	15.86	13.00	3.06
0.5	5	9.51	6.30	-1.04
1	5	8.99	4.70	-2.02
Overall	15		8	
H= 9.7'		DF= 2	<b>P= 0.008</b>	
H= 9.71		DF= 2	<b>P= 0.008</b>	

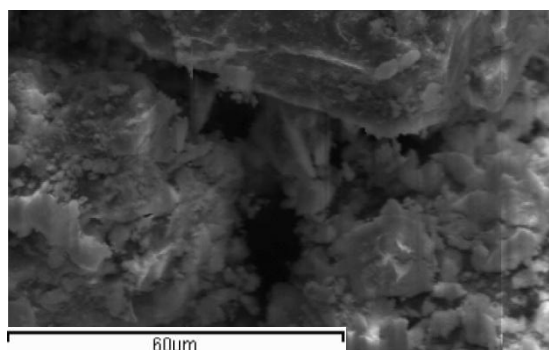
Por otra parte y respecto a la prueba de contraste Kruskal-Wallis el valor de significancia para las mezclas elaboradas con látex-jabón es muy bajo, ya que para la probabilidad de error se observó un valor de  $P= 0.735$ , lo que estadísticamente significa que no existe diferencia alguna entre las adiciones de látex-jabón y la mezcla control (Tabla 38), y lo que puede corroborarse en la Figura 40.

**Tabla 38 Nivel de significancia mediante la prueba Kruskal-Wallis para absorción en especímenes con látex**

<b>Kruskal-Wallis Test: Absorción/Látex-Jabón</b>				
Látex	N	Median	Rank	Z
0	5	15.85	19.60	0.38
1	10	15.25	16.30	-0.64
2	10	15.57	20.60	0.93
3	10	15.01	16.40	-0.58
Overall	35		18	
H= 1.28		DF= 3	<b>P= 0.735</b>	
H= 1.28		DF= 3	<b>P= 0.735</b>	

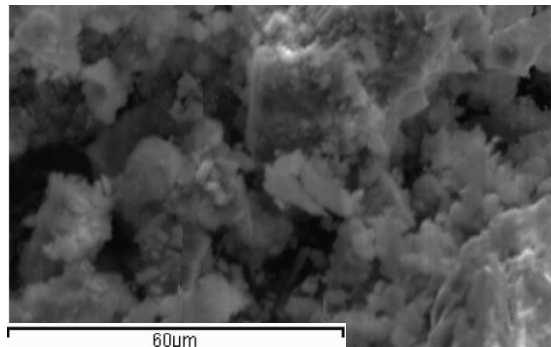
#### 4.2.5 Análisis de microscopía y DRX

Respecto a las muestras de la fase II se obtuvieron micrografías de la mezcla M10 (cemento 10%) que se muestran en Figura 41 en las que se puede observar la estructura de la matriz más compacta y homogénea respecto a las micrografías de la muestra M9, dicho cambio se debe principalmente a la formación de los compuestos de hidratación del cemento contenido en la mezcla, que primeramente recubren los granos del suelo y también forman una especie de membranas entre dichos granos (Figura 41), lo que hace más homogénea y compacta la matriz de la mezcla en relación con la mezcla M9. En la Figura 41 se puede ver que la cantidad y tamaño de poros disminuye considerablemente, en relación con las mezclas de la fase I, también es apreciable que los granos del suelo se ven recubiertos por los productos de hidratación del cemento, lo cual le confiere una mayor resistencia mecánica y reduce la absorción de las mezclas.



**Figura 41 Micrografía de la mezcla M10 (10% cemento)**

En la Figura 42 se muestra la micrografía de la mezcla M12 (10% cemento-2%ácidos grasos), en dicha figura se aprecia que la matriz del material es densa, y con tamaños de poros que van de 5 a 20 micrones ( $\mu\text{m}$ ). Se percibe también el mismo efecto del cemento en las partículas de la arcilla como en el caso de la mezcla M10, es decir, un efecto de recubrimiento de las mismas, así como de unión entre partículas provocada por la formación de los productos de hidratación del cemento entre las partículas del suelo.



**Figura 42 Micrografía de la mezcla M12 (10% cemento-1%ácidos grasos)**

De las mezclas de la fase II se obtuvieron también micrografías de la mezcla M18 (10% cemento-1.0%ácidos grasos-3%polimero) que se muestran en la Figura 43 y en la que se percibe la ausencia de los compuestos de hidratación del cemento o una formación menor de estos en relación a la muestra M10 y cuya morfología se presenta en forma de fibras, debido posiblemente al efecto del amoniaco contenido en el látex y que es usado como estabilizante del mismo. Por otra parte, las partículas del suelo se notan con una especie recubrimiento superficial que las aglomera formando partículas de mayor dimensión y les confiere una textura lisa provocada por el látex, en relación a los de la mezcla M10 cuya textura en las partículas del suelo se perciben fibrosas y de menor tamaño. Lo anterior demuestra que los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia a la compresión y absorción de agua se deben principalmente a la ausencia de los productos de hidratación del cemento.

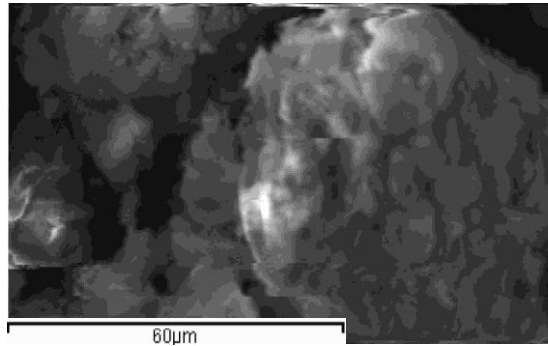


Figura 43 Micrografía de la mezcla M18 (10% cemento-2%ácidos grasos-3%polimero)

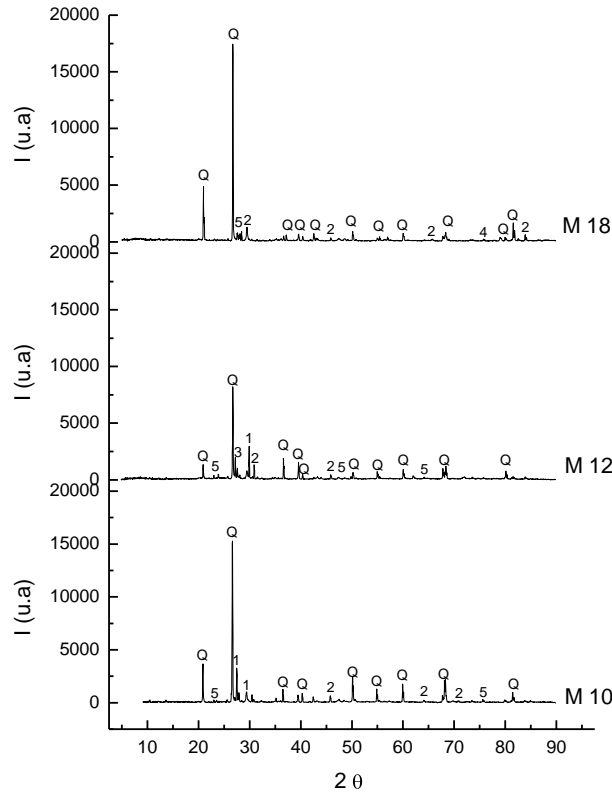
### ***Difracción de Rayos “X”***

Se obtuvieron difractogramas de las mezclas M10, M12 y M18 y se realizó un análisis global de difracción de rayos X, se encontró en estos la presencia de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) o cuarzo (Q), algunos ferroaluminatos de calcio ( $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2, 3\text{Fe}_{18}, \text{Ca}_2\text{Al}_5\text{Fe}_7\text{O}_{20}$ ) y silicato de calcio ( $\text{CaSiO}_3$ ), todos estos, propios del suelo, además de encontrarse algunos otros compuestos resultado de la hidratación del cemento en combinación con los compuestos contenidos en el suelo y las adiciones realizadas, dichos compuestos identificados fueron: aluminato de calcio ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ), carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) o calcita, silicato de calcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) y óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) o hematita.

En la Figura 44 se puede observar en el patrón de difracción de rayos “X” de la muestra M10, -la cual es la muestra de referencia de esta fase experimental-, la presencia de óxido de silicio y ferroaluminatos que son propios del suelo utilizado. También se nota la presencia de aluminato de calcio que es aportado por la adición del cemento en la matriz del suelo, así como carbonato de calcio que resulta del proceso de carbonatación del hidróxido de calcio con el bióxido de carbono que existe en el medio ambiente y la humedad contenida en los poros del material.

Dentro de la misma figura puede apreciarse el patrón de DRX de la mezcla M12, y en el cual, además de los compuestos observados en la mezcla de referencia, se observa también la presencia de silicato de calcio (calcita), el cual es potencializado por la adición

de los ácidos grasos emulsificados, y tiene como una de sus características una alta reactividad con ácidos débiles y se disuelven fácilmente en agua que contenga anhídrido carbónico pero no en agua pura (Porta, 2003).



**Figura 44 Patrones de Difracción de rayos “X” para adobes elaborados con las mezclas M10, M12 y M18. Las fases cristalinas detectadas fueron: óxido de silicio (Q), aluminato de calcio (1), ferroaluminatos (2), silicato de calcio (3), óxido de hierro (4) y carbonato de calcio (5)**

La Figura 44 muestra también el patrón de DRX de la mezcla M18, en relación con la mezcla M10, dicho patrón de difracción muestra el contenido de óxido de silicio, ferroaluminatos y carbonato de calcio, sin embargo, la presencia de aluminato de calcio contenido en la mezcla M10 y que es uno de principales productos de hidratación del cemento, no se percibe dentro de la mezcla M18, pero si la aparición de óxido de hierro que en la mezcla de referencia no se percibe, lo cual permite confirmar la ausencia de compuestos formados posteriormente a la hidratación del cemento.

