



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**PROPUESTA DE FABRICACIÓN DE ADOBE CON ADICIÓN
DE PUZOLANA DEL ÁREA DE SACAPULAS, QUICHÉ**

Miriam Lucía Calderón Urizar

Asesorado por el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

Guatemala, noviembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE FABRICACIÓN DE ADOBE CON ADICIÓN
DE PUZOLANA DEL ÁREA DE SACAPULAS, QUICHÉ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

MIRIAM LUCÍA CALDERÓN URIZAR

ASESORADO POR EL ING. MARIO RODOLFO CORZO ÁVILA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| VOCAL I | Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno |
| VOCAL II | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL III | Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa |
| VOCAL IV | Br. Narda Lucía Pacay Barrientos |
| VOCAL V | Br. Walter Rafael Véliz Muñoz |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

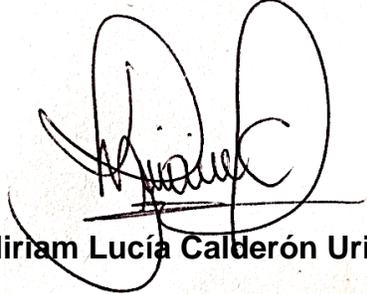
| | |
|-------------|------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| EXAMINADORA | Inga. Carmen Marina Mérida Alva |
| EXAMINADOR | Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila |
| EXAMINADOR | Ing. Luis Estuardo Saravia Ramírez |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROPUESTA DE FABRICACIÓN DE ADOBE CON ADICIÓN DE PUZOLANA DEL ÁREA DE SACAPULAS, QUICHÉ

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 15 de mayo de 2012.



Miriam Lucía Calderón Urizar



Guatemala 2 de mayo del 2014

Ingeniero

Hugo Leonel Montenegro Franco

Director de la Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirse a usted para informarle que he reviso el trabajo de graduación titulado **“Propuesta de fabricación de adobe con adición de puzolana del área de Sacapulas, Quiché”**, desarrollado por la estudiante universitaria **Miriam Lucia Calderón Urizar**, quien contó con la asesoría del suscrito.

Considero que el trabajo realizado por la estudiante **Calderón Urizar** satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,



Mario Rodolfo Corzo Ávila
Ingeniero Civil Colegiado 2089

Asesor



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
2 de septiembre de 2014

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación PROPUESTA DE FABRICACIÓN DE ADOBE CON ADICIÓN DE PUZOLANA DEL ÁREA DE SACAPULAS, QUICHÉ, desarrollado por la estudiante de Ingeniería Civil Miriam Lucia Calderón Urizar, quien contó con la asesoría del Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Guillermo Melini Salguero

Ing. Civil Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
ÁREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación de la estudiante Miriam Lucia Calderón Urizar, titulado PROPUESTA DE FABRICACIÓN DE ADOBE CON ADICIÓN DE PUZOLANA DEL ÁREA DE SACAPULAS, QUICHÉ, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Hugo Leonel Montenegro Franco

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2014.

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua

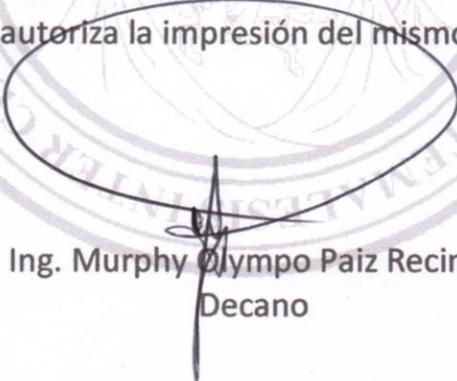




DTG. 647.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE FABRICACIÓN DE ADOBE CON ADICIÓN DE PUZOLANA DEL ÁREA DE SACAPULAS, QUICHÉ**, presentado por la estudiante universitaria **Miriam Lucía Calderón Urizar**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 17 de noviembre de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|-------------------|--|
| Dios | Por darme la vida. |
| Mis padres | Por ser mi soporte, por su amor y apoyo incondicional. |
| Mi hermana | Por ser un ejemplo para mí. |
| Mis amigos | Por haberme acompañado en el viaje. |
| Mi familia | Por estar siempre a mi lado. |

AGRADECIMIENTOS A:

**La Universidad de San
Carlos de Guatemala y
Facultad de Ingeniería**

Por darme el orgullo de pertenecer a ella.

**Sección de
Prefabricados y
Ecomateriales del
Centro de
Investigaciones de
Ingeniería**

Por la experiencia.

Sabandijas retorcidas

Por la hermandad.

**Ing. Mario Corzo e Ing.
Javier Quiñonez**

Por compartir su conocimiento, por su confianza
y por su ejemplo.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | IX |
| GLOSARIO | XI |
| RESUMEN..... | XIII |
| OBJETIVOS..... | XV |
| INTRODUCCIÓN | XVII |
| | |
| 1. MARCO TEÓRICO..... | 1 |
| 1.1. Adobe | 1 |
| 1.1.1. Historia del adobe..... | 1 |
| 1.1.2. Materiales para fabricación de adobe..... | 2 |
| 1.1.2.1. Arena | 2 |
| 1.1.2.2. Limo..... | 3 |
| 1.1.2.3. Arcillas | 3 |
| 1.1.3. Características del suelo para elaboración de adobes..... | 3 |
| 1.1.4. Esfuerzos admisibles..... | 4 |
| 1.2. Las puzolanas | 5 |
| 1.2.1. Material volcánico en Guatemala..... | 5 |
| 1.2.2. Clasificación de las puzolanas..... | 6 |
| 1.2.2.1. Comportamiento mecánico..... | 7 |
| 1.2.3. Proceso de reacción de las puzolanas | 8 |
| 1.3. Estabilización con cal y puzolanas | 9 |
| 1.4. Situación actual de vivienda en Guatemala..... | 9 |
| 1.5. Sacapulas..... | 12 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2. | METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN | 13 |
| 2.1. | Muestreo | 13 |
| 2.2. | Características de las muestras | 14 |
| 2.2.1. | Puzolana | 14 |
| 2.2.2. | Material de adobe..... | 14 |
| 2.3. | Preparación de las muestras..... | 15 |
| 2.3.1. | Puzolana | 15 |
| 2.3.1.1. | Secado al sol..... | 15 |
| 2.3.1.2. | Molienda..... | 16 |
| 2.3.2. | Material para adobes..... | 16 |
| 2.4. | Ensayos | 17 |
| 2.4.1. | Determinación de la reactividad puzolánica | 17 |
| 2.4.1.1. | Elaboración de mezcla | 17 |
| 2.4.1.2. | Llenado de moldes | 18 |
| 2.4.1.3. | Curado en cámara de vapor..... | 19 |
| 2.4.1.4. | Ensayo de resistencia a compresión | 20 |
| 2.4.2. | Gravedad específica | 21 |
| 2.4.3. | Límites de Atterberg | 21 |
| 2.4.3.1. | Límite líquido | 22 |
| 2.4.3.2. | Límite plástico | 23 |
| 2.4.3.3. | Índice de plasticidad..... | 23 |
| 2.4.4. | Granulometría | 24 |
| 2.4.4.1. | Análisis granulométrico por mallas..... | 25 |
| 2.4.4.2. | Análisis granulométrico por sedimentación–hidrómetro | 26 |
| 2.4.5. | Elaboración de adobes..... | 26 |
| 2.4.6. | Ensayo de muestras a compresión | 27 |
| 2.4.6.1. | Labrado de cubos..... | 27 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.4.6.2. | Ensayos a compresión de cubos de adobe..... | 28 |
| 3. | RESULTADOS | 31 |
| 3.1. | Reactividad puzolánica: ensayos a compresión de cubos | 31 |
| 3.2. | Límites de Atterberg | 33 |
| 3.3. | Granulometría de materiales en estado natural..... | 34 |
| 3.4. | Distribución granulométrica por hidrómetro | 39 |
| 3.5. | Granulometría de posibilidades | 40 |
| 3.5.1. | Posibilidad A..... | 41 |
| 3.5.2. | Posibilidad B..... | 42 |
| 3.5.3. | Posibilidad C..... | 42 |
| 3.5.4. | Resultados de granulometrías de posibilidades de mezclas..... | 43 |
| 3.6. | Resultados de ensayos a compresión mezclas para adobe.... | 47 |
| 4. | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 55 |
| 4.1. | De granulometría de materiales en estado natural..... | 55 |
| 4.2. | De los resultados de granulometría con el método del hidrómetro | 56 |
| 4.3. | De los resultados de granulometría de las posibilidades de mezclas | 56 |
| 4.4. | De los resultados de ensayos a compresión de muestras de adobe..... | 57 |
| | CONCLUSIONES | 59 |
| | RECOMENDACIONES | 61 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 63 |
| | APÉNDICES | 65 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Dosificación de material para la elaboración de adobes | 4 |
| 2. | Requerimientos físicos según Norma ASTM C593-06 (2011)..... | 8 |
| 3. | Banco de material para elaboración de adobe, aldea Río Blanco, Sacapulas, Quiché | 13 |
| 4. | Muestra de material para adobes de la aldea Río Blanco..... | 16 |
| 5. | Rasado de moldes después de apisonamiento..... | 19 |
| 6. | Moldes en recipientes cerrados para curado | 20 |
| 7. | Muestras colocadas en cámara de vapor..... | 20 |
| 8. | Copa Casagrande para determinación del límite líquido..... | 22 |
| 9. | Labrado de cubos con sierra eléctrica..... | 27 |
| 10. | Cubos labrados para ensayos a compresión | 28 |
| 11. | Ensayo de cubos de adobe a compresión | 29 |
| 12. | Gráfico de resultados de ensayo a compresión de muestras de puzolana a distintos tiempos de molienda..... | 32 |
| 13. | Granulometría: barro de Magdalena la Abundancia..... | 34 |
| 14. | Granulometría: barro de Río Blanco | 35 |
| 15. | Granulometría: barro de Chuzaculeu | 36 |
| 16. | Resumen comparativo de resultados de granulometrías de materiales arcillosos para elaboración de adobes | 37 |
| 17. | Granulometría: puzolana San Jorge..... | 38 |
| 18. | Gráfico de distribución granulométrica por hidrómetro..... | 40 |
| 19. | Granulometría: posibilidad A | 44 |
| 20. | Granulometría: posibilidad B | 45 |

| | | |
|-----|--|----|
| 21. | Granulometría: posibilidad C | 46 |
| 22. | Resumen comparativo de resultados de granulometrías de posibilidades de mezclas para elaboración de adobes con puzolana... | 46 |
| 23. | Resumen comparativo de porcentajes de finos y arena respecto al rango establecido por la Norma NTE 080..... | 47 |
| 24. | Gráfico de comparación de resultados de resistencias a compresión de muestras de adobe a primera grieta..... | 51 |
| 25. | Gráfico de comparación de resultados de resistencias a compresión de muestras de adobe hasta falla | 52 |
| 26. | Comparación de gráficos de resultados de ensayos a compresión de muestras de adobe a primera grieta y falla..... | 53 |

TABLAS

| | | |
|-------|---|----|
| I. | III Censo de Vivienda, 1973..... | 10 |
| II. | Censo habitacional y poblacional, 2002 | 11 |
| III. | Dosificación de mezcla puzolana-cal..... | 18 |
| IV. | Clasificación de los suelos según su índice de plasticidad (IP) | 24 |
| V. | Tamices y tamaños de aberturas..... | 25 |
| VI. | Identificación de muestras y tiempos de molienda: puzolana | 31 |
| VII. | Resultados de ensayos a compresión de muestras de puzolana a distintos tiempos de molienda..... | 32 |
| VIII. | Límites de Atterberg: Río Blanco | 33 |
| IX. | Límites de Atterberg: Chuzaculeu..... | 33 |
| X. | Límites de Atterberg. Magdalena la Abundancia | 33 |
| XI. | Resumen de granulometría: Magdalena la Abundancia | 34 |
| XII. | Resumen granulometría: Río Blanco..... | 35 |
| XIII. | Resumen granulometría: Chuzaculeu | 36 |
| XIV. | Resumen de granulometría: San Jorge | 38 |

| | | |
|--------|--|----|
| XV. | Distribución granulométrica (ensayo con hidrómetro) | 39 |
| XVI. | Eliminación de gravas: Magdalena la Abundancia..... | 41 |
| XVII. | Gradación teórica de mezcla: posibilidad B | 42 |
| XVIII. | Gradación teórica de mezcla: posibilidad C | 43 |
| XIX. | Resumen de granulometría: posibilidad A | 43 |
| XX. | Resumen de granulometría: posibilidad B | 44 |
| XXI. | Resumen de granulometría: posibilidad C | 45 |
| XXII. | Resultados de ensayos a compresión de muestras de adobe con 0 % de hidróxido de calcio | 48 |
| XXIII. | Resultados de ensayos a compresión de muestras de adobe con 3 % de cal | 48 |
| XXIV. | Resultados de ensayos a compresión de muestras de adobe con 6 % de cal | 49 |
| XXV. | Resultados de ensayos a compresión de muestras de adobe con 9 % de hidróxido de calcio | 49 |
| XXVI. | Resultados de ensayos a compresión de muestras de adobe utilizando material de Magdalena la abundancia puro | 50 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|-------------------------------|---------------------------------|
| A | Área |
| IP | Índice de plasticidad |
| Kg | Kilogramos |
| LL | Límite líquido |
| LP | Límite plástico |
| Mpa | Mega Pascales |
| M | Metro |
| mm | Milímetro |
| nm | Nanómetro |
| SCA, SCB, SCC, SCD | Nombres de muestras de puzolana |
| Wmw | Peso del matraz + suelo |

| | |
|-------------|--------------------------------|
| Wmsw | Peso del matraz + suelo + agua |
| Ws | Peso del suelo |
| % | Porcentaje |
| F'c | Resistencia a compresión |

GLOSARIO

| | |
|-----------------------|---|
| Adhesión | Fuerza de atracción que mantiene unidas moléculas de distinta especie química. |
| Adobe | Mezcla de barro y paja o heno, con forma de ladrillo, sin cocer y secada al sol o al aire, usado en tabiques y muros. |
| ASTM | Siglas en inglés de American Society of Testing Materials (Sociedad Americana para Ensayos de los Materiales). |
| Curado | Proceso de prevención de la pérdida de humedad del concreto mientras mantiene un régimen satisfactorio de temperatura. |
| Esfuerzo | Esfuerzo es la resistencia que ofrece un área unitaria (A) del material del que está hecho un miembro para una carga aplicada externa (fuerza, F). |
| Estabilización | Mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. |

| | |
|----------------------|--|
| Granulometría | Medición y graduación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios, así como de los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas. |
| Molienda | Consiste en desmenuzar una materia sólida, especialmente granos o frutos, golpeándola con algo o frotándola entre dos piezas duras hasta reducirla a trozos muy pequeños, a polvo o a líquido. |
| Muestra | Parte o cantidad pequeña de una cosa que se considera representativa del total y que se toma o se separa de ella con ciertos métodos para someterla a estudio, análisis o experimentación. |
| Partículas | Cuerpo material de pequeñas dimensiones constituyente de la materia. |
| Plasticidad | Propiedad que tiene un material de ser moldeado o trabajado para cambiarlo de forma. |
| Puzolana | Roca volcánica muy fragmentada y de composición basáltica; se utiliza como aislante en la construcción y para la fabricación de cemento hidráulico. |
| Volcánico | Se aplica a la roca que se forma por la solidificación del magma que sale a la superficie terrestre por los volcanes, en forma de lava. |

RESUMEN

Este trabajo de graduación describe el procedimiento completo de investigación que se llevó a cabo para el análisis de la posibilidad de la utilización de puzolana, como material adicional para la elaboración de adobes en el área de Sacapulas, Quiché. Siendo su objetivo principal evaluar el comportamiento mecánico de los bloques de adobe con adición de puzolana para establecer su posible utilización en viviendas económicas.

