



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**  
La Universidad Católica de Loja

**ÁREA TÉCNICA**

**TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**Rigidización de un muro portante de suelo mediante malla geotextil**

**TRABAJO DE TITULACIÓN.**

**AUTOR:** Campoverde Muñoz, Ronald Alexander

**DIRECTOR:** Maza, Bolívar Hernán, MSc

**LOJA – ECUADOR**

**2017**



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

*Septiembre, 2017*

## **APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Ingeniero, MSc.

Bolívar Hernán Maza.

### **DOCENTE DE LA TITULACIÓN**

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: “Rigidización de un muro portante de suelo mediante malla geotextil” realizado por Campoverde Muñoz Ronald Alexander ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, febrero de 2017

f).....

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo Campoverde Muñoz Ronald Alexander declaro ser autor del presente trabajo de titulación: “Rigidización de un muro portante de suelo mediante malla geotextil”, de la Titulación de Ingeniería Civil, siendo Bolívar Hernán Maza director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f.....

Autor: Campoverde Muñoz Ronald Alexander

Cédula: 1105332678

## DEDICATORIA

### *A Dios*

Por iluminar mi camino y darme las fuerzas necesarias para avanzar y lograr las metas que me he planteado.

### *A mis padres*

Por ser los pilares fundamentales en mi crecimiento personal y profesional, y han sido el apoyo constante que he necesitado para emprender este duro camino.

### *A mis hermanos*

Porque con las palabras de aliento que me han brindado y su apoyo incondicional fortalecen en mi crecimiento como persona.

### *A mis abuelos*

Que con sus enseñanzas de vida han sido un ejemplo para culminar metas inconclusas y emprender nuevos desafíos.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por darme la vida, guiarme y ser la conciencia en mi mente para la toma de buenas decisiones y lograr mi objetivo de ser Ingeniero Civil.

A mis padres Ronald y Mariana, que día a día han sido la fortaleza para continuar mi camino, han sabido soportar mis triunfos y fracasos y me han llenado de valor para asumir con responsabilidad mi toma de decisiones.

A mis hermanos Nathaly y Jorge, que con su apoyo constante hemos sabido afrontar victorias y tropiezos y juntos alcanzar nuestras metas.

A la Universidad Técnica Particular de Loja, con mención especial a la Titulación de Ingeniería Civil, por ser una institución no solo formadora de profesionales, sino de hombres de bien para la sociedad.

A los docentes de la Titulación de Ingeniería Civil por impartir cada uno de sus conocimientos que han sido un factor fundamental en mi crecimiento profesional.

Al Msc. Bolívar Maza por su comprensión, generosidad y apoyo para impartir sus conocimientos en el desarrollo de la presente investigación.

Y finalmente agradecer a mi familia y amigos por apoyarme día a día para culminar la presente investigación.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN .....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORÍA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I.....	6
MARCO TEÓRICO, ESTADO DEL ARTE .....	6
1.1. El suelo. ....	7
1.2. Uso histórico del barro crudo.....	7
1.3. Bloques de tierra (BT). ....	8
1.4. Clasificación de suelos.....	9
1.4.1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).....	9
1.4.2. Sistema de la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO) .....	11
1.5. Propiedades mecánicas del suelo.....	12
1.5.1. Distribución Granulométrica .....	12
1.5.2. Módulo elástico. ....	14
1.5.3. Límites de Atterberg .....	15
1.5.4. Deformación.....	16
1.5.5. Rigidez. ....	16
1.5.6. Compresión Simple .....	17
1.6. Estabilización de suelos con fibras naturales. ....	18
1.7. Fibras vegetales y sus propiedades. ....	18
1.8. Dosificación de los bloques de suelo.....	19
1.9. Fallas procedentes en construcciones de adobe.....	19
1.10. Medidas de seguridad que benefician la seguridad en viviendas de adobe.....	21
1.11. Geotextiles. ....	21
1.11.1. Tipos de geotextiles. ....	21
1.11.2. Propiedades de los geotextiles.....	22
1.11.3. La geomalla y su importancia en viviendas de interés social.....	23

1.12. Diseño sísmico de muros con suelo estabilizado con fibras y malla geotextil. ....	24
1.13. Consideraciones geométricas de una vivienda para diseño sísmico. ....	24
1.14. Análisis mediante elementos finitos.....	26
1.15. Método de elementos finitos asistido por computadora. ....	28
1.16. Método de elementos finitos aplicando Ansys. ....	29
CAPÍTULO II.....	31
ÁREA DE ESTUDIO .....	31
2.1. Antecedentes. ....	32
2.2. Zona de estudio. ....	32
2.2.1. Macará. ....	32
2.2.2. Catamayo.....	32
2.2.3. Loja. ....	32
2.3. Zonas de extracción de tierra.....	34
2.3.1. Macará. ....	34
2.3.2. Catamayo.....	35
2.3.3. Loja. ....	36
CAPÍTULO III.....	37
METODOLOGÍA.....	37
3.1. Obtención de muestras. ....	38
3.2. Caracterización de los materiales. ....	38
3.2.1. Ensayo de resistencia seca.....	38
3.2.2. Ensayo del rollito.....	39
3.3. Caracterización de suelos. ....	39
3.4. Ensayos de laboratorio.....	39
3.4.1. Análisis granulométrico. ....	40
3.4.2. Ensayo de los límites de Atterberg.....	41
3.4.3. Módulo elástico, deformación y ensayo de compresión simple. ....	44
3.4.4. Rigidez.....	45
3.5. Clasificación de suelos.....	45
3.6. Diseño y dosificación de la mezcla.....	45
3.7. Optimización de mezclas mediante tracción indirecta. ....	48
3.8. Elaboración de los bloques de tierra. ....	50
3.9. Caracterización del sistema adobe geomalla. ....	50
3.10. Análisis a flexión de los muros portantes de suelo mediante modelado aplicando la técnica de elementos finitos en Ansys.....	51
3.11. Materiales. ....	51
3.12. Modelado de los muros portantes sometidos a flexión en Ansys.....	53

3.13. Análisis a compresión de los muros portantes de suelo mediante modelado aplicando la técnica de elementos finitos en Ansys. ....	57
3.14. Modelado de los muros portantes sometidos a compresión en Ansys.....	57
3.15. Generación de la malla a partir del modelado del elemento finito.....	59
3.16. Justificación de la investigación. ....	60
CAPÍTULO IV .....	67
RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	67
4.1. Resultados de caracterización de suelos. ....	68
4.2. Análisis de la clasificación de suelos.....	73
4.3. Resultados del ensayo de tracción indirecta. ....	74
4.4. Caracterización de los materiales a partir de la mezcla óptima .....	77
4.5. Resultados del análisis a flexión de los muros portantes de suelo mediante elementos finitos.....	79
4.6. Resultados del análisis a compresión de los muros portantes de suelo mediante elementos finitos. ....	87
CONCLUSIONES .....	90
RECOMENDACIONES.....	92
BIBLIOGRAFÍA.....	93
ANEXOS.....	96
Anexo 1: Resultados de los ensayos a tracción indirecta.....	97
Anexo 2: Resultados del análisis a flexión de los muros portantes de suelo mediante elementos finitos.....	111
Anexo 3: Resultados del análisis a compresión de los muros portantes de suelo mediante elementos finitos.....	116

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de suelos según SUCS .....	10
Tabla 2: Clasificación de suelos según AASHTO.....	12
Tabla 3: Tamaño de abertura de los tamices .....	13
Tabla 4: Módulos de elasticidad para distintos tipos de suelo .....	15
Tabla 5: Valores referenciales de compresión última en suelos .....	17
Tabla 6: Procedimiento para el cálculo del análisis granulométrico de un suelo .....	40
Tabla 7: Coordenadas de los puntos para el modelo multi-tabla del hexágono.....	46
Tabla 8: Propiedades del adobe .....	52
Tabla 9: Propiedades del mortero de barro.....	52
Tabla 10: Propiedades de la geomalla .....	53
Tabla 11: Dimensiones de las paredes de adobe analizadas.....	54
Tabla 12: Cargas aplicadas a los muros .....	54
Tabla 13: Resumen de cargas que actúan sobre los muros.....	58
Tabla 14: Propiedades del adobe en Ansys .....	63
Tabla 15: Propiedades del mortero en Ansys .....	63
Tabla 16: Propiedades de la geomalla en Ansys .....	63
Tabla 17: Deformación total en el muro sin refuerzo en Ansys y modelo real .....	64
Tabla 18: Deformación total en el muro reforzado con geomalla en Ansys y modelo real....	65
Tabla 19: Datos de la curva granulométrica - Macará.....	69
Tabla 20: Datos de la curva granulométrica - Catamayo.....	69
Tabla 21: Datos de la curva granulométrica - Loja punto 1 .....	70
Tabla 22: Datos de la curva granulométrica – Loja punto 2.....	70
Tabla 23: Datos de la curva granulométrica – Loja punto 3.....	71
Tabla 24: Resultados de los límites de consistencia de los suelos.....	72
Tabla 25: Clasificación de suelos según AASHTO y SUCS .....	72
Tabla 26: Porcentajes de arenas y finos en los suelos.....	73
Tabla 27: Resultados de tracción indirecta de los distintos suelos combinados con tamo de arroz. ....	74
Tabla 28: Resultados de tracción indirecta de los distintos suelos combinados con tallo de arroz. ....	75
Tabla 29: Determinación de la resistencia a compresión simple de los bloques de tierra. ...	77
Tabla 30: Determinación de la densidad de los BT. ....	78
Tabla 31: Deformación total en el muro de 15 cm de espesor .....	79
Tabla 32: Deformación total en el muro de 30 cm de espesor .....	80
Tabla 33: Porcentaje de rigidización de la geomalla en el muro de 15 cm de espesor.....	85
Tabla 34: Porcentaje de rigidización de la geomalla en el muro de 30 cm de espesor.....	85

Tabla 35: Esfuerzos de tracción en los muros de 15 cm de espesor.....	86
Tabla 36: Esfuerzos de tracción en los muros de 30 cm de espesor.....	86
Tabla 37: Deformación total por compresión de los muros de 15 cm y 30 cm de espesor ...	87
Tabla 38: Deformación unitaria por compresión del muro de 15 cm de espesor .....	87
Tabla 39: Deformación unitaria por compresión del muro de 30 cm de espesor .....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Carta de plasticidad de Casagrande .....	11
Figura 2: Curva Granulométrica .....	13
Figura 3: Diagrama de esfuerzo-deformación del acero.....	14
Figura 4: Estados de consistencia del suelo según su humedad .....	16
Figura 5: Ensayo a compresión simple de un BT sin cemento .....	17
Figura 6: Fallas por corte y tracción en muros de adobe.....	20
Figura 7: Fallas en construcciones de adobe .....	20
Figura 8: Refuerzo de muro con geomalla .....	23
Figura 9: Casa cuadrada y compacta con abundantes muros transversales.....	25
Figura 10: Guía para los vanos en muros .....	26
Figura 11: Coordenadas nodales (i, j, m) y desplazamiento de los nodos.....	27
Figura 12: Discretización de un muro de adobe .....	28
Figura 13: Zona de estudio: a) Mapa político del Ecuador, b) Mapa político de la provincia de Loja.....	33
Figura 14: Zona de extracción de tierra en Macará.....	34
Figura 15: Zona de extracción de tierra en Catamayo-Indiuchu .....	35
Figura 16: Zona de extracción de tierra en Loja-sector El Capulí .....	36
Figura 17: Ensayo de resistencia seca: a) La bolita no se rompe; b) La bolita se rompe .....	38
Figura 18: Ensayo del rollito: a) Primer caso; b) Segundo caso; c) Tercer caso.....	39
Figura 19: Análisis granulométrico del suelo mediante tamizado .....	40
Figura 20: Equipo de Casagrande para determinación del límite líquido.....	41
Figura 21: Determinación del límite plástico.....	43
Figura 22: Determinación de la resistencia a compresión simple de un BT.....	44
Figura 23: Preparación de mezclas para probetas de tracción indirecta .....	45
Figura 24: Probetas del suelo proveniente de Macará para ensayo de tracción indirecta ....	46
Figura 25: Modelo multi-tabla del hexágono .....	47
Figura 26: Ensayo de tracción indirecta .....	48
Figura 27: Fisuras producidas en las probetas luego del ensayo de tracción indirecta .....	48
Figura 28: Ensayo brasileño o de tracción indirecta (a) Configuración de la carga y (b) rotura de la probeta por tracción indirecta. ....	49
Figura 29: Muros sin refuerzo de 15 y 30 cm de espesor respectivamente.....	54
Figura 30: Empotración de los muros: zona B y C. Lugar donde actúa la fuerza zona A .....	55
Figura 31: Muros reforzados con geomalla de 15 y 30 cm de espesor respectivamente.....	56
Figura 32: Empotración de los muros: zona B y C. Lugar donde actúa la fuerza zona A .....	56
Figura 33: Resumen del modelado del muro sin refuerzo: Empotrado en la zona B. La carga distribuida sobre el espesor del muro actúa en la zona A .....	57

Figura 34: Resumen del modelado del muro reforzado con geomalla: Empotrado en la zona A. La carga distribuida sobre el espesor del muro actúa en la zona B .....	58
Figura 35: Modelo de elemento finito hexaédrico.....	59
Figura 36: Modelo del elemento finito: a) Muro sin refuerzo, b) Muro reforzado con geomalla .....	59
Figura 37: Muro de adobe reforzado con geomalla.....	60
Figura 38: Ensayo a flexión realizado en los muros .....	61
Figura 39: Sexta y última fase del ensayo a flexión realizado en los muros .....	62
Figura 40: Curva de comportamiento de los muros analizados.....	62
Figura 41: Esquema de modelo de análisis a flexión en los muros: Zonas A y B empotradas. Zona C donde actúa la fuerza.....	64
Figura 42: Curva esfuerzo vs deformación del muro sin refuerzo .....	65
Figura 43: Curva esfuerzo vs deformación del muro reforzado con geomalla .....	66
Figura 44: Curva granulométrica del suelo proveniente del cantón Macará .....	69
Figura 45: Curva granulométrica del suelo proveniente del cantón Catamayo .....	69
Figura 46: Curva granulométrica del suelo proveniente del cantón Loja Punto 1 .....	70
Figura 47: Curva granulométrica del suelo proveniente del cantón Loja Punto 2 .....	70
Figura 48: Curva granulométrica del suelo proveniente del cantón Loja Punto 3 .....	71
Figura 49: Ensayo de compresión simple de las muestras de adobe.....	78
Figura 50: Curva esfuerzo vs deformación del muro de 15 cm de espesor .....	82
Figura 51: Curva esfuerzo vs deformación del muro de 30 cm de espesor .....	83
Figura 52: Curva de participación de la geomalla en el muro de 15 cm de espesor.....	88
Figura 53: Curva de participación de la geomalla en el muro de 30 cm de espesor.....	88

## RESUMEN

Las construcciones de tierra ante embates sísmicos se deterioran gravemente y no prestan las condiciones necesarias para ser habitadas, por ello es necesario desarrollar nuevas técnicas de refuerzo a tracción. Se plantea como alternativa de rigidización el uso de una malla geotextil.

La presente investigación pone a disposición el análisis realizado a muros portantes de suelo en condiciones normales y rigidizados con geomalla para conocer el funcionamiento estructural y el desempeño a tracción y compresión que genera este elemento de refuerzo.

Se desarrollaron modelos de estudio basados en análisis de elementos finitos por software. Los muros son sometidos a cargas de tracción y compresión continuas hasta llegar a su falla. Los resultados presentados muestran el comportamiento de las deformaciones en el muro.

Los ensayos de laboratorio fueron determinantes para conocer las características del suelo. Se consideraron tres tipos de suelo, y su análisis mediante tracción indirecta permitió encontrar la dosificación exacta para fabricar adobes de dimensiones óptimas. Se obtuvieron las propiedades de cada uno de los elementos estructurales para ser ingresadas en el programa.

**PALABRAS CLAVES:** adobe, rigidización, elementos finitos, muros portantes de suelo.

## **ABSTRACT**

The earth constructions are seriously deteriorated against seismic attacks and don't provide the necessary conditions to be inhabited, so it's necessary to develop new traction reinforcement techniques. The use of a geotextile mesh is proposed as a stiffening alternative.

This research makes available the analysis made to soil load-bearing walls under normal conditions and stiffened with geogrid to know the structural performance and the tensile and compression performance generated by this reinforcement element.

Study models were developed on finite elements analysis by software. The walls are subjected to continuous loads of traction and compression until they reach their fault. The results presented show the behavior of the deformations in the wall.

The laboratory tests were determinant to know the characteristics of the soil. Three types of soil were considered, and their analysis by indirect traction allowed to find the exact dosage to manufacture adobes of optimal dimensions. The properties of each of the structural elements were obtained to be entered into the program.

**KEYWORDS:** adobe, stiffening, finite elements, soil load-bearing walls.

## INTRODUCCIÓN

La tierra es uno de los materiales de construcción más antiguos empleados por el hombre (Solís et al., 2015), por ello se constituye en el principal material de construcción existente en el planeta que puede brindar características estructurales necesarias en una construcción civil además de satisfacer costes económicos y ambientales (Rivera y Muñoz, 2012).

Actualmente la seguridad estructural y el costo económico que conlleva las viviendas es una asignatura pendiente para los gobiernos en todos los confines del planeta, inclusive los países desarrollados (Maza, 2008). El deterioro ambiental agravado en las últimas décadas afecta fundamentalmente a la naturaleza a través de elevados niveles de explotación de los recursos naturales (Galíndez, 2009).

La problemática del coste para la obtención de una vivienda es un déficit importante en América Latina. Según la CEPAL el déficit de viviendas en la región supera las 25 millones de viviendas, que es alrededor de 125 mil millones de dólares. En Ecuador se estima que alrededor de 6 mil millones de dólares se requieren para satisfacer esta necesidad (Carrión, 2003).