### 4.3 Análisis comparativo de resultados entre fase I y fase II

De las dos fases experimentales se han observado comportamientos interesantes respecto al efecto de las adiciones en la matriz del adobe compactado y adobe compactado y estabilizado con 10% de cemento. En este apartado se presentan de forma conjunta los resultados obtenidos en dichas fases, para notar el efecto que tuvieron las adiciones elaboradas en los ensayos evaluados.

#### 4.3.1 Resistencia a la flexión

Los valores de resistencia a la flexión de ambas fases experimentales se muestran en la Figura 45 en la que se aprecia el efecto de la adición de cemento en la matriz original de suelo. Por una parte los especímenes de la mezcla M1 (suelo sin adición) presentaron una media de 0.08 MPa, mientras que los especímenes de la mezcla M10 (10% cemento-suelo) mostraron un valor de 0.79 MPa que representa un incremento en la resistencia a la flexión de ocho veces y media en relación con la mezcla M1.

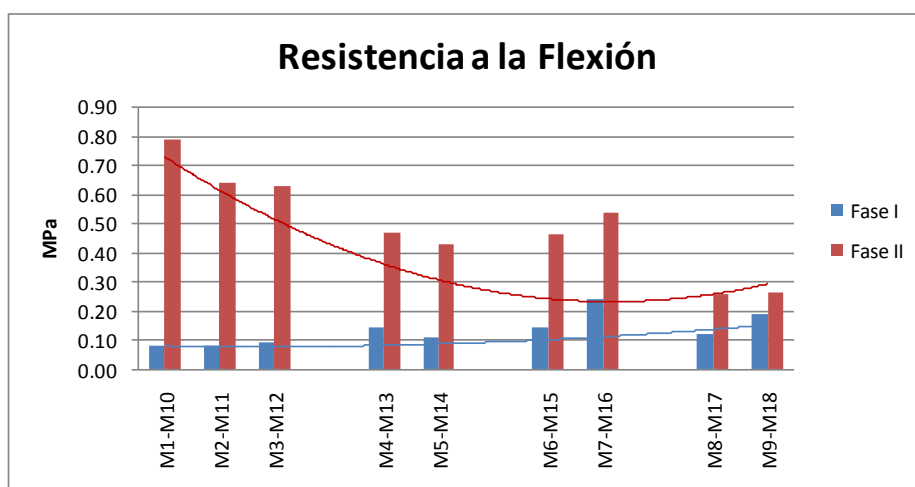


Figura 45 Efecto de la adición de los materiales de estudio en la resistencia a la flexión en las fases I y II

En la figura anterior también puede notarse -siguiendo las líneas de tendencia- que las adiciones de los materiales suplementarios en los especímenes elaborados con las mezclas de la fase II, tuvieron un efecto negativo muy marcado, contrariamente a los

especímenes de la fase I en los que se encontró una relación de ligero incremento de la resistencia a la flexión conforme se aumenta la cantidad de látex.

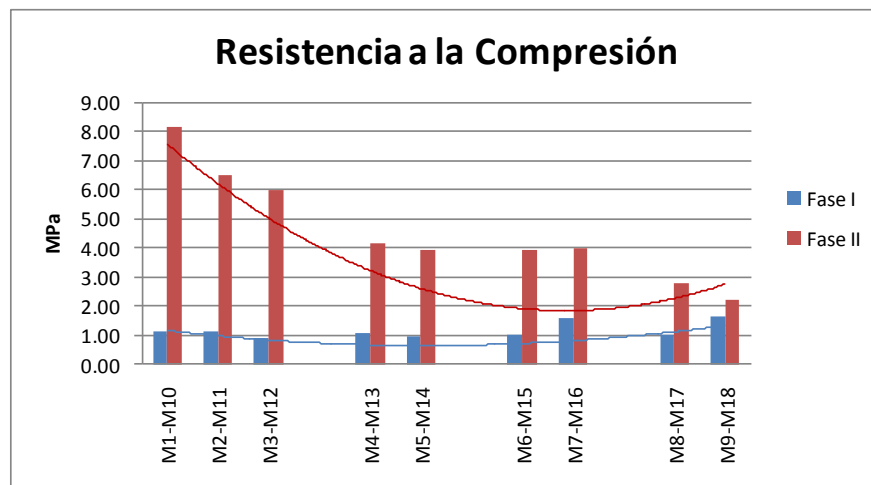
Respecto a las diferencias entre las mezclas de la fase I y II, se presentan en la Tabla 39 en porcentaje de variación los valores de la fase II en relación a los resultados de resistencia a la flexión de la fase I, el incremento de resistencia se nota más marcado entre las mezclas M1 y M10 con un crecimiento de 859.18% de la fase II respecto a la fase I

**Tabla 39 Variación de resistencia a la flexión entre las mezclas de la fase I y II**

Relación de Crecimiento de Resistencia a la Flexión en Fase II									
Mezcla	M1-M10	M2-M11	M3-M12	M4-M13	M5-M14	M6-M15	M7-M16	M8-M17	M9-M18
% Variación	859.18	678.11	597.12	221.70	464.94	226.58	126.20	115.11	41.76

### 4.3.2 Resistencia a la compresión

Los resultados de las pruebas de resistencia a compresión en ambas fases, se muestran en la Figura 46 donde se puede notar el efecto que tiene la adición del 10% de cemento en los especímenes elaborados con la mezcla M10 respecto a la mezcla M1 y en la que se percibe un incremento del 627.99%.



**Figura 46 Efecto de la adición de los materiales de estudio en la resistencia a compresión en las fases I y II**

Puede verse también el efecto de las adiciones de los materiales suplementarios en las mezclas de la fase II siguiendo la línea de tendencia; de la misma forma se puede apreciar el efecto en las mezclas de la fase I. Las diferencias entre los resultados de las mezclas de la fase I y II, se muestran en la Tabla 40 donde se notan los porcentajes de incremento de las mezclas de la fase II respecto a la fase I.

**Tabla 40 Variación de resistencia a compresión entre mezclas de las fases I y II**

<b>Relación de Crecimiento de Resistencia a la Compresión en Fase II</b>									
<b>Mezcla</b>	<b>M1-M10</b>	<b>M2-M11</b>	<b>M3-M12</b>	<b>M4-M13</b>	<b>M5-M14</b>	<b>M6-M15</b>	<b>M7-M16</b>	<b>M8-M17</b>	<b>M9-M18</b>
<b>% Crecimiento</b>	<b>627.99</b>	<b>459.21</b>	<b>571.27</b>	<b>283.06</b>	<b>299.47</b>	<b>275.31</b>	<b>150.29</b>	<b>179.41</b>	<b>36.24</b>

### **4.3.3 Absorción de agua**

En ambas fases experimentales se observaron efectos combinados de la adición de los materiales suplementarios, así como del tipo de adobe, ya que como se ha descrito, la primera fase consideró evaluar el efecto de la adición de látex y jabón en el adobe compactado, y en la segunda fase se evaluó el efecto de esos mismo materiales, en adobe compactado y estabilizado con cemento.

La Figura 47 muestra los resultados de la prueba de porcentaje de absorción en ambas fases experimentales. Puede distinguirse el efecto que tienen las adiciones de los materiales en estudio siguiendo las líneas de tendencia de cada fase. Los especímenes con 100% de absorción se desintegraron durante el proceso de la prueba, por lo que a manera de ilustración se presentan en la figura. El resto de los especímenes tuvieron resultados de absorción de agua respecto a su masa seca, en un rango de 14 a 16%.



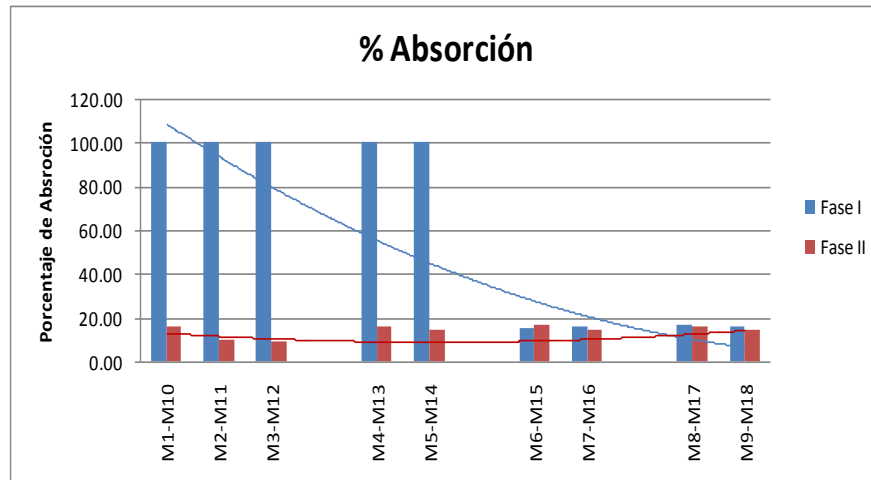


Figura 47 Efecto de la adición de los materiales de estudio en la absorción de agua en las fases I y II

Las mezclas de la fase I (M1 a M5) fueron las que se desintegraron durante la prueba de absorción, como se mencionó previamente, mientras que las mezclas M6-M9 tuvieron valores de absorción similares a las mezclas de la segunda fase, por lo que se puede apreciar un aporte realmente significativo en la disminución de la absorción de agua con la adición de 2 y 3% de látex en el adobe compactado sin estabilizar con cemento.