De acuerdo a los parámetros de las normas adoptadas para la elaboración de adobes, se estudiaron materiales utilizados para la elaboración de adobes de distintas áreas del territorio de Sacapulas, Quiché, englobando los resultados de los mismos en gráficas y tablas que facilitarán la lectura y análisis de resultados.

Esta investigación se llevó a cabo en las instalaciones del área de Eco-materiales y área de Prefabricados del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, a quienes se agradece el apoyo brindado.

OBJETIVOS

General

Evaluar el comportamiento mecánico de bloques de adobe con adición de puzolana del área de Sacapulas, Quiché.

Específicos

1. Caracterizar una muestra de material utilizado actualmente para la elaboración de adobes del área de Sacapulas, Quiché.
2. Analizar y caracterizar una muestra de material volcánico para determinar su reactividad puzolánica del área de Sacapulas, Quiché.
3. Determinar el comportamiento mecánico de los adobes con adición de puzolana.
4. Elaborar una propuesta, de ser posible, de fabricación de adobe con adición de puzolana del área de Sacapulas, Quiché.

INTRODUCCIÓN

El adobe es uno de los materiales más antiguos conocidos por el hombre, las primeras edificaciones se hicieron moldeando de diferentes formas y tamaños estos bloques de tierra sin cocer. En la actualidad, se sigue construyendo con este material en muchos pueblos de Guatemala.

El adobe no requiere de procesos industriales o componentes químicos para poder trabajar con él, puesto que se puede usar el material local, disminuyendo así los costos del mismo.

Entre las características del adobe se pueden mencionar que es térmico, su variación de temperatura es poca por lo que se considera como constante e independiente a las variaciones térmicas del ambiente; es un material fácil de utilizar y también tiene la característica de que puede ser moldeado en casi cualquier forma y tamaño.

Los parámetros ambientales que agreden el adobe como elemento son: lluvia, viento y radiación solar, lluvia como factor de humedad, viento como agente abrasivo y radiación solar por fenómenos de cristalización; estos factores se relacionan con los factores sísmicos, ya que debido a la falta de mantenimiento, lo hacen vulnerable a la falla.

El territorio de Guatemala se ha caracterizado por la intensa actividad volcánica, dando lugar a extensiones amplias de suelos formadas por materiales volcánicos depositados a lo largo del tiempo.

La mayor parte de estos materiales volcánicos son cenizas provenientes de erupciones volcánicas, la cuales han dado origen a los materiales puzolánicos, proporcionándole características como: su estructura, textura, composición y granulometría que confirman que Guatemala es un país con materiales altamente puzolánicos.

La propuesta de adobe con adición de puzolana del área de Sacapulas, Quiché, ha surgido debido a la necesidad de encontrar un elemento constructivo que cumpla con las resistencias necesarias, para poder soportar cargas fuertes pero también conserven la estética de la naturaleza con bajos costos.

El presente trabajo de graduación lleva la consideración de dar una integración entre las características propias de los materiales utilizados, para la elaboración de adobe y las características propias de los materiales puzolánicos, buscando un equilibrio entre los mismos y buscando la posibilidad de elaborar un adobe que rebase las características de los adobes convencionales.

La propuesta buscará el uso de materiales de fácil acceso propios del lugar, minimizando costos y transporte de los insumos en la elaboración de adobes; teniendo en cuenta las propiedades físicas, mecánicas, la fabricación *insitu*, la facilidad constructiva sin olvidar la estética de la construcción y que sea amigable con el ambiente.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Adobe

Perú es uno de los países a nivel latinoamericano que posee un gran número de investigaciones respecto a las construcciones con tierra, esto llevó al desarrollo de la Norma Técnica de Edificación E-080 Adobe, que comprende lo referente al adobe simple o estabilizado utilizado para la construcción de mampostería, incluyendo sus características y comportamiento.

Según la Norma NTE E-080, el adobe se define como un bloque macizo de tierra sin cocer, el cual puede contener paja u otro material que mejore su estabilidad frente a agentes externos. Por otro lado se define al adobe al que se ha incorporado otros materiales, con el fin de mejorar sus condiciones a la compresión y estabilidad ante la presencia de humedad, se le llama adobe estabilizado.

Como definición más sencilla se puede decir que el adobe es un bloque de barro elaborado a mano con un molde y secado al ambiente.

1.1.1. Historia del adobe

No existe un consenso en el que se explique la fecha o año exacto en el que empezó la construcción con tierra. Varios autores mencionan diferentes fechas de descubrimientos de este tipo de construcción, por lo que tienen diferentes opiniones de su origen.

Gernot Minke en su *Manual de construcción con tierra*, menciona que las construcciones con tierra empezaron hace 9 000 años y fueron descubiertas en Turkestán entre 6 000 y 8 000 antes de Cristo.

En Guatemala las construcciones con adobe se introdujeron desde la época de La Colonia, el cual se ha utilizado como sistema tradicional de construcción en obras de servicio público y vivienda. Conforme al tiempo estos sistemas de uso se siguen empleando, a pesar de los fuertes terremotos que han azotado el país. Las técnicas de construcción con adobe, son tradiciones de comunidades, de personas que han heredado los conocimientos y los siguen aplicando.

1.1.2. Materiales para fabricación de adobe

Es necesario tener claro que los materiales para la elaboración de adobe tienen que ser los adecuados para el mismo, ya que de no ser así se puede afectar el comportamiento de los adobes en conjunto.

1.1.2.1. Arena

Conjunto de partículas de rocas disgregadas. En geología se denomina arena al material compuesto de partículas, cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 milímetros. Una partícula individual dentro de este rango es llamada “grano de arena”.

1.1.2.2. Limo

Es un material suelto con una granulometría comprendida entre la arena fina y la arcilla. Es un sedimento clástico incoherente transportado en suspensión por los ríos y por el viento, que se deposita en el lecho de los cursos de agua o sobre los terrenos que han sido inundados. Para que se clasifique como tal, el diámetro de las partículas de limo varía de 0,002 a 0,06 milímetros.

1.1.2.3. Arcillas

La arcilla es la partícula más pequeña de suelo, tienen un tamaño menor que 0,002 milímetros y poseen un comportamiento plástico y cohesión. Las partículas de arcilla están cargadas negativamente, por lo que generan atracción con partículas cargadas positivamente, esta atracción se hace menor respecto a la distancia entre partículas o con respecto al agua.

Por ser las partículas más pequeñas y por su forma existe un intercambio de elementos, que le dan sus particularidades y algunas pueden reaccionar con determinados elementos.

1.1.3. Características del suelo para elaboración de adobes

La gradación del suelo a utilizar para la fabricación de adobes varía por literatura, pero generalmente debe aproximarse a los siguientes porcentajes: arcilla entre 10 y 20 por ciento, limo 15 y 25 por ciento y arena entre 55 y 70 por ciento. Estos rangos pueden variar cuando se fabriquen adobes estabilizados como se muestra en la figura 1.

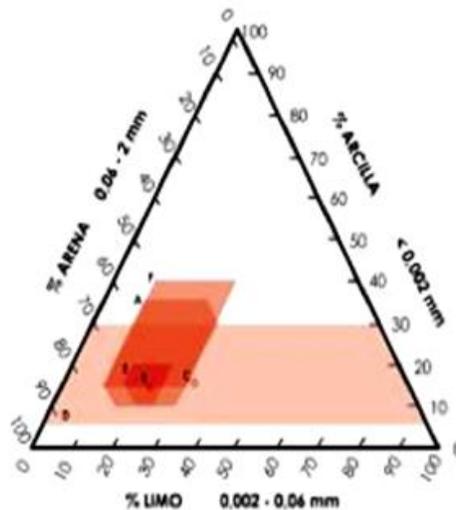
La Norma Técnica de Edificación E-080 Adobe específica que no se harán construcciones de adobe en suelos granulares sueltos, cohesivos ni blandos, ni arcillas expansivas.

1.1.4. Esfuerzos admisibles

Los ensayos para la obtención de los esfuerzos admisibles de diseño considerarán la variabilidad de los materiales a usarse, es decir que los resultados dependen de la calidad de material con los que se trabajen.

Para fines de diseño y construcción, de acuerdo con la Norma NTE. E-80 Adobe, se considera un esfuerzo mínimo a compresión de 12 Kilogramos por centímetro cuadrado por unidad. Se debe tomar en cuenta que las muestras para ensayos (cubos) no se fabrican por unidad, estos debe ser labrados de un adobe convencional.

Figura 1. **Dosificación de material para la elaboración de adobes**



Fuente: <http://www.plataformaarquitectura.cl/2010/04/17/estrategias-morfologicas-de-diseno-sismo-resistente-para-la-construccion-contemporanea-en-tierra-portante/>. Consulta: septiembre de 2013.

1.2. Las puzolanas

Puzolana es el nombre que recibe la ceniza volcánica que proviene de la población de Puzzuoli, Italia, en las faldas del volcán Vesubio, donde los romanos encontraron un material de origen volcánico reactivo de base silíceo, al cual ellos llamaron *Pulvis Puteolanus*. Posteriormente el término fue extendiéndose a todos aquellos materiales que por sus propiedades similares a la puzolana de origen natural podían tener usos sustitutivos.

La definición oficial de puzolana, se encuentra en la especificación normalizada ASTM C595M-11 Especificación Normalizada para Cementos Adicionados Hidráulicos que es: material silíceo o silíceo aluminoso, el cual en sí mismo posee pequeño o ningún valor cementicio, pero que, finamente dividido y en presencia de humedad, reaccionará químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas comunes para formar compuestos que poseen propiedades cementicias.

1.2.1. Material volcánico en Guatemala

Guatemala debido a su amplia y diversa geología, ha sido objeto de diversas investigaciones geológicas, especialmente en el campo de la vulcanología, científicos extranjeros fueron los pioneros en la geología guatemalteca, geólogos y vulcanólogos de renombre como Von Seebach, Carl Sapper, entre otros comenzaron a indagar en territorio guatemalteco en busca de respuestas al origen, formación y contenido de materiales volcánicos.

Esta información cartográfica involucra el origen, localización y hasta áreas que cubren los materiales puzolánicos presentes en Guatemala.

1.2.2. Clasificación de las puzolanas

Como se sabe, el término “puzolana” encierra una gran variedad de materiales, por lo que es necesaria una clasificación para estos. Esta clasificación es un indicador de reactividad y determinación de la conveniencia de puzolanas para distintas aplicaciones.

Existen muchas propuestas de clasificación de las puzolanas, como la clasificación por química y mineralogía y la clasificación basada en la reactividad y características del comportamiento.

La Norma ASTM 618 “Standard specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Concrete”, tiene una clasificación y caracterización de la puzolana dividiéndola en tres grupos:

- Clase N: puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tobas y cenizas volcánicas, calcinadas o sin calcinar; y varios materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas.
- Clase F: ceniza volante producida por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso. Estas cenizas poseen propiedades puzolánicas.
- Clase C: ceniza volante producida por la calcinación de carbón subbituminoso lignito. Esta clase de ceniza además de tener propiedades puzolánicas, también tiene propiedades cementicias.

1.2.2.1. Comportamiento mecánico

El comportamiento de la puzolana está basado en cuatro ensayos: resistencia (actividad puzolánica), trabajabilidad (requerimientos de agua), serviciabilidad (contracción) y durabilidad (ataque álcali agregado).

Según Quiñonez en su investigación *Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos*, este tipo de clasificación puede ser más práctico que los otros. Los criterios para cada clase podría variar de país a país, pero los elementos básicos indicados en el sistema resistencia, trabajabilidad, deformación y durabilidad son los elementos esenciales de una buena puzolanidad, (Quiñónez, 2010)

Hammond, (citado por Quiñónez en su investigación *Estado del arte de puzolanas naturales volcánicas como adiciones activas en la producción de cementos*), indica una clasificación más simplificada basada en la resistencia (actividad) de morteros curados por 7 días a 54 grados centígrados (esta es la clasificación hindú). Esta clasificación presenta los siguientes límites de resistencia y su interpretación:

- Muy inactiva, si la resistencia es menos de 1,4 Mpa.
- Inactiva, si la resistencia está entre 1,4 y 2,8 Mpa.
- Pobremente activa, si la resistencia está entre 2,8 y 4,1 Mpa.
- Intermedia, si la resistencia está entre 4,2 - 5,5 Mpa.
- Activa, si la resistencia esa entre 5,6 y 6,9 Mpa.
- Muy activa, si es mayor a 6,9 Mpa.

La Norma ASTM C593-06 (2011) “Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization1” da los requisitos que hay que tener en cuenta para poder determinar si un material es una puzolana, estos requisitos se muestran en la figura 2.

Figura 2. **Requerimientos físicos según Norma ASTM C593-06 (2011)**

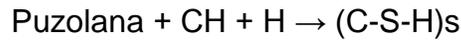
| | |
|---|-------|
| Fracción de solubles en agua, % máx. | 10 |
| Fineza, cantidad retenida, tamizado en húmedo | |
| Tamiz No. 30 (600- μ m), % máx. | 2 |
| Tamiz No. 200 (75- μ m), % máx. | 30 |
| Resistencia Cal-Puzolana , resistencia a compresión mínima, Psi (Mpa) | |
| | 600 |
| A 7 días, 130 \pm 3 °F (54 \pm 2 °C) | (4,1) |
| | 600 |
| Después de 21 días adicionales, 73 \pm 3 °F (23 \pm 2 °C) | (4,1) |
| | 400 |
| Resistencia mínima a compresión, Psi (Mpa) | (2,8) |
| | 400 |
| Resistencia mínima de saturación de vacío, Psi (Mpa) | (2,8) |

Fuente: elaboración propia.

1.2.3. **Proceso de reacción de las puzolanas**

Al igual que en la reacción del cemento, en puzolanas se forma el silicato cálcico hidratado (C-S-H) de manera similar y tiene una gran importancia en el desarrollo de la pasta, en su contribución a la cohesión y propiedades mecánicas.

La reacción puzolánica está representada en la siguiente relación estequiométrica:



Donde (C-S-H)_s, es el silicato de calcio hidratado de estequiometría no definida.

1.3. Estabilización con cal y puzolanas

Para suelos que no reaccionan con cal con un índice de plasticidad menor de 10, o suelos no plásticos, se puede agregar un segundo material con propiedades puzolánicas, de tal forma que provoque una reacción cal-sílice.