Los costos elevados surgidos de utilizar el cemento como material de construcción además de encarecer las viviendas provocan altos niveles de contaminación en nuestra atmósfera debido a los diversos procesos de fabricación de este material (Galíndez, 2009), por cada tonelada de cemento producida se crea aproximadamente una tonelada de CO<sub>2</sub>, generando aproximadamente 7% de emisión de CO<sub>2</sub> en el mundo (Noticias de la ciencia, 2015). La cocción de los minerales requiere una elevada demanda de energía que junto a la liberación de dióxido de carbono a la atmósfera acrecientan el efecto invernadero.

Actualmente miles de personas recurren a entidades financieras y organizaciones estatales que les faciliten la obtención de una vivienda para alojarse junto a los seres queridos. Sin embargo la falta de recursos junto con el desempleo y los costos elevados de la canasta básica familiar les prohíben el acceso a un inmueble, lo que acrecienta los asentamientos en territorios no adecuados y el confinamiento habitacional.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-2015) requiere de diseño sismo-resistente en viviendas puesto que al Ecuador lo gobiernan diferentes zonas sísmicas, razón por la que nuestra región es considerada zona de alto riesgo sísmico, lo que induce a los profesionales de la construcción a diseñar estructuras sismo-resistentes. Estos modelos involucran acero de refuerzo, acero estructural, concreto, frente a este escenario, el adobe ha perdido razón de uso por su bajo valor de resistencia frente a la actividad sísmica, debido a la falta de investigación relacionada. El comentario anterior nos dice que existen sobradas razones para emprender la presente investigación.

La investigación tiene por objeto estabilizar un suelo con fibra vegetal para elaborar adobes, además de rigidizar un muro de adobe con geomalla con resistencia a flexión y ambientalmente sostenible. Esto se validará bajo los siguientes objetivos: Obtener la mejor mezcla de suelo para construir bloques con capacidad portante, diseñar los muros de mampostería con adobe estabilizado y de dimensiones óptimas y caracterizar las propiedades del bloque estabilizado a través de su módulo elástico, plasticidad, rigidez, deformación y resistencia a la compresión simple para ser analizados mediante elementos finitos.

Se plantea el uso del suelo como material esencial para la construcción de viviendas, que estabilizado con fibras naturales y combinado con geomalla, es una alternativa viable, por ello surge la necesidad de diseñar bloques de suelo estabilizados con fibras naturales de dimensiones óptimas que permitan utilizar material natural de la zona que sea, ambientalmente, económicamente y socialmente sustentable y sostenible. Esta técnica de rigidización puede ser aplicable porque combina técnicas ancestrales de construcción basadas en tierra con elementos rigidizadores como la geomalla.

El análisis a flexión del muro confinado con la geomalla permitirá generar las mejores opciones costo-beneficio. El producto final seleccionado prevé garantizar seguridad, resistencia y rigidez.

Mediante la caracterización del suelo se buscarán obtener propiedades que satisfagan elasticidad, plasticidad, resistencia y rigidez necesarias en el bloque para la conformación de un muro portante, que combinado con la geomalla mejorará la resistencia a esfuerzos flexionantes.

El análisis de las características obtenidas de ensayos tales como el de granulometría y los límites de consistencia para el suelo escogido, así como ensayos de compresión y tracción para los bloques, permitirán generar datos que serán procesados mediante análisis de elementos finitos que verificará la transversalidad de la investigación en el aspecto estructural. El primer capítulo contiene el marco teórico de la investigación, en este capítulo se habla de los conceptos principales para caracterizar un suelo, el uso de fibras vegetales en bloques de suelo, así como la resistencia a esfuerzos de flexión generados al combinar un muro portante con una malla geotextil. El análisis de elementos finitos se describe en este mismo capítulo y todas las normativas y reglamentos necesarios para la investigación.

El segundo y tercer capítulo refieren a la ubicación geográfica de la zona y la metodología abarcada en la investigación, respectivamente. Este último capítulo conlleva a la caracterización del suelo, diseño y dosificación de la mezcla, además del comportamiento a flexión que se genera de la interacción muro de tierra con geomalla aplicando el análisis de elementos finitos mediante software.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados con su respectivo análisis y discusión, así como las conclusiones y recomendaciones generadas de la investigación. Finalmente se presentan los anexos obtenidos del trabajo de fin de titulación.

El alcance de la presente investigación es: Caracterizar una muestra de suelo para construir bloques de tierra estabilizados con fibras vegetales, obtener sus propiedades para posteriormente realizar un análisis a flexión mediante elementos finitos para conocer el funcionamiento estructural a flexión de un muro de adobe rigidizado con geomalla.

## **CAPÍTULO I**

### **MARCO TEÓRICO, ESTADO DEL ARTE**

## **1.1. El suelo.**

El suelo o una masa de suelo se lo puede definir como una mezcla de granos minerales y materiales agregados (Aguirre, 2007). Básicamente los suelos se conforman debido a la desintegración o descomposición-meteorización de estratos rocosos. Su composición incluye además aire, agua, así como materia orgánica procedente de la descomposición de plantas y animales.

La tierra cruda ha sido utilizada a lo largo de la historia como el principal sistema de construcción. El sistema constructivo en tierra cruda, denominado de muros de adobe, está formado básicamente por el aparejado de unidades de tierra cruda secadas al sol (adobes), aglutinados con barro que hace las veces de mortero de pega (Rivera y Muñoz, 2012).

Un bloque de tierra natural es una alternativa útil que permite viabilizar el uso del principal material de construcción presente en el planeta. Mediante el mismo es posible disminuir los costos excedentes de la construcción producto del uso de otros materiales de construcción provenientes de la alta industria.

La arcilla es el componente fundamental para fabricar adobes, su cohesión es una propiedad útil para el diseño de bloques de tierra, su atracción y repulsión entre partículas dada por la humedad permite su remoldeo (Galíndez, 2009).

## **1.2. Uso histórico del barro crudo.**

El adobe es una de las técnicas de construcción más antiguas y populares del mundo. Su uso ha sido registrado a más de 10 mil años en las más variadas zonas y climas del planeta (Mannise, 2012),

La palabra adobe probablemente es de origen árabe, de tub = bloque (Roux y Espuna, 2012). Se denomina adobe para diferenciarlo del bloque cocido o ladrillo. Básicamente su elaboración ha consistido en tierra cruda cocida al aire libre, bajo la luz del sol, combinada con fibras naturales para evitar su agrietamiento.

La tierra cruda como principal material de construcción, ha representado un aspecto muy importante para el desarrollo de técnicas de construcción tradicionales, que consisten en la selección del suelo mismo como principal material de construcción expuesta a la fabricación y al secado.

Su uso se ha generalizado porque no generan un consumo energético considerable para su fabricación, su elaboración se puede desarrollar en la zona de construcción misma, además

es una técnica constructiva amigable con el ambiente, socialmente adaptable y económicamente sustentable.

Sin embargo su utilización ha venido en desuso, puesto que no provee las garantías necesarias para combatir los embates generados por movimientos sísmicos. Los sistemas constructivos en tierra antiguamente se utilizaban para edificios patrimoniales que consistían en muros de carga diseñados solo para soportar cargas verticales y de servicio, sin incluir los efectos producidos por sismos (Rivera y Muñoz, 2012).

Además de su inoperancia ante los sismos, otros de los mayores inconvenientes presentes en construcciones de adobe es que son de dimensiones considerables que requieren de mayor espacio para ser colocados, ello producen que reduzcan las dimensiones habitacionales de las viviendas y su ineficacia para soportar la abrasión hídrica.

### **1.3. Bloques de tierra (BT).**

La arcilla es el material fundamental para elaborar mamposterías de adobe de buena calidad, mediante procesos idóneos de construcción puede dotar a los bloques de tierra las características necesarias para aspectos sísmicos y mecánicos.

Sin embargo la arcilla es susceptible a cambios volumétricos producidos por su interacción con el agua que generan en ella grietas que deben ser controladas mediante fibras que fortalezcan su comportamiento mecánico y obtener mayor resistencia a compresión y flexión, similar al comportamiento entre el cemento y las varillas de acero.

La técnica de los BT generalmente requieren agregar fibras al barro de 0.10 m de longitud aproximadamente, en una proporción de volumen no menor a una parte de paja por seis de suelo (Rodríguez, 2010).

Para evitar su agrietamiento, suelen ser secados en la sombra, colocados en zonas planas y limpias, y se agrega arena fina entre el piso y el mampuesto. Su estancia en el secado requiere de tiempos recomendados mayores a la semana.

Los moldes suelen ser de madera, con dimensiones mayores a las que originalmente tendrá el bloque, puesto a que su composición es de arcilla, éste tiende a contraerse por lo que sus dimensiones se ven reducidas.

Las arcillas presentan propiedades mecánicas muy complejas, sin embargo son apropiadas y aptas para el diseño de BT. Una correcta clasificación del suelo (caracterización de los límites de consistencia y la granulometría) permitirán dotar al mampuesto de las características necesarias requeridas en bloques de tierra para el uso en construcciones civiles.

#### **1.4. Clasificación de suelos.**

Los suelos se clasifican para conocer sus propiedades. Los sistemas de clasificación básicamente se basan en los límites de consistencia y la granulometría para ubicar cada matriz de suelo en grupos y subgrupos.

Actualmente se usan dos sistemas de clasificación de suelos: El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el sistema de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

##### **1.4.1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)**

El SUCS es un sistema inicialmente propuesto por Casagrande en 1942 y posteriormente adaptado por el United States Bureau of Reclamation y el US Army Corps of Engineers (Das, 2012).

Este sistema clasifica a los suelos en gravas, arenas, limos, arcillas, suelos orgánicos y turbas, agregándole sufijos que los caracterizan, ello permite dividirlos en subgrupos que finalmente generan el nombre del suelo y sus propiedades.

Básicamente la clasificación de los suelos es la siguiente:

- Suelos de grano grueso (grava y arena): Suelos con menos del 50% de contenido en finos.
- Suelos de grano fino (limo y arcilla): Suelos con al menos un 50% de contenido de limos y arcillas.
- Suelos orgánicos (orgánico y turba): Constituidos básicamente por materia orgánica.

Esta clasificación de suelos se basa en la granulometría del suelo, obtenida mediante los porcentajes pasantes y retenidos en el tamiz. Además, los límites de consistencia permiten caracterizar a los suelos finos (limos y arcillas), agregándole sufijos que vienen dados por L y H, tanto para baja plasticidad como alta plasticidad, respectivamente, y se los encuentra en la carta de plasticidad de Casagrande, separados por la línea B. La clasificación mediante los límites de Atterberg, se realiza para la fracción que pasa el tamiz #40 (Das, 2012).

Tabla 1: Clasificación de suelos según SUCS

Tipo de grano	Criterios para asignar símbolos y nombres de grupo mediante pruebas de laboratorio			Clasificación del suelo		
				Símbolo de grupo	Nombre de grupo	
<b>Suelos de grano grueso</b>  Más de 50% retenido en el tamiz # 200	<b>Gravas</b> Más de 50% de la fracción gruesa retenida en el tamiz # 4	<i>Gravas limpias</i> Menos de 5% finos	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	GW	Grava bien graduada	
		<i>Gravas con finos</i> Más de 12% de finos	$Cu < 4$ y/o $1 > Cc > 3$	GP	Grava mal graduada	
		<b>Arenas</b> 50% o más de la fracción gruesa pasa el tamiz # 4	<i>Arenas limpias</i> Menos de 5% finos	Finos clasificados como ML O MH	GM	Grava limosa
			<i>Arena con finos</i> Más de 12% de finos	Finos clasificados como CL O CH	GC	Grava arcillosa
	<b>Suelos de grano fino</b> 50% o más pasa el tamiz # 200	<b>Limos y arcillas</b> Límite líquido menor que 50	<i>Inorgánicos</i>	$IP > 7$ y se encuentra en o arriba de la línea "A"	CL	Arcilla de baja compresibilidad
				$IP < 4$ o se encuentra debajo de la línea "A"	ML	Limo de baja compresibilidad
		<b>Limos y arcillas</b> Límite líquido 50 o mayor	<i>Orgánicos</i>	Límite líquido - secado en horno $< 0.75$	OL	Arcilla orgánica
				Límite líquido - no secado $< 0.75$		Limo orgánico
<b>Suelos altamente orgánicos</b>	Principalmente materia orgánica, de color oscuro y olor orgánico	<i>Inorgánicos</i>	IP se encuentra en o arriba de la línea "A"	CH	Arcilla de alta compresibilidad	
			IP se encuentra debajo de la línea "A"	MH	Limo de alta compresibilidad	
		<i>Orgánicos</i>	Límite líquido - secado en horno $< 0.75$	OH	Arcilla orgánica	
			Límite líquido - no secado $< 0.75$		Limo orgánico	
				PT	Turba	

Fuente: ASTM INTERNATIONAL

Elaboración: El autor

### 1.4.2. Sistema de la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO)

Este sistema de clasificación de suelos originalmente fue desarrollado por Terzaghi y Hogentogler para el Bureau of Public Roads norteamericano (Bañón, 1999). Su uso es especialmente para la construcción de vías, específicamente para control de subrasantes y terraplenes.

Fue inspirado en el modelo de Casagrande. Considera que los grupos de suelos son 7 (A-1 hasta A-7), subdivididos en otros más, para llegar a un total de 12. Su clasificación se basa tanto en el análisis granulométrico, así como en los límites de Atterberg.

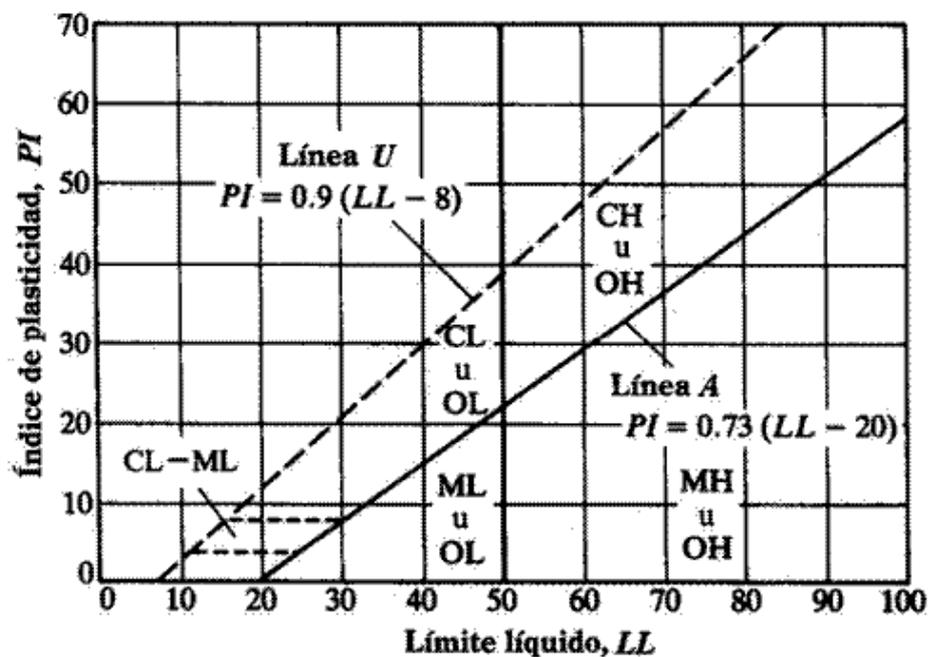


Figura 1: Carta de plasticidad de Casagrande  
Fuente: Blog del Ingeniero Civil (2010)

Este sistema introduce un nuevo concepto denominado índice de grupo (IG), que permite determinar la posición relativa dentro del grupo. Se presenta en números enteros y si es negativo se presenta igual a 0.

$$IG = (F - 35) (0,2 + 0,005 (LL - 40)) + 0,01 (F - 15) (IP - 10) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

F = Porcentaje que pasa por el tamiz N° 200, expresado como número entero.

LL = Límite Líquido.

IP = Índice de Plasticidad.

Tabla 2: Clasificación de suelos según AASHTO

DIVISIÓN GENERAL	MATERIALES GRANULARES (pasa menos del 35% por el tamiz ASTM # 200)							MATERIALES LIMO-ARCILLOSOS (más del 35% por el tamiz ASTM # 200)					
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7		
Subgrupo	A - 1 - a	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				A - 7 - 5	A - 7 - 6	
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b> (% que pasa por cada tamiz)													
Serie ASTM	# 10	≤ 50											
	# 40	≤ 30	≤ 50	≥ 51									
	# 200	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 36	≤ 36	≤ 36	≤ 36	
<b>ESTADO DE CONSISTENCIA</b> (de la fracción de suelo que pasa por el tamiz ASTM # 40)													
Límite líquido			NP	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	> 41 (IP < LL-30)	> 41 (IP > LL-30)	
Índice de plasticidad	≤ 6			≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≥ 11	
<b>ÍNDICE DE GRUPO</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>		<b>≤ 4</b>		<b>≤ 8</b>	<b>≤ 12</b>	<b>≤ 20</b>	<b>≤ 20</b>		
<b>TIPOLOGÍA</b>	Fragmentados de piedra, grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos			
<b>CALIDAD</b>	EXCELENTE A BUENA						ACEPTABLE A MALA						

Fuente: (Das, 2012)

Elaboración: El autor

## 1.5. Propiedades mecánicas del suelo.

Las propiedades de un suelo se las suele evaluar mediante ensayos de laboratorio, aunque actualmente tanto la resistencia como la deformación pueden ser evaluadas aparentemente mediante ensayos in situ. Los ensayos de laboratorio y la exploración en campo permiten al ingeniero civil determinar los parámetros necesarios para conocer las propiedades del material.

A continuación se citan los principales ensayos de laboratorio que permitirán determinar las propiedades presentes en un suelo.

### 1.5.1. Distribución Granulométrica

La distribución granulométrica de un suelo determina la variabilidad de los tamaños de los granos presentes en una masa de suelo. Este ensayo de laboratorio permite clasificar un suelo por los porcentajes pasantes y retenidos en los tamices.

El análisis granulométrico de un suelo se realiza bajo dos metodologías: Análisis granulométrico con mallas para suelos de grano grueso y análisis granulométrico por medio del hidrómetro para suelos de grano fino.