#### 4.4 Contraste de resistencia a la flexión, compresión y absorción de agua

Para contrastar los valores de resistencia a la flexión, compresión y absorción de agua obtenidos en esta investigación, se presentan en Tabla 41, los valores de resistencia mecánica y absorción de agua, obtenidos en diversas investigaciones, así como los valores mínimos establecidos por los reglamentos y normas de algunos países que utilizan el adobe compactado como material de construcción (NTE E.080) y por último los valores de la media de la mezcla que presentó el mejor resultado en la fase I.

**Tabla 41 Valores mínimos de resistencia a la flexión, compresión y absorción de agua en adobe compactado según norma peruana, CYTED y otras fuentes**

<b>Valores de Resistencia Mecánica y Absorción de Agua en Adobe Compactado</b>						
<b>Tipo de Ensayo</b>	<b>Norma Peruana</b>	<b>Habitaterra CYTED</b>	<b>Congreso Cuba</b>	<b>Congreso Habitat</b>	<b>CIIDIR Oaxaca</b>	<b>Mezcla M7</b>
Resistencia a compresión (Mpa)	1.20	1.20	1.75	1.95	1.30	1.60
Flexión simple (Mpa)	0.30	0.30	-	-	0.30	0.24
Porcentaje de Absorción (%)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	16.11

En la Tabla 41 se observa que la resistencia a la compresión de los adobes compactados elaborados con la mezcla M7 (1.0% jabón y 2.0% látex) se encuentran justo en la media de los valores de resistencia establecidos por la norma peruana y los resultados obtenidos en otras investigaciones. Puede verse también que la resistencia a la flexión es menor que la mínima establecida por la norma peruana y el CYTED, mientras que en lo referente a la absorción de agua, los valores obtenidos en el adobe evaluado en la presente investigación, se ubica en 16% de absorción, que es 4% menos absorbente que lo establecido por la norma.

Con base en lo anterior, se puede establecer que el adobe elaborado con la mezcla M7 está por encima de los valores establecidos por algunas normas internacionales, y en el rango de valores encontrados en otras investigaciones, por lo que se puede utilizar dicha mezcla para la elaboración de adobes para edificación.

Por otra parte, la Tabla 42 presenta los valores mínimos de resistencia a la flexión, compresión y absorción de agua, en bloques de construcción que establece la Norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2005 y aclara que: si los valores se encuentran por debajo de los establecidos en ella, pueden ser utilizados si el reglamento local de construcción lo permite. Muestra también algunos valores de resistencia obtenidos en otras investigaciones sobre adobe compactado y estabilizado con materiales cementantes.

**Tabla 42 Valores mínimos de resistencia a la flexión, compresión y absorción de agua en bloques para la construcción según la norma mexicana C-404 y otras fuentes**

<b>Valores de Resistencia Mecánica y Absorción de Agua en Adobe Compactado</b>							
<b>Tipo de Ensayo</b>	<b>NMX (bloques)</b>	<b>NMX (Tabicones)</b>	<b>Regalado Reyes</b>	<b>CIIDIR Oaxaca</b>	<b>M10</b>	<b>M11</b>	<b>M12</b>
Resistencia a compresión (Mpa)	5.88	9.80	8.41	8.32	8.16	6.50	6.01
Flexión simple (Mpa)	0.49	0.78	0.78	0.79	0.79	0.64	0.63
Porcentaje de Absorción (%)	9-20	9-20	14.95	15.60	15.95	10.23	9.04

En la Tabla 42 se puede ver que los adobes elaborados con las mezclas M10, M11 y M12 (10% cemento, 10% cemento-0.5% jabón y 10% cemento-1.0% jabón) presentan valores de resistencia a la flexión, compresión y absorción de agua, por encima de los establecido por la norma mexicana, para bloques de construcción. Mientras que la mezcla M10 (10% cemento) se ubica incluso muy cercana a los valores mínimos establecidos por la norma, para lo que define como tabicones, que son los materiales que caracteriza como los más resistentes a la flexión, compresión y absorción de agua, por lo que, se puede establecer que los adobes elaborados con esas mezclas cumplen con la norma y son recomendables para la construcción.

## CAPITULO V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

En la presente investigación se ha evaluado y comparado el efecto de la adición de un polímer (*látex*), y ácidos grasos emulsificados (jabón) en diferentes porcentajes de adición en adobe compactado y adobe compactado y estabilizado con 10% de cemento. Con base en los ensayos de resistencia a compresión, flexión, y absorción de agua se presentan las siguientes conclusiones:

En la evaluación de las propiedades estudiadas en el adobe compactado:

- Se obtuvo que el látex al ser mezclado directamente con el suelo, promueve la formación inmediata de grumos que hicieron prácticamente nulo un mezclado homogéneo, por lo que se utilizó la solución de jabón como agente estabilizante que permitió mezclar de forma homogénea el látex con el suelo, favoreciendo las condiciones de trabajo que se requieren en campo
- La adición de jabón al suelo con que se elaboraron adobes compactados no provoca mejoría directa en las propiedades que se evaluaron (resistencia a la flexión, resistencia a la compresión y absorción de agua);
- La adición de jabón en 0.5 y 1.0% al látex provoca un efecto retardante de la plastificación en éste, permitiendo con esto mayores tiempos de mezclado de látex con el suelo, así como un mezclado más homogéneo, siendo 1.0% de jabón combinado con 2% de látex la adición que presenta mejores resultados para las propiedades evaluadas en esta investigación;
- El látex (poli-isopreno), tiene un impacto positivo en la resistencia mecánica y absorción de agua en el adobe compactado, sin embargo, en proporciones mayores de 2% de látex, dicho efecto disminuye, por lo que este porcentaje se considera como el óptimo combinado con 1.0% de jabón como estabilizante, mezcla M7;

- Los resultados del contraste de resistencia a la flexión, compresión y absorción de agua de la mezcla M7 contra la norma peruana y CYTED, permiten sugerir el uso del adobe compactado elaborado con dicha mezcla, como material recomendable para la construcción.

De las propiedades evaluadas en el adobe compactado y estabilizado con 10% de cemento se obtuvo que:

- La adición de jabón presentó un impacto negativo en las propiedades de resistencia a compresión y flexión, sin embargo, en la absorción de agua el efecto fue positivo, reduciendo la absorción de los especímenes elaborados con 0.5 y 1.0% de jabón;
- Respecto a la adición de látex combinado con los dos niveles de jabón estudiados, se observó que las mezclas elaboradas con estas combinaciones provocaron la disminución de las propiedades de resistencia a compresión y flexión, sin embargo, la absorción de agua se mantuvo en el mismo rango que las muestras control y que fue de 9.04 a 16.58%;
- Los adobes elaborados con la mezcla control (10% de cemento) tuvieron valores de resistencia a compresión, flexión y absorción de agua, muy similares a los que presentan los tabicones, en la Norma Mexicana, además, las mezclas con la adición de jabón (M11 y M12), presentaron valores de resistencia a la flexión, compresión y absorción de agua, por encima de los que establece la misma norma para bloques, por lo que dichas mezclas (M10, M11 y M12) pueden utilizarse para elaborar adobes compactados para la construcción.

## 5.2 Recomendaciones

Del aprendizaje obtenido durante el desarrollo de la presente investigación conjuntamente con la experiencia generada, se sugieren las siguientes recomendaciones:

Es necesario conocer el efecto de la adición de jabón en el látex sin adición de amoníaco, para evaluar su interacción y la posibilidad de su utilización como retardante de la plastificación del mismo.

Se recomienda continuar investigando sobre el efecto del látex (*Hevea Brasiliensis* Muel Ar.) en pastas de cemento hidratado, para conocer la interacción de estos materiales entre sí.

Es recomendable evaluar la interacción de los materiales que se adicionaron al adobe compactado en esta investigación con otro tipo de materiales cementantes, tales como: cal, yeso, o materiales que contengan o promuevan la formación de aluminato de calcio.

Debe continuarse la investigación sobre el efecto de las adiciones realizadas en el adobe compactado, adobe compactado y estabilizado con cemento en la resistencia ante cargas en muros construidos con estos materiales, y junteados con morteros elaborados con estas mismas mezclas y otras tales como: cemento, cemento-arena y cemento-cal-arena, con la finalidad de generar conocimiento sobre la materia, así como para desarrollar la tecnología constructiva más apropiada para este material.

Generar las bases para la elaboración de un apartado de recomendaciones y normas técnicas complementarias para la construcción con adobe compactado que se integren en los reglamentos de construcción de todo el país, promoviendo y estimulando la construcción con materiales de este tipo, que por su origen natural y proceso de manufactura, reducen la contaminación del medio ambiente, aprovechan, integran y conservan los recursos naturales.

## Bibliografía

### Normas

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) 2003. Normas de Construcción. Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales. Parte 1. Título 03-06

ASTM C150-05 Standard Specification for Portland Cement

ASTM E 70-90 Standard Test Method for pH of Aqueous Solutions with the Glass Electrode.

ASTM C31/C31M-03a Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field.