Este tipo de estabilización genera varias reacciones químicas que causan la modificación de las características del suelo. Las reacciones más importantes en el proceso de estabilización son:

- Intercambio de iones y floculación
- Reacción puzolánica
- Carbonatación

1.4. Situación actual de vivienda en Guatemala

La tierra cruda ha sido por muchos siglos uno de los principales materiales de construcción en todo el mundo debido a su fácil acceso y a su bajo costo. El estado de las construcciones con tierra en Guatemala, se ve reflejado en los censos habitacionales desarrollados.

En el III Censo de Vivienda realizado en 1973 (ver tabla I), se observa que el 39 % de las viviendas en Guatemala estaba construido con adobe donde el 51 % de estas viviendas estaba en el área urbana del país. La precariedad de las viviendas se puede observar fácilmente, ya que el mayor porcentaje de viviendas estaban construidas de adobe.

Tabla I. **III Censo de Vivienda, 1973**

| MATERIAL DE PARED EXTERIOR | CANTIDAD DE VIVIENDAS | % | VIVIENDA URBANA | % | VIVIENDA RURAL | % |
|-----------------------------------|------------------------------|----------|------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Ladrillo o block | 87 375 | 8,62 | 69 448 | 19,64 | 17 927 | 2,72 |
| Adobe | 397 670 | 39,23 | 181 910 | 51,45 | 215 760 | 32,68 |
| Madera | 174 219 | 17,18 | 54 760 | 15,49 | 119 459 | 18,09 |
| Lepa, palo o leña | 227 551 | 22,44 | 23 600 | 6,67 | 203 951 | 30,89 |
| Bajareque | 110 912 | 10,94 | 18 813 | 5,32 | 92 099 | 13,95 |
| Otro material | 16 090 | 1,59 | 5 049 | 1,43 | 11 041 | 1,67 |
| Total | 1 013 817 | 100 | 353 580 | 100 | 660 237 | 100 |

Fuente: Dirección General de Estadística.

Por otra parte el Censo Habitacional y Poblacional realizado en el año 2002 (ver tabla II), se observa que en el área urbana las construcciones con adobe disminuyeron al 24 %, este porcentaje es influenciado por el alza en las construcciones con block. Por otro lado se tiene el mismo porcentaje entre el 1973 y 2002 de construcciones de adobe en el área rural.

Tabla II. **Censo habitacional y poblacional, 2002**

| MATERIAL DE PARED EXTERIOR | CANTIDAD DE VIVIENDAS | % | VIVIENDA URBANA | % | VIVIENDA RURAL | % |
|-----------------------------------|------------------------------|----------|------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Block | 1 130 753 | 43,86 | 775 046 | 62,25 | 355 707 | 26,68 |
| Adobe | 625 905 | 24,28 | 178 647 | 14,35 | 447 258 | 33,55 |
| Madera | 426 336 | 16,54 | 99 561 | 8 | 326 775 | 24,51 |
| Ladrillo | 87 529 | 3,39 | 72 934 | 5,86 | 14 595 | 1,09 |
| Lepa, palo o leña | 86 625 | 3,36 | 14 289 | 1,15 | 72 336 | 5,43 |
| Bajareque | 80 561 | 3,12 | 11 995 | 0,96 | 68 566 | 5,14 |
| Concreto | 73 216 | 2,84 | 53 259 | 4,28 | 19 957 | 1,5 |
| Lámina metálica | 54 784 | 2,12 | 32 878 | 2,64 | 21 760 | 1,63 |
| Otro material | 12 556 | 0,49 | 6 357 | 0,51 | 6 199 | 0,46 |
| Total | 2 578 265 | 100 | 1 245 112 | 100 | 1 333 153 | 100 |

Fuente: Instituto Nacional de Estadística, 2004.

Se puede decir entonces que el adobe sigue siendo un material constructivo de gran importancia, principalmente en la vivienda rural y para las personas de menores ingresos.

1.5. Sacapulas

Municipio y cabecera municipal de Quiché. Conocido con el nombre de Santo Domingo Sacapulas. La cabecera está situada a 1 196 metros sobre el nivel del mar. Su producción es agrícola, especialmente caña de azúcar, maíz café, frutas y legumbres. Aunque hay pequeñas industrias de elaboración de sal de Sacapulas, objetos de plata, tejidos e hilados y dulces de panela.

El municipio de Sacapulas tiene una población de 45 200 habitantes cuenta con índice de desarrollo humano de 0,542. El municipio no cuenta con una oficina de ordenamiento, planificación territorial y catastro, en consecuencia, tampoco con un plan técnicamente normativo y operativo de ordenamiento territorial y desarrollo integral.

El tipo de construcción que se observa en Sacapulas, varía por ubicación, se puede decir que dentro del casco urbano en los últimos años se ha observado un incremento en las construcciones de mampostería de concreto, pero a pesar de ello, las construcciones de adobe siguen siendo predominantes.

Cuando se habla del área rural del municipio, se puede decir que más de un 96 % de las construcciones son de adobe, debido a la facilidad de construcción y obtención de materiales, el costo de la misma y la tradición.

2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

2.1. Muestreo

El muestreo de ambos materiales, puzolana y material para adobe, se realizó utilizando herramientas apropiadas como pala y piocha. Las muestras fueron extraídas cavando aproximadamente 5 centímetros o hasta donde la muestra no estuviera contaminada con ningún otro material o materia orgánica.

Las muestras fueron colocadas en sacos plásticos aproximadamente de 25 kilogramo debidamente identificados con el nombre del lugar de extracción de la muestra.

Figura 3. **Banco de material para elaboración de adobe, aldea Río Blanco, Sacapulas, Quiché**



Fuente: aldea Río Blanco, Sacapulas, Quiché.

2.2. Características de las muestras

Las muestras fueron recolectadas en el territorio de Sacapulas Quiché, realizando un recorrido sobre las principales carreteras del municipio, tomando en cuenta la accesibilidad para las mismas y la disponibilidad de los materiales a utilizar.

2.2.1. Puzolana

Las muestra de puzolana fue recolectada en un banco de la aldea San Jorge, Sacapulas que se encuentra a aproximadamente a 7 kilómetros de la cabecera municipal.

El material volcánico en estado natural presentaba una gradación fina principalmente, con gruesos de pómez aproximadamente de 1,5 centímetros. La muestra se encontraba en estado semihúmedo.

2.2.2. Material de adobe

Las muestras de arcilla fueron seleccionadas de un banco de una fábrica de adobe ubicada en la aldea Río Blanco, aproximadamente a 10 kilómetros de la cabecera municipal de Sacapulas.

El material en estado natural presentaba gradaciones diferentes, contenía rocas aproximadamente de 4 centímetros de diferente tipo.

2.3. Preparación de las muestras

La preparación de las muestras fue realizada a manera de optimizar recursos y mantener por el tiempo de estudio necesario las muestras en el estado natural en que se obtuvieron para evitar alteraciones y las condiciones necesarias de los materiales para los ensayos de laboratorio respectivos de cada material.

2.3.1. Puzolana

Ya obtenidas las muestras de puzolana se prepararon para los ensayos de laboratorio, principalmente para medir su reactividad puzolánica y granulometría como se describe más adelante, para luego dependiendo de los resultados obtenidos determinar su uso en los adobes.

2.3.1.1. Secado al sol

El secado al sol se realizó para extraer la humedad que contenía el material de forma natural para poder molerlo. Se colocó la muestra sobre carpetas de plástico negro de aproximadamente 1x1 metros y se extendió el material sobre las mismas, hasta dejar una capa de aproximadamente 2 centímetros.

2.3.1.2. Molienda

Para poder determinar la puzolanicidad en la muestra, es necesario molerla. El procedimiento se realizó en un molino de bolas marca Patterson con capacidad de 0,1 milímetros cúbicos, con 6 770 bolas grandes de diámetro 31,5 milímetros y 1 037 bolas pequeñas con diámetro de 24,5 milímetros, la molienda se realizó para 0,5, 1 y 1,5 horas.

2.3.2. Material para adobes

El material para la fabricación de adobes se utilizó en estado natural, es decir, en la forma en que se encontraba en el banco, solamente se mantuvo almacenado en sacos plásticos debidamente identificados y cerrados para evitar su contaminación.

El material se clasificó mediante los ensayos de granulometría y límites de Atterberg los cuales se describen más adelante.

Figura 4. **Muestra de material para adobes de la aldea Río Blanco**



Fuente: banco de material, aldea Río Blanco, Sacapulas, Quiché.

2.4. Ensayos

Para determinar las características de las muestras de material y las propuestas de proporciones para la elaboración de adobes, es necesario realizar ensayos de laboratorio, donde los resultados de los mismos darán parámetros para su clasificación y análisis.

2.4.1. Determinación de la reactividad puzolánica

El procedimiento se realizó bajo la Norma ASTM C593-06 (2011) “Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization” para la determinación de la resistencia.

2.4.1.1. Elaboración de mezcla

El procedimiento utilizado para la elaboración de mezclas es el descrito en la Norma ASTM C109-11 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-inches or 50- millimeters Cube Specimens)”, con ciertas variaciones especificadas en la Norma ASTM C593-06 (2011) “Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization” que indican los procedimientos ordenados y cronometrados.

En la Norma ASTM C593-06 (2011) “Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization” se especifica la dosificación de la mezcla la cual es la siguiente:

Tabla III. **Dosificación de mezcla puzolana-cal**

| Material | Cantidad |
|-----------------|-----------------|
| Cal Hidratada | 180 g |
| Arena Estándar | 1 480 g |
| Puzolana | 360 g |

Fuente: Norma ASTM C593-06 (2011) "Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization". p. 2.

2.4.1.2. Llenado de moldes

El proceso de llenado de moldes se realizó bajo la Norma ASTM C 109-11 "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement mortars (using 2-in or 50-mm Cube Specimens)", inciso 10.4.3.

Este proceso consiste en la preparación y llenado de los moldes del material, mezclado en dos capas que se apisonan con 32 perpendiculares a las caras del molde por capa y luego rasar (ver figura 5). Este proceso debe ser realizado con la misma energía, uniformidad y consistencia ya que de no hacerlo correctamente, los cubos pueden presentar defectos como vacíos (ratoneras) que influyen en el resultado de los ensayos de resistencia a compresión.

Figura 5. **Rasado de moldes después de apisonamiento**

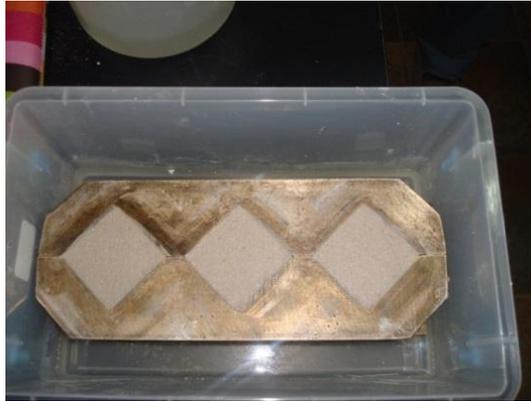


Fuente: Ing. Javier Quiñonez de la Cruz, sección de Ecomateriales, Centro de Investigaciones de Ingeniería USAC.

2.4.1.3. Curado en cámara de vapor

El proceso de curado es el que se indica en la Norma ASTM C593-06(2011) “Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization”, la cual indica que los especímenes deben ser colocados inmediatamente después de haber sido moldeados sobre agua, dentro de una cámara de vapor con la superficie del molde protegida contra el goteo a una temperatura de 54 °C y humedad controlada por 7 días.

Figura 6. **Moldes en recipientes cerrados para curado**



Fuente: Sección de Ecomateriales, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 7. **Muestras colocadas en cámara de vapor**



Fuente: Sección de Ecomateriales, Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

2.4.1.4. Ensayo de resistencia a compresión

El ensayo de resistencia a compresión, consiste en aplicar una carga axial a una velocidad aproximada de 200 a 400 lb/seg. Este ensayo se realizó en cubos con 7 días de curado en la cámara de vapor.

2.4.2. Gravedad específica

La gravedad específica de un suelo (GS) se define como el peso unitario del suelo, dividido por el peso unitario del agua destilada a cuatro grado Celsius, de esta manera se consideran solamente los granos del suelo.

Este ensayo de suelo es utilizado principalmente para calcular la relación de vacíos de un suelo, en el análisis hidrométrico y para predecir el peso unitario. El cálculo se realiza mediante datos obtenidos en laboratorio, como el peso del agua con el matraz, peso del suelo con el matraz, peso del matraz, peso del suelo, entre otros. Se utiliza la fórmula siguiente:

$$GS = \left(\frac{W_s}{W_{mw} + W_s - W_{msw}} \right) \alpha$$

Donde: W_s = peso del suelo

W_{mw} = peso del matraz + suelo

W_{msw} = peso del matraz + suelo + agua

2.4.3. Límites de Atterberg

La consistencia es el grado de cohesión que tienen las partículas de los suelos arcillosos, estos pueden tener diferentes grados de cohesión dependiendo de la cantidad de agua que contengan, esto dá lugar a los estados de consistencia.

Los límites de Atterberg son propiedades de los suelos, con los que se definen la plasticidad y se utilizan en la identificación y clasificación de un suelo. Así un suelo puede encontrarse en estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido.

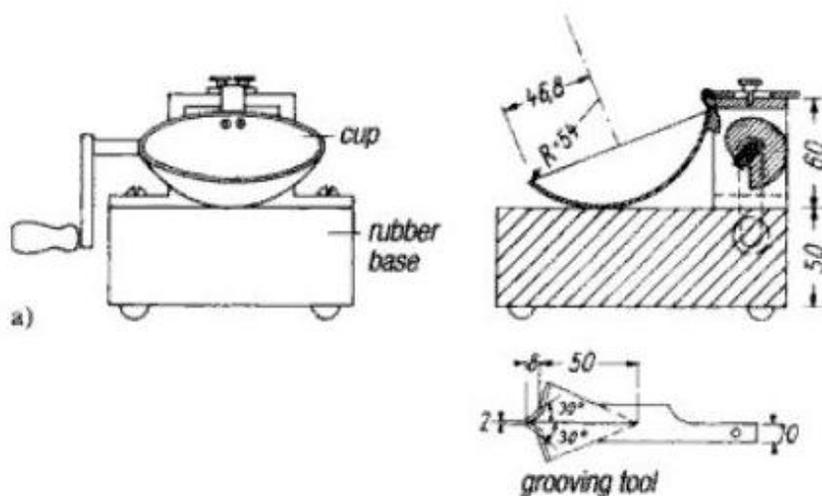
Atterberg dividió y consideró tres límites o estados de consistencia:

- Límite de contracción: es la frontera convencional entre el estado sólido y semisólido.
- Límite plástico: es la frontera entre los estados semisólido y plástico
- Límite líquido: es la frontera entre el estado plástico y semilíquido, o plástico y líquido.

2.4.3.1. Límite líquido

El límite líquido, según la Norma ASTM D-4318 “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils”, que establece que el límite se determina por medio de la copa de Casagrande, que consiste en una esfera de radio interior de 54 milímetros, espesor de 2 milímetros y un peso de 200,20 g, incluyendo el tacón que gira en torno a un eje fijo unido a la base.

Figura 8. **Copa Casagrande para determinación del límite líquido**



Fuente: Norma ASTM D-4318. *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. p. 3.