## Análisis granulométrico con mallas

Utiliza una cantidad adecuada de suelo seco pulverizado, el procedimiento consiste en pasar el material por un cierto número de tamices de aberturas cada vez más reducidas, junto con la medición y determinación de los porcentajes acumulados de suelo que pasan a través de cada uno de los tamices (Das, 2012).

Tabla 3: Tamaño de abertura de los tamices

Malla Nro.	Abertura (mm)
3"	75,000
2"	50,800
1 1/2"	38,100
1"	25,400
3/4"	19,050
3/8"	9,520
Nº4	4,760
10	2,000
20	0,840
40	0,425
60	0,250
140	0,106
200	0,075
fondo	

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

Las aberturas de los tamices están basadas en las normas ASTM y permiten realizar el análisis granulométrico de un suelo para su posterior clasificación.

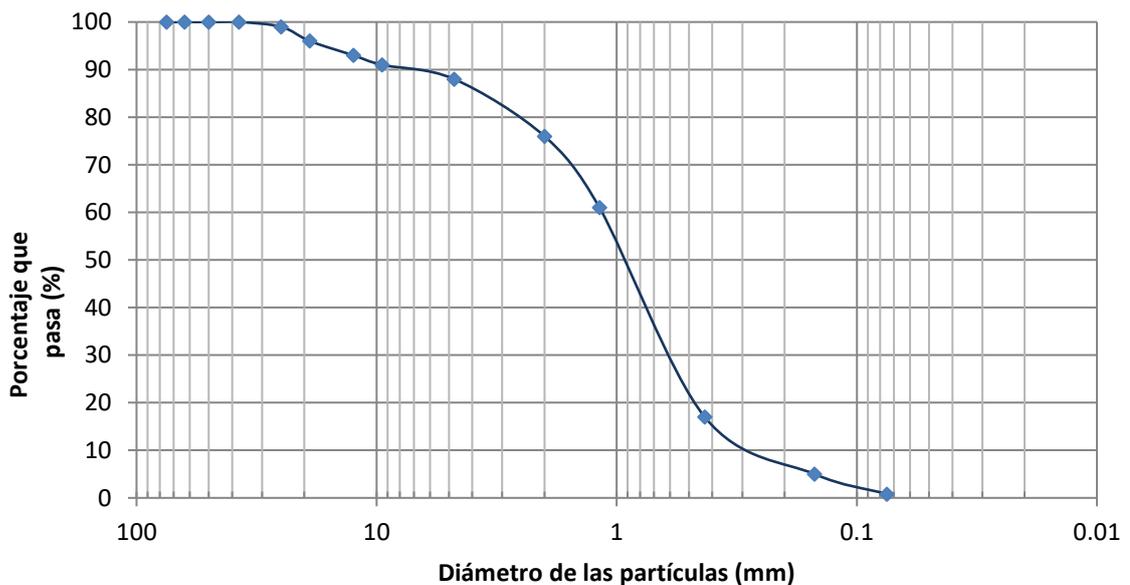


Figura 2: Curva Granulométrica

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

Mediante el porcentaje acumulado de suelo se elabora la curva granulométrica, que es una representación semi-logarítmica entre el diámetro de la partícula versus el porcentaje retenido.

### Análisis granulométrico por tamizado o sedimentación

Es un análisis basado en la sedimentación de las partículas del suelo en agua. El Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (2000) explica que para aplicar este ensayo se requiere una cantidad necesaria de suelo seco y se aplica cuando se quiere conocer la fracción de material para tamices menores al 200.

Se realiza mediante lavado, para la fracción de material entre el tamiz 4 y 200; previamente el material debe ser cuarteado, siendo los pesos mínimos los siguientes: 115 g para suelos arenosos, 65 g para suelos arcillosos y limosos (Das, 2012). La muestra se remoja durante cierto tiempo para ablandar los terrones y posteriormente lavada con agua hasta que esté completamente limpia. La muestra retenida es secada en horno y tamizada.

#### 1.5.2. Módulo elástico.

También conocido como módulo de Young. Es una característica del suelo que evalúa la facilidad con la que puede estirarse. Mediante este parámetro se mide la tensión necesaria para romper un material.

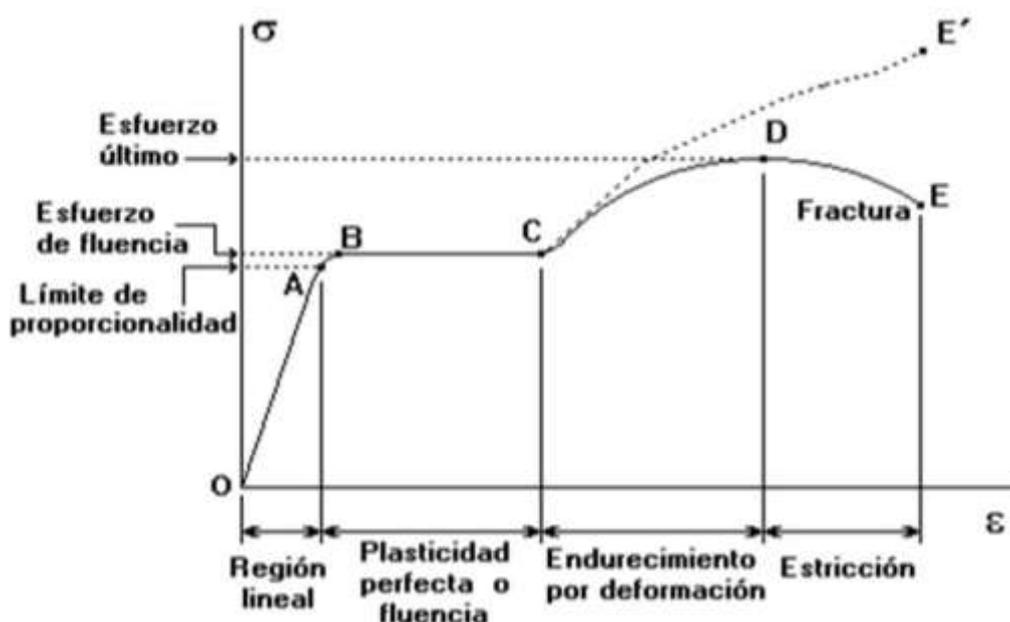


Figura 3: Diagrama de esfuerzo-deformación del acero

Fuente: Prudencio (2015)

Los suelos presentan un módulo elástico más alto cuanto más estrechamente relacionadas se encuentren las partículas, por ello es necesario medir la densidad o porosidad del suelo.

Tabla 4: Módulos de elasticidad para distintos tipos de suelo

Tipo de suelo	Módulo de elasticidad E (MPa)
Suelos muy flojos o muy blandos	< 8
Suelos flojos o blandos	ago-40
Suelos medios	40 - 100
Suelos compactos o duros	100 - 500
Rocas blandas	500 - 8000
Rocas duras	8000 - 15000
Rocas muy duras	> 15000

Fuente: Ingemecánica (2015)

Elaboración: El autor

El agua es un factor importante para conocer el módulo elástico de un suelo, ya que mayores concentraciones de agua dan lugar a que el suelo presente menor elasticidad, similar en arcillas. Sin embargo en el caso de suelos de mayor diámetro de grano (arenas) este resultado no suele ser igual.

### 1.5.3. Límites de Atterberg

Con el ensayo de los límites de consistencia se caracteriza el comportamiento de los suelos finos. Los límites de Atterberg consideran que en un suelo de grano fino existen 4 estados de consistencia, según su humedad son: Estado semilíquido cuando tiene una cantidad excesiva de agua, al secarse gradualmente intervendrán los estados plástico, semisólido y sólido (Das, 2012).

Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado a otro son los denominados límites de Atterberg.

- *Límite líquido*: Contenido de humedad en porcentaje, cuando el suelo pasa de un estado semilíquido a un estado plástico y puede moldearse.
- *Límite plástico*: Contenido de humedad, cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido y se rompe.
- *Límite de retracción o contracción*: Contenido de humedad, cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y deja de contraerse al perder humedad.



Figura 4: Estados de consistencia del suelo según su humedad  
Fuente: Estudiosgeotécnicos (2013)

#### 1.5.4. Deformación.

En un suelo principalmente se reconocen tres tipos básicos de esfuerzo-deformación: comportamiento elástico, plástico y viscoso (Zea y Rivera, 2004).

Un cuerpo plástico a diferencia de un cuerpo elástico no puede regresar a su posición original tras haberse deformado después de haber sido sometido a una carga y que luego se le retirase, en su lugar permanece con una deformación remanente. En suelos viscosos, la deformación del material no solo depende de los esfuerzos aplicados, sino también de la duración de la aplicación de la misma. En suelos plásticos y elásticos la respuesta es inmediata y no dependen del tiempo.

La deformación en suelos se encuentra de dos maneras:

- Por compresibilidad, cuando hay cambios de volumen sin alterar la forma de la masa.
- Por deformabilidad, cuando hay más cambios de forma que cambios de volumen.

#### 1.5.5. Rigidez.

La rigidez de un suelo es la capacidad que presenta para ser inflexible, es decir la incapacidad de elasticidad o de movimiento del cuerpo.

La rigidez permite a un elemento ser capaz de resistir grandes deflexiones o deformaciones, ello es conveniente ya que el material será capaz de resistir mayores cargas.

Los bloques de tierra deben poseer mayor rigidez porque son utilizados como muros portantes y su utilidad radica en la portabilidad y la capacidad para soportar cargas verticales y conducirlas al suelo, sin embargo es necesario que desarrollen esfuerzos resistentes capaces de contrarrestar los efectos sísmicos para cumplir eficientemente su propiedad rígida.

### 1.5.6. Compresión Simple

Es una variante simplificada del ensayo triaxial. Este ensayo hace que una muestra de suelo sea sometido a una carga axial vertical hasta su rotura para determinar su deformación axial, al igual que la carga última que soportaría dicho material de prueba (Sagasetta y Cañizal, 2010).

Tabla 5: Valores referenciales de compresión última en suelos

Tipo de suelo	Resistencia a compresión simple, $q_u$ (kN/m <sup>2</sup> )
Suelos muy flojos o muy blandos	0 - 80
Suelos flojos o blandos	80 - 150
Suelos medios	150 - 300
Suelos compactos o duros	300 - 500
Rocas blandas	500 - 5000
Rocas duras	5000 - 40000
Rocas muy duras	> 40000

Fuente: Ingemecánica (2015)  
Elaboración: El autor

Generalmente este ensayo se utiliza para conocer el servicio a compresión de un material. Es un ensayo de compresión no confinada, o también conocido como ensayo de compresión uniaxial.



Figura 5: Ensayo a compresión simple de un BT sin cemento  
Fuente: Galíndez (2009)

Su importancia es relevante porque permite obtener la carga última de un suelo. Los valores de compresión que entrega pueden utilizarse en proyectos ingenieriles que no requieran de un valor más preciso, ya que entrega un resultado conservador.

El resultado que arroja el ensayo de rotura a compresión simple es un parámetro supervisor para el control de calidad de materiales.

#### **1.6. Estabilización de suelos con fibras naturales.**

La arcilla al ser un material expansivo, en presencia de humedad experimenta cambios de volumen que son necesarios controlar, aumenta en presencia de agua y disminuye cuando se seca (Cosanher, 2014).

El uso de fibras naturales permite estabilizar un suelo, con ello se mejora las propiedades físicas del adobe (Gracomaq, 2015). Diversos ensayos han logrado determinar que la estabilización con fibras mejora las siguientes propiedades en los adobes:

- Retracción cuando seca.
- Erosión.
- Resistencia a la humedad.
- Resistencia a la inclusión de insectos.

Las fibras naturales sirven de armadura y además permiten el aislamiento térmico y acústico en materiales de construcción diversos como ladrillos, bloques y placas (Galán y Rivera, 2012).

#### **1.7. Fibras vegetales y sus propiedades.**

Las fibras vegetales son los elementos o fragmentos de origen natural que pueden hilarse. Se diferencia de otros tipos de fibras como artificiales o sintéticas cuyo origen proviene de la manufactura y procesamiento basado en otros elementos, como por ejemplo el petróleo.

Las fibras vegetales son una alternativa viable en la economía de las construcciones civiles porque son una tecnología saludable y sostenible (Lourdes-Rapife, 2012).

Las propiedades principales presentes en las fibras naturales, son las siguientes:

**Flexibilidad:** Generalmente las fibras procedentes de semillas y en menor cantidad las provenientes de fibras de tallos presentan una buena flexibilidad.

Absorción de humedad: Por lo general las fibras vegetales presentan una óptima humedad y ello les permite mayor plasticidad y ser proclives a poder de cierta manera resistirse al ingreso de humedad exterior.

Resistencia mecánica: Esta propiedad se presenta principalmente en fibras de hojas y cáscaras de frutos. La cocción por ejemplo de la cáscara del arroz brinda un mejor acabado final, además la resistencia.

Aislamiento térmico: Conservan la temperatura del interior, y ello es un aspecto muy importante en zonas con climas variables o zonas con altas temperaturas.

### **1.8. Dosificación de los bloques de suelo.**

La técnica de construcción con tierra (construcción de adobe estabilizado o sin estabilizar), utiliza el suelo con bajo contenido de materia orgánica y de arcilla expansiva, debido a que ésta última con la absorción y secado del agua, altera su volumen y no lo recupera (Arteaga, Medina y Guitérrez, 2011).

La tierra para fabricar adobes se forma por 25 a 45% de limos y arcilla y el resto de arena, la proporción máxima de arcilla será del 15 al 17% (Morales et al., 1993).

Galíndez (2009), mediante forma empírica logró comprobar que los bloques de tierra comprimida (BTC) compuestos de tierra areno-arcillosa de mediana plasticidad, debidamente compactados a presiones de 4 Kg/cm<sup>2</sup>, 6 Kg/cm<sup>2</sup> y 8 Kg/cm<sup>2</sup> e impermeabilizados con aceite usado de vehículos constituye el mampuesto de mejores condiciones para elaborar.

Caballero et al.(2010) refiere que un BT compuesto de suelo areno-arcilloso combinado con fibras de bagazo de agave de 25mm de longitud y en concentraciones del 1%, logró determinar resistencia a compresión de 6,85 MPa y 0,56 MPa de resistencia a flexión.

### **1.9. Fallas procedentes en construcciones de adobe.**

A continuación se citan algunos de los principales inconvenientes que se evidencian en construcciones de adobe (Morales et al.,1993):

- Construcciones superiores a dos pisos no son aptas para soportar sismos.
- Existe la posibilidad de que la materia prima utilizada sea de mala calidad y genere mala producción.
- Dimensiones inadecuadas.
- Confinamiento deficiente y mal arriostramiento de los muros.
- Vanos de puertas y ventanas muy anchos

- Fallas por corte y tracción.

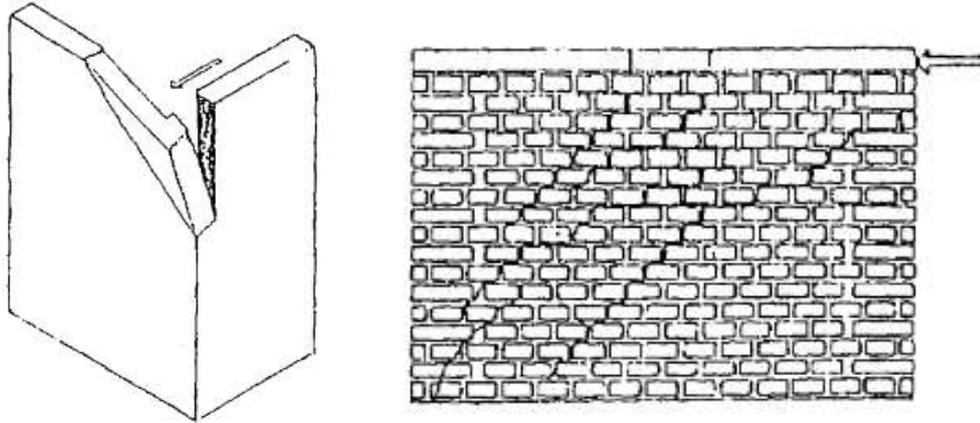


Figura 6: Fallas por corte y tracción en muros de adobe  
Fuente: Morales et al.(1993)

- Susceptibilidad a la erosión hídrica e intemperismo.
- Falta de rigidez horizontal de los techos.
- Techos pesados y deficiente empalme con los muros.



Figura 7: Fallas en construcciones de adobe  
Fuente: Morales et al. (1993)

### **1.10. Medidas de seguridad que benefician la seguridad en viviendas de adobe.**

*Zelaya (2007)* propone las siguientes medidas de seguridad en viviendas de adobe:

- Evitar la mala calidad del adobe, es decir usar materia prima de buena calidad y mejorar la técnica de producción.
- Evitar el dimensionamiento inadecuado del adobe especialmente impedir que la altura del adobe sea demasiado grande.
- Usar una cadena superior de amarre.
- Dejar de construir viviendas de más de un piso, ya que son vulnerables a los sismos.

*Blondet, Villa y Brzev (2003)* recomiendan además las siguientes medidas de seguridad:

- Usar techo liviano y aislado en lugar de techo de tierra pesado y compacto.
- Construir sobre una cimentación fuerte.
- Distribuir los muros eficientemente de manera que exista soporte mutuo por medio de muros transversales, en intervalos regulares en ambas direcciones o usar contrafuertes.

### **1.11. Geotextiles.**

Los geotextiles se definen como el material textil plano, permeable y polimérico empleado en contacto con el suelo y otros materiales para aplicaciones de ingeniería civil (GITECO Universidad de Cantabria, 2000).

Está constituido de fibras poliméricas basadas en polipropileno, poliéster o poliamidas, similar a una tela. Presentan gran deformabilidad y son capaces de ser enrollados, cortados y cocidos, entre otros.

#### **1.11.1. Tipos de geotextiles.**

Según GITECO - Universidad de Cantabria (2000), la clasificación de los geotextiles viene dada por su composición, el método de fabricación del geotextil, la naturaleza del polímero y la presentación del polímero.