NMX-C-404-ONNCCE-2005 Industria de la Construcción –Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones para Uso Estructural- Especificaciones y Métodos de Prueba

NMX-AA-034-SCFI-2001 Análisis de Agua- Determinación de Sólidos y Sales Disueltas en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas- Método de Prueba

Norma NTE E0.80 Adobe del ININVI: Construcciones de Adobe. Norma Técnica para construcciones de adobe. Disposiciones especiales para diseño sismo resistente, Perú

Red Habitaterra. Colectivo de autores: Recomendaciones para la elaboración de normas de edificaciones de adobe y tapial, pp 11-34. Habitaterra CYTED, Perú-Brasil, 1993

### Trabajos citados

Achenza M., Fenu L. (2005). On earth stabilization with natural polymers for earth masonry construction. *Materials and Structures* , 21-27. Volume 21

Al-Rawas Amer Ali, Hago. A. (2005). Effect of lime, cement and sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of expansive soil from Oman. *Building and Environment* , 681-687. Volume 40.

Albayrak Ali Tugrul, Muzaffer Yassar (2005). Investigation of the effects of fatty acids on the compressive strength of concrete and the grindability of the cement. *Cement and Concrete Research*, 400-404. Volume 35.

Alva B. A. (2004). *The conservation of earthen architecture*. The Gette Conservation Institute Newsletter.

Alvarez Vera A, Vázquez A. (2003). *Relación entre la absorción de agua a cortos tiempos y las propiedades mecánicas de mezclas de almidón/celulosa modificada y sus compuestos con fibras sisal cortas*. SAM/CONAMET.

- Anderson, Leavers, Rawlings, Alexander. (1998). *Ciencia de los materiales*. México: Limusa.
- Arabi M, Wild S. (1986). *Microstructural development in cured soil-lime composites*. Mater Science, 497-503. Volume 21
- ARMY, U.S.A. (1994). *Soil stabilization for pavements*. USA: Joint Departments of the Army and Air Force, USA, TM 5-822-14/AFMAN 32-8010.
- Bahar R., Benazzoug M. (2004). Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement and Concrete Composites* , 811-820. Volume 26
- Bentz Dale, Quenard Daniel. (2000). Microstructure and transport properties of porous building materials. *Materials Structures* , 147-153. Volume 31
- Blondet Marcial, Villa Garcia G, Brzev S. (2003). *Construcciones de adobe resistentes a los terremotos*. Perú: EERI/IA EE.
- Botasso HG, F. E. (2003). *Estabilizantes ionicos de suelos para la construcción*. La Plata, Argentina: Jornadas SAM/CONAMET/Simposio Materiales.
- Calabria Juliana, Vasconcelos L. (2008). Microstructure and chemical degradation of adobe and clay bricks. *Ceramics International* , 665-671. Volume 35
- CNA. (1990). *Mecánica de suelos, instructivo para el ensaye de suelos*. México, D.F.: CNA.
- Delgado Jiménez Carmen, Cañas Guerrero Ignacio. (2006). Earth building in Spain. *Construction and Building Materials* , 679-690. Volume 20.
- Domínguez M., I. S. (1995). *Las arcillas: el barro noble*. México, D.F.: Fondo de Cultura Economica.
- Facundo Peláez. (2007). Los plásticos. *Ciencias* , 24-30.
- Farías, E. (1994). *Física de Suelos*. México: Trillas.
- García Romero E., M. S. (2005). *Las arcillas: propiedades y usos*. Madrid, España: Universidad Complutense.
- García Troncoso N.L., C. L. (2009). Correlaciones entre ensayos destructivos y no destructivos para hormigones de alta resistencia con agregados calcáreos. *Espol* , 14-21.
- Goodhew Steven, Griffiths Richard. (2005). Sustainable earth walls to meet the building regulations. *Energy and Building* , 451-459. Volumen 37
- Granger, F. (1993). *De Architecture II*. Cambridge: Loeb Classical Library.
- Grupta T.N. (2000). *Materials for the human habitat in 21 Century*. E.U.A.: MRS Buletin.



Guettala A., Abisi A. (2006). Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Construction and Building Materials* , 119-127. Volume 20

Hall Matheew, Djerbib Youcef. (2004). Rammed earth sample production; context, recommendations and consistency. *Construction and Building Materials* , 281-286. Volume 18

IMCYC. (2008). Ingeniería del suelo-cemento. *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto*, 1-24.

INIFAP. (2008). *Campo Experimental El Palmar*. Tezonapa, Veracruz: S.E.

Investigación y Desarrollo. (30 de Marzo de 1999). Paulina y la historia de una compactadora de Adobe. *Periodismo de Ciencia y Tecnología* , págs. 1-1.

Jahn, G. V. (2000). Microcurso A8. *Arquitectura de Barro* (pág. 14). Caracas, Venezuela: ICVA Venezuela.

Janotka I, Madejová. J. (1996). Behavior of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in the presence of the set styrene-acrylate dispersion. *Cement and Concrete Research* , 26-35. Volume 26

Jenni A, Zurbruggen R. (2005). Changes in microstructures and physical properties of polymer-modified mortars during wet storage. *Cement and Concrete Research* , 79-90. Volume 36

Juárez Badillo R. (1997). *Mecánica de suelos: Fundamentos de mecánica de suelos*. México, D.F.: Limusa.

Khumar Mehta, Paulo Monteiro. (1993). *Concreto. Estructura, propiedades y materiales*. USA: Pretince-Hall.

Kosmatka H. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. EU: Portland Cement Association.

Kosmatka H, P. W. (1992). *Diseño y control de mezclas de concreto*. México, D.F.: IMCYC.

Linstromberg Willian W. (1979). *Curso breve de química orgánica*. España: Reverte.

López Lara Teresa, Hernández Zaragoza J. (2004). Mineralogical characterization of stabilized soils. *Mechanics of Time-Dependent Materials* , 155-163.

Luisa Parra M, William Batty. (2006). *Thermal behaviour of adobe constructions*. Science Direct, Building and Environment. Volume 41

Mahyuddin R., M. Z. (2001). Durability studies of blended natural-synthetic polymer modified mortar and ferrocement. *Seventh international symposium on ferrocement and reinforced cement composites* (págs. 431-439). Singapore: National University of Singapore.

Ortiz Guzman Margarito. (2006). *Determinación del módulo de elasticidad y la relación de Poisson del adobe compactado*. Oaxaca, México: Instituto Tecnológico de Oaxaca.

Martinez Reyes Jacobo. (2007). *Caracterización de la reactividad puzolánica de materiales de origen natural, industrial y desperdicio agrícola*. Oaxaca, México: CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca.

Mitchell, J. (1976). *Fundamentals of soils behaviour*. New York: John Wiley & Sons.

Montgomery. (2005). *Análisis Estadístico de Datos*. México: Limusa.

Mroueg Ulla-Maija, Wallstrom Margareta. (2002). By-products and recycled materials in earth construction in Finland: an assessment of applicability. *Resources, Conservation and Recycling* , 117-129. Volume 35

Neville A., J. B. (1998). *Tecnología del concreto*. México, D.F.: Trillas.

Ngowi Alfred B. (1997). Improving the traditional earth construction: a case of study of Botswana. *Construction and Building Materials* , 1-7. Volumen 11

NRMCA. (2008). CIP 16- Resistencia a flexión del concreto. *Hormigón. El concreto en la práctica. ¿Qué, por qué y como? National Ready Mixed Concrete Association* , 1-2.

Nuñez S, M. d. (2001). *Introducción a la Reología*. México D.F.: IPN.

Nurhayat Dimergencia. (2008). The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization. *Construction and Building Materials* , 1220-1224. Volume 22

O'Meara SM. (2002). *Desde Rio a Johannesburgo; Gobernanza urbana, pensar globalmente, actuar localmente*. World Summit Policy Briefs.

Ohama Yoshiko. (1987). Principle of latex modification and some typical properties of latex-modified mortars and concretes. *ACI Materials Journal* , 511-518. Volume 21

Ollitrauly-Fitchet R. (1998). Microstructural aspects in a polymer-modified cement. *Cement and Concrete Research* , 1687-1693. Volume 28

ONU. (1996). Construcción Antisísmica con Adobe Estabilizado y Bambú. *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo* , 12-24.

Oxford Instrument Microanalysis Group. (1997). *Link ISIS operator's guide*. England. UK: Oxford instruments (UK) Limited microanalysis group.

Pavia S, Bolton J. (2000). *Stone brick and mortar*. Ireland: Wordwell Bray.

Peris Mora Eduardo. (2007). Life cycle sustainability and the transcendent quality of building materials. *Building and Environment* , 1329-1334. Volume 42

- Pineda Piñon Jorge, Vega-Durán J. (2007). Enhancement of mechanical hydrophobic properties of adobes for building industry by the addition of polymeric agents. *Building and Environment* , 877-883. Volume 42
- Poblete V, P. M. (2001). *Ciencia de los Materiales "Microscopia Electrónica de Barrido"*. Universidad de Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Popov, E. P. (1982). *Mecánica de materiales*. Mexico, D.F: Limusa.
- Porta J., L. A. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid España: Mundi Prensa.
- Ralph A. Burns. (2004). *Fundamentos de química*. USA: Pretince Hall.
- Ramachandran, V. F. (2000). *Concrete Sciencie. Concrete Admixtures Handbook*. USA: Pretince Hall.
- Real Academia Española. (2001). *Diccionario de la lengua española*. España: Espasa Calpe.
- Regalado Reyes I. (2007). *Mejoramiento experimental de la calidad del adobe compactado estabilizado con cemento tipo CCP-30R*. Oaxaca, México: Instituto Tecnológico de Oaxaca.
- Reyes Ortíz O. J, M. S. (2001). Empleo de aceite quemado para mejorar las propiedades mecánicas de bases y subbases granulares. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* , 55-58.
- Rico, A. (2005). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y autopistas 2*. México, D.F.: Limusa.
- Riego, C. N. (2001). *Compactación de Suelos Agrícolas*. Santiago de Chile: Trillas.
- Rodríguez Díaz M. A. (2003). *Aplicación Tecnológica del Adobe Estabilizado*. España-Cuba: Universidad de Oviedo & Universidad Central de las Villas.
- Ru Wang, Pei-Ming Wang, Xin-Gi Li. (2004). Physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber emulsión modified cement mortars. *Cement and Concrete Research* , 900-906. Volume 35
- Rubio-Avalos J. C, Manzano Ramírez A, Pérez Roble J.F. (2005). Flexural behavior and microstructure analysis of a gypsum-SBR composite material. *Materials Letters* , 230-233. Volume 59
- SAHOP. (2002). *Epecificaciones generales de restauración*. Oaxaca, México: Secretaria de Asentamientos Humanos y Obras Públicas.
- Saija M. Leo (1995). Waterproofing of portland cement mortars with a specially designed polyacrylic latex. *Cement and Concrete Research* , 5003-5009. Volume 25

Sakai Etsuo, Sujita Jhon. (1995). Composite mechanism of polymer modified cement. *Cement and Concrete Research* , 127-135. Volume 25

Sands, D. E. (1993). *Introduction to crystallography*. New York: W.A. Benjamin, Inc.