Arthur Casagrande, determinó que el límite líquido es una medida de resistencia al corte del suelo a un determinado contenido de humedad, y que cada golpe corresponde a un esfuerzo cortante cercano a 1 gramos por centímetro cuadrado.

El ensayo consiste en medir la cantidad de agua con la cual se obtiene un cierre en la ranura de $\frac{1}{2}$ pulgada al aplicar 25 golpes.

2.4.3.2. Límite plástico

El límite plástico se define como el contenido de humedad del suelo con el que se desmorona o se agrieta al moldearlo sobre la palma de la mano o una superficie lisa en un rollito de $\frac{1}{8}$ de pulgada de diámetro.

Esta prueba depende mucho del operador, ya que la definición de agrietamiento del rollito de suelo y el diámetro están sujetos a la interpretación del operador.

2.4.3.3. Índice de plasticidad

El índice de plasticidad numéricamente es la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP). Este representa la variación de humedad que puede tener un suelo que se conserva en estado plástico.

La clasificación de los suelos por el índice de plasticidad varía desde 0 a 17, lo que es un indicativo para razonar como trabaja el suelo en el terreno. En la tabla IV se muestran los rangos.

Tabla IV. **Clasificación de los suelos según su índice de plasticidad (IP)**

| | |
|---------|--|
| IP=0 | Si no es posible determinar uno de los límites o si la diferencia es negativa, se considera como un suelo no plástico. |
| IP<7 | El suelo tiene una baja plasticidad. |
| 7<IP<17 | El suelo es medianamente plástico. |
| IP>17 | Suelo altamente plástico. |

Fuente: BOWLES, Joseph E. *Manual de laboratorio de suelos para ingeniería civil*. p. 21.

2.4.4. Granulometría

El suelo puede tener una variedad considerable de granos, como granos de mayor tamaño que se pueden mover con facilidad y los más pequeños que no puede apreciar el ojo humano.

Según Braja M. Das en su libro *Fundamentos de la ingeniería geotécnica* la distribución granulométrica de suelos de granos gruesos generalmente se determina mediante análisis granulométrico por mallas, por otro lado, para suelos de grano fino la distribución granulométrica puede obtenerse por medio del análisis con hidrómetro.

2.4.4.1. Análisis granulométrico por mallas

El análisis granulométrico por mallas consiste en tomar una cantidad medida de suelo seco y pasarlo por una columna de tamices, que a medida que el material va bajando en la columna, la medida de las aberturas de los tamices se vuelven más pequeñas quedando solamente una charola en el fondo.

Luego se mide la cantidad de suelo retenido en cada una de las mallas y se calcula el porcentaje de suelo acumulado en cada tamiz. Según Braja M. Das esta cifra se designa como el porcentaje de partículas menores al tamaño asociado a la malla. En la tabla V, se especifican las principales aberturas de tamices y el número de tamiz.

Tabla V. Tamices y tamaños de aberturas

| TAMICES SERIE ASTM | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------|-----------|----------|--------|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|
| No. | Abertura | No | Abertura | No. | Abertura | No. | Abertura | No. | Abertura | No. | Abertura |
| 5" | 127 | 1 1/2" | 38.1 | 3/8" | 9.53 | 12 | 1.7 | 60 | 0.25 | 325 | 0.041 |
| 4.24" | 107.7 | 1 1/4" | 31.75 | 5/16" | 7.94 | 14 | 1.4 | 70 | 0.212 | 400 | 0.035 |
| 4" | 101.6 | 1.06" | 26.02 | 0.265" | 6.73 | 16 | 1.18 | 80 | 0.18 | 450 | 0.031 |
| 3 1/2" | 88.9 | 1" | 25.4 | 1/4" | 6.35 | 18 | 1 | 100 | 0.15 | 500 | 0.028 |
| 13/4" | 82.55 | 7/8" | 22.23 | 4 | 4.75 | 20 | 0.85 | 120 | 0.125 | 635 | 0.021 |
| 3" 2 | 76.2 | 3/4" | 19.05 | 5 | 4 | 25 | 0.71 | 140 | 0.106 | | |
| 1/2" | 63.5 | 5/8" | 15.88 | 6 | 3.35 | 30 | 0.6 | 170 | 0.09 | | |
| 2.12" | 53.85 | 0.53" | 13.46 | 7 | 2.8 | 35 | 0.5 | 200 | 0.075 | | |
| 2" 1 | 50.8 | 1/2" | 12.7 | 8 | 2.36 | 40 | 0.43 | 230 | 0.065 | | |
| 3/4" | 44.45 | 7/16" | 11.11 | 10 | 2 | 50 | 0.36 | 270 | 0.053 | | |

Fuente: Norma ASTM D-422 "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils". p. 2.

2.4.4.2. Análisis granulométrico por sedimentación–hidrómetro

El análisis granulométrico por sedimentación se utiliza para obtener un estimado de la distribución granulométrica de suelos cuyas partículas se encuentran desde el tamiz Núm. 200.

El principal objetivo de este ensayo es obtener el porcentaje de arcilla que contiene un suelo para poder clasificarlo como tal, ya que la curva de distribución granulométrica cuando más del 12 % del material pasa a través del tamiz No. 200, no se utiliza como criterio dentro de ningún sistema de clasificación de suelos, y no existe ningún tipo de conducta particular del material que dependa intrínsecamente de la forma de dicha curva.

El procedimiento de prueba se realiza bajo la Norma ASTM D422-02 “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils”.

2.4.5. Elaboración de adobes

Para la elaboración de adobes se siguió una serie de pasos basados en técnicas tradicionales de fabricación de adobe, tratando de mantener la menor cantidad de variables posibles en el proceso.

Básicamente el proceso de elaboración del adobe consiste en la mezcla del material con agua, hasta dejarlo con una consistencia pastosa para después moldear el material en la forma deseada con molde de madera, por último dejarlo secar al ambiente. La descripción más detallada del procedimiento se explica más adelante.

2.4.6. Ensayo de muestras a compresión

El procedimiento utilizado para el ensayo de las muestras a compresión, consiste en la preparación de las muestras y del ensayo en sí.

2.4.6.1. Labrado de cubos

Los cubos para el ensayo a compresión deben ser labrados directamente de un adobe completo para mantener los resultados lo más cercano a la realidad posible. La dimensión de los cubos debe ser la dimensión de la menor arista del adobe.

Los cubos, se labraron con una sierra eléctrica, primero marcando los lugares donde se debía cortar y luego cortando.

Figura 9. Labrado de cubos con sierra eléctrica



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Área de Prefabricados, USAC.

Figura 10. **Cubos labrados para ensayos a compresión**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Área de Prefabricados, USAC.

2.4.6.2. Ensayos a compresión de cubos de adobe

Los ensayos fueron realizados en una máquina Universal en el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

El ensayo consiste en colocar el cubo de muestra en la base de la máquina, como se muestra en la figura 10, para luego aplicar una carga axial de compresión a un cubo de adobe hasta que falle, anotando la carga a la que aparece la primer grieta y la carga final.

Figura 11. **Ensayo de cubos de adobe a compresión**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, Área de Morteros, USAC.

3. RESULTADOS

Los resultados que a continuación se presentan son la recopilación de información obtenida durante la selección de materiales para la elaboración de adobes y las mezclas finales para la elaboración de los mismos.

3.1. Reactividad puzolánica: ensayos a compresión de cubos

Debido a su composición física y química, la puzolana tiene un poder de reacción mayor al ser dividida en partículas más pequeñas, por lo que es necesario que tenga un proceso de molienda para llegar a ello.

En el caso de este trabajo de graduación, se toman distintos tiempos de molienda por lo que se tienen distintos tamaños de partículas por muestra, para lo cual se elaboraron probetas para ensayos a compresión para los distintos tiempos de molienda.

Tabla VI. **Identificación de muestras y tiempos de molienda: puzolana**

| IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|------------|
| MUESTRA | TIEMPO DE MOLIENDA (Horas) | IDENTIFICACIÓN | |
| SC | 0 | A | SCA |
| SC | 0,50 | B | SCB |
| SC | 1,00 | C | SCC |
| SC | 1,50 | D | SCD |

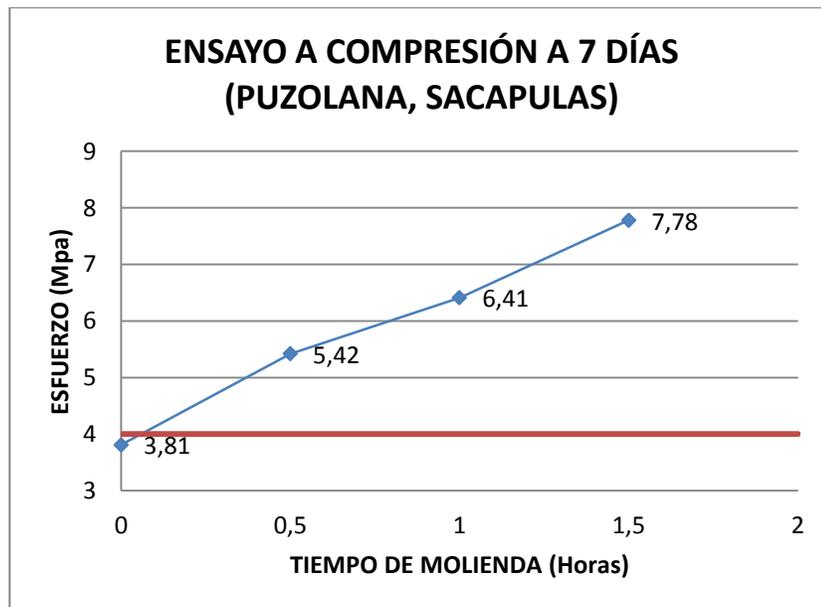
Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Resultados de ensayos a compresión de muestras de puzolana a distintos tiempos de molienda**

| ENSAYOS A 7 DÍAS (CURADO EN CÁMARA DE VAPOR) | | | | | | | | |
|--|-------------------------------|---------|----------------|-----------------|------------|-------------------|--------------------------|---------------------|
| MUESTRA | RESISTENCIA A COMPRESIÓN (KG) | | | ESFUERZOS (Mpa) | | | COEFICIENTE DE VARIACIÓN | DESVIACIÓN ESTANDAR |
| | Carga 1 | Carga 2 | Carga promedio | Esfuerzo 1 | Esfuerzo 2 | Esfuerzo promedio | | |
| SCA | 970 | 935 | 952,5 | 3,88 | 3,74 | 3,81 | 0,00129 | 0,0049 |
| SCB | 1 375 | 1 335 | 1 355 | 5,5 | 5,34 | 5,42 | 0,00118 | 0,0064 |
| SCC | 1 680 | 1 525 | 1 602,5 | 6,72 | 6,1 | 6,41 | 0,01499 | 0,0961 |
| SCD | 1 950 | 1 940 | 1 945 | 7,8 | 7,76 | 7,78 | 0,00005 | 0,0004 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Gráfico de resultados de ensayo a compresión de muestras de puzolana a distintos tiempos de molienda**



Fuente: elaboración propia.

3.2. Límites de Atterberg

Se analizan los límites de Atterberg para poder determinar si los materiales propuestos para la utilización en elaboración de adobes cumplen con criterios de plasticidad, es decir, si las partículas más pequeñas que los componen son arcillas o poseen características plásticas.

Tabla VIII. **Límites de Atterberg: Río Blanco**

| RÍO BLANCO | LÍMITE LÍQUIDO | LÍMITE PLÁSTICO |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
| NO TIENE LIMITES | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Límites de Atterberg: Chuzaculeu**

| Chuzaculeu | | |
|-------------------|----------|-----------------------------|
| LL=24,92 | LP=21,02 | BAJA PLASTICIDAD |

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Límites de Atterberg. Magdalena la Abundancia**

| Magdalena la Abundancia | | |
|--------------------------------|-----------|--------------------------------|
| LL=27,08 | LP= 17,67 | MEDIANA PLASTICIDAD |

Fuente: elaboración propia.

3.3. Granulometría de materiales en estado natural

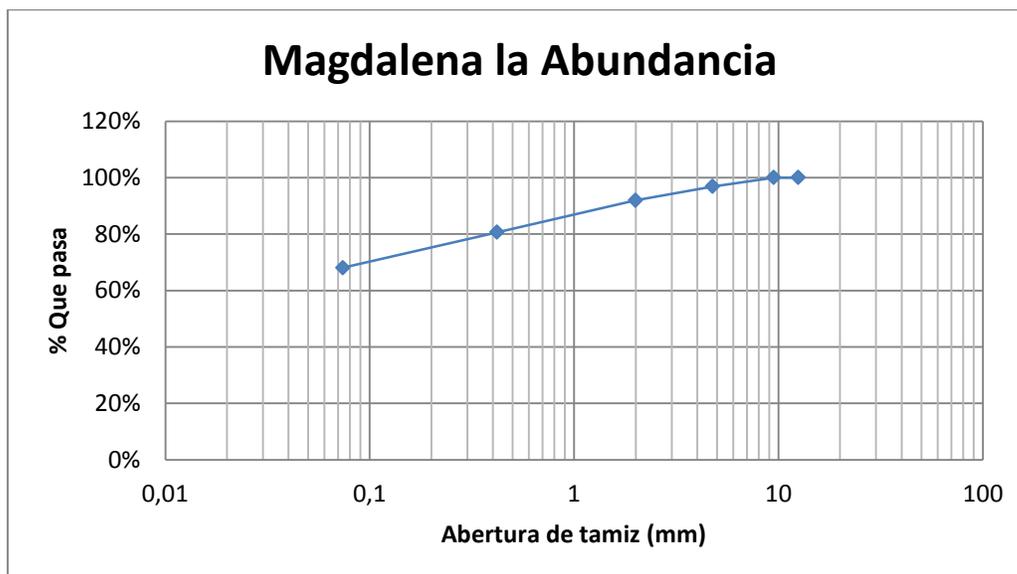
Para poder estabilizar físicamente un material, es necesario conocer las propiedades del mismo y las propiedades del material con el que se desea estabilizar.