Clasificación de los geotextiles (geosintéticos) según su composición:

- Geotextiles
- Productos relacionados: Geomalla, Geored, Geoestera, Geocélula
- Geocompuestos: Geotextil + Geomalla, Geotextil + Geored
- Geomembranas

Clasificación según el método de fabricación:

- No tejidos
- Tejidos
- Tricotados

Clasificación según la naturaleza del polímero:

- Poliolefinas
- Poliamidas
- Poliéster

Clasificación según la presentación del polímero:

- De fibra continua
- De filamento continuo

#### **1.11.2. Propiedades de los geotextiles.**

Debido a la composición de las fibras sintéticas, las funciones principales se basan en su resistencia mecánica a la perforación y tracción y a su capacidad de drenaje. Algunas propiedades de los geotextiles se citan a continuación:

- *Separación:* Permiten la separación de dos capas de suelo de diferentes propiedades geomecánicas para evitar la mezcla de ambas. Su utilización consiste en ser barrera entre las capas de suelo para facilitar la transmisión de agua.
- *Refuerzo:* Sirven de refuerzo para combatir los efectos referentes a tracción, para así eliminar las fuerzas de vuelco, además puede ser utilizados como material de confinamiento.
- *Estabilización:* Trabajan como complemento de las propiedades mecánicas del suelo, ya que controlan los esfuerzos transmitidos en las fases de construcción así como en la de servicio de las estructuras.
- *Filtración y Drenaje:* Los geotextiles no tejidos debido a su gran porosidad presentan una alta permeabilidad que permite el paso del agua y retiene las partículas del suelo, asimismo puede transportar y conducir el agua a través de su estructura.
- *Protección:* Absorben los esfuerzos provocados por objetos punzantes y protege a otros materiales laminares como las geomembranas.

### 1.11.3. La geomalla y su importancia en viviendas de interés social.

Según la definición brindada por Geotexan, las geomallas son estructuras tridimensionales con la característica de ser mono o biorientadas, fabricadas en polietileno de alta densidad. Son geosintéticos en grupo de costillas paralelas tensionadas con aperturas de suficiente tamaño para permitir el entrase de suelos u otro material pétreo que se encuentre circundante en la zona (GeoSoluciones, 2015).

La técnica del refuerzo de muros con geomallas es eficaz y adecuada desde el punto de vista tecnológico, ambiental y socioeconómico por el riesgo sísmico al que pueden estar susceptibles las construcciones en tierra cruda.

Según (Solís et al., 2015), el refuerzo de muros con geomalla consigue aumentar la resistencia de los muros de adobe, fundamentalmente en la capacidad para soportar tensiones de tracción, y aún más importante el aumento de la ductilidad de la construcción para disipar la energía generada en sismos.

El refuerzo con geomalla envuelve las paredes de la vivienda para trabajar conjuntamente con ellas, y se unen a la mampostería mediante trozos de cuerda que atraviesan el muro y que son colocadas en las juntas del mortero durante su construcción.

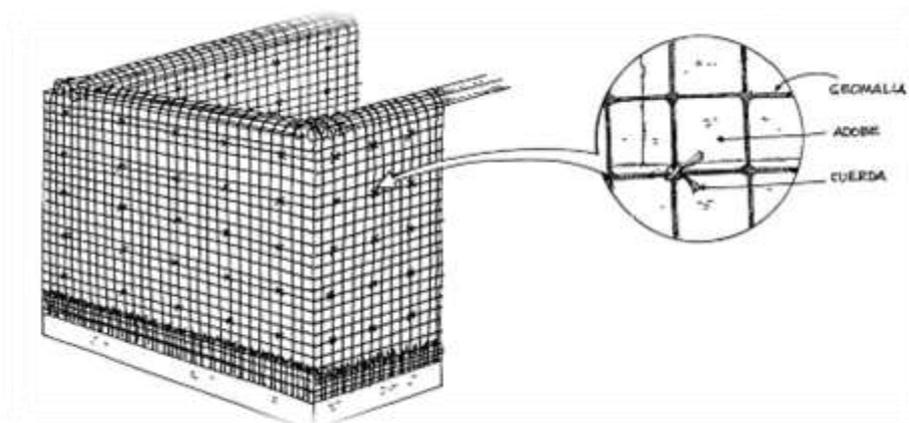


Figura 8: Refuerzo de muro con geomalla  
Fuente: Blondet et al.(2010)

La técnica de refuerzo con geomalla confina las paredes de adobe de las viviendas y abraza por completo el exterior e interior de la vivienda y se tarrajea con el mismo barro de diseño del mampuesto.

Otro beneficio que presenta el uso de la geomalla, es que pueden actuar como refuerzo en actuales construcciones de adobe.

### **1.12. Diseño sísmico de muros con suelo estabilizado con fibras y malla geotextil.**

Torrealva (2009) presenta las siguientes hipótesis que se deben seguir para el reforzamiento con geomallas:

- Los muros deben ser reforzados con geomallas por ambas caras.
- Las geomallas de ambas caras deben estar conectadas entre sí y a través del muro cada 30 cm aproximadamente horizontal y verticalmente.
- Los muros son tarrajeados con barro mezclado con paja para embeber a las geomallas.
- Los esfuerzos de compresión por el efecto combinado de la carga vertical y el momento flector coplanar no son relevantes debido a la poca altura de las edificaciones de adobe en áreas sísmicas.
- Los muros así reforzados son suficientemente esbeltos y generan un comportamiento flexible para fuerzas transversales al plano, que se consigue con esbeltez mayor a 4.

Además logró obtener las siguientes conclusiones del diseño a flexión:

- La resistencia a flexión de la sección se encuentra gobernada por la resistencia última a tracción del refuerzo.
- Las grietas por tracción se originan y propagan a través de las juntas en los adobes.
- Las fallas por compresión en adobes no influyen gracias al confinamiento que genera el refuerzo con la geomalla.

Una consideración muy importante y que se debe tener en cuenta en el diseño con geomalla es que el comportamiento dinámico del conjunto es elástico no lineal con iguales niveles de resistencia en tracción y compresión, y la energía puede ser disipada gracias al deterioro del muro, sin embargo por el confinamiento de la geomalla no se altera la capacidad portante vertical y horizontal del elemento.

### **1.13. Consideraciones geométricas de una vivienda para diseño sísmico.**

Uno de los principios esenciales de la construcción de adobe sismo resistente es el uso de distribuciones en planta compactas y tipo caja (ver figura 9).

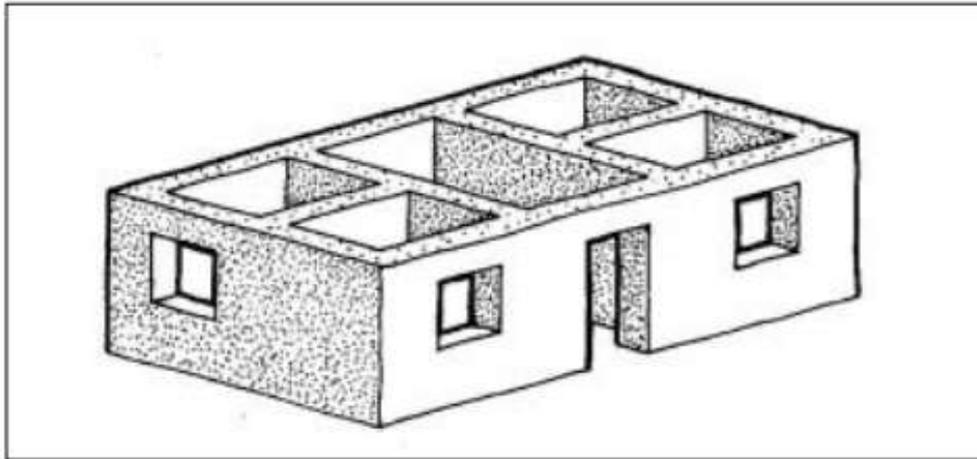


Figura 9: Casa cuadrada y compacta con abundantes muros transversales  
Fuente: Coburn et al.(1995)

La longitud del adobe no debe ser mayor que el doble de su ancho más el espesor de una junta de pega.

$$L \leq 2a + e_{junta} \quad (\text{Ec. 2})$$

Dimensiones recomendadas para bloques de adobe:

- Adobe estabilizado: 28 x 28 x 8 cms
- Adobe simple: 38 x 38 x 8 cms

En cuanto a las condiciones que debe presentar el muro, Blondet, Villa y Brzev (2003) presentan las siguientes características empíricas relacionadas a la construcción para ser lo suficientemente resistentes a sismos:

- La altura del muro no debería exceder ocho veces el espesor del muro en su base y en ningún caso debería ser mayor que 3.5 m.
- La longitud sin arriostres de un muro entre muros transversales no debería exceder de 10 veces el espesor del muro, con un máximo de 7 m.
- Los vanos no deberían exceder de un tercio de la longitud total del muro.
- Ningún vano debería tener un ancho superior a 1.2 m.
- Proveer muros de 1.2 m de longitud mínima entre vanos.

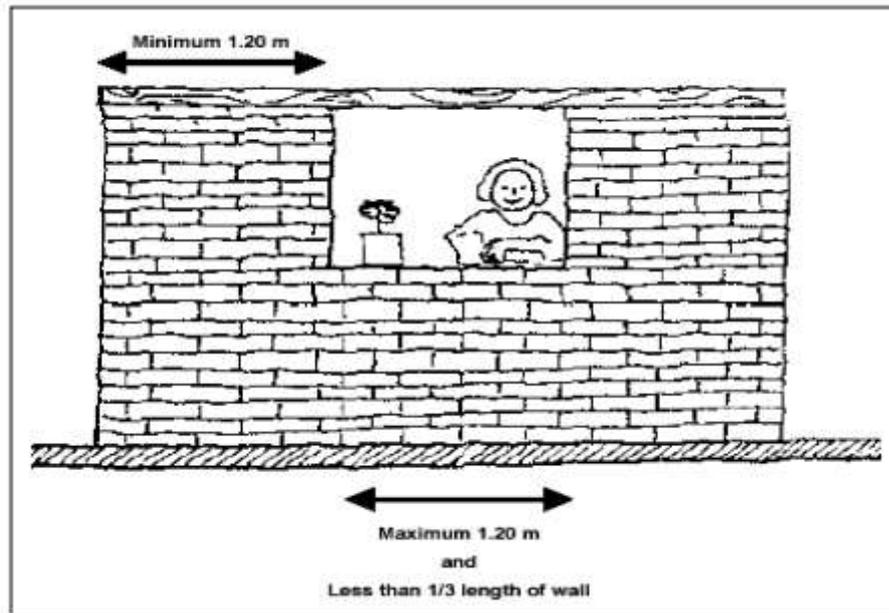


Figura 10: Guía para los vanos en muros  
Fuente: RESESCO (1997)

Zelaya (2007) además presenta las siguientes recomendaciones:

- La relación entre la longitud del adobe en el plano del muro y su altura no debe ser menor que 4 para construcciones hechas con adobe sin estabilización, ni menor que 3 para adobe estabilizado.
- La falla deberá ser por rotura del adobe y no por la junta. el largo debe ser mayor que el doble del ancho, de tal manera que si se produce falla, sería por rotura del adobe y no en las juntas.

#### 1.14. Análisis mediante elementos finitos.

El método de elementos finitos (MEF) es un método numérico que consiste en dividir un cuerpo en una cantidad finita de elementos definidos por el usuario. La subdivisión del cuerpo en elementos finitos se denomina discretizar. Se utiliza el MEF para la aproximación de problemas continuos (Frias, 2004).

Zienkiewicz y Taylor (1994) definen el método bajo las siguientes condiciones:

- El continuo se divide en un número finito de partes “elementos”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados nodos. Los nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.

- La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de las funciones de los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.

El MEF es una transformación de un cuerpo de naturaleza continua a un modelo discreto aproximado, es decir, transformar la entidad en un número finito de elementos (discretizar) y mediante la interpolación de la interacción de los valores conocidos en los nodos, conocer el comportamiento en el interior del cuerpo aproximado.

Su empleabilidad usualmente es para la resolución de problemas de alto grado de complejidad que involucran geometrías complejas, cargas no distribuidas y determinación de propiedades de materiales que por lo general no son posibles de obtener analíticamente mediante expresiones matemáticas (Jiménez, 2004).

#### Elemento finito:

Un elemento finito “e” viene definido por sus nodos (i, j, m) y por su contorno formado por líneas que los unen.

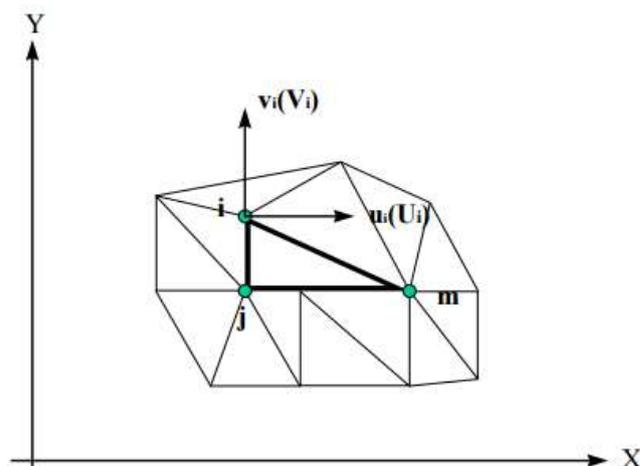


Figura 11: Coordenadas nodales (i, j, m) y desplazamiento de los nodos  
Fuente: Frias (2004)

Se puede definir a un elemento finito como una serie de subdominios no intersectantes entre sí, dentro del cual se pueden distinguir una serie de puntos representativos llamados nodos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se conoce como malla (Ortiz, Ruiz, y Ortiz, 2013).

### Mallado:

El mallado es la discretización de un cuerpo mediante el cual se permite el cálculo de las distintas relaciones de adyacencia de los nodos que se generan del modelo matemático que rige el sistema.

Las incógnitas o grados de libertad definidas en cada nodo se asocian a las relaciones de adyacencia que se pueden escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales, este sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema y es proporcional al número de nodos (Ortiz, Ruiz, y Ortiz, 2013). La resolución de todo este sistema permite conocer los desplazamientos generados y a partir de ecuaciones matemáticas relacionarlos con otras incógnitas para encontrar valores de tensiones y deformaciones.

En la figura siguiente se presenta un modelo de cuerpo y su posterior discretización.

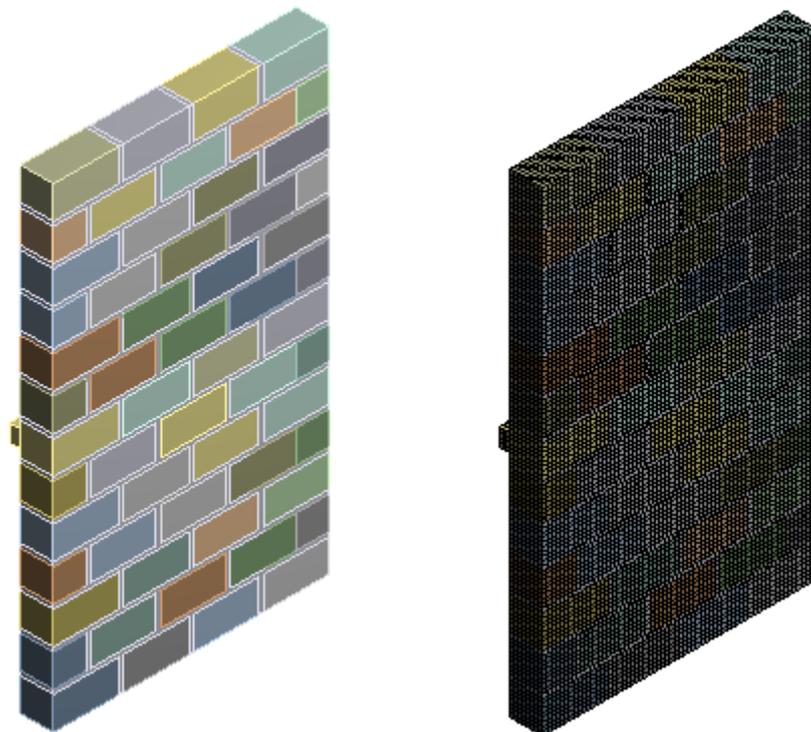


Figura 12: Discretización de un muro de adobe  
Fuente: El autor

### **1.15. Método de elementos finitos asistido por computadora.**

El análisis por elementos finitos permite simular mediante computadora el comportamiento que resultaría producto de someter a un cuerpo de geometría complicada a diversos problemas físicos. A través de este método numérico es posible encontrar soluciones a las diversas ecuaciones diferenciales que surgen de dicho problema.

Fruto de la complejidad que supone la resolución de problemas ingenieriles, el avance tecnológico ha permitido desarrollar softwares que analicen y resuelvan estos problemas. De ello nace La Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE por sus siglas en inglés que significa Computer Aided Engineering).

La CAE supone un paso más en los sistemas CAD (Computer Aided Design o Diseño Asistido por Ordenador) tradicionales, ya que además del diseño del modelo, también permite integrar sus propiedades, condiciones a las que está sometido, materiales, etc. (Bonilla, 2003).

Las herramientas CAE permiten modelar el comportamiento que surgiría en la realidad de un elemento estructural y de ello obtener resultados como deformaciones y esfuerzos. Sin embargo las herramientas CAE deben ser asistidas por sistemas CAD, puesto que mediante ellos es posible modelar la geometría del cuerpo que se analiza.

Su aplicación es muy útil porque ayuda en la resolución de problemas ingenieriles complejos que difícilmente pueden ser resueltos manualmente, además de que reducen el tiempo de análisis y solución significativamente. Todo ello con el conocimiento necesario del profesional que debe entender el porqué de los resultados y darle explicación a aquello que el programa arroja.

#### **1.16. Método de elementos finitos aplicando Ansys.**

Dentro de este aspecto surgen programas computacionales que permiten el análisis mediante elementos finitos como Ansys.

ANSYS, Inc. (Swanson Analysis Systems, Corporación) nace en 1970, fruto del desarrollo del análisis de códigos computacionales para predecir las curvas de esfuerzos del rotor de un reactor nuclear, el cual se veía afectado tanto por la presión como por la temperatura, por parte de Dr. John Swanson en los laboratorios nucleares de Westinghouse en Pittsburgh (Palacio, 2015).