Sanz Berzosa I. (2002). *Prácticas de química orgánica: experimentación y desarrollo*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

SCT. (2003). Normas de Construcción. En S. d. Transportes, *Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales*. México, D.F.: SCT.

Seymour R. B., C. C. (1996). *Introducción a la química de los polímeros*. España: Reverte.

Somayaji S. (1995). *Civil Engineering Materials*. New Jersey: Prentice Hall.

Sowers, G. B. (1995). *Introducción a la Mecánica de los Suelos y Cimentación*. EUA: Macmillan.

Stancato A. C, Burke A. K. (2005). Mechanism of a vegetable waste composite with polymer-modified cement (VWCPMC). *Cement and Concrete Composites* , 599-603. Volume 27

Su Z, S. K, Bijjen M. J. (1991). Influence of polymer modification on the hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research* , 21-44. Volume 21

Summers D. (1983). *Manual de química*. México, D.F.: Grupo Editorial Iberoamericano.

Ugaz Palomino R, T. C. (2001). *Ensayos sobre estabilización de suelos con el aditivo RBI-81*. Perú: Congreso Nacional de Ingeniería Civil.

Velasco U. M. (2007). *Los polímeros, síntesis, caracterización, degradación y reología*. México, D.F.: IPN.

Venkatarama Reddy, Ajay Gupta. (2006). Strength and elastic properties of stabilized mud block masonry using cement-soils mortars. *Materials in Civil Engineering* , 472-476.

Xian-qing Xie, Tong-xian Fan, Bing-He Sun.(2003). Dry sliding friction and wear behavior of woodceramics. *Materials Science and Engineering* , 287-293. Volume 342

Younoussa Millogo, Hajjaji Mohamed, Ouedraogo Raguinalba(2008). Microstructure and physical properties of lime-clay adobe bricks. *Construction and Building Materials* , 2386-2392. Volume 22

## **Anexos**

## **Procedimientos de Pruebas del Suelo**

### ***Secado parcial***

Se realiza con el fin de facilitar la disgregación y manejo de las muestras, cuando su contenido de agua es tal, que no se pueden disgregar fácilmente.

Para secar las muestras al aire o al sol a temperatura ambiente, se extiende la misma en las charolas o sobre una superficie sensiblemente horizontal, lisa y limpia, para que sea fácil recogerla, evitar la pérdida de finos y su contaminación.

### ***Disgregación***

Se realiza con el fin de separar las diferentes partículas aglomeradas que constituyen la muestra. La disgregación de la muestra se efectúa sin romper partículas duras, llevándose a un grado al que permita reproducir en lo posible las condiciones de utilización del material en el campo.

El material se criba por la malla N°4 (4.75mm) apartando la fracción que pasa esta malla.

El material retenido se criba en la malla 3" (75mm) y la fracción retenida se coloca en charolas de lámina, donde se disgrega hasta obtener partículas que ya no sean disgregables. El material disgregado se criba nuevamente por la malla 3"; se obtiene y se registra la masa de la fracción retenida con aproximación de 10gr. y se calcula su porcentaje con relación a la masa total de la muestra.

El material disgregado y cribado que pasa la malla 3", se agrega al que inicialmente la pasó y se criba por la malla 2" (50mm), repitiendo el mismo procedimiento de cribado, disgregado y cálculo descritos anteriormente. Se repite la misma operación con las mallas 1" (25mm), 3/8" (9.5mm) y N°4(4.75mm).

### ***Cuarteo de muestras***

Debe realizarse con el fin de obtener de una muestra, porciones representativas de tamaño adecuado para efectuar las pruebas de laboratorio que se requieran.

Se mezcla 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 sensiblemente horizontal, lisa y limpia, de preferencia cubierta con una lona. 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.

Se forma un cono truncado. Enseguida, el cono truncado se separa en cuadrantes sensiblemente iguales. Sobre una charola se junta el material de dos cuadrantes opuestos. 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.

### ***Peso volumétrico seco suelto***

Consiste en obtener la relación entre el peso del material y su volumen, una vez que la muestra respectiva ha sido debidamente preparada y después corregir el valor encontrado de acuerdo con el contenido de agua.

De la muestra del material obtenido, que se secó, disgregó y separó se toma la cantidad necesaria para llenar el recipiente de 10L. se homogeneiza el material mediante mezclado, para después, empleando un cucharón de lamina y utilizando como referencia un escantillón, llenar el recipiente, dejando caer el material desde una altura de 20cms evitando el reacomodo por movimientos indebidos. Posteriormente se enraza el material utilizando una regla. Se obtiene la masa del recipiente y finalmente se determina el contenido de agua.

El peso específico o volumétrico del material seco y suelto, se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$\gamma_d = \frac{100(W_{rm} - W_r)}{V(100 + \%W)} = \frac{100 W_m}{V(100 + \%W)} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$\gamma_d$ : Es el peso específico o volumétrico del material seco y suelto, en kilogramos por metro cúbico.

$W_{rm}$ : peso del recipiente conteniendo el material, en kg.

$W_r$ : peso del recipiente contenido en el recipiente, en kg

$W_m$ : peso del material contenido en el recipiente, en kg

$V$ : volumen del recipiente o del material contenido en el mismo, en metros cúbicos

$\%W$ : contenido de agua remanente en el material.

### ***Granulometría***

Permite determinar la composición por tamaños (granulometría) de las partículas que integran los materiales empleados para terracerías, mediante su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas. El paso del material se hace primero a través de las mallas con aberturas más grande, hasta llegar a las cerradas, de forma que los tamaños se van reteniendo, para así obtener la masa que se tiene en cada malla, calcular su porcentaje respecto al total y determinar el porcentaje de la masa.

#### ***Selección del material para la prueba***

De la muestra del material se apartan aproximadamente 15 kg. Se obtiene la masa de este material

#### ***Obtención de las porciones de prueba***

Para realizar la prueba, del material apartado se separa la grava de la arena con finos. Se vacía poco a poco y cuidadosamente el material sobre la malla N°4 (4,75mm), sin sobrepasar la capacidad de la malla y recolectando el material que pasa en una charola.



Se vierte en la balanza la porción retenida en la malla N°4; se determina su masa, que representa la grava, y se regresa a la charola dicha porción. De la misma forma se obtiene la masa de la fracción que pasa dicha malla, que representa la arena con finos de la muestra.

De la fracción de material que pasó la malla N°4, se obtiene una porción de 10gr para determinar su contenido de agua. De la fracción restante que pasó dicha malla y que tiene el contenido de agua original, se obtiene una porción que corresponda aproximadamente a 200gr de material seco.

#### ***Cribado de la fracción de material retenido en la malla N°4***

La porción de material retenido en la malla N°4, se criba por la malla 3" y menores. Para el cribado, el material se vierte poco a poco y cuidadosamente por cada malla, a la que se le aplica un movimiento vertical y de rotación horizontal, con el fin de mantener al material en constante movimiento para permitir que las partículas de tamaños menores pasen a través de las aperturas y recolectarlas en una charola. El material retenido se coloca en otra charola

De la misma forma, la porción del material que pasó la malla 3", se criba por la malla 2" y así sucesivamente por todas las mallas para grava, obteniendo la masa del material retenido en cada una.

#### ***Cribado de la fracción de material que pasa por la malla N°4***

La porción de material que pasó la malla N°4, se coloca en un vaso metálico donde se le agregan aproximadamente 500cm<sup>3</sup> y se deja reposar durante 12 horas como mínimo.

Posteriormente se lava a través de la malla N°200, para lo cual:

- Con ayuda de una varilla con punta de bala se agita, en forma de ochos el contenido del vaso durante 15 seg. para formar una suspensión.
- Se deja reposar dicha suspensión durante 30 seg. e inmediatamente después se decanta sobre la malla N°200.
- Para facilitar el paso de las partículas finas a través de las malla, se aplica sobre esta un chorro de agua a baja presión.
- Se repite el procedimiento de lavado, hasta que el agua decantada salga limpia.

El material retenido en la malla N°200 se regresa al vaso metálico, utilizando un poco de agua, misma que se decanta al final de la operación, pero evitando el arrastre de partículas.

Se seca el material dentro del vaso metálico hasta una masa constante, manteniéndolo en el horno durante un lapso no menor de 16hr, a una temperatura de 105 °C.

posteriormente se retira del horno y se deja enfriar dentro del secador hasta temperatura ambiente.