Tabla XI. **Resumen de granulometría: Magdalena la Abundancia**

| | % |
|-------|-------|
| GRAVA | 3,11 |
| ARENA | 28,85 |
| FINOS | 68,04 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Granulometría: barro de Magdalena la Abundancia**



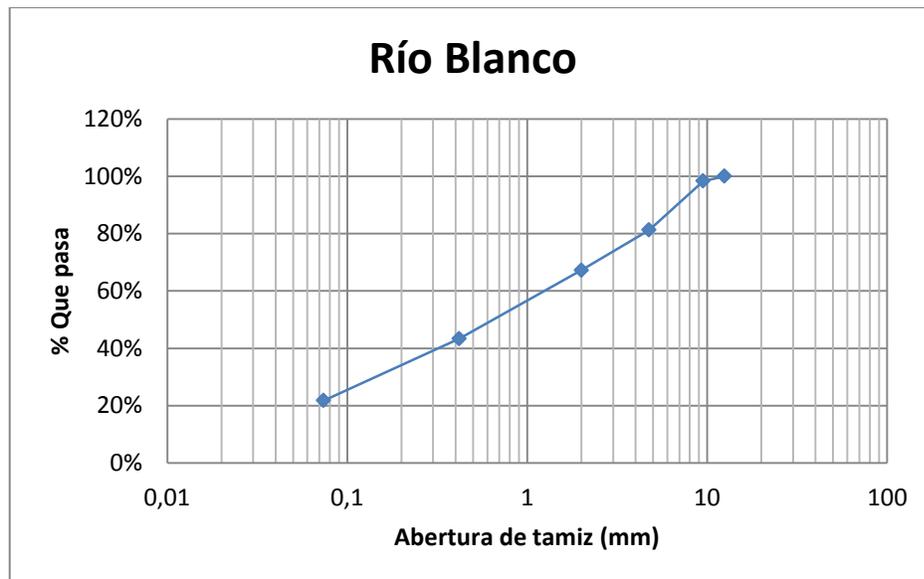
Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Resumen granulometría: Río Blanco**

| | % |
|-------|-------|
| GRAVA | 18,72 |
| ARENA | 59,51 |
| FINOS | 21,77 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Granulometría: barro de Río Blanco**



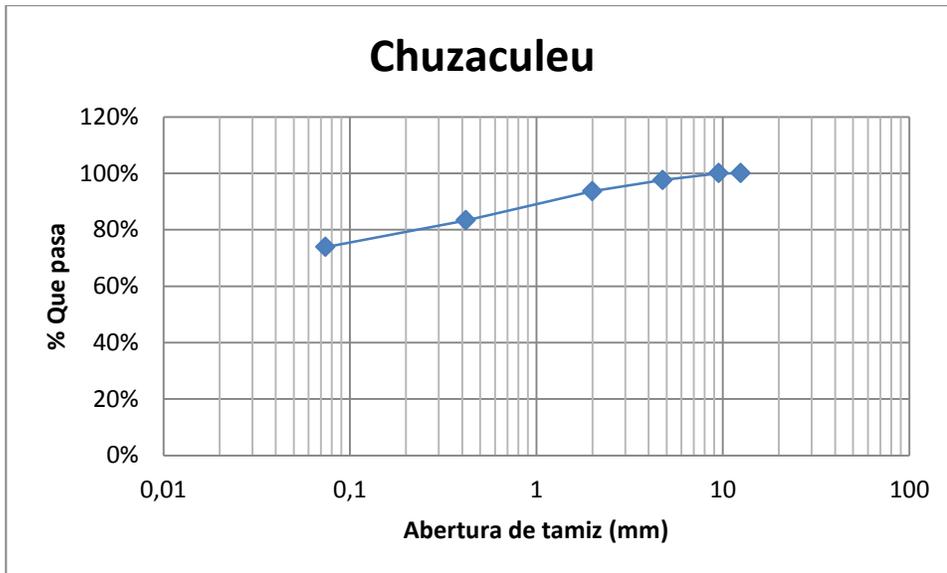
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resumen granulometría: Chuzaculeu**

| | % |
|-------|-------|
| GRAVA | 2,41 |
| ARENA | 23,73 |
| FINOS | 73,86 |

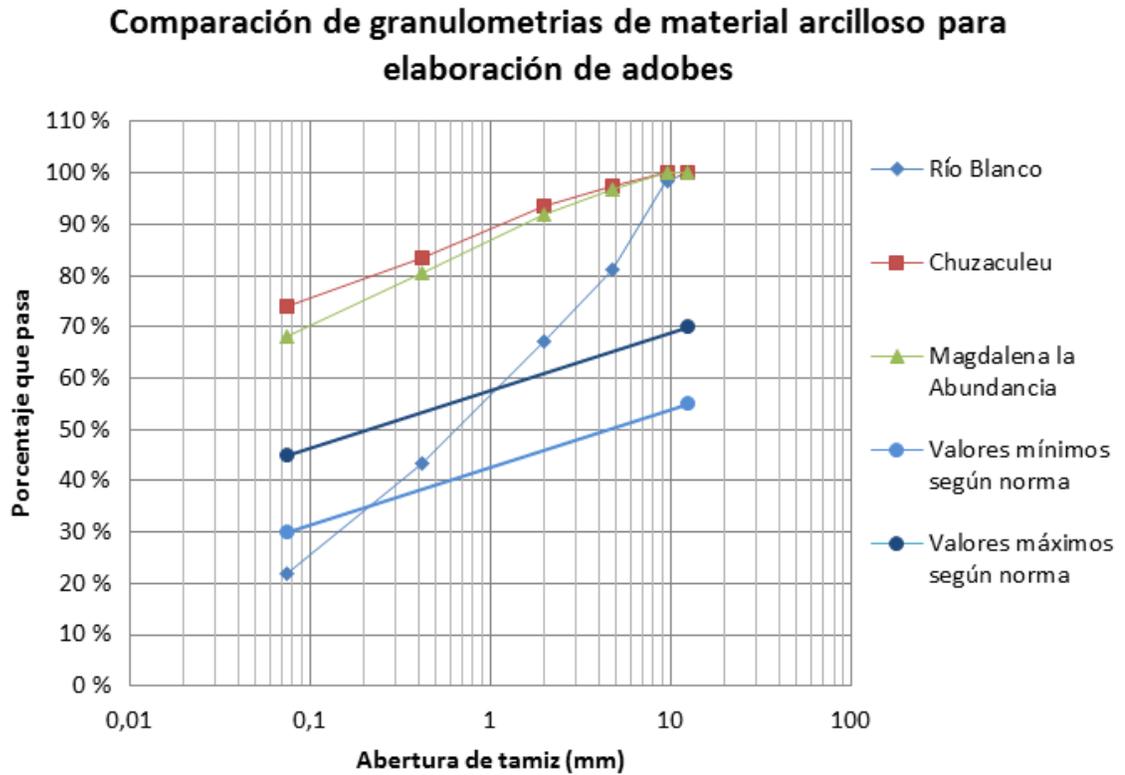
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Granulometría: barro de Chuzaculeu**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Resumen comparativo de resultados de granulometrías de materiales arcillosos para elaboración de adobes**



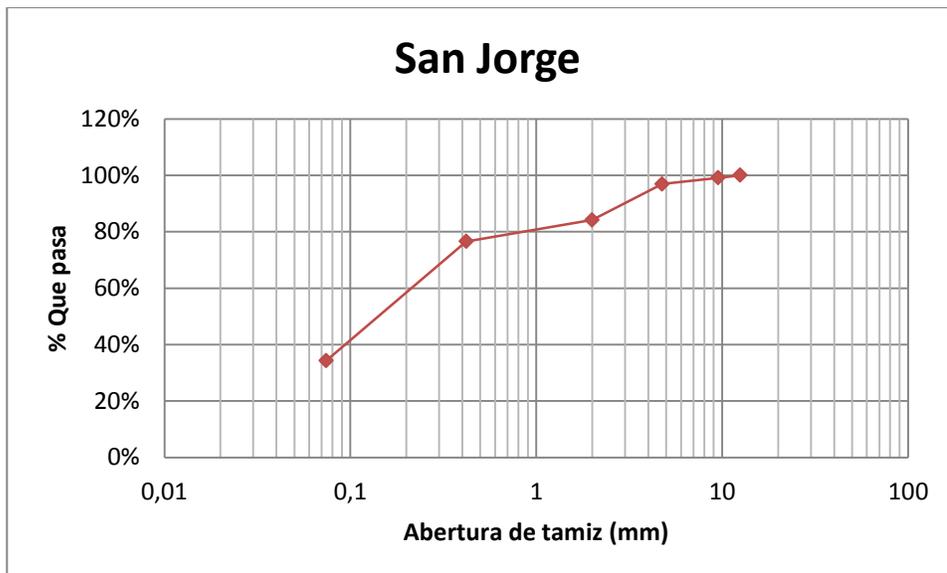
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Resumen de granulometría: San Jorge**

| | % |
|-------|-------|
| GRAVA | 3,08 |
| ARENA | 62,67 |
| FINOS | 34,25 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Granulometría: puzolana San Jorge**



Fuente: elaboración propia.

3.4. Distribución granulométrica por hidrómetro

Para poder determinar con mejor exactitud el tipo de suelo que se está manejando es necesario realizar una granulometría por medio de hidrómetro, ya que de esa manera se puede determinar la composición mínima del material, es decir, determinar si este posee partículas tan pequeñas que lo convierten en una arcilla o limo.

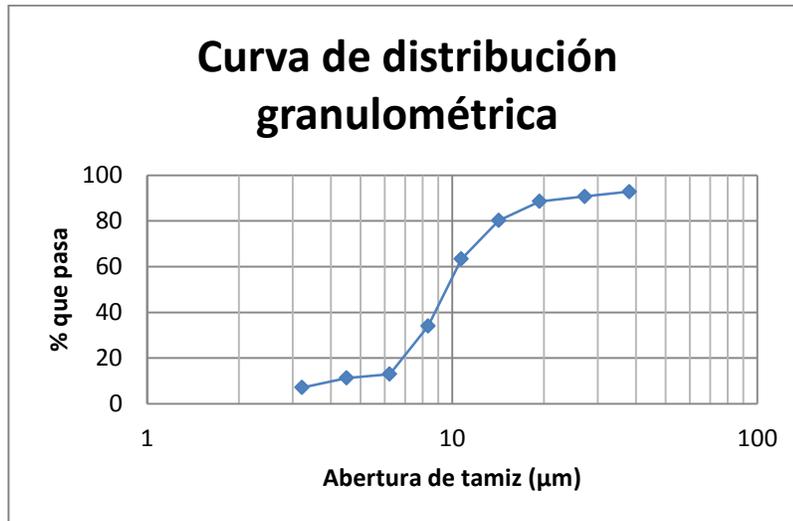
En este trabajo de graduación se analiza el material para adobes de Magdalena la Abundancia, ya que posee la mejor distribución granulométrica.

Tabla XV. **Distribución granulométrica (ensayo con hidrómetro)**

| Abertura (μm) | % que pasa |
|-------------------------------|------------|
| 38,05 | 92,82 |
| 27,22 | 90,72 |
| 19,36 | 88,62 |
| 14,21 | 80,22 |
| 10,71 | 63,42 |
| 8,33 | 34,02 |
| 6,24 | 13,02 |
| 4,51 | 11,34 |
| 3,22 | 7,14 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Gráfico de distribución granulométrica por hidrómetro**



Fuente: elaboración propia.

3.5. Granulometría de posibilidades

Las granulometrías de los materiales en estado natural no cumplen con los requisitos de distribución de tamaño de grano, por lo que se toman tres posibilidades de mezcla. Estas posibilidades consisten en la estabilización física de los materiales utilizando puzolana.

Para las mezclas se toma el material de Magdalena la Abundancia, ya que este posee mayor plasticidad que el resto de materiales, lo que hace que se produzca una mejor adherencia entre las partículas que conforman el adobe. Este material debe estabilizarse mecánicamente solo para equilibrar el porcentaje de arenas que posee, ya que esta contiene un 28,85 % de arena, mientras que la norma busca una granulometría con un porcentaje de arena del 55 % al 77 %.

3.5.1. Posibilidad A

La posibilidad A consiste en estabilizar mecánicamente el material para adobe de Magdalena la Abundancia. Debido a que para la estabilización de dicho material se necesita agregar arena, se separan los finos y la grava del material puzolánico dejando solamente la arena para poder utilizarla en la estabilización de dicho material.

Este proceso se realiza de la siguiente manera:

- Se retiran las gravas del material de Magdalena la Abundancia utilizando un tamiz de 1/4”;
- Se retiran las gravas del material puzolánico utilizando un tamiz de 1/4”;
- Se retiran los finos del material puzolánico utilizando un tamiz No. 30;
- Se mezclan ambos materiales ya tamizados en una proporción de 1:1.

Tabla XVI. **Eliminación de gravas: Magdalena la Abundancia**

| Eliminación de gravas (puzolana, gravas 3.11) | | | | |
|---|-------|----------------------|-------|---------------|
| Puzolana | % | % gravas distribuido | total | Aprox. |
| Arena | 28,85 | 0,89 | 29,74 | 30 |
| Finos | 68,04 | 2,12 | 70,16 | 70 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Gradación teórica de mezcla: posibilidad B**

| Material | Arena | Finos | |
|----------------------|--------------|--------------|-------|
| Magdalena Abundancia | 30 % | 70 % | |
| Puzolana | 100 % | 0 % | |
| | 130 % | 70 % | x 0,5 |
| | 65 % | 35 % | |

Fuente: elaboración propia.

3.5.2. Posibilidad B

La posibilidad B consiste en el mismo principio que la posibilidad A (anteriormente descrita en la sección 3.5.1.) con la variación en la separación de gravas ya que para esta se utiliza un tamiz Núm. 16, esto hace que sea más práctica la separación de finos, pero al mismo tiempo la gradación que permanece es más gruesa que la posibilidad A.

3.5.3. Posibilidad C

La posibilidad C consiste en no hacer la separación de finos y arena en la puzolana, sino que agregarla en estado natural solamente eliminando la grava con esto se supondrá que los finos serán utilizados como aglomerante, es decir “la parte fina que reacciona se utilizará como el estabilizante químico y la parte gruesa como el estabilizante mecánico”.

El material se mezclará con cal, lo que hará que las partículas que pasen por el tamiz No. 200 sean las que reaccionen, y la arena solamente sirva para alcanzar los requisitos físicos del material para la elaboración de adobes.

En este caso se utiliza una mezcla 0,25:0,75 con la cual se obtienen los resultados teóricos más favorables y que se acercan más a los requisitos de la norma NTE 080.

Tabla XVIII. **Gradación teórica de mezcla: posibilidad C**

| | 25 % Magdalena la Abundancia | | 75 % Puzolana | | Total |
|-------|------------------------------|------|---------------|------|-------------|
| arena | 0,25 | 30 % | 0,75 | 65 % | 56 % |
| finos | 0,25 | 70 % | 0,75 | 35 % | 44 % |

Fuente: elaboración propia.

3.5.4. Resultados de granulometrías de posibilidades de mezclas

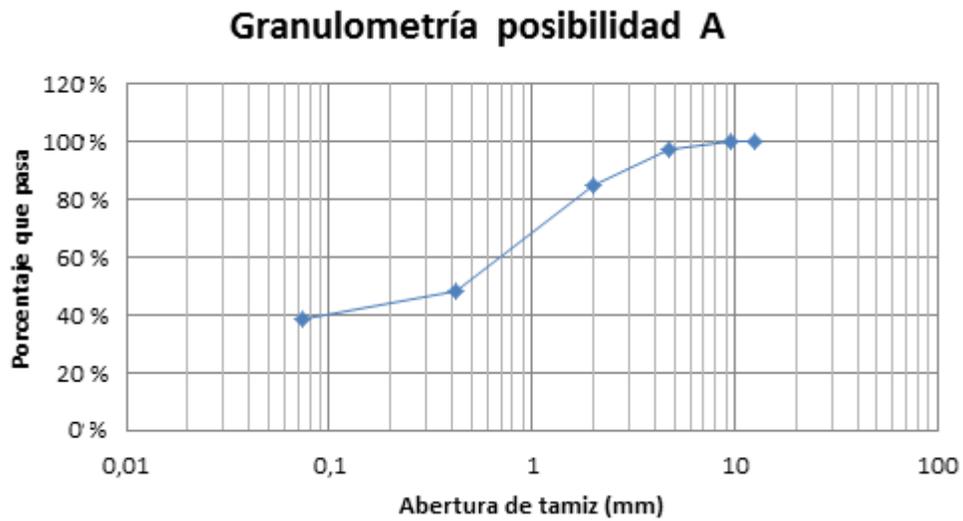
A continuación se presentan los resultados de los ensayos de granulometría realizados a las distintas muestras de posibilidades de mezclas para la elaboración de adobes.