Su desarrollo se fue afinando hasta lograr trabajar bajo geometría en 3-D y análisis no lineales para deformaciones plásticas, análisis dinámico, y los códigos para transferencia de calor por parte de Wilson at Aerojet (Palacio, 2015).

En la actualidad Ansys es un software de simulación que permite predecir con seguridad el comportamiento de un cuerpo en el mundo real, crea prototipos virtuales completos de cuerpos y sistemas complejos – compuestos de componentes estructurales, electrónicos y de software embebido – que incorporan todos los fenómenos físicos que existen en ambientes del mundo real (Ansys, 2016).

El proceso de simulación en Ansys consiste en tres fases o módulos:

- Pre-procesado: Creación de la geometría y mallado.
- Procesado: Consiste en agregar las diferentes características o entrada de elementos de los que se desea obtener la solución, ya sea deformaciones, deformaciones unitarias, tensiones y demás incógnitas que se desea conocer.
- Post-procesado: En esta fase se analiza y se evalúa los resultados que arroja el programa.

Todos estos módulos presentan una interfaz gráfica para una mayor comprensión del diseñador.

El programa permite la solución de problemas lineales y no lineales, de acuerdo a las definiciones que el diseñador especifica. Su base de datos incluye la solución de problemas mecánicos como el análisis de estructuras dinámicas y estáticas, análisis de transferencia de calor y fluido-dinámica, además de análisis de acústica y electromagnetismo.

Este método numérico de análisis usando este software requiere que el usuario ingrese en primer lugar las propiedades de los elementos y luego defina el tipo de análisis al que va a ser sometido un cuerpo.

**CAPÍTULO II**  
**ÁREA DE ESTUDIO**

## **2.1. Antecedentes.**

Se consideraron tres zonas de extracción de suelo para elaborar los bloques. Se escogen los suelos de Macará y Catamayo porque son lugares en donde se explota bastante este recurso, principalmente para elaborar ladrillos. También se extrajo suelo de la ciudad de Loja para considerar la variabilidad de los mismos en la provincia.

Los tres suelos se analizan bajo porcentajes de variación en los diámetros de sus partículas (ver secciones 3.6 y 3.7) para compararlos y obtener la mezcla de mayor resistencia.

## **2.2. Zona de estudio.**

### **2.2.1. Macará.**

La ciudad de Macará se localiza al sur occidente de la república del Ecuador a 79°57'49.39" de longitud oeste y 4°23'13.11" de latitud sur a 195 km de la ciudad de Loja. Con una superficie de 575 km<sup>2</sup>, constituye el 5,2% de la superficie de la provincia de Loja (GAD Macará, 2016).

El cantón Macará limita al norte con los cantones Celica y Paltas, al este con el cantón Sozoranga, al oeste con el cantón Pindal y Zapotillo y en la zona sur con la República del Perú.

### **2.2.2. Catamayo.**

Catamayo es un cantón de la provincia de Loja que delimita al norte con la provincia de El Oro y el cantón Loja, al sur con los cantones Gonzanamá y Loja, al este con el cantón Loja y al oeste con los cantones Chaguarpamba, Olmedo y Paltas.

El cantón Catamayo se localiza en las coordenadas 3°59' de latitud sur y 79°21' de longitud oeste a aproximadamente 33,5 km de la ciudad de Loja. Tiene una superficie de 649 km<sup>2</sup> (GAD Catamayo, 2015).

### **2.2.3. Loja.**

La ciudad de Loja es la cabecera cantonal del cantón llamado por el mismo nombre. Se ubica en las coordenadas 3°59'00" de latitud sur y 79°12'00" de longitud oeste.

Sus límites geográficas son los siguientes: Al norte limita con el cantón Saraguro, al sur y este con la provincia de Zamora Chinchipe, mientras que al oeste con parte de la provincia de El Oro y los cantones Catamayo, Gonzanamá y Quilanga (GAD Loja, 2016).

En los presentes mapas se muestra la posición geográfica de la provincia de Loja en Ecuador y el mapa territorial de la organización y división política de la provincia.

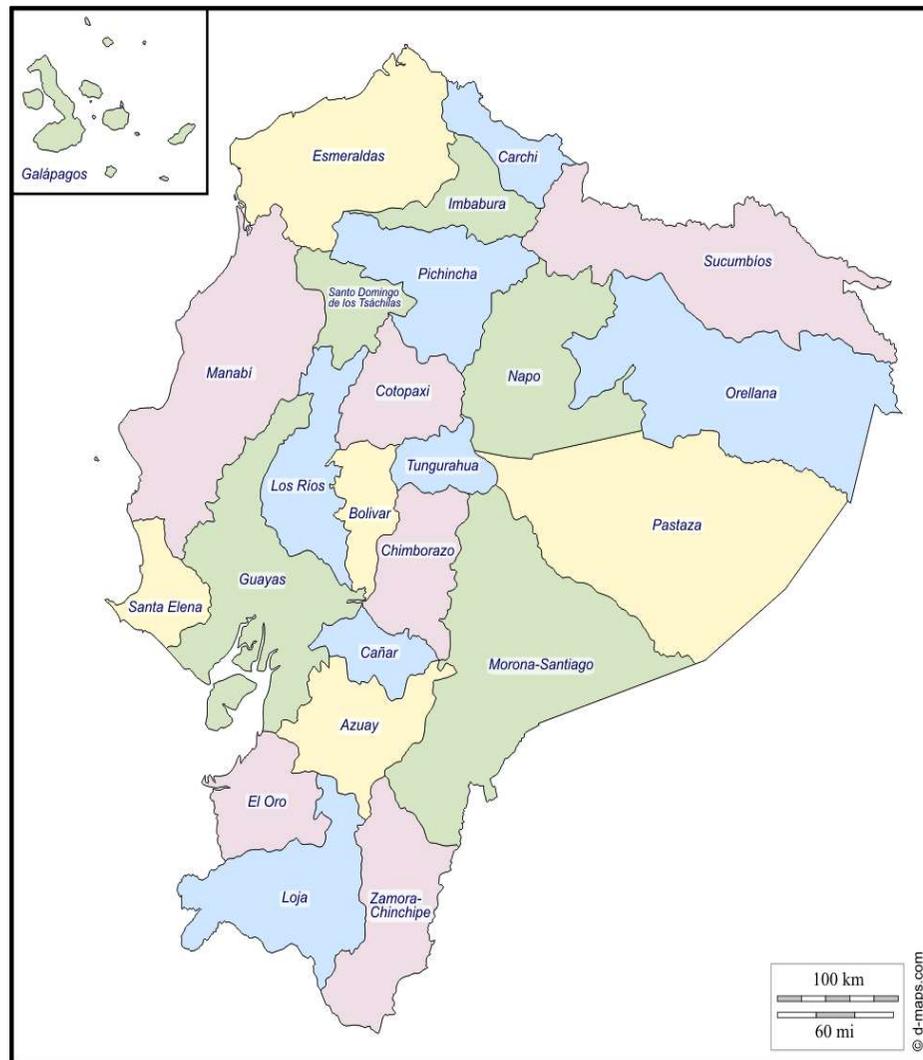


Figura 13: Zona de estudio: a) Mapa político del Ecuador, b) Mapa político de la provincia de Loja  
 Fuente: a) D-maps (2016), b) Mapas Ecuador (2016)  
 Elaboración: El autor

## 2.3. Zonas de extracción de tierra.

### 2.3.1. Macará.

La ciudad de Macará produce adobes y ladrillos cocidos a partir de la arcilla presente en la zona. El lugar de extracción de tierra se encuentra en la parroquia urbana de Macará, en el barrio 5 de Junio.

En la zona existen muchos productores artesanales informales de ladrillos y adobes, que basan la elaboración de los mismos en la experiencia heredada y desarrollada en el tiempo.

La vía de acceso es de tierra y se puede transitar en vehículo. La ubicación de la zona se muestra a continuación:

Coordenadas UTM    4°23'22.1"S  
                              79°56'55.3"W



Figura 14: Zona de extracción de tierra en Macará  
Fuente: Google Maps

### 2.3.2. Catamayo.

La producción de ladrillos cocidos es una de las principales actividades económicas que sustentan a las familias de Catamayo. Una de las principales zonas de producción de ladrillos se encuentra en la parroquia rural El Tambo.

Dentro de la parroquia El Tambo se encuentra una zona denominada Indiuchu, que es una cantera de donde se obtiene la tierra para elaborar ladrillos. A la zona se accede tomando la ruta Catamayo-Gonzanamá, de donde se conecta la vía de entrada a Indiuchu. Las coordenadas exactas de localización se muestran a continuación.

Coordenadas UTM    4°01'47.8"S  
                              79°21'54.0"W

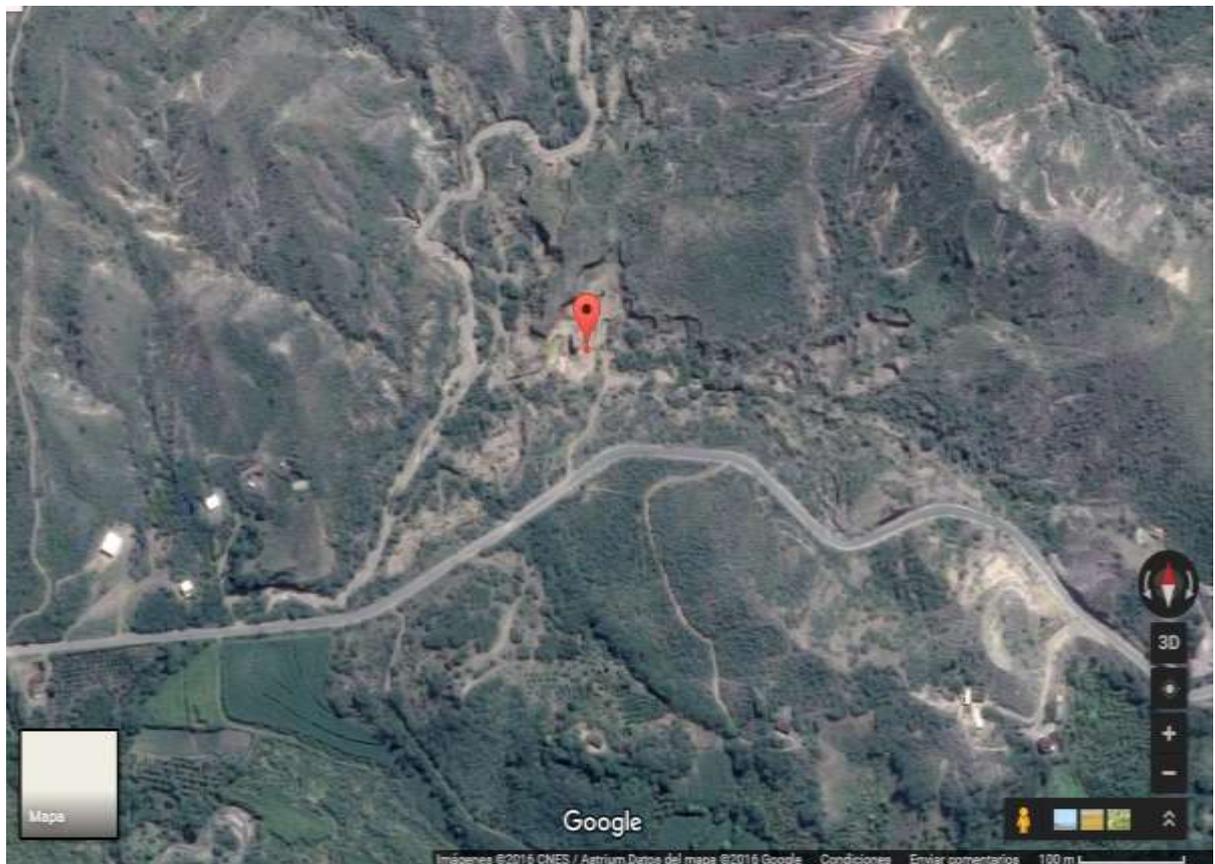


Figura 15: Zona de extracción de tierra en Catamayo-Indiuchu  
Fuente: Google Maps

### 2.3.3. Loja.

La principal zona de extracción y elaboración de ladrillos en el cantón Loja se encuentra en la parroquia de Malacatos. Por ello se escogió una zona afín a esta parroquia.

Se extrajo material cerca al poblado conocido como El Capulí. A la zona se puede llegar en vehículo a través de la Vía de Integración Barrial “Ángel Felicísimo Rojas” a unos 300 m de la intersección con la vía antigua a Vilcabamba. Las coordenadas exactas de localización se muestran a continuación.

Coordenadas UTM    4°03'16.5"S  
                              79°11'51.7"W

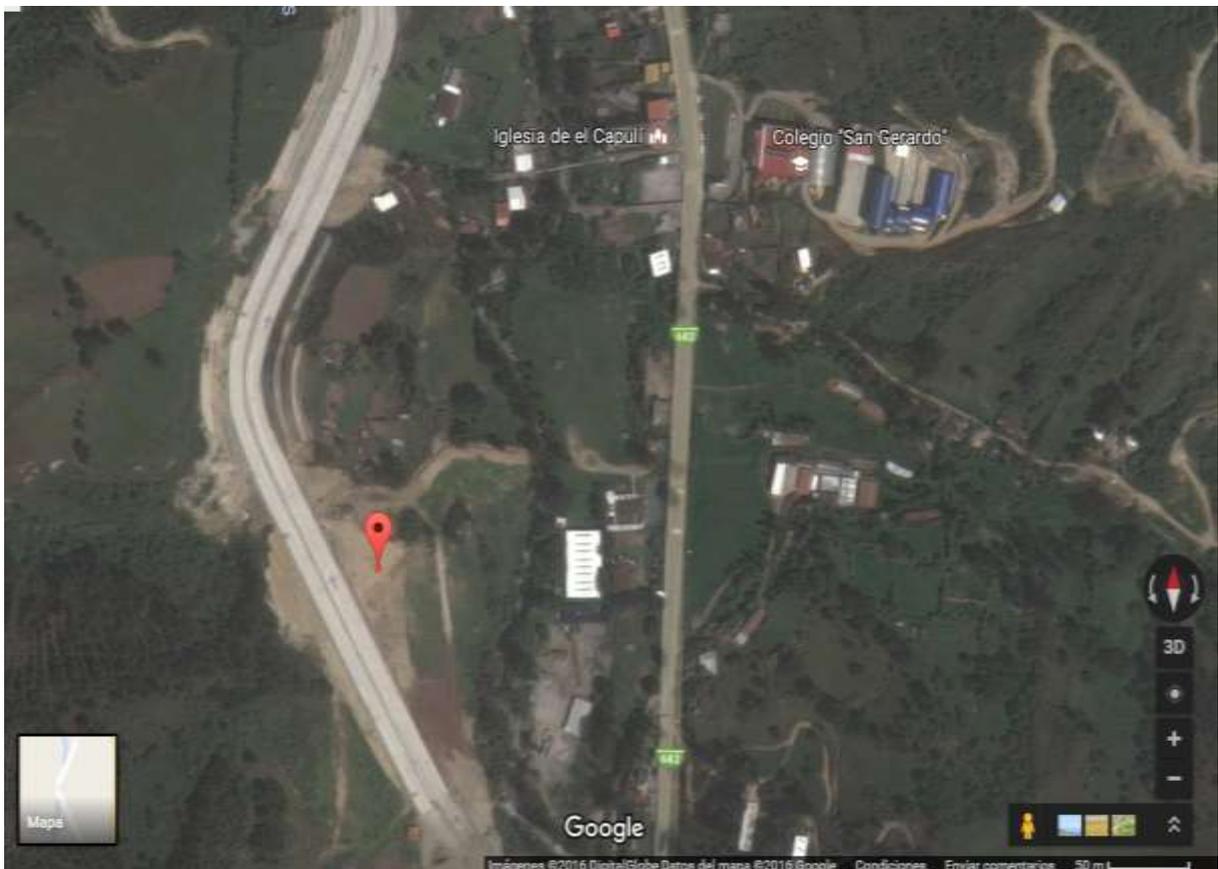


Figura 16: Zona de extracción de tierra en Loja-sector El Capulí  
Fuente: Google Maps

**CAPÍTULO III**  
**METODOLOGÍA**

### 3.1. Obtención de muestras.

Las muestras para la elaboración de los bloques de tierra se obtienen de suelos cohesivos aplicando técnicas que permitan conservar la estructura granular propia del sitio para posteriormente ser ensayadas en laboratorios.

Los procedimientos que se aplican son los siguientes:

- Muestra en bloque, tomada de la superficie del terreno
- Muestra en bloque, tomada de una pared vertical.

Las propiedades de las muestras de suelo presentes en el sitio se conservan aplicando métodos que permitan mantener dichas características en laboratorio. Estos procedimientos consisten en guardar los suelos en fundas plásticas para mantener las características propias de la zona de extracción.

### 3.2. Caracterización de los materiales.

La aceptación del material se basa en pruebas in situ que midan la resistencia natural y plasticidad propia del suelo y permitan su utilización para elaborar las mezclas de adobe.

#### 3.2.1. Ensayo de resistencia seca.

Se realiza mediante la prueba de la bolita, para ello con el suelo elegido se hace por lo menos tres bolitas de barro de aproximadamente 2cm de diámetro, son puestas a secado durante 24 horas y posteriormente sometidas a aplastamiento cada una mediante el dedo índice y pulgar.