Una vez ensambladas las mallas para arena, se vierte el material seco y frío sobre la malla superior y se coloca la tapa.

Se efectúa la operación de cribado imprimiendo al juego de mallas un movimiento vertical y de rotación horizontal durante 5 min, en esta operación es conveniente emplear el agitador mecánico.

Concluido el cribado, se quita la tapa y se separa la primera malla (N°10), la cual se agita sobre una charola hasta que estime que la masa del material que pasa dicha malla durante un minuto no sea mayor a 1 gr. El material depositado en la charola, se vierte sobre la siguiente malla (N°20). Este procedimiento de cribado se repite de forma subsecuente con cada una de las mallas restantes.

Finalmente se obtienen las masas de los materiales retenidos en cada una de las mallas y se anotan las masas con aproximación de 0.1gr.

El peso de la muestra seca se determina por medio de la siguiente fórmula:

$$Wms = Wfg + Wff = Wm_1 + \left(\frac{Wm_2}{1+w}\right) \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

Wms: peso de la muestra representativa del material seco, en gr

Wfg: fracción retenida por la malla N°4.75 al no tomarse en cuenta la humedad.

Wff: peso de la fracción que pasa la malla N°4 de la muestra seca.

Wm1: peso de la fracción retenida en la malla N°4 de la muestra original húmeda.

Wm2: peso de la fracción que pasa la malla N°4.

### **Limites de consistencia**

Estas pruebas permiten conocer las características de plasticidad de la porción de los materiales para terracerías que pasan la malla n°40(0.425mm), cuyos resultados se utilizan principalmente para la identificación y clasificación de los suelos. Las pruebas consisten en determinar, el límite líquido, -este se considera como la frontera entre los estados semilíquidos y plástico-. El límite plástico, que se considera como la frontera entre los estados plástico y semisólido. El índice plástico se calcula como la diferencia entre los límites líquido y plástico.

De la muestra de material se aparta, una porción de tamaño tal que, una vez cribada en forma manual por la malla N°40, se obtengan aproximadamente 300gr del material que pase esa malla, éste se coloca en una charola y se desecha el material retenido.

De la fracción que pasa se separan aproximadamente 250 gr, se obtiene y se registra la masa del material separado, con aproximación de 0.01gr. Se coloca el material separado en un recipiente apropiado, se le adiciona el agua necesaria para saturar el material y se deja en reposo durante aproximadamente 24hrs.

### **Limite líquido**

El equipo necesario para efectuar esta prueba es la copa de Casagrande, balanza, horno, desecador, vaso o recipiente, cápsulas de porcelana, espátula, cuentagotas, vidrios de reloj y paño.

De la fracción del material preparada, se toma una porción de aproximadamente 150gr que se coloca en la cápsula de porcelana donde se homogeneiza utilizando la espátula. En la copa de Casagrande, previamente calibrada, se coloca una cantidad suficiente de material para que, una vez extendido con la espátula, se alcance un espesor de 8 a 10 mm en la parte central de la copa.

Con una pasada firme del ranurador se hace una abertura en la parte central del material contenido en la copa, para lo cual, éste se mantendrá siempre normal a la superficie interior de la copa.

Colocado y ranurado el material, se acciona la manivela del aparato para hacer caer la copa a razón de dos golpes por segundo, registrando el numero de golpes necesarios para lograr que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13mm.

Logrado lo anterior se toma con la espátula aproximadamente 10gr de material de la porción cerrada de la ranura y, para determinar su contenido de agua. Mediante el cuenta gotas, se agrega agua al material en la cápsula y se homogeneiza con la espátula; dicho material se prueba según el procedimiento anterior.

Este procedimiento se repite hasta completar cuatro determinaciones, las cuales se registran adecuadamente. La cantidad de agua que se adicione al material será tal que las cuatro determinaciones queden comprendidas entre los 10 y 35 golpes en la copa de Casagrande.

Se grafican los puntos correspondiente a cada determinación, representando en el eje de las abscisas en escala logarítmica, el numero de golpes  $n$  y en el de las ordenadas en escala aritmética, los respectivos contenidos de agua  $w_n$ . Se traza una línea recta que una aproximadamente los puntos graficados; a esta recta se le llama curva de fluidez. Para calcular el límite líquido se utiliza la siguiente fórmula:

$$W = \frac{WH - Ws}{Ws - Wt} \times 100 \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

W: humedad en %

WH: peso de la muestra húmeda + peso de la tara (gr)

Ws: peso de la muestra seca + peso de la tara (gr)

Wt: Peso de la tara (gr)

### **Limite plástico**

El equipo necesario para realizar esta prueba es una balanza, horno, desecador, cápsulas de porcelana, espátula, vidrios de reloj, placa de vidrio y alambre de acero.

De la fracción del material preparada, se toma una porción de tamaño tal que pueda tomarse una pequeña esfera de aproximadamente 12mm en toda su longitud, la que se moldea con los dedos para que pierda agua y se manipula sobre la palma de la mano para formar un cilindro.

A continuación el cilindro se hace girar con los dedos de las manos sobre la placa de vidrio para reducir su diámetro hasta que se aproximadamente de 3mm en toda su longitud. La velocidad de girado será de 0 a 60 ciclos por minutos.

Si al alcanzar un diámetro de 3mm el cilindro no se rompe en tres secciones simultáneamente, significa que su contenido de agua es superior al del límite plástico. En tal caso se junta nuevamente todo el material para formar la pequeña esfera manipulándola con los dedos para facilitar la pérdida de agua y lograr una distribución uniforme de la misma, repitiendo el procedimiento descrito anteriormente, hasta que el cilindro se rompa en tres segmentos precisamente en el momento de alcanzar dicho diámetro, el cual se verifica comparándolo contra el alambre de referencia.

Inmediatamente se colocan sobre un vidrio de reloj los fragmentos del cilindro y se determina el contenido de agua de ese material

Para calcular el límite plástico se utiliza la siguiente fórmula:

$$W = \frac{WH - Ws}{Ws - Wt} \times 100 \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

W: humedad en %

WH: peso de la muestra húmeda + peso de la tara (gr)

Ws: peso de la muestra seca + peso de la tara (gr)

Wt: Peso de la tara (gr)

### **Índice plástico**

Una vez calculados el límite líquido y el límite plástico se determina el índice plástico mediante la siguiente expresión:

$$Ip = \omega_L - \omega_P \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

$I_p$ : índice plástico del material, (%) con aproximación a la unidad

$\omega_L$ : Límite líquido del material, (%)

$\omega_P$ : Límite plástico, (%)

Cuando el material sea muy arenoso y no pueda determinarse el límite plástico, se reportan el límite plástico y el índice plástico como NP (No Plástico).

### **Contracción lineal**

Es la reducción de volumen de un suelo, medido en una de las dimensiones y expresadas como porcentaje de la dimensión original, cuando la humedad se reduce desde la correspondiente al límite líquido hasta el límite de contracción.

Del material tomado de la copa de Casagrande donde se determinó el límite líquido del material que cerró a los 25 golpes y con 13 mm (1/2") de espesor, se procede a llenar el molde de lámina galvanizada de 10 x 2 x 2 cm. El llenado se efectúa en tres capas utilizando una espátula golpeando el molde sobre una superficie, para retirar el aire contenido en la muestra.

Después de colocada la última capa, se enrasa el molde empleando la espátula y se deja reposar a la sombra hasta que cambie ligeramente de color y se pierda la apariencia lustrosa de la superficie, para que posteriormente se seque en el horno por un periodo mínimo de 18 hrs; a una temperatura ambiente de 105°C, se saca del horno y se deja enfriar a temperatura ambiente y a continuación ayudándose de un calibrador vernier, se determina la longitud media de la barra del material seco y la longitud interior del molde con aproximación de 0.01cm.

La contracción lineal se calcula con la siguiente fórmula:

$$C_1L_1 = \left[ \frac{(L_1 - L_2)}{L_1} \right] 100 \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

- C<sub>1</sub>L<sub>1</sub>: contracción lineal en %
- L<sub>1</sub>: longitud de la barra de suelo húmedo
- L<sub>2</sub>: Longitud de la barra de suelo seco

### **Humedad**

La humedad o contenido de agua de un suelo en la relación expresada en porcentaje del peso de agua en relación con el peso de las partículas sólidas.

Esta prueba permite determinar el contenido de agua en los materiales para terracerías, con el fin de obtener una idea cualitativa de su consistencia o de su probable comportamiento. La prueba consiste en secar una muestra del material en el horno y determinar el porcentaje de la masa de agua, con relación a la masa de sólidos.

Se obtiene la masa del recipiente limpio y seco en gr. Se coloca una porción de la muestra húmeda en el recipiente e inmediatamente después se determina la masa del conjunto; se registra en gramos.

A continuación se coloca en la fuente de calor el recipiente que contiene la muestra, durante el tiempo necesario para que se evapore toda el agua, lo cual se comprueba

haciendo pasar repetidamente un vidrio de reloj sobre la muestra, ya que mientras esa sostenga agua, se condensará el vapor en la superficie del vidrio. Con el fin de lograr un secado más rápido y uniforme, se recomienda remover moderadamente la muestra dentro del recipiente durante el proceso de secado, evitando pérdidas de material.

Una vez seca la muestra se retira el recipiente de la fuente de calor utilizando, se deja enfriar y se obtiene la masa de la muestra en gr.