Tabla XIX. **Resumen de granulometría: posibilidad A**

| | % |
|-------|-------|
| GRAVA | 2,56 |
| ARENA | 58,92 |
| FINOS | 38,52 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Granulometría: posibilidad A



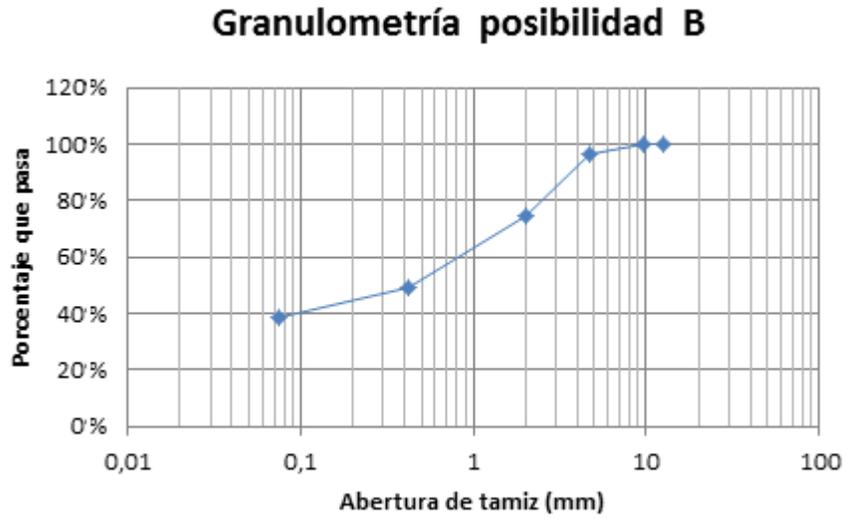
Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. Resumen de granulometría: posibilidad B

| | % |
|-------|-------|
| GRAVA | 3,84 |
| ARENA | 57,67 |
| FINOS | 38,49 |

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Granulometría: posibilidad B**



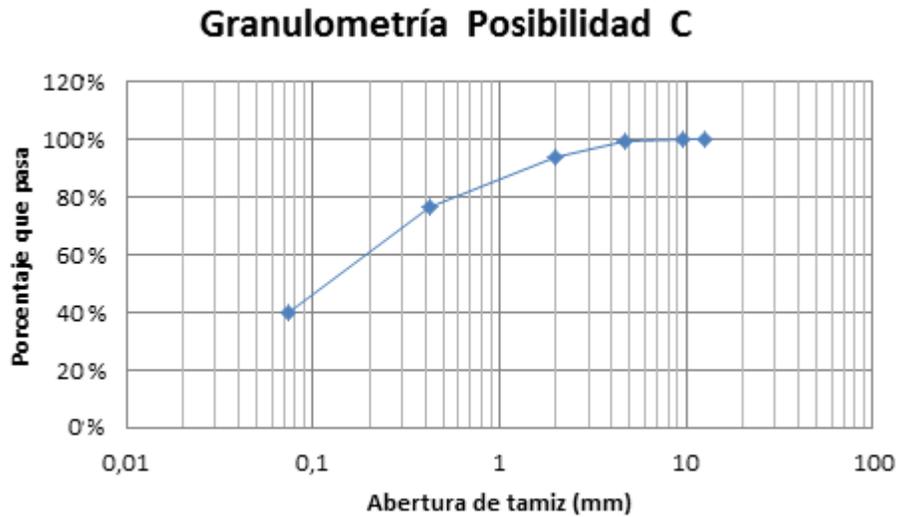
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Resumen de granulometría: posibilidad C**

| | % |
|-------|-------|
| GRAVA | 0,77 |
| ARENA | 59,18 |
| FINOS | 40,05 |

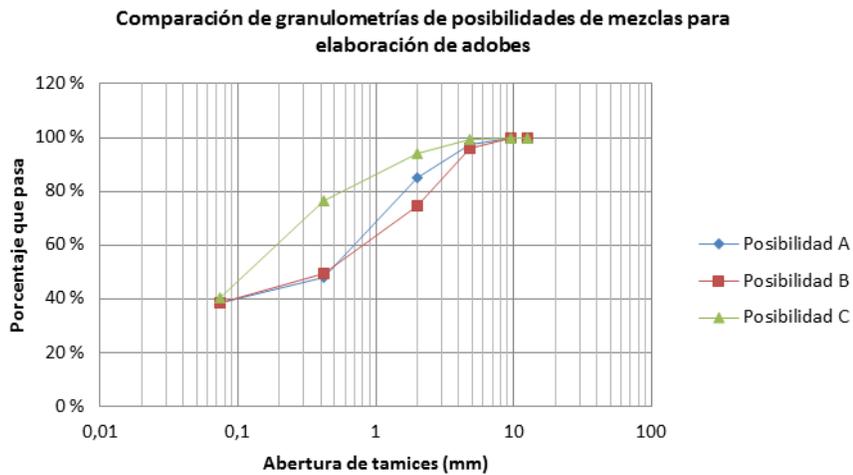
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Granulometría: posibilidad C



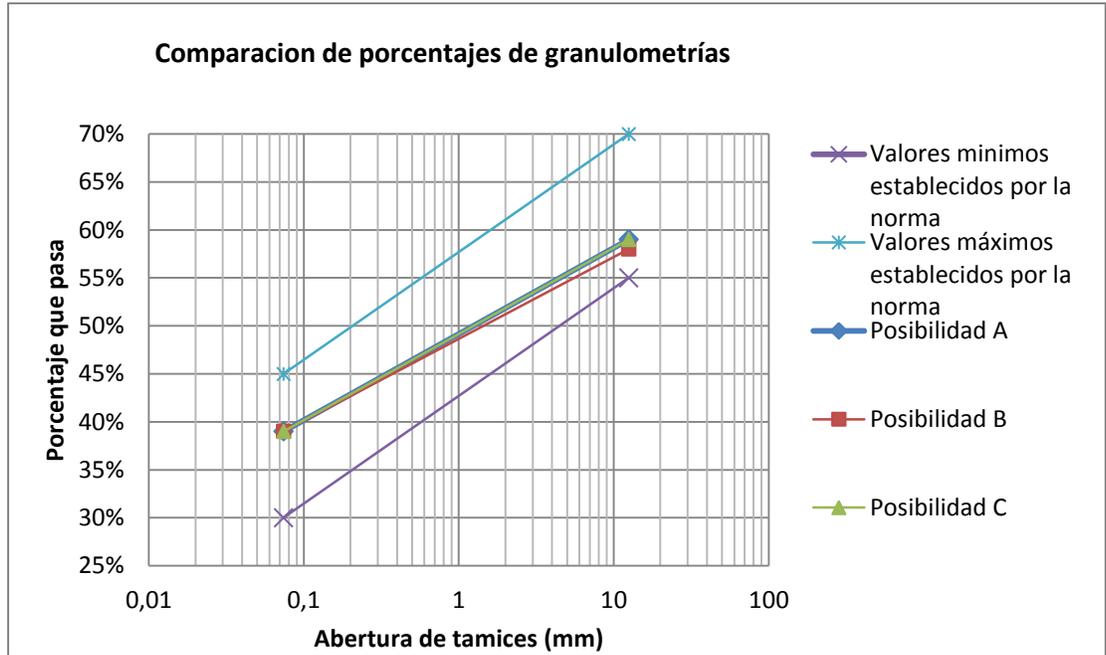
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Resumen comparativo de resultados de granulometrías de posibilidades de mezclas para elaboración de adobes con puzolana



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Resumen comparativo de porcentajes de finos y arena respecto al rango establecido por la Norma NTE 080**



Fuente: elaboración propia.

3.6. Resultados de ensayos a compresión mezclas para adobe

Una de las características principales de la puzolana es que el material por sí solo no tiene ningún poder cementicio, pero al mezclarlo con agua e hidróxido de calcio se produce una reacción química que forma un compuesto con propiedades cementicias.

Al estudiar las propiedades mecánicas de las posibilidades de mezclas para la elaboración de adobe, se observa que la mezcla que cumple de mejor manera con los requisitos y parámetros que especifica la Norma peruana NTE 080, es la obtenida con la posibilidad de mezcla C.

Se elaboraron adobes utilizando una mezcla 25 a 75 %, material de Magdalena la Abundancia y puzolana respectivamente. A esta se le agrega distintos porcentajes de cal para provocar la reacción química de la puzolana.

En el caso de este trabajo de graduación, se utilizan porcentajes de hidróxido de calcio del 3, 6 y 9 % del volumen total de mezcla.

Tabla XXII. **Resultados de ensayos a compresión de muestras de adobe con 0 % de hidróxido de calcio**

| Cantidad de Cal | Carga a Compresión (Kg) | | Esfuerzo a Compresión (Kg/cm ²) | |
|-----------------|-------------------------|-----------------|---|--------------|
| | 1er. Grieta | Falla | 1er. Grieta | Falla |
| 0% | | | | |
| A | 300 | 430 | 1,860 | 2,666 |
| B | 300 | 470 | 1,803 | 2,824 |
| C | 400 | 440 | 2,404 | 2,644 |
| | | Promedio | 2,022 | 2,712 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Resultados de ensayos a compresión de muestras de adobe con 3 % de cal**

| Cantidad de Cal | Carga a Compresión (Kg) | | Esfuerzo a Compresión Kg/cm ² | |
|-----------------|-------------------------|-----------------|--|--------------|
| | 1er. Grieta | Falla | 1er. Grieta | Falla |
| 3 % | | | | |
| A | 80 | 120 | 0,683 | 1,025 |
| B | 180 | 325 | 1,377 | 2,487 |
| C | 160 | 250 | 1,224 | 1,913 |
| | | Promedio | 1,095 | 1,808 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Resultados de ensayos a compresión de muestras de adobe con 6 % de cal**

| Cantidad de Cal | Carga a Compresión (Kg) | | Esfuerzo a Compresión Kg/cm ² | |
|-----------------|-------------------------|-----------------|--|--------------|
| | 1er. Grieta | Falla | 1er. Grieta | Falla |
| 6% | | | | |
| A | 160 | 390 | 1,387 | 3,381 |
| B | 240 | 420 | 1,965 | 3,438 |
| C | 340 | 410 | 2,849 | 3,435 |
| | | Promedio | 2,067 | 3,418 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Resultados de ensayos a compresión de muestras de adobe con 9 % de hidróxido de calcio**

| Cantidad de Cal | Carga a Compresión (Kg) | | Esfuerzo a Compresión Kg/cm ² | |
|-----------------|-------------------------|-----------------|--|--------------|
| | 1er. Grieta | Falla | 1er. Grieta | Falla |
| 9% | | | | |
| A | 360 | 420 | 2,542 | 2,966 |
| B | 480 | 640 | 3,418 | 4,558 |
| C | 300 | 520 | 2,016 | 3,494 |
| | | Promedio | 2,659 | 3,673 |

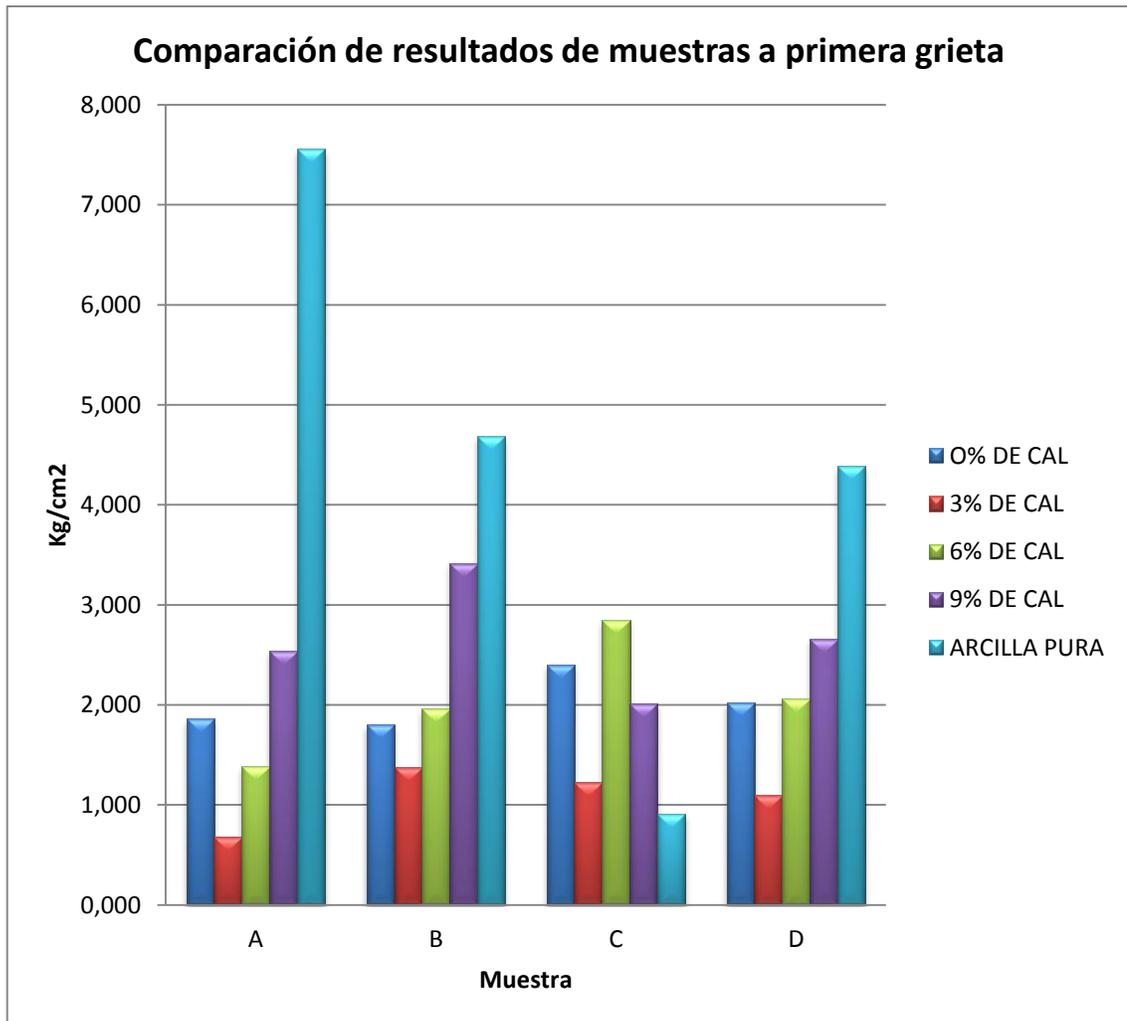
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Resultados de ensayos a compresión de muestras de adobe utilizando material de Magdalena la abundancia puro**

| Cantidad de Cal | Carga a Compresión (Kg) | | Esfuerzo a Compresión Kg/cm ² | |
|-----------------|-------------------------|-----------------|--|--------------|
| | 1er. Grieta | Falla | 1er. Grieta | Falla |
| Arcilla pura | | | | |
| A | 1 200 | 1 440 | 7,559 | 9,071 |
| B | 680 | 1 080 | 4,684 | 7,440 |
| C | 150 | 1 350 | 0,916 | 8,240 |
| | | Promedio | 4,386 | 8,250 |