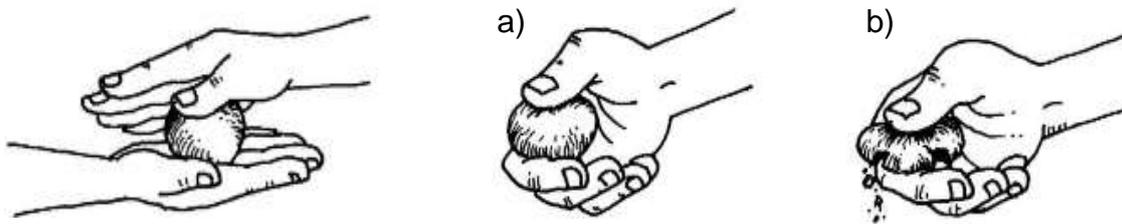


Figura 17: Ensayo de resistencia seca: a) La bolita no se rompe; b) La bolita se rompe  
Fuente: (Blondet, Vargas, Torrealva, y Rubiños, 2010)  
Elaboración: El autor

- Si la bolita no se rompe: Denota que el suelo contiene suficiente arcilla y es apta para elaborar las mezclas de adobe, siempre y cuando se controle la fisuración provocada por la contracción de la arcilla.
- Si la bolita se rompe: Denota que el suelo no es apto y no contiene suficiente arcilla para elaborar las mezclas de arcilla.

### 3.2.2. Ensayo del rollito.

Se aplica para conocer la plasticidad del suelo. Se frota con las dos manos una masa de suelo para elaborar los rollitos.

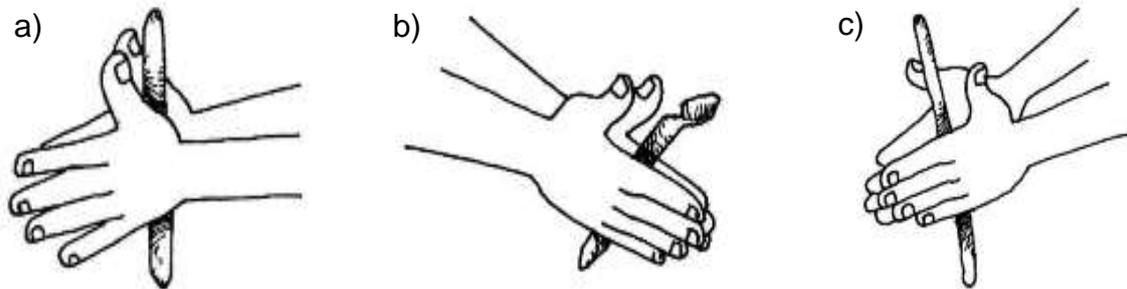


Figura 18: Ensayo del rollito: a) Primer caso; b) Segundo caso; c) Tercer caso  
Fuente: (Blondet et al., 2010)  
Elaboración: El autor

- Primer caso: Cuando el rollito mide entre 5cm - 15cm, la tierra tiene suficiente cantidad de arcilla y arena, y es apta para elaborar las mezclas de adobe.
- Segundo caso: Cuando el rollito se rompe antes de que mida 5cm, la tierra tiene demasiada arena y es necesario agregar arcilla.
- Tercer caso: Cuando el rollito mide más de 15cm, la tierra tiene mucha arcilla y es necesario agregar arena.

### 3.3. Caracterización de suelos.

En el presente trabajo de fin de titulación se trabaja con 5 tipos de suelos obtenidos de 3 cantones de la provincia de Loja:

- Macará, un punto.
- Catamayo, un punto.
- Loja, tres puntos.

La caracterización de suelos consiste en evaluar la fiabilidad de los suelos para elaborar bloques de tierra o adobes mediante los ensayos de granulometría y límites de consistencia (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad).

### 3.4. Ensayos de laboratorio.

Los ensayos de laboratorio permiten conocer las propiedades del material que no pueden ser analizadas con los ensayos de campo. Al aplicar estos ensayos es posible conocer la aceptación del material y en caso de ser necesario la adición de nuevos agregados cuando el material no cumpla adecuadamente la dosificación de las mezclas.

### 3.4.1. Análisis granulométrico.

El análisis granulométrico del suelo se realiza mediante una serie de tamices que permiten conocer la disposición de los granos. Previamente se dispone de diferentes muestras para conocer el contenido de humedad.

La muestra se ensaya para verificar y corregir la granulometría, de acuerdo a la recomendación de algunos autores (Blondet et al., 2003; Blondet et al., 2010; Galíndez, 2009; Solís et al., 2015), ello permite determinar los porcentajes de arena, limo y arcilla.



Figura 19: Análisis granulométrico del suelo mediante tamizado  
Fuente: El autor

La tabla presentada a continuación, muestra el procedimiento a seguir para la determinación de los porcentajes pasantes con sus respectivos diámetros de partículas para elaborar la curva granulométrica.

Tabla 6: Procedimiento para el cálculo del análisis granulométrico de un suelo

tamiz	tamiz (mm)	Wretenido parcial	Wretenido acumulado	% Retenido	% Pasa
-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	-----	-----	-----	-----	-----
Pasa N°4					
-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	-----	-----	-----	-----	-----
fondo		-----			

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

El muestreo de los materiales se realiza conforme lo recomienda la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE) INEN 695, puesto que el ensayo granulométrico requiere de una correcta disposición de granos.

La distribución granulométrica de la serie fina se realiza como lo estipula la norma NTE INEN 696, mediante lavado.

La muestra se lava utilizando agua potable por el tamiz 200, el agua de lavado se decanta puesto que contiene material en suspensión y mediante pesaje inicial y final de secado se obtiene el porcentaje de finos presente.

Se dispone de los respectivos tamices con las aberturas normadas y balanzas con precisión de  $\pm 0.1$  g. Además, para el secado de las muestras se utiliza un horno que mantenga una temperatura uniforme de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

### **3.4.2. Ensayo de los límites de Atterberg.**

Mediante los límites de Atterberg o límites de consistencia se logra caracterizar el comportamiento de los suelos finos. Se dispone de muestras de suelo debidamente preparadas (cuarteadas y material pasante del tamiz 40).

#### **Ensayo del límite líquido.**

El ensayo para la determinación del límite líquido se basa en la norma NTE INEN 691 mediante el método de Casagrande. A través de este ensayo se logra establecer el contenido de agua destilada necesaria en el suelo para obtener un comportamiento líquido y plástico.

La práctica requiere de la copa de Casagrande, que con un determinado número de golpes establece la fluencia del suelo en condiciones normalizadas. Mediante la adición del agua destilada se obtiene una pasta densa y homogénea de suelo capaz de moldearse con los dedos.



Figura 20: Equipo de Casagrande para determinación del límite líquido  
Fuente: El autor

La muestra ensayada tiene como objeto obtener diferentes consistencias de suelo de acuerdo al número de golpes requeridos para cerrar la ranura provocada en la copa de Casagrande en los siguientes intervalos: 25-35; 20-30; 15-25.

Para cada uno de los intervalos de golpes se obtiene una porción de suelo de la unión de las dos mitades de la pasta y se determina su contenido de humedad secando la muestra al horno. La ecuación para el cálculo del contenido de humedad se presenta a continuación:

$$CH = \frac{Wh}{Ws} \times 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde:

$CH$  = Contenido de humedad (%)

$Wh$  = Peso del agua (g)

$Ws$  = Peso del suelo secado en el horno (g)

Los porcentajes de humedad permiten elaborar la curva de fluidez - relación entre el contenido de humedad y el correspondiente número de golpes de la taza de bronce en un gráfico de papel semilogarítmico. El contenido de humedad como ordenada sobre la escala aritmética, y el número de golpes como abscisa sobre la escala logarítmica (la curva de flujo es una línea recta promedia que pasa tan cerca como sea posible a través de los tres o más puntos dibujados).

El límite líquido de la muestra es el contenido de humedad correspondiente a la intersección de la curva de flujo con la ordenada de 25 golpes, aproximado a un número entero.

### **Ensayo del límite plástico e índice de plasticidad.**

El cálculo del límite plástico se basa en la norma NTE INEN 692. Este método además permite determinar el índice de plasticidad del suelo.

Con el ensayo de límite plástico se determina el contenido de agua necesaria en un suelo para generar un comportamiento plástico y sólido mediante el proceso de rolado para evaporar gradualmente el agua y generar fisuras y disgregaciones en el suelo.

El rolado de la muestra se realiza haciendo esferas con el suelo que posteriormente son rodadas con la palma de la mano sobre una placa de vidrio hasta formar cilindros. El proceso se realiza para provocar un desmoronamiento de los cilindros a un diámetro aproximado de 3.2 mm (1/8").



Figura 21: Determinación del límite plástico  
Fuente: El autor

Finalmente, de la porción desmoronada se calcula el porcentaje de humedad con un peso aproximado de suelo de 6 g. Se calcula el contenido de humedad para varias muestras y el promedio es el límite plástico del suelo, expresado como un número entero. La ecuación se presenta a continuación:

$$LP = \frac{Wh}{Ws} \times 100 \quad (\text{Ec. 4})$$

Dónde:

$LP$  = Límite plástico expresado en porcentaje

$Wh$  = Peso del agua (g)

$Ws$  = Peso del suelo secado en el horno (g)

El índice de plasticidad del suelo se obtiene de la diferencia entre su límite líquido y su límite plástico.

$$IP = LL - LP \quad (\text{Ec. 5})$$

Dónde:

$IP$  = Índice de plasticidad expresado en porcentaje

$LP$  = Límite Plástico expresado en porcentaje

$LL$  y  $LP$ , son números enteros.

- Cuando el límite líquido o el límite plástico no puedan determinarse, el índice de plasticidad se informa con la abreviatura NP (no plástico).

- Cuando el límite plástico resulte igual o mayor que el límite líquido, el índice de plasticidad se informa como NP (no plástico).

### 3.4.3. Módulo elástico, deformación y ensayo de compresión simple.

El módulo de elasticidad se establece basándose en el ensayo de tracción indirecta, obtenido del gráfico esfuerzo vs deformación unitaria. La tangente obtenida de la curva esfuerzo vs deformación unitaria permite la determinación del módulo elástico.

Las probetas se ensayan mediante compresión diametral aplicando una carga constante. La adición del deformímetro permite obtener las deformaciones que se generan hasta lograr la rotura de la muestra.

Las deformaciones constantes generadas por las cargas aplicadas permiten definir el comportamiento elástico o plástico presente en el suelo, así como las máximas deformaciones soportadas por los BT.

La pendiente que aloje la mayor cantidad de puntos en el área lineal de la gráfica se define como el módulo elástico del suelo ensayado.

Mediante el ensayo de compresión simple se puede obtener la resistencia máxima a compresión no confinada que soporta la sección menor del bloque de tierra. Para ello se va aplicando una carga moderada de compresión en un tiempo determinado hasta lograr la rotura del bloque.



Figura 22: Determinación de la resistencia a compresión simple de un BT  
Fuente: El autor

La resistencia a compresión simple se genera cuando el esfuerzo sobre la muestra comienza a decrecer, dando como significado que el suelo ha alcanzado su resistencia máxima, el máximo valor alcanzado será el esfuerzo a compresión simple.

#### **3.4.4. Rigidez.**

Se trata de obtener la mayor rigidez posible en el BT, dotando a la mezcla de adobe de las proporciones de arena, limo, arcilla y fibras vegetales adecuadas.

La rigidez en el bloque de suelo consiste en obtener la mayor resistencia posible del ensayo de compresión simple. Esta resistencia se la considera indispensable puesto que los BT actúan como muros portantes que transfieren las cargas verticales al terreno sin la necesidad de contar con cimentaciones excesivas que las transmitan.

#### **3.5. Clasificación de suelos.**

La clasificación de suelos se realiza basándose en las metodologías planteadas por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el Sistema de la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO).

Esta clasificación de suelos, tal y como lo plantean las metodologías, se basan en los ensayos de los límites de Atterberg y la granulometría. Dicha clasificación permite definir el tipo de suelo y caracterizar las propiedades afines del mismo.

#### **3.6. Diseño y dosificación de la mezcla.**

El diseño de la mezcla se realiza basándose en los porcentajes propuestos por los autores citados en el presente trabajo (ver sección 1.8).

La mezcla básica consiste en colocar porcentajes de 15% a 17% de arcilla, 10% a 30% de limos y el porcentaje restante de arena, a la que gradualmente se agrega fibras vegetales en el orden del 1% al 2%.



Figura 23: Preparación de mezclas para probetas de tracción indirecta  
Fuente: El autor

Las fibras vegetales agregadas actúan como el refuerzo a tensiones y consisten en las siguientes: cascarilla de arroz y tallo de arroz. De las muestras ensayadas se determina la opción más viable para mejorar la resistencia del BT a compresión y la respectiva tensión máxima que soporta.

Para evaluar las distintas dosificaciones se plantea como metodología del experimento el modelo multi-tabla del hexágono.

Este modelo permite hacer un estudio más profundo de la variabilidad de las incógnitas. Para el presente experimento se cuenta con dos variables: variable X, porcentaje de finos (material pasante del tamiz #40) en peso; y variable Y, porcentaje de fibras vegetales en peso.



Figura 24: Probetas del suelo proveniente de Macará para ensayo de tracción indirecta  
Fuente: El autor

La planificación del experimento contempla agregar fibras vegetales a las distintas dosificaciones propuestas en proporciones del 1%, 1.5 % y 2%.

Asimismo, el porcentaje de finos van en proporciones del 25%, 29%, 33%, 37% y 41%. Para el porcentaje restante se agrega del mismo suelo el material pasante del tamiz #10 y retenido en el tamiz #40.

Tabla 7: Coordenadas de los puntos para el modelo multi-tabla del hexágono

Punto	% de finos X	% de fibras vegetales Y
A	25	1.5
B	29	2
C	37	2
D	41	1.5
E	37	1
F	29	1
G – J	33	1.5

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

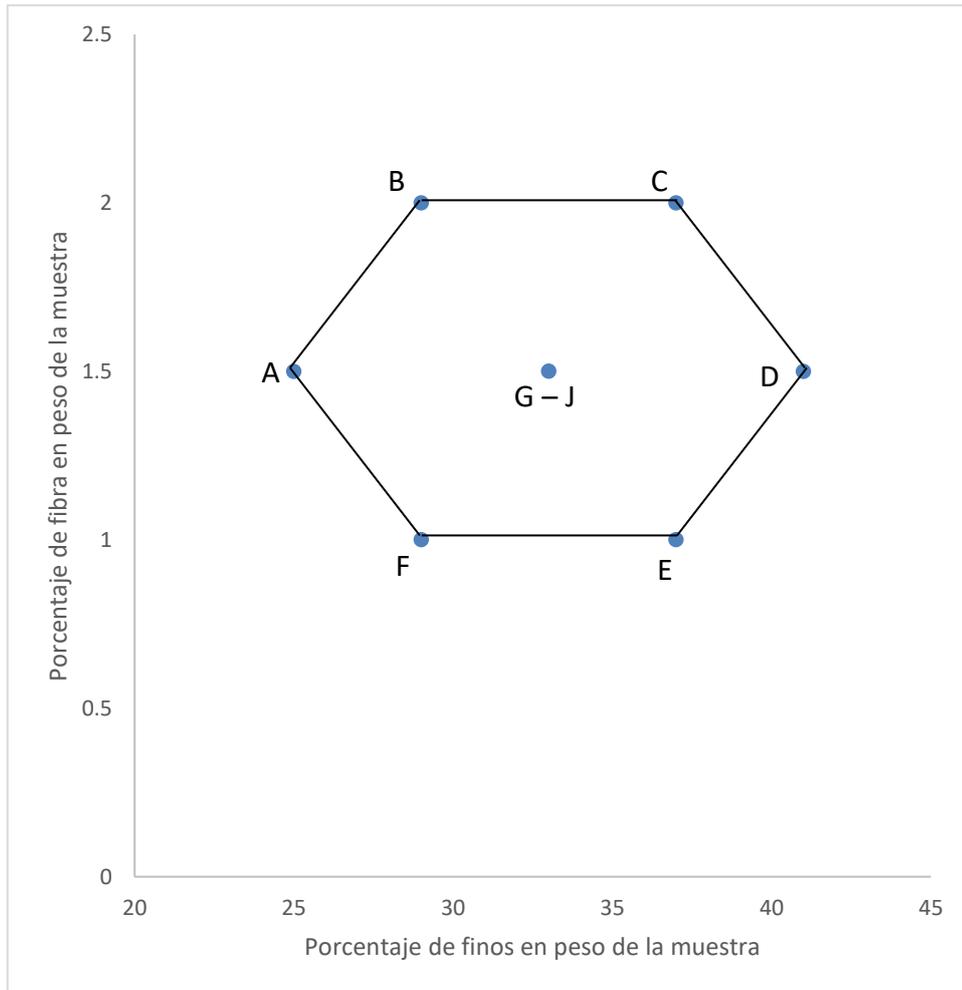


Figura 25: Modelo multi-tabla del hexágono  
Fuente: Acevedo (2001)  
Elaboración: El autor

### 3.7. Optimización de mezclas mediante tracción indirecta.

Para optimizar material y encontrar la mezcla óptima de suelo y fibra vegetal, se plantea el método brasileño o tracción indirecta. Este método consiste en elaborar probetas cilíndricas “pastillas” sometidas a compresión diametral (ver figura 26).



Figura 26: Ensayo de tracción indirecta  
Fuente: El autor

El ensayo de tracción indirecta es un método de ensayo aplicado en cilindros, sin embargo se logró adecuarlo en probetas con espesores de 50 mm. Para ello se aplica una carga vertical constante a lo largo del espesor del disco, producto de la carga se generan esfuerzos a tracción que pueden ser medidos.



Figura 27: Fisuras producidas en las probetas luego del ensayo de tracción indirecta  
Fuente: El autor

Las probetas cilíndricas se elaboran con diámetros (d) y espesores (e) fijos con una relación e/d entre 0.3 – 0.5. Para ello, el diámetro de las pastillas se plantean en valores cercanos a los 70 mm, que varían por la contracción del suelo luego del secado; su espesor consiste en valores cercanos a los 30 mm.