El contenido de humedad se calcula con la siguiente expresión:

$$W = \frac{WH - W_s}{W_s} \times 100 \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

W: humedad o contenido de agua (%)

WH: peso de la muestra húmeda (gr)

Ws: Peso de la muestra seca (gr)

### **Densidad**

Estas pruebas permiten determinar las relaciones masa-volumen de los materiales respecto a la relación masa-volumen del agua, así como la absorción de los materiales y se utilizan para calcular los volúmenes ocupados por el material en sus diferentes condiciones de contenidos de agua y el cambio debido a la entrada de agua en sus poros. Utilizado un embudo, se introduce el material en el matraz previamente calibrado. Posteriormente se llena el matraz con agua destilada hasta aproximadamente la mitad de su capacidad. Empleando un dispositivo de succión, se aplica vacío al matraz durante 15 min. con objeto de extraer el aire atrapado en la muestra.

Una vez hecho lo anterior, se coloca el matraz a una fuente calor para llevar el agua a punto de ebullición durante 10 minutos aproximadamente, hasta expulsar el aire atrapado. Se deja enfriar el matraz hasta alcanzar la temperatura ambiente y se adiciona el volumen de agua destilada necesaria para alcanzar la marca de aforo y, en su caso, se vuelve aplicar el vacío para asegurar que haya quedado aire atrapado en la muestra; si es necesario, se quitará o agregará agua destilada utilizando una probeta graduada, de tal forma que el nivel inferior del menisco coincida con la marca de aforo.

Se seca cuidadosamente la superficie exterior del matraz y el interior del cuello del mismo. Para esta última operación se emplea un lienzo de papel absorbente enrollado, evitando tocar el menisco.

Se obtiene la masa del matraz con el material y el agua en gramos. Se tapa el matraz y se invierte varias veces en forma cuidadosa con el fin de uniformizar la temperatura de la suspensión, a continuación se coloca el bulbo del termómetro en el centro del matraz y se registra la temperatura, misma que es considerada como temperatura de prueba.

Hecho lo anterior se vierte toda la suspensión en una capsula de porcelana, empleando el agua necesaria para arrastrar todas las partículas del suelo y se deja reposar durante 24 hr, se elimina el agua sobrante mediante decantación y se lleva la muestra al horno para

su secado total a masa constante a una temperatura de 105°C; se determina y se registra la masa seca de la muestra.

Finalmente, utilizando la curva de calibración del matraz, se obtiene la masa del matraz seco y la masa del matraz con el agua, correspondiente a la temperatura de prueba y se registra.

La densidad relativa se obtiene con la formula siguiente:

$$Ss = \frac{Ws}{Ws + Wmw - Wmws} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

Ws: Peso de la muestra seca (gr)

Wmw: Peso del matraz con agua destilada hasta el nivel de aforo (gr)

Wmws: Peso del matraz seco superficialmente (gr)

La densidad de los suelos varía comúnmente entre los valores presentados en la Tabla 43:

**Tabla 43 Densidad de suelos para la determinación del tipo según la Norma NMX C-170**

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Densidad</b>
Cenizas volcánicas	2.20 a 2.50
Suelos orgánicos	2.50 a 2.65
Arenas y gravas	2.65 a 2.67
Limos inorgánicos y guijarros arcillosos	2.67 a 2.72
Arcillas poco plásticas y medianamente plásticas	2.72 a 2.78
Arcillas medianamente plásticas y muy plásticas	2.78 a 2.84
Arcillas expansivas	2.84 a 2.88

## Caracterización del Suelo





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO REGIONAL  
CIIDIR UNIDAD OAXACA

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

OBRA:	Material de Banco	ENSAYE NÚMERO:	40
UBICACIÓN:	San Pedro Mixtepec, Oaxaca	FECHA DE INICIACIÓN:	18-Sep-08
ESTUDIO:	Granulometría	FECHA DE INFORME:	25-Sep-08
PROCEDENCIA:	San Pedro Mixtepec, Oaxaca	SONDEO N°	0
		MUESTRA N°	1

Humedad de la muestra		P.V. SUELTO		P.V. MINIMO	
Capsula No.	28				
Peso h+cap.	151.00 gr	Peso h+Tara	18310.0 gr		
Peso s+cap.	149.80 gr	Peso Tara	5134.0 gr		
Agua	1.20 gr	Peso neto	13176.0 gr		
Peso capsula	24.78 gr	Peso corr.	13059.6 gr		
Peso s. Seco	125.02 gr	Vol. Tara	9970.0 cm3		
% w	0.96	Peso Vol.	1310 kg/m3		

Tamaño max. 3/4"  
Lavado vaso: 27  
Límites vaso: 13

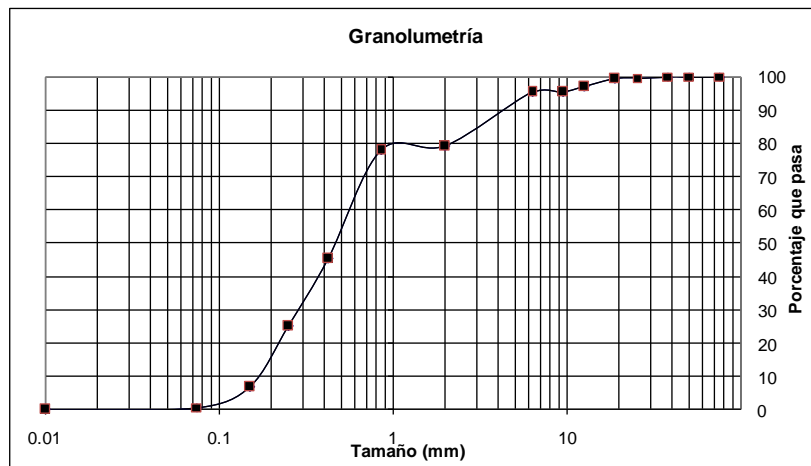
Ss vaso:	
No de Ens.	40
Cápsula	27
Frasco No	2
Ps + Rec.	149.8 gr
Rec.	24.8 gr
Ps.	125.0 gr
PFSW	720.2 gr
Temp.	23 °C
PFW	680.4 gr
Vol.	85.2308 cc
Ss.	1.47

FRACCIÓN RETENIDA EN LA MALLA NUMERO 4					
Malla	Peso retenido	Peso ret. Corr.	Ret. Parcial	Ret. Acum.	Pasa
	gr	gr	%	%	%
3"	0.00	0.00	0.000	0	100
2"	0.00	0.00	0.000	0	100
1 1/2"	0.00	0.00	0.000	0	100
1"	51.10	51.10	0.391	0	100
3/4"	39.90	39.90	0.306	1	99
1/2"	304.30	304.30	2.330	3	97
3/8"	221.65	221.65	1.697	5	95
1/4"	0.00	0.00	0.000	5	95
N° 4	319.90	319.90	2.450	7	93
Pasa N° 4	12239.15	12122.79	92.826	100	0
Suma	13176.00	13059.64	100.000	100	

Densidad de la Muestra	
W. Seco	99.72
W. Mtrz+Ag.+Mtr.	720.20
W. Mtrz.	657.80
Temp.	23.00 °C
Densidad	2.67
Tipo Suelo	

FRACCIÓN QUE PASA POR LA MALLA NUMERO 4					
Malla	Peso retenido	Peso ret. Corr.	Ret. Parcial	Ret. Acum.	Pasa
	gr	gr	%	%	%
N° 4	27.00	27.00	12.652	20	80
N° 10	2.10	2.10	0.984	21	79
N° 20	2.80	2.80	1.312	22	78
N° 40	69.60	69.60	32.614	55	45
N° 60	43.20	43.20	20.243	75	25
N° 100	39.00	39.00	18.275	93	7
N° 200	13.10	13.10	6.138	99	1
Pasa N°200	1.60	1.30	0.608	100	0
Suma	200.00	198.10	92.826		

Límites	
Vaso Lavado	27.00
Vaso Límites	13.00
Cristal	0.00
W. Hum.	64.00 gr
W. Seco	58.35 gr
W. Cristal	27.20 gr
B. Contracción	10.00
Contracción	N.P.



D10= 0.18  
D30= 0.28  
D60= 0.57

Cu= 3.17  
Cc= 0.76

Retenido en Malla #3 0.000 %  
Grava= 7 %  
Arena= 92.2 %  
Finos= 0.608 %  
Pasa Malla #40 45 %

Clasificación de Suelo Según el SUCS:

Arena Mal Graduada (SW)



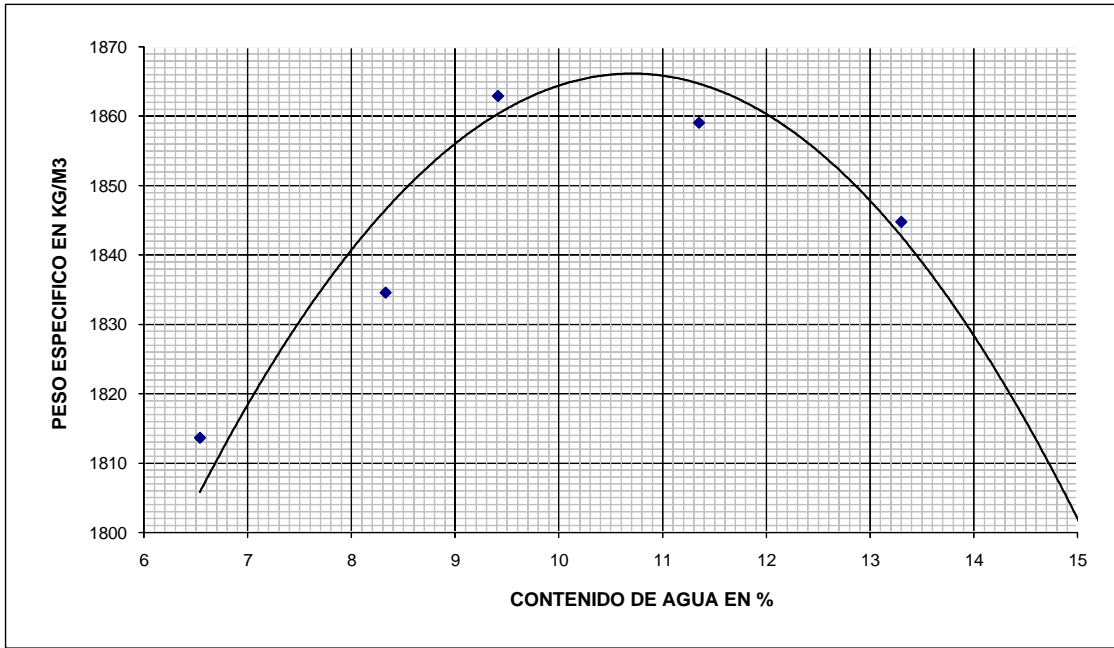
**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACION PARA EL DESARROLLO INTEGRAL  
REGIONAL, UNIDAD OAXACA