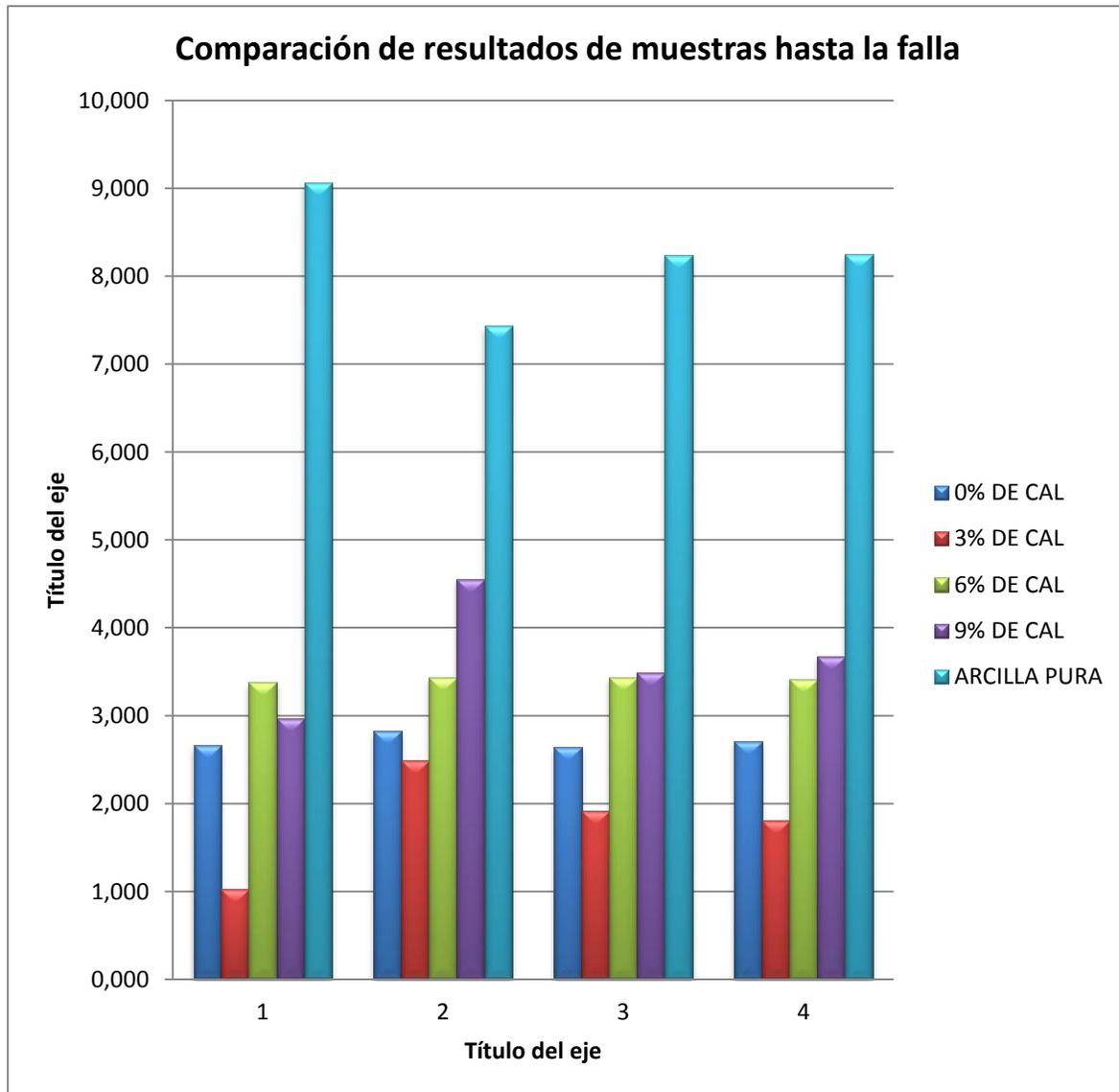
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Gráfico de comparación de resultados de resistencias a compresión de muestras de adobe a primera grieta**



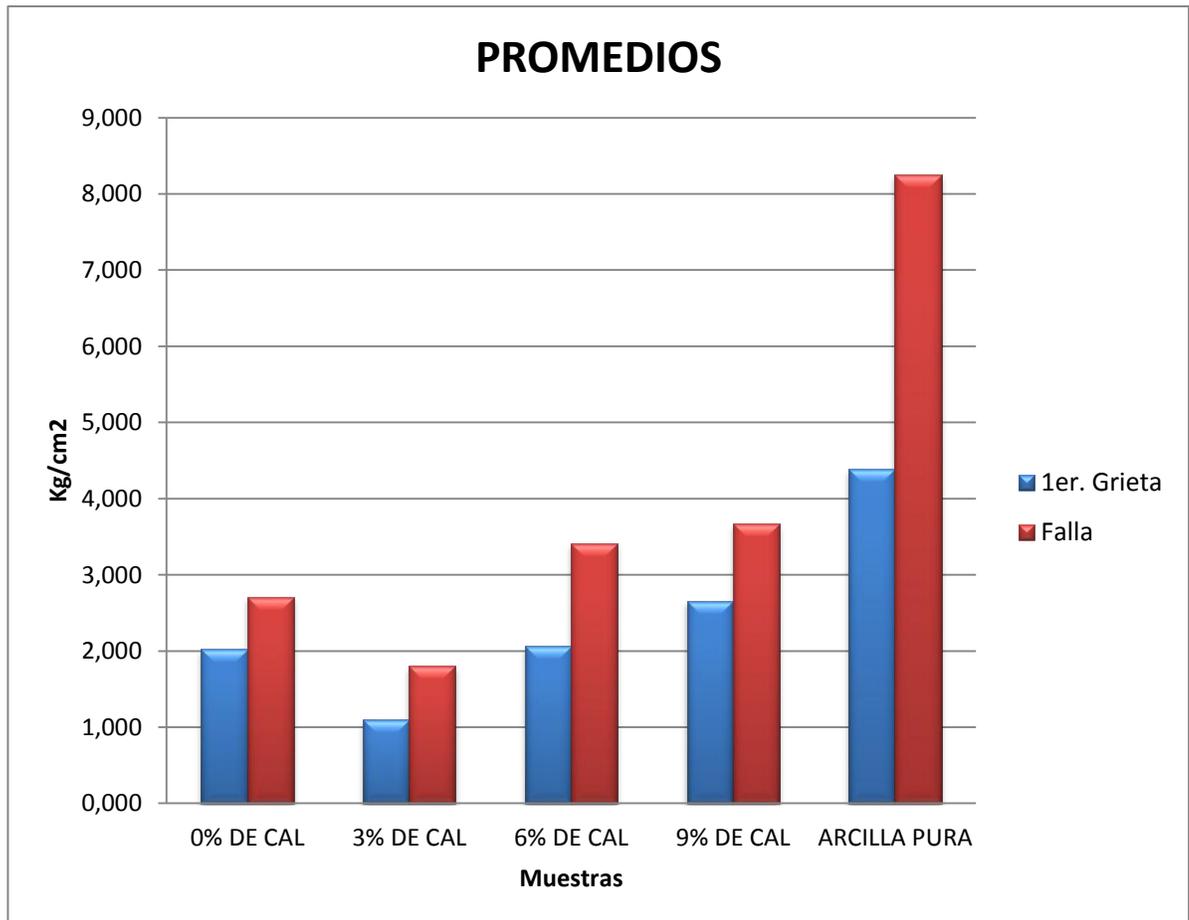
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Gráfico de comparación de resultados de resistencias a compresión de muestras de adobe hasta falla**



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Comparación de gráficos de resultados de ensayos a compresión de muestras de adobe a primera grieta y falla**



Fuente: elaboración propia.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. De granulometría de materiales en estado natural

Al momento de realizar el análisis de los resultados de granulometrías de los materiales Magdalena la Abundancia, Río Blanco y Chuzaculeu en estado natural, se puede observar que al realizar una comparación con los rangos admisibles que la Norma NTE 080 especifica, ninguno de ellos cumple.

Esto se debe a que, en el caso de los materiales de Magdalena la Abundancia y Chuzaculeu, los valores de los finos en ambos materiales sobrepasan el límite permisible ya que se encuentran en un rango de 68-73 %. Lo que hace necesario la estabilización física con arena, es decir, estabilización de la composición de los granos de los mismos, ya que la norma determina un rango entre 30-45 % de finos.

En el caso del material de Río Blanco, es lo contrario a los anteriores, ya que la cantidad de finos contenida en el mismo es insuficiente para cumplir la especificación de la norma, ya que se posee un porcentaje del 21 % mientras que la norma específica que deberá ser de un 30 % mínimo.

Debido a que es necesaria la estabilización física de los materiales para poder cumplir con los rangos permisibles de granulometría, se descarta el material de Río Blanco, ya que para la estabilización del mismo se necesita material con una granulometría que posea una cantidad significativa de finos y esto lo vuelve impráctico para la elaboración y mezcla de los mismos.

4.2. De los resultados de granulometría con el método del hidrómetro

Al hacer el análisis de los resultados de la prueba del hidrómetro se realizan con base en las especificaciones de la Norma ASTM D422-02 “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils”.

El suelo ensayado pertenece al grupo de limos, en este caso se caracteriza por ser un limo arcilloso color beige.

4.3. De los resultados de granulometría de las posibilidades de mezclas

Al hacer el análisis gráfico de los resultados de la granulometría de las posibilidades de mezcla para la elaboración de adobes, se observa que las tres opciones quedan dentro de los rangos de distribución de granos establecidos por la norma, por lo que se ha de analizar, la practicidad de elaboración en campo.

Debido a que las posibilidades A y B consisten en tamizar ambos materiales mezclados para poder llegar al resultado, se hace impráctica la elaboración de adobes con las mismas. El hecho de la necesidad de separación de granos implica un aumento en el tiempo de elaboración de adobes e incremento en los recursos, ya que se desperdicia gran parte del material que se separa, por lo que se necesita una cantidad mayor del mismo.

Por otro lado la mezcla elaborada con las proporciones de la posibilidad C, debido a que al material es necesario solamente retirarle las partículas de grava, se encuentra más práctico al momento de la elaboración en campo, ya que hay mínimo desperdicio de material y el tiempo de ejecución disminuye, esto debido a que es menor la cantidad de trabajo de mezclado y separación la

que se necesita. Por lo que se considera a la posibilidad C la más práctica y adecuada para la elaboración de adobes.

Por otro lado se puede decir que en el caso de la posibilidad C, aparte de la practicidad de la utilización de la puzolana en estado natural sino que solamente eliminando la grava, con esto se supone que los finos serán utilizados como aglomerante, es decir la parte fina que reacciona se utilizará como el estabilizante químico y la parte gruesa como el estabilizante mecánico.

Por lo anterior se considera que:

4.4. De los resultados de ensayos a compresión de muestras de adobe

Al realizar el análisis de los resultados de los ensayos a compresión de las distintas muestras de adobes realizadas, hay tres aspectos importantes a evaluar.

- El primero de los aspectos a evaluar es que según las gráficas de resultados, es que los adobes realizados con la posibilidad de mezcla C poseen una mínima resistencia al solamente utilizar la mezcla o en si, con poca cantidad de cal.

A medida que se aumenta el porcentaje de cal en la mezcla, la resistencia va aumentando pero aun así no cumplen con los requerimientos de resistencia a compresión que establece la Norma chilena NTE 080, la cual especifica que el valor mínimo de resistencia a compresión debe ser de 12 Kilogramos por centímetro cuadrado.

- El segundo aspecto importante a analizar, es el comportamiento a compresión de los adobes elaborados solamente con el material de Magdalena la abundancia en estado natural.

Estas muestras de adobe elaboradas con el material en estado natural, alcanzan mayores resistencias que cualquier otra muestra elaborada con distintas mezclas de cal y puzolana.

- El tercer aspecto a evaluar es la variación entre las resistencias de las muestras de adobe elaboradas con material natural, ya que a pesar de que son significativamente altas, son demasiado variables, lo que no hace al material confiable.

CONCLUSIONES

1. El material utilizado actualmente en la elaboración de adobes que se apega más a las necesidades mecánicas del mismo, es el material de Magdalena la Abundancia, ya que este es un limo arcilloso, por lo que posee propiedades plásticas que dan una mayor resistencia a compresión y una mayor adhesión entre partículas.
2. Los resultados de los ensayos a compresión de las muestras de material puzolánico, muestran que mientras mayor es el grado de molienda, mayor es la resistencia a compresión que poseen las mismas. Esto es debido a que existen menos cavidades en la composición microscópica de la puzolana y al momento de la molienda, estas cavidades se rompen, lo que hace que haya más material en contacto con los agentes reaccionantes (cal).
3. La trituración del material puzolánico es importante, ya que de esa manera las partículas de menor tamaño reaccionan con la cal y el agua, por lo que actúa como un aglomerante y las partículas gruesas actúan como un estabilizante fisicomecánico.
4. En la estabilización de adobes con puzolana, es necesario la utilización de cal para provocar una reacción química. Según resultados, no se debe utilizar una cantidad de cal menor al 9 % del volumen completo de material y un 75 % de material puzolánico respecto a la mezcla con la arcilla de elaboración de adobes, ya que de esta manera se llega a la resistencia mínima que la Norma NTE 080 permite.

5. Para el cumplimiento de los requisitos de granulometría que establece la norma, se debe utilizar el 75 % de material puzolánico para la elaboración de adobes con este material, puede decirse que son principalmente adobes de puzolana con adición de arcilla, lo que vuelve al adobe poco viable en elaboración.

6. Debido a que los resultados a compresión de los adobes con adición de puzolana fueron los mínimos, especificados por la Norma Peruana NTE 080 Elaboración de Adobes, no se consideró necesario la realización de pruebas a flexión de los mismos, ya que la resistencia es muy pequeña por lo que no se pueden esperar resultados satisfactorios en las mismas, y la norma no especifica un rango de resistencia a flexión de los mismos.

7. Con base en los resultados a compresión de las diferentes muestras de adobes, se observa que los adobes elaborados alcanzan las resistencias mínimas a compresión que establece la Norma NTE 080 que es de 12 kilogramos por centímetro cuadrado, pero es necesario tener en cuenta que estos resultados son óptimos por la condiciones de laboratorio.