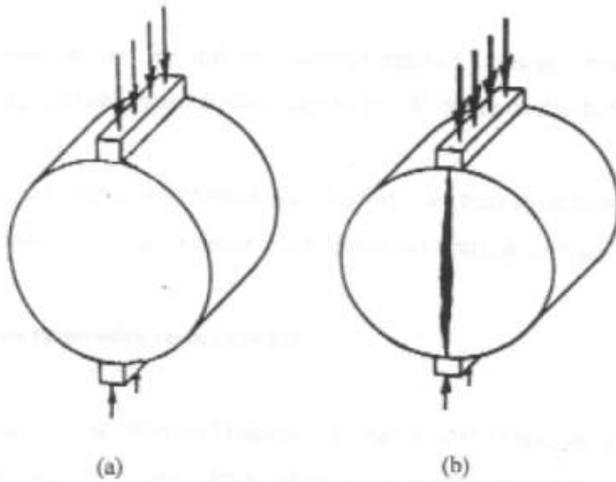


Figura 28: Ensayo brasileño o de tracción indirecta (a) Configuración de la carga y (b) rotura de la probeta por tracción indirecta.

Fuente: upcommons.upc.edu

A continuación se presenta la ecuación que rige el ensayo de tracción indirecta:

$$Tr = \frac{(2 \times P)}{(\pi \times d \times L)} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

Tr = Resistencia a la tracción indirecta (Kg/cm<sup>2</sup>)

P = Carga máxima aplicada (Kg)

d = Diámetro de la probeta (cm)

L = Longitud donde se aplicará la carga (cm).

Este ensayo supone someter diametralmente una probeta cilíndrica a una carga vertical de compresión. Esta carga actúa sobre un área rectangular igual al diámetro por el espesor de la probeta (ver figura 28).

De este análisis se supone se generan fuerzas de tracción horizontales indirectamente causadas por la aplicación de la carga vertical para originar la rotura de la probeta.

### **3.8. Elaboración de los bloques de tierra.**

Las dimensiones del BT están regidas bajo una proporción de 1: ½: ½, para el largo, el ancho y la altura del bloque (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2005), como dimensiones óptimas que benefician la manipulación y reducen el peso y ancho de las paredes.

De acuerdo a lo estipulado, se elaboran bloques de tierra con las siguientes dimensiones: 30 cm, 15 cm, 15 cm, para el largo, ancho y alto respectivamente.

Mediante el ensayo de tracción indirecta se logra encontrar que la mezcla que brinda mayor resistencia a la tracción es el suelo de Macará, con una proporción de 37% de material pasante del tamiz #40, 1% de tamo de arroz y el porcentaje restante material que pasa el tamiz #10 y queda retenido en el tamiz #40.

La elaboración de los bloques consiste en el batido de la mezcla, adición de la fibra, colocación en los moldes de madera y por último el secado bajo sombra.

El batido de la mezcla se realiza agregando los porcentajes en peso del suelo escogido para las distintas consideraciones (pasante y retenido en el tamiz #40), esta mezcla previamente se deja humedecida la noche anterior. Se agrega el porcentaje restante de agua conforme se obtienen de los límites de consistencia ensayados en laboratorio.

La fibra se agrega posteriormente en el porcentaje óptimo y se continúa con el batido continuo de la mezcla hasta obtener una consistencia óptima de amasado. La mezcla finalmente se dispone en moldes previamente humedecidos para evitar la adherencia a las paredes. Los moldes se retiran luego de allanar la cara superior.

Los BT fueron secados a la sombra durante un período de 30 días para posteriormente ser analizados mediante ensayos de laboratorio que permitan conocer ciertas propiedades necesarias para el modelado por elementos finitos en Ansys.

### **3.9. Caracterización del sistema adobe geomalla.**

Mediante el ensayo de compresión simple se obtiene la resistencia máxima que soporta el BT. Además se analiza la resistencia máxima a flexión que soporta el muro tanto en condiciones normales sin la adición de la geomalla, y el porcentaje adquirido con la adición de ésta. El sistema adobe geomalla, consiste en evaluar la resistencia que aporta la geomalla a un muro portante de suelo – muro conformado por los adobes.

El reforzamiento con la geomalla permite analizar y corroborar la idea planteada de que en combinación con el bloque de tierra brinda a los muros portantes de suelo mayor rigidez y resistencia a la flexión, ya que su función es abrazar el muro y anclarlo a la tierra para soportar de manera efectiva los embates producidos por los sismos.

El confinamiento con el geotextil se evalúa luego de que el muro de suelo haya alcanzado su resistencia máxima a flexión y la geomalla adopte el porcentaje restante hasta llegar a su rotura.

### **3.10. Análisis a flexión de los muros portantes de suelo mediante modelado aplicando la técnica de elementos finitos en Ansys.**

El software Ansys es un programa para análisis mediante elementos finitos que permite modelar el muro portante, tanto en condiciones normales (sin la adición de la geomalla), así como el análisis con la inclusión de esta.

El diseño estructural del muro consiste en modelar un sistema constructivo tipo con las dimensiones adecuadas según las recomendaciones que dan los autores citados en el presente trabajo (ver sección 1.13), siendo el espesor del muro el que rige sobre las otras dimensiones.

Los muros de adobe se someten a una carga horizontal que actúa sobre una barra de acero que distribuye dicha carga a lo largo del ancho del muro.

El software obtiene los valores máximos de deformación y los esfuerzos generados de la flexión que sufre el muro producto de la carga actuante. Dichos esfuerzos ayudan a conocer el esfuerzo a flexión mínimo que se debe generar para que la malla geotextil actúe y los porcentajes de reducción de impacto a flexión que se generan respecto a un muro sin geomalla.

La principal incógnita a resolver es conocer la reducción de deformaciones que adquiere el muro luego que se agrega la geomalla, además del funcionamiento que se genera después que el sistema adobe-mortero haya alcanzado su resistencia última a tracción.

### **3.11. Materiales.**

Los diferentes ensayos realizados en laboratorio permitieron caracterizar los materiales usados para el modelado y análisis mediante elementos finitos.

El modelado en Ansys considera tres materiales esenciales para su respectivo análisis: El adobe, el mortero de barro y la geomalla.

Adobe:

La característica esencial para el bloque de adobe es su resistencia a compresión última, puesto que materiales elaborados en tierra están sujetos a deformaciones por aplastamiento. Del ensayo de compresión simple desarrollado en laboratorio se determinó un valor correspondiente a 3.2 MPa.

De la bibliografía consultada se logró establecer un coeficiente de Poisson igual a 0.35. Del ensayo de tracción indirecta se obtuvo un módulo elástico de 39 MPa. A continuación se detallan todas las características del material.

Tabla 8: Propiedades del adobe

Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (MPa)	Coeficiente de Poisson	Resistencia Última a Tracción (MPa)	Resistencia Última a Compresión (MPa)
1760	39	0.35	0.08	3.2

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Mortero de barro:

El muro portante de suelo se considera compuesto de materiales isotrópicos. Es por ello que el sistema adobe-mortero de barro se adopta como un material único salvo en su densidad, que obtenido en los ensayos de laboratorio equivale a 2544 Kg/m<sup>3</sup>.

Tabla 9: Propiedades del mortero de barro

Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (MPa)	Coeficiente de Poisson	Resistencia Última a Tracción (MPa)
2544	39	0.35	0.08

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Geomalla:

Las características de la geomalla se obtuvieron de las especificaciones brindadas por los fabricantes. La geomalla utilizada es biaxial con un espesor de costilla de 4 mm y con aberturas de 3.6 cm y 3.8 cm entre ejes para el sentido vertical y longitudinal respectivamente. El espesor de la geomalla es de 3 mm. En la tabla anexa se detallan las características de la geomalla:

Tabla 10: Propiedades de la geomalla

Material	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson	Resistencia Última a la Tracción (KN/m)	Espesor de costilla (cm)	Tamaño de abertura (cm)	Espesor de geomalla (cm)
Poli-propileno	1390	1100	0.4	20	0.4	3.6 x 3.8	0.3

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

### 3.12. Modelado de los muros portantes sometidos a flexión en Ansys.

El presente trabajo prevé dos fases de análisis de los muros:

- Primera fase: Modelado y análisis de dos muros portantes de suelo con espesores de paredes de 15 cm y 30 cm, sometidos a una carga flexionante que actúa longitudinalmente en el centro del muro.
- Segunda fase: Modelado y análisis de los dos muros portantes de suelo con espesores de paredes de 15 cm y 30 cm agregada la geomalla, sometidos a una carga flexionante que actúa longitudinalmente en el centro del muro.

Para las fases antes mencionadas es necesario aclarar lo siguiente:

- La carga actuante se distribuirá al muro a través de una barra de acero.
- La altura del muro de 30 cm está regida bajo el siguiente análisis:

$$H \leq 8e_{adobe} \leq 3.5 \text{ m} \quad \mathbf{H = 2.19 \text{ m}} \leq 2.4 \text{ m} \leq 3.5 \text{ m}$$

- La longitud del muro de 30 cm se rige bajo la siguiente condición:

$$L \leq 10e_{adobe} \leq 7 \text{ m} \quad \mathbf{L = 1.00 \text{ m}} \leq 3.0 \text{ m} \leq 7 \text{ m}$$

- Se escogió una relación  $\frac{H}{L} \geq 2$  para poder tener un mejor análisis a flexión en el caso del muro de 30 cm.

#### Primera fase:

Para el muro con espesor igual a 15 cm no se adoptaron los criterios de los autores citados. Sin embargo se trató de mantener la misma altura del muro de espesor igual a 30 cm, salvo en la longitud en la que se trató de disminuir la relación  $H/L$ , en vista de que el muro es más fino y es susceptible a grandes deflexiones.

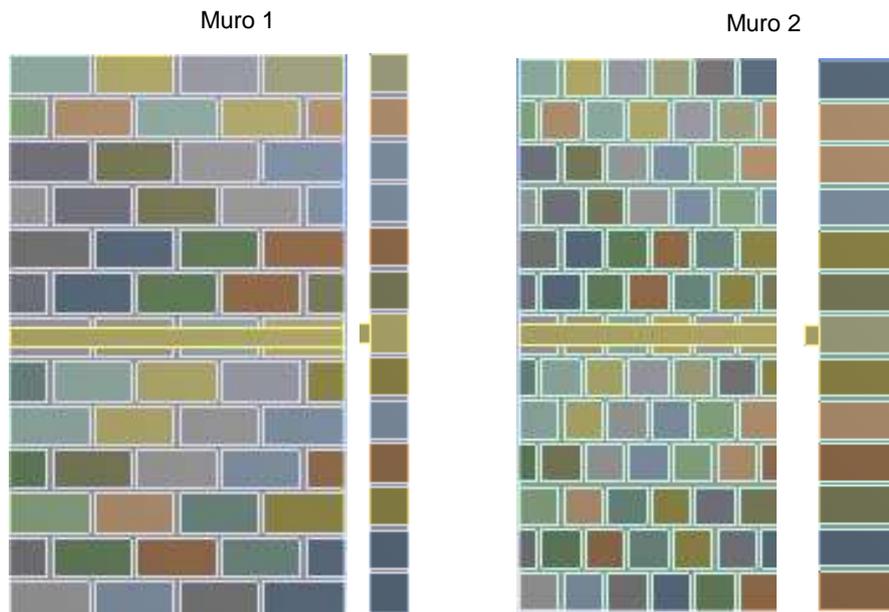


Figura 29: Muros sin refuerzo de 15 y 30 cm de espesor respectivamente  
 Fuente: El autor  
 Elaboración: El autor

Tabla 11: Dimensiones de las paredes de adobe analizadas

	Muro 1	Muro 2
Espesor (cm)	15	30
Altura (cm)	219	219
Ancho (cm)	129	100

Fuente: El autor  
 Elaboración: El autor

El mortero de pega de los bloques escogido para ambos casos es de 2 cm. Asimismo se empotró la sección superior e inferior del muro.

En cuanto a la distribución de cargas, el análisis de la carga horizontal se realizó en un tiempo de 6 segundos. Para ello se partió con una carga horizontal inicial de 0 MPa y que va en aumento cada segundo, según transcurra el tiempo. En la tabla 12 se presenta un resumen de las cargas aplicadas.

Tabla 12: Cargas aplicadas a los muros

Tiempo (s)		1	2	3	4	5	6
Muro 1	Carga (MPa)	0.005	0.008	0.01	0.02	0.02	0.01
Muro 2	Carga (MPa)	0.005	0.01	0.02	0.04	0.04	0.02

Fuente: El autor  
 Elaboración: El autor

El esquema de cargas y restricciones a las que está sujeto el elemento se pueden ver en la figura 30. Otro aspecto a considerar en el análisis del muro es que se ha considerado el peso propio del muro como elemento secundario de resistencia a flexión.

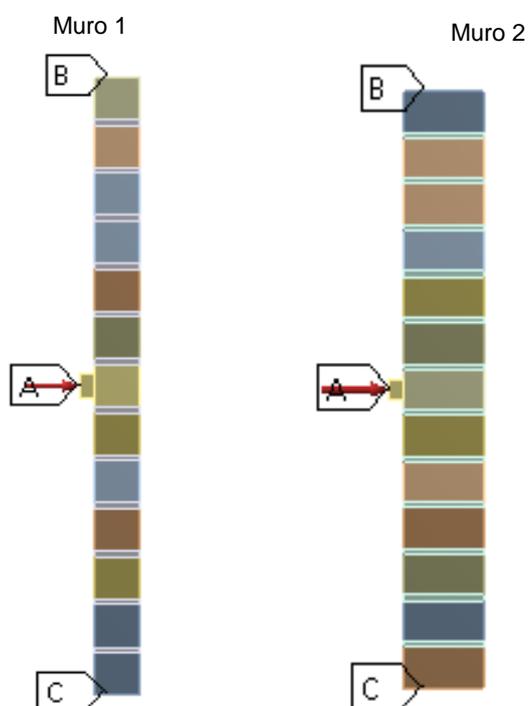


Figura 30: Empotración de los muros: zona B y C. Lugar donde actúa la fuerza zona A  
Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

### Segunda fase:

En esta segunda fase de análisis, tal como se detalló anteriormente se agrega la geomalla al sistema adobe-mortero. Para ello se considera los siguientes casos:

- La geomalla es biaxial, es decir presenta resistencia a tracción tanto en la dirección vertical como en la horizontal.
- La geomalla abrazará a todo el muro, a excepción de la parte inferior en la que se considera que ésta estará anclada al cemento del muro (ver figura 31).
- La geomalla absorberá paulatinamente la carga flexionante hasta que el sistema adobe-mortero falle y continuará trabajando a flexión hasta alcanzar su resistencia máxima.
- Para el correcto funcionamiento del sistema adobe-mortero-geomalla éste último componente estará sujeto en sus caras longitudinales con cintas o soguillas del mismo material que las amarran y no permiten que se suelten, distribuidas cada 30 cm en el sentido vertical y horizontal.

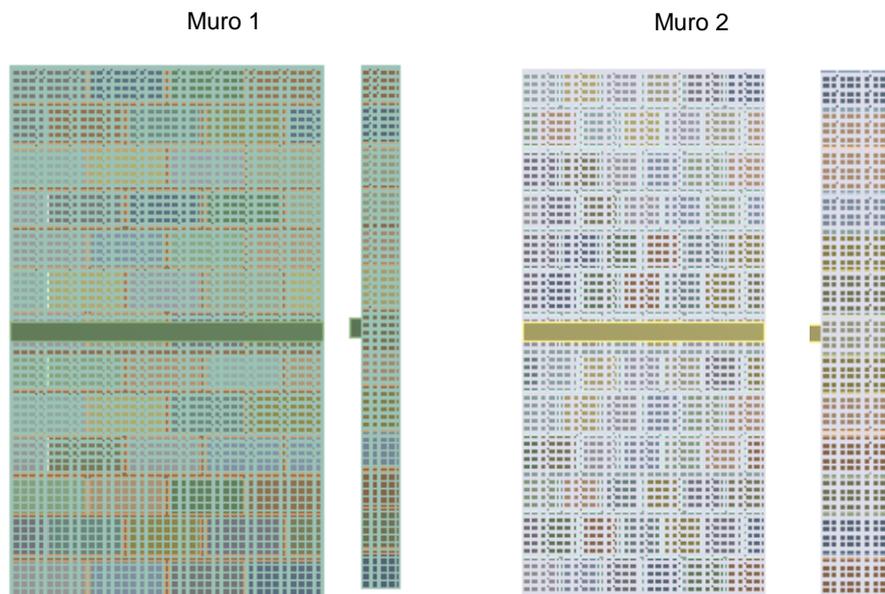


Figura 31: Muros reforzados con geomalla de 15 y 30 cm de espesor respectivamente  
Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Al igual que los muros sin refuerzo, los muros reforzados serán sometidos a las mismas cargas en el tiempo de 6 segundos y serán empotrados en la sección inferior y superior. Las fuerzas y restricciones que actúan en el muro se presentan en la figura 32.

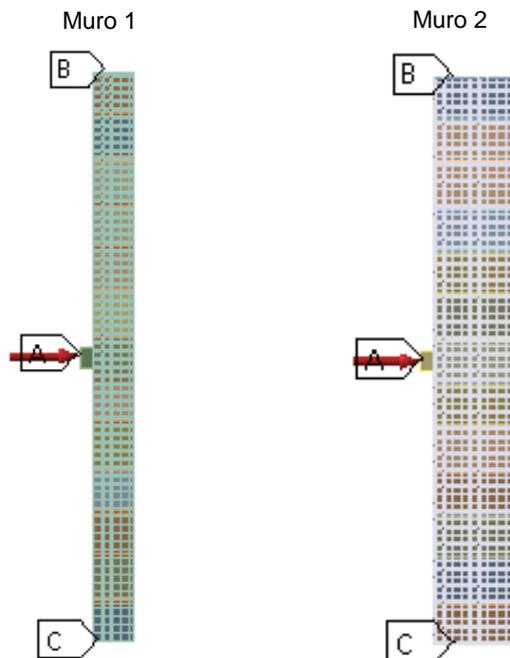


Figura 32: Empotración de los muros: zona B y C. Lugar donde actúa la fuerza zona A  
Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

### 3.13. Análisis a compresión de los muros portantes de suelo mediante modelado aplicando la técnica de elementos finitos en Ansys.

Los muros de adobe se someten a una carga vertical de compresión distribuida a lo largo del espesor del muro. La carga actuante corresponde a los valores reales que se producen tanto por el peso propio del muro, así como el peso de la cubierta.