**DETERMINACION DEL PESO ESPECIFICO SECO MAXIMO Y % HUMEDAD OPTIMA**

DESCRIPCION DE LA MUESTRA: <u>Arena Mal Gadruada (SW)</u>	ENSAYE NUMERO: <u>1</u>
ESTUDIO QUE SE LE VA A EFECTUAR: <u>Compactacion Proctor</u>	FECHA DE RECIBO: <u>21-11-08</u>
PROCEDENCIA: <u>San Pedro Mixtepec, Oaxaca</u>	FECHA DE INFORME: <u>27-11-08</u>

TIPO DE PRUEBA: AASHTO STD. Var. "C"  
 NUM DE CAPAS: 3 PESO PIZON: 2.5 Kgs. MOLDE NUM. 2  
 NUM. DE GOLPES POR CAPA: 25 ALTURA DE CAIDA: 30.5 cm VOLUMEN 0.94345

PRUEBA NUMERO	1	2	3	4	5	6	7
Peso molde mas suelo húmedo, g.	3896	3948	3996	4026	4045	4041	3972
Peso del molde, g.	2073	2073	2073	2073	2073	2073	2073
Peso suelo húmedo, g (Wm)	1823	1875	1923	1953	1972	1968	1899
Peso específico húmedo(kg/m3):	1932	1987	2038	2070	2090	2086	2013
Cápsula número	31	26	24	27	17	4	7
Peso de la cápsula mas suelo húmedo, g	145.8	139.3	151.2	143.5	168.5	183.8	193.8
Peso de la cápsula mas suelo seco, g.	139	131.3	141.3	131.4	151.5	163.9	170.7
Peso del agua, g.	6.8	8	9.9	12.1	17	19.9	23.1
Peso cápsula, g.	35	35.25	36.1	24.78	23.69	33.58	34
Peso suelo seco, g.	104	96.05	105.2	106.62	127.81	130.32	136.7
Contenido de agua, % w	6.5	8.3	9.4	11.3	13.3	15.3	16.9
Peso específico seco(kg/m3):	1814	1835	1863	1859	1845	1810	1722



Peso específico máximo = 1866 kg/m3      Humedad óptima = 10.8 %

## **Análisis Kruskal-Wallis: Ejemplo de cálculo**

## Método de análisis estadístico no paramétrico Kruskal-Wallis

La prueba de Kruskal-Wallis es el método más adecuado para comparar poblaciones cuyas distribuciones no son normales. Incluso cuando las poblaciones son normales, este contraste funciona muy bien. También es adecuado cuando las desviaciones típicas de los diferentes grupos no son iguales entre sí,

La hipótesis nula de la prueba de Kruskal-Wallis es:

H<sub>0</sub>: Las k medianas son todas iguales

H<sub>1</sub>: Al menos una de las medianas es diferente

### Cálculo de los rangos para cada observación

Para cada observación se le asigna el rango según el orden que ocupa la observación en el conjunto total de los datos, asignando el rango medio en caso de empates.

### Cálculo de la suma de rangos R<sub>m</sub>

Para cada grupo m = 1, ..., r, siendo r el número de grupos, se define R<sub>m</sub> como la suma de rangos de cada grupo m

### Cálculo del valor medio de los rangos E[R<sub>m</sub>] y de los rangos medios -R<sub>m</sub>

El valor medio de los rangos E[R<sub>m</sub>] se calcula como:

$$E [R_m] = \frac{n_m(n + 1)}{2}$$

y el rango medio R<sub>m</sub> como:

$$R_m = \frac{R_m}{n_m}$$

### Estadístico de contraste H'

El estadístico de contraste de Kruskal-Wallis H' se calcula como:

$$H = \frac{\frac{12}{n(n + 1)} \sum_{m=1}^r \frac{1}{n_m} [R_m - E[R_m]]^2}{1 - \frac{\sum_{j=1}^k (d_j^3 - d_j)}{n^3 - n}}$$

siendo d<sub>j</sub> el número de empates en j = 1, ..., k siendo k el número de valores distintos de la variable respuesta, que sigue una distribución Chi-Cuadrado con r - 1 grados de libertad.

Consideremos el siguiente ejemplo: se tienen los siguientes datos experimentales, correspondientes a 22 individuos de los que se ha recogido información de dos variables: una variable explicativa Exp nominal y otra variable respuesta Rta cuantitativa. Los datos se presentan de forma que en las filas hay varios individuos para facilitar la lectura:

Rta	Exp
15	1
15	1
25	1
25	1
25	1
33	1
43	1
15	2
16	2
16	2
25	2
28	2

Rta	Exp
28	2
28	2
28	2
35	2
43	2
13	3
15	3
25	3
25	3
35	3

Calcular la prueba de Kruskal-Wallis de comparación de medianas para los datos anteriores.

#### Cálculo de los rangos para cada observación

Para cada observación se le asigna el rango según el orden que ocupa la observación en el conjunto total de los datos, asignando el rango medio en caso de empates:

Rta	Exp	Rango (Rta)
15	1	3.5
15	1	3.5
25	1	10.5
25	1	10.5
25	1	10.5
33	1	18
43	1	21.5
15	2	3.5
16	2	6.5
16	2	6.5
25	2	10.5
28	2	15.5

Rta	Exp	Rango (Rta)
28	2	15.5
28	2	15.5
28	2	15.5
35	2	19.5
43	2	21.5
13	3	1
15	3	3.5
25	3	10.5
25	3	10.5
35	3	19.5

#### Cálculo de la suma de rangos $R_m$

Para cada grupo  $m = 1, \dots, r$ , siendo  $r$  el número de grupos, se define  $R_m$  como la suma de rangos de cada grupo  $m$ , que para los datos del ejemplo resultan ser:

$$R_1 = \sum_{\text{grupo 1}} \text{rangos} = 3.5 + 3.5 + 10.5 + 10.5 + 10.5 + 18 + 21.5 = 78$$

$$R_2 = \sum_{\text{grupo 2}} \text{rangos} = 3.5 + 6.5 + 6.5 + 10.5 + 15.5 + 15.5 + 15.5 + 15.5 + 19.5 + 21.5 = 130$$

$$R_3 = \sum_{\text{grupo } 3} \text{rangos} = 1 + 3.5 + 10.5 + 10.5 + 19.5 = 45$$

### Cálculo del valor medio de los rangos $E[R_m]$ y de los rangos medios $R_m$

El valor medio de los rangos  $E[R_m]$  se calcula como:

$$E[R_m] = \frac{n_m(n+1)}{2}$$

y el rango medio  $R_m$  como:

$$R_m = \frac{R_m}{n_m}$$

Para los datos del ejemplo resultan ser:

$$E[R_1] = \frac{n_1(n+1)}{2} = \frac{7(22+1)}{2} = 80.50$$

$$E[R_2] = \frac{n_2(n+1)}{2} = \frac{10(22+1)}{2} = 115.50$$

$$E[R_3] = \frac{n_3(n+1)}{2} = \frac{5(22+1)}{2} = 57.50$$

$$R_1 = \frac{R_1}{n_1} = 11.14$$

$$R_2 = \frac{R_2}{n_2} = 13.00$$

$$R_3 = \frac{R_3}{n_3} = 9.00$$

### Estadístico de contraste $H'$

El estadístico de contraste  $H'$  se calcula como:

$$H = \frac{\frac{12}{n(n+1)} \sum_{m=1}^r \frac{1}{n_m} [R_m - E[R_m]]^2}{1 - \frac{\sum_{j=1}^k (d_j^3 - d_j)}{n^3 - n}}$$

siendo  $d_j$  el número de empates en  $j = 1, \dots, k$  siendo  $k$  el número de valores distintos de la variable respuesta, que para los datos del ejemplo resulta ser:

$$\sum_{j=1}^k (d_j^3 - d_j) = (4^3 - 4) + (2^3 - 2) + (6^3 - 6) + (4^3 - 4) + (2^3 - 2) + (2^3 - 2) = 348$$

con lo que:

$$H' = \frac{\frac{12}{22 * 23} \left( \frac{1}{7} [78 - 80.5]^2 + \frac{1}{10} [130 - 115]^2 + \frac{1}{5} [45 - 57.5]^2 \right)}{1 - \frac{348}{22^3 - 22}} = 1.3398$$

que sigue una distribución Chi-Cuadrado con  $r - 1 = 2$  grados de libertad, que tiene asociada un valor  $p$  de 0.5118