RECOMENDACIONES

Ante la evidente necesidad que tiene el uso del adobe para la construcción de vivienda en el área de estudio, se recomienda:

1. El uso del material de Magdalena la Abundancia, debido a sus propiedades físicas, como granulometría y plasticidad.
2. Estudio sobre el comportamiento de los adobes con adición respecto a la humedad o agua.
3. Para la edificación de viviendas tradicionales con adobe, no importando el tipo de adobe a utilizar, es necesario seguir los principios constructivos siguientes, que son necesarios para que la vivienda trabaje estructuralmente de manera adecuada.
 - En cuanto a relación longitud – altura de muro no sea menor a 1,2
 - Relación del ancho – largo del adobe 0,5, siendo el largo no mayor a 60 cm.
 - Contar con muros transversales que estén a más de 4,00 metros entre ellos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM, Norma. *ASTM C593-06 Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization*. USA Book Of Standards. 2011. 5 p.
2. _____. *D-4318 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. USA Book Of Standards. 2000. 14 p.
3. _____. *C618-12 Coal Fly Ash or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. USA Book Of Standards. 2002. 8 p.
4. BAUTISTA GALLARDO, Pablo José. *Determinación del índice de reactividad mecánica de 18 muestras de materiales volcánicos de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 153 p.
5. BLONDET, Marcial; et al. *Construcciones de adobe resistentes a los terremotos: Tutor*. Perú: Enciclopedia mundial de vivienda, 2003, 25 p.
6. MINKE, Gernot. *Manual de construcciones con tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación a la arquitectura*. Alemania: FEB, 2005. 224 p.

7. Norma Técnica de Edificación 080 Adobe. [en línea]
<http://es.slideshare.net/jovoc/normas-tecnicas-del-adobe>.
[Consulta: mayo de 2014].

8. OCHOA J., Luis. *Caracterización geológica y física de 8 muestras de puzolanas de origen volcánico de la región de occidente de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 133 p.

9. PACHE TORRAL, Said Jalalí. *Eco-efficient Construction and Building Materials*. 2011. 247 p.

APÉNDICES

APÉNDICE A: ENSAYOS DE SUELOS



ENSAYO DE GRANULOMETRÍA: RIO BLANCO

FECHA: 03/05/2013

PESO BRUTO SECO (g): 1446.19
TARA (g): 161.91
PESO NETO SECO (g): 1284.28

| RÍO BLANCO | | | | | |
|------------|---------------|-----------------|-----------|----------------|------------|
| TAMIZ | ABERTURA (mm) | PESO BRUTO (gr) | TARA (gr) | PESO NETO (gr) | PORCENTAJE |
| 1/2" | 12.5 | 1166.3 | 161.68 | 1004.62 | 100% |
| 3/4" | 9.5 | 1145.13 | 161.68 | 983.45 | 98% |
| #4 | 4.76 | 926.01 | 161.68 | 764.33 | 81% |
| #10 | 2 | 745.08 | 161.68 | 583.4 | 67% |
| #40 | 0.42 | 439.32 | 161.68 | 277.64 | 43% |
| #200 | 0.074 | | 161.68 | 279.66 | 22% |

**ENSAYO DE GRANULOMETRÍA: CHUZACULEU**

FECHA: 20/3/2013

PESO BRUTO SECO (g): 1432.43

TARA (g): 323.2

PESO NETO SECO (g): 1109.23

| CHUZACULEU | | | | | |
|------------|---------------|-----------------|-----------|----------------|------------|
| TAMIZ | ABERTURA (mm) | PESO BRUTO (gr) | TARA (gr) | PESO NETO (gr) | PORCENTAJE |
| 1/2" | 12.5 | 399.21 | 109.35 | 289.86 | 100% |
| 3/4" | 9.5 | 399.21 | 109.35 | 289.86 | 100% |
| #4 | 4.76 | 372.48 | 109.35 | 263.13 | 98% |
| #10 | 2 | 328.91 | 109.35 | 219.56 | 94% |
| #40 | 0.42 | 214.32 | 109.35 | 104.97 | 83% |
| #200 | 0.074 | | 109.35 | 819.37 | 74% |

**ENSAYO DE GRANULOMETRÍA: MAGDALENA LA ABUNDANCIA**

FECHA: 20/3/2013

PESO BRUTO SECO (g): 1343.11

TARA (g): 317.45

PESO NETO SECO (g): 1025.66

| MAGDALENA LA ABUNDANCIA | | | | | |
|-------------------------|---------------|-----------------|-----------|----------------|------------|
| TAMIZ | ABERTURA (mm) | PESO BRUTO (gr) | TARA (gr) | PESO NETO (gr) | PORCENTAJE |
| 1/2" | 12.5 | 499.85 | 172.15 | 327.7 | 100% |
| 3/4" | 9.5 | 499.85 | 172.15 | 327.7 | 100% |
| #4 | 4.76 | 468.03 | 172.15 | 295.88 | 97% |
| #10 | 2 | 417.17 | 172.15 | 245.02 | 92% |
| #40 | 0.42 | 301.2 | 172.15 | 129.05 | 81% |
| #200 | 0.074 | | 172.15 | 697.96 | 68% |

**ENSAYO DE GRANULOMETRÍA: PUZOLANA (SAN JORGE)**

FECHA: 04/11/2013

PESO BRUTO SECO (g): 914.68

TARA (g): 221.21

PESO NETO SECO (g): 693.47

| SAN JORGE | | | | | |
|------------------|---------------|-----------------|-----------|----------------|------------|
| TAMIZ | ABERTURA (mm) | PESO BRUTO (gr) | TARA (gr) | PESO NETO (gr) | PORCENTAJE |
| 1/2" | 12.5 | 627.89 | 171.94 | 455.95 | 100% |
| 3/4" | 9.5 | 621.67 | 171.94 | 449.73 | 99% |
| #4 | 4.76 | 606.56 | 171.94 | 434.62 | 97% |
| #10 | 2 | 518.05 | 171.94 | 346.11 | 84% |
| #40 | 0.42 | 465.23 | 171.94 | 293.29 | 77% |
| #200 | 0.074 | | 171.94 | 237.52 | 34% |

**ENSAYO DE GRANULOMETRÍA: POSIBILIDAD B**

FECHA: 16/04/2013

PESO BRUTO SECO (g): 598.68

TARA (g): 96.43

PESO NETO SECO (g): 502.25

| TAMIZ | ABERTURA (mm) | PESO BRUTO (gr) | TARA (gr) | PESO NETO (gr) | PORCENTAJE |
|-------|---------------|-----------------|-----------|----------------|------------|
| 1/2" | 12.5 | 405.18 | 96.29 | 308.89 | 100% |
| 3/4" | 9.5 | 405.18 | 96.29 | 308.89 | 100% |
| #4 | 4.76 | 385.91 | 96.29 | 289.62 | 96% |
| #10 | 2 | 277.33 | 96.29 | 181.04 | 75% |
| #40 | 0.42 | 151.27 | 96.29 | 54.98 | 49% |
| #200 | 0.074 | | 96.29 | 193.36 | 38% |

**ENSAYO DE GRANULOMETRÍA: POSIBILIDAD C**

FECHA: 16/04/2013

PESO BRUTO SECO (g): 957.67
TARA (g): 166.32
PESO NETO SECO (g): 791.35

| TAMIZ | ABERTURA (mm) | PESO BRUTO (gr) | TARA (gr) | PESO NETO (gr) | PORCENTAJE |
|-------|---------------|-----------------|-----------|----------------|------------|
| 1/2" | 12.5 | 570.64 | 96.29 | 474.35 | 100% |
| 3/4" | 9.5 | 570.64 | 96.29 | 474.35 | 100% |
| #4 | 4.76 | 564.59 | 96.29 | 468.3 | 99% |
| #10 | 2 | 523.3 | 96.29 | 427.01 | 94% |
| #40 | 0.42 | 383.34 | 96.29 | 287.05 | 76% |
| #200 | 0.074 | | 96.29 | 317 | 40% |

**ENSAYO DE GRANULOMETRÍA: POSIBILIDAD A**

FECHA: 16/04/2013

PESO BRUTO SECO (g): 965.32
TARA (g): 173.65
PESO NETO SECO (g): 791.67

| TAMIZ | ABERTURA (mm) | PESO BRUTO (gr) | TARA (gr) | PESO NETO (gr) | PORCENTAJE |
|-------|---------------|-----------------|-----------|----------------|------------|
| 1/2" | 12.5 | 582.97 | 96.29 | 486.68 | 100% |
| 3/4" | 9.5 | 582.97 | 96.29 | 486.68 | 100% |
| #4 | 4.76 | 562.75 | 96.29 | 466.46 | 97% |
| #10 | 2 | 462.85 | 96.29 | 366.56 | 85% |
| #40 | 0.42 | 171.09 | 96.29 | 74.8 | 48% |
| #200 | 0.074 | | 96.29 | 304.99 | 39% |

|  LIMITES DE ATTERBERG | | | | |
|---|-----------------------|-------------------------|------------------------|-------|
| CHUZACULEU | LÍMITE LÍQUIDO | | LÍMITE PLÁSTICO | |
| Golpes | 19 | | | |
| Tarro | S-7 | A-23 | S-4 | A-51 |
| Tara | 21.56 | 21.46 | 21.73 | 19.97 |
| PBH | 45.15 | 43.55 | 37.17 | 35.21 |
| PBS | 40.35 | 38.99 | 34.43 | 32.62 |
| AGUA | 25.54 | 26.01 | 21.57 | 20.47 |
| AGUA % | 25.77% | | 21.02 | |
| | K=0.9673 | | | |
| LL=24.92 | LP=21.02 | BAJA PLASTICIDAD | | |
| IP=5 | | | | |

|  LIMITES DE ATTERBERG | | | | |
|---|-----------------------|----------------------------|------------------------|-------|
| LA ABUNDANCIA | LÍMITE LÍQUIDO | | LÍMITE PLÁSTICO | |
| Golpes | 30 | | | |
| Tarro | T-8 | E-1 | S-32 | M-1 |
| Tara | 21.66 | 21.51 | 21.63 | 43.78 |
| PBH | 38.3 | 43.72 | 29.35 | 52.19 |
| PBS | 34.82 | 39.06 | 28.16 | 50.96 |
| AGUA | 26.44 | 26.55 | 18.22 | 17.13 |
| | 26.495 | | 17.675 | |
| | K=1.0223 | | | |
| LL=27.08 | LP= 17.67 | MEDIANA PLASTICIDAD | | |
| IP=9 | | | | |

| PRUEBA DE HIDRÓMETRO: MAGDALENA LA ABUNDANCIA | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------|-----------------|--------------------|------------------|------------------------|------|------|---|------|----------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Lapsos de tiempo (min) | Lectura hidrómetro | Corrección cero | Corrección menisco | Temperatura (°C) | Corrección temperatura | Rc | R | Profundidad efectiva del hidrómetro "L" (Tabla XXIII) | L/T | Valor K (Tabla XXII) | Diámetro del suelo (mm) | Suelo en suspensión (% mas fino) |
| 1 | 47 | 3 | 0.1 | 21 | 0.2 | 44.2 | 47.1 | 8.6 | 8.6 | 0.012976 | 0.03805 | 92.82 |
| 2 | 46 | 3 | 0.1 | 21 | 0.2 | 43.2 | 46.1 | 8.8 | 4.4 | 0.012976 | 0.02722 | 90.72 |
| 4 | 45 | 3 | 0.1 | 21 | 0.2 | 42.2 | 45.1 | 8.9 | 2.23 | 0.012976 | 0.01936 | 88.62 |
| 8 | 41 | 3 | 0.1 | 21 | 0.2 | 38.2 | 41.1 | 9.6 | 1.2 | 0.012976 | 0.01421 | 80.22 |
| 16 | 33 | 3 | 0.1 | 21 | 0.2 | 30.2 | 33.1 | 10.9 | 0.68 | 0.012976 | 0.01071 | 63.42 |
| 32 | 19 | 3 | 0.1 | 21 | 0.2 | 16.2 | 19.1 | 13.2 | 0.41 | 0.012976 | 0.00833 | 34.02 |
| 4 | 9 | 3 | 0.1 | 21 | 0.2 | 6.2 | 9.1 | 14.8 | 0.23 | 0.012976 | 0.00624 | 13.02 |
| 120 | 8 | 3 | 0.1 | 22 | 0.4 | 5.4 | 8.1 | 15 | 0.13 | 0.012976 | 0.00451 | 11.34 |
| 240 | 6 | 3 | 0.1 | 22 | 0.4 | 3.4 | 6.1 | 15.3 | 0.06 | 0.012976 | 0.00322 | 7.14 |

| Abertura (µm) | % que pasa |
|---------------|------------|
| 38.05 | 92.82 |
| 27.22 | 90.72 |
| 19.36 | 88.62 |
| 14.21 | 80.22 |
| 10.71 | 63.42 |
| 8.33 | 34.02 |
| 6.24 | 13.02 |
| 4.51 | 11.34 |
| 3.22 | 7.14 |

APENDICE B: RESULTADOS DE ENSAYOS A COMPRESIÓN

| RESULTADOS DE ENSAYOS A COMPRESIÓN | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|----------------|------------|-----------------|-------------------------|-------|--------------|--------------|
| 0% | B | H | E | Observaciones | Area (cm2) | Area Útil (cm2) | Carga a Compresión (Kg) | | | Falla |
| | | | | | | | 1er. Grieta | Falla | 1er. Grieta | |
| A | 12.8 | 12.7 | 12.7 | ... | 162.56 | 161.29 | 300 | 430 | 1.860 | 2.666 |
| B | 13 | 12.9 | 12.9 | ... | 167.7 | 166.41 | 300 | 470 | 1.803 | 2.824 |
| C | 13.1 | 13 | 12.8 | ... | 170.3 | 166.4 | 400 | 440 | 2.404 | 2.644 |
| 3% | | | | | | | | | 2.022 | 2.712 |
| A | 11.8 | 12.4 | 12.3 | 80% area total | 146.32 | 117.056 | 80 | 120 | 0.683 | 1.025 |
| B | 12.3 | 12.5 | 12.5 | 85% area total | 153.75 | 130.6875 | 180 | 325 | 1.377 | 2.487 |
| C | 12.3 | 12.5 | 13 | 85% area total | 153.75 | 130.6875 | 160 | 250 | 1.224 | 1.913 |
| 6% | | | | | | | | | 1.095 | 1.808 |
| A | 11.5 | 11.8 | 11.8 | 85% area total | 135.7 | 115.345 | 160 | 390 | 1.387 | 3.381 |
| B | 11.6 | 11.7 | 11.9 | 90% area total | 135.72 | 122.148 | 240 | 420 | 1.965 | 3.438 |
| C | 11.8 | 11.9 | 11.8 | 85% area total | 140.42 | 119.357 | 340 | 410 | 2.849 | 3.435 |
| 9% | | | | | | | | | 2.067 | 3.418 |
| A | 11.8 | 11.9 | 11.9 | ... | 140.42 | 141.61 | 360 | 420 | 2.542 | 2.966 |
| B | 12 | 11.8 | 11.9 | ... | 141.6 | 140.42 | 480 | 640 | 3.418 | 4.558 |
| C | 12.1 | 12.1 | 12.3 | ... | 146.41 | 148.83 | 300 | 520 | 2.016 | 3.494 |
| Arcilla pura | | | | | | | | | 2.659 | 3.673 |
| A | 12.5 | 12.5 | 12.7 | ... | 156.25 | 158.75 | 1200 | 1440 | 7.559 | 9.071 |
| B | 12.7 | 12.7 | 12.7 | 90% area total | 161.29 | 145.161 | 680 | 1080 | 4.684 | 7.440 |
| C | 12.7 | 12.8 | 12.8 | Fisura | 162.56 | 163.84 | 150 | 1350 | 0.916 | 8.240 |
| | | | | | | | | | 4.386 | 8.250 |