Mediante el programa se pretende obtener las deformaciones aparentes generadas de la carga a compresión. Los esfuerzos producidos en cada uno de los elementos permitirán conocer el aporte que brinda la geomalla al muro bajo condiciones de cargas de compresión y no de flexión.

### 3.14. Modelado de los muros portantes sometidos a compresión en Ansys.

Al igual que el modelo a flexión, el modelo a compresión comprende dos fases de análisis, la primera que considera al muro sin refuerzo, y la segunda en la que se agrega la geomalla. La diferencia radica en que sobre el muro actuará una carga de compresión distribuida sobre su espesor. Los materiales, así como las propiedades del muro se toman del análisis a flexión.

#### Primera fase:

Se empotró la sección inferior del muro. El análisis de la carga se realizó en un segundo, y se considera que sobre el muro actuará una carga igual al peso propio del muro más el peso de la cubierta, tal y como se muestra en la figura 33.

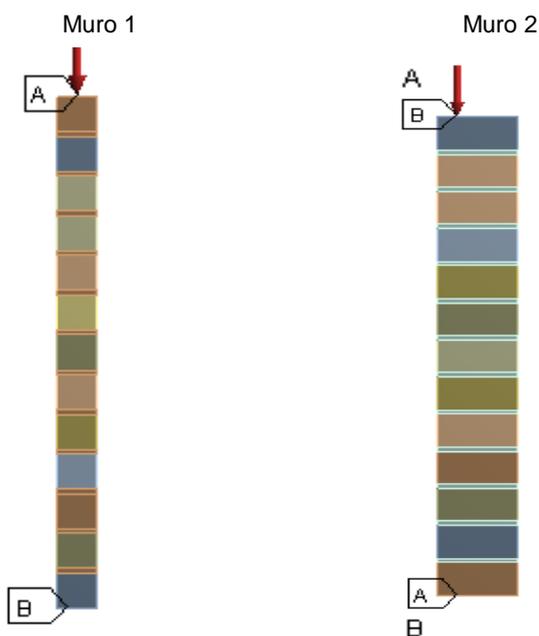


Figura 33: Resumen del modelado del muro sin refuerzo: Empotrado en la zona B. La carga distribuida sobre el espesor del muro actúa en la zona A

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

El resumen de cargas a compresión se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 13: Resumen de cargas que actúan sobre los muros

Carga W (kN/m <sup>2</sup> )	Muro de 15 cm de espesor	Muro de 30 cm de espesor
W peso propio	40.65	41.30
W cubierta	1	1
W total	41.65	42.30

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Segunda fase:

Agregada la geomalla, se considera que los adobes fallarán por aplastamiento, por lo que será necesario verificar si la geomalla absorberá los esfuerzos a tracción que se producen luego de que el muro falle, ya que reducirá su sección en el plano vertical y la aumenta en los planos perpendiculares a la fuerza.

Este criterio se analiza para corroborar la idea de que la geomalla trabaja a tracción y no a compresión, ya que de manera justificada un muro portante se diseña para soportar cargas de otros elementos.

Al igual que los muros sin refuerzo, los muros reforzados serán sometidos a la misma carga de compresión en el tiempo de 1 segundo y se empotran en la sección inferior.

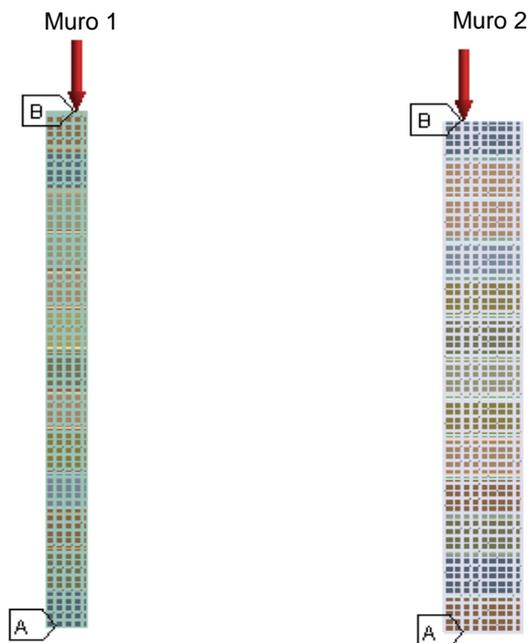


Figura 34: Resumen del modelado del muro reforzado con geomalla: Empotrado en la zona A. La carga distribuida sobre el espesor del muro actúa en la zona B

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

### 3.15. Generación de la malla a partir del modelado del elemento finito.

A través del método de elementos finitos es posible dividir el cuerpo o muro en un número finito de elementos de dimensiones proporcionadas por el usuario o que bien lo genera el programa.

Se escogió un elemento finito hexaédrico de 8 nudos para los bloques de adobe. Los grados de libertad se asocian a la cercanía con otros elementos y a las restricciones a los que se somete el sistema. Por ello para los elementos superiores e inferiores del sistema se restringen los tres grados de libertad; caso contrario sucede con los elementos internos en los que se permite su libre desplazamiento. El tamaño del elemento finito es de 3 cm.

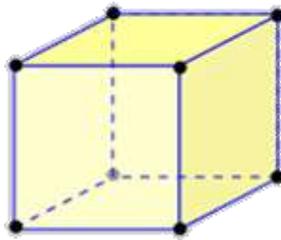
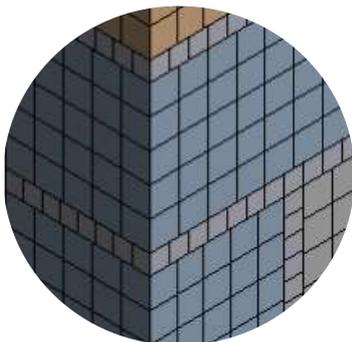
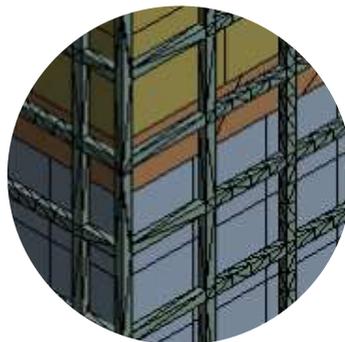


Figura 35: Modelo de elemento finito hexaédrico  
Fuente: Molero (2011)

En el caso del elemento finito para el mortero de barro se escogió un elemento finito hexaédrico de 2 cm de longitud. El elemento finito para la geomalla fue generado automáticamente por el programa debido a la complejidad de la superficie.



a)



b)

Figura 36: Modelo del elemento finito: a) Muro sin refuerzo, b) Muro reforzado con geomalla  
Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

### 3.16. Justificación de la investigación.

El análisis realizado se basó en la investigación hecha en la Pontificia Universidad Católica del Perú bajo el tema titulado “Análisis del comportamiento a flexión de muros de adobe reforzados con geomallas”.

Los autores plantean el refuerzo con malla debido al peligro sísmico en su región, y porque es una técnica agradable socialmente y tecnológicamente. Con el análisis que realizan muestran el comportamiento a flexión en muros de adobe reforzados con geomallas (Solís et al., 2015).

La técnica de refuerzo con geomalla expuesta por los autores consiste en que al envolverlo al muro lo dota de esfuerzos que contrarrestan la flexión. Para ello las geomallas se amarran al muro a través de cordones de cuerdas o nylon que atraviesan las juntas de mortero, además envuelven la sección superior del muro, mientras que la parte inferior se ancla al cemento. La geomalla queda embebida al muro por el enlucido que se le realiza al muro (ver figura 37).



Figura 37: Muro de adobe reforzado con geomalla  
Fuente: Solís et al. (2015)

### ***Caracterización de los materiales.***

Los adobes fueron elaborados con las siguientes características: 120 x 210 x 100 mm. La variación en la resistencia a compresión de los bloques se analizó mediante ensayos a compresión en pilas de 5 bloques, obteniendo un valor de compresión aproximadamente igual a 1.1 Mpa.

La resistencia a tracción de la geomalla la obtuvieron del ensayo del mismo nombre según lo especifica la norma ASTM D6631-01. El ensayo logró obtener una resistencia máxima de tensión de 25 kN/m.

### ***Ensayo de flexión de los muros.***

El comportamiento a flexión en los muros lo realizan restringiendo el movimiento en sus secciones inferior y superior. En la parte central del muro ejercen una carga que se reparte a lo largo de su ancho a través de un rodillo metálico, entre el muro y el rodillo se encuentra una tira de neopreno que permite transmitir la fuerza al muro (ver figura 38). Las dimensiones del muro fueron de 1.6 m el alto, 0.8 m el espesor y 0.22 m el espesor.

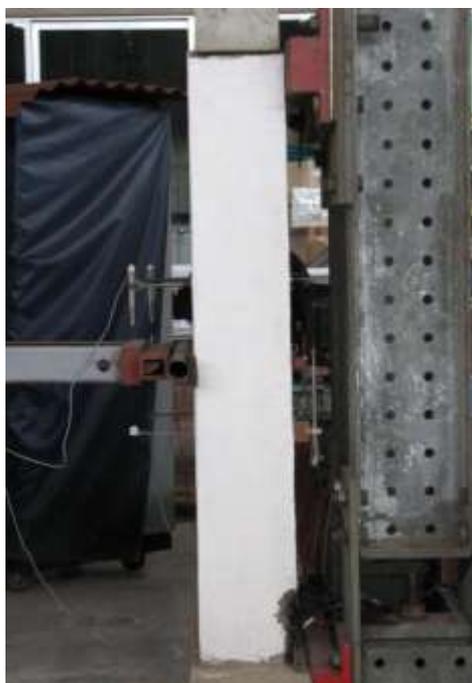


Figura 38: Ensayo a flexión realizado en los muros  
Fuente: Solís et al. (2015)

El muro reforzado fue analizado en un proceso de carga y descarga durante 6 fases. Dejando deformaciones residuales luego de que se aplica la segunda carga y descarga.

Los autores tomaron cuatro lecturas de las deformaciones en el centro del muro: dos en la cara de tracción, y dos en una posición equivalente en la cara de compresión, mediante sensores de desplazamiento que registran el desplazamiento longitudinal relativo entre dos puntos simétricos con respecto a la sección central del muro y separados entre sí 40 cm (Solís et al., 2015).



Figura 39: Sexta y última fase del ensayo a flexión realizado en los muros  
Fuente: Solís et al. (2015)

Los muros analizados permitieron obtener la siguiente curva de comportamiento del muro.

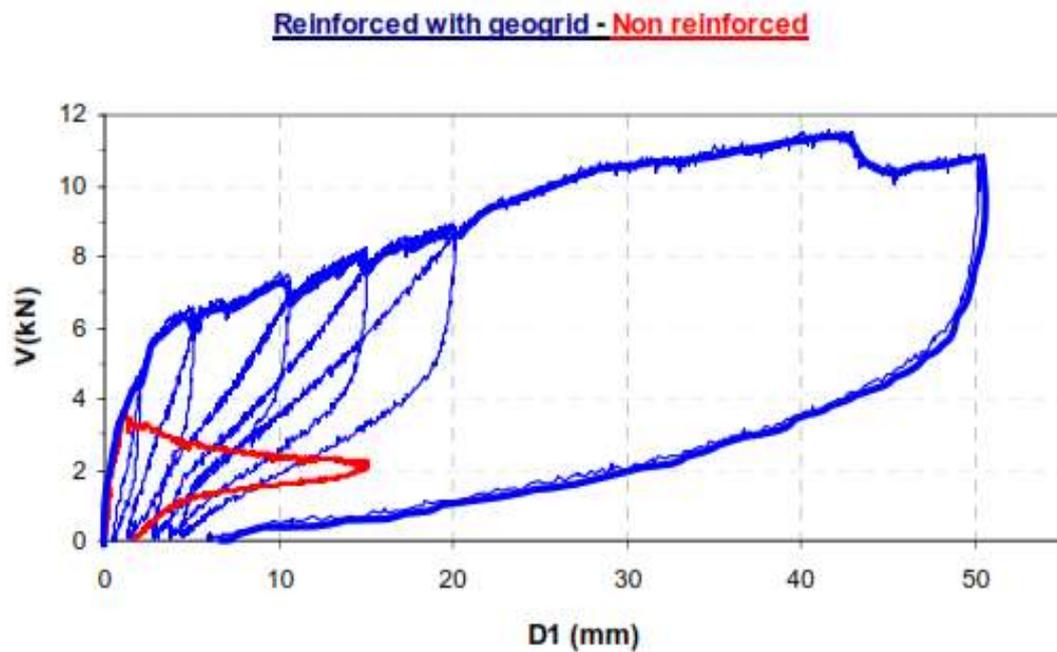


Figura 40: Curva de comportamiento de los muros analizados  
Fuente: Torrealva (2009)

### Modelo de análisis mediante elementos finitos en Ansys.

Mediante Ansys se modeló el muro con las dimensiones realizadas en el modelo real. Se diseñaron los bloques de adobe con las dimensiones y las propiedades expuestas anteriormente, algunas propiedades de los materiales fueron adoptadas.

Adobe:

Tabla 14: Propiedades del adobe en Ansys

Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson	Resistencia Última a Tracción (MPa)	Resistencia Última a Compresión (MPa)
1760	99.6	0.35	0.25	1.1

Fuente: Solís et al. (2015)

Elaboración: El autor

Mortero:

Tabla 15: Propiedades del mortero en Ansys

Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson	Resistencia Última a Tracción (MPa)
2544	99.6	0.35	0.25

Fuente: Solís et al. (2015)

Elaboración: El autor

Geomalla:

Tabla 16: Propiedades de la geomalla en Ansys

Material	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson	Resistencia Última a la Tracción (KN/m)	Espesor de costilla (cm)	Tamaño de abertura (cm)	Espesor de geomalla (cm)
Poli-propileno	1390	1100	0.4	25	0.4	3.6 x 3.8	0.3

Fuente: Solís et al. (2015)

Elaboración: El autor

El muro analizado en Ansys contó con las mismas dimensiones del modelo real: 1.6 m de alto, 0.8 m de ancho y 0.22 m de espesor. Se escogió una relación  $\frac{H}{L} \geq 2$ .

$$H \leq 8e_{adobe} \leq 3.5 \text{ m} \quad \mathbf{H = 1.6 \text{ m}} \leq 1.76 \text{ m} \leq 3.5 \text{ m}$$

$$L \leq 10e_{adobe} \leq 7 \text{ m} \quad \mathbf{L = 0.80 \text{ m}} \leq 2.20 \text{ m} \leq 7 \text{ m}$$

El análisis del muro se realizó empotrando sus secciones inferior y superior, mientras que en su centro vertical, longitudinalmente se transfiere una carga mediante una varilla de acero de espesor controlado. El análisis del modelo realizado se hace bajo condiciones estáticas, a diferencia del análisis dinámico de carga y descarga al que fue sometido el muro reforzado con geomalla real.

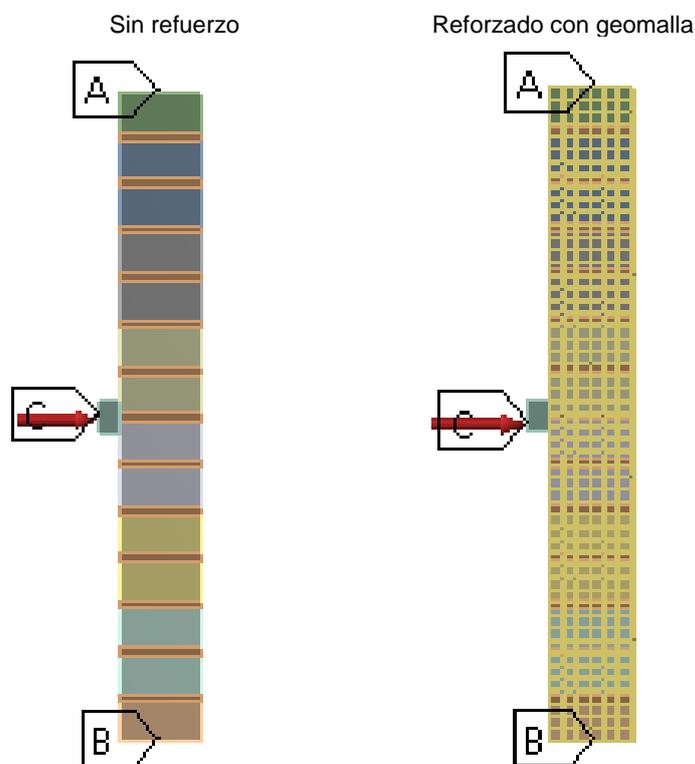


Figura 41: Esquema de modelo de análisis a flexión en los muros: Zonas A y B empotradas. Zona C donde actúa la fuerza  
 Fuente: El autor  
 Elaboración: El autor

**Resultados del modelo analizado mediante elementos finitos en Ansys.**

Deformación total del muro sin refuerzo:

Tabla 17: Deformación total en el muro sin refuerzo en Ansys y modelo real

Carga (kN)	Carga (MPa)	Deformación ANSYS (mm)	Deformación real (mm)
0	0	0	0
0.32	0.005	0.16125	0.19512
0.64	0.01	0.28576	0.26618
1.28	0.02	0.55374	0.5299
3.52	0.055	1.5117	1.46306

Fuente: El autor  
 Elaboración: El autor

Deformación total del muro reforzado con geomalla:

Tabla 18: Deformación total en el muro reforzado con geomalla en Ansys y modelo real

Carga (kN)	Carga (MPa)	Deformación ANSYS (mm)	Deformación real (mm)
0	0	0	0
0.64	0.01	0.25616	0.215270405
1.3	0.0203	0.51232	0.430540809
6	0.09375	3.2311	3.315360986
8	0.125	13.433	11.04290475
10	0.15625	17.306	19.58904089
11.4432	0.1788	20.799	25.80840377

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

El modelo del muro sin refuerzo realizado en Ansys presenta deformaciones parecidas a las que se han obtenido en el ensayo de flexión por los autores, ello se origina porque el muro no estuvo sujeto a un análisis de carga y descarga como si sucede en el caso del muro reforzado con geomalla. El muro llega a una carga máxima de corte de 3.52 kN (ver figura 42).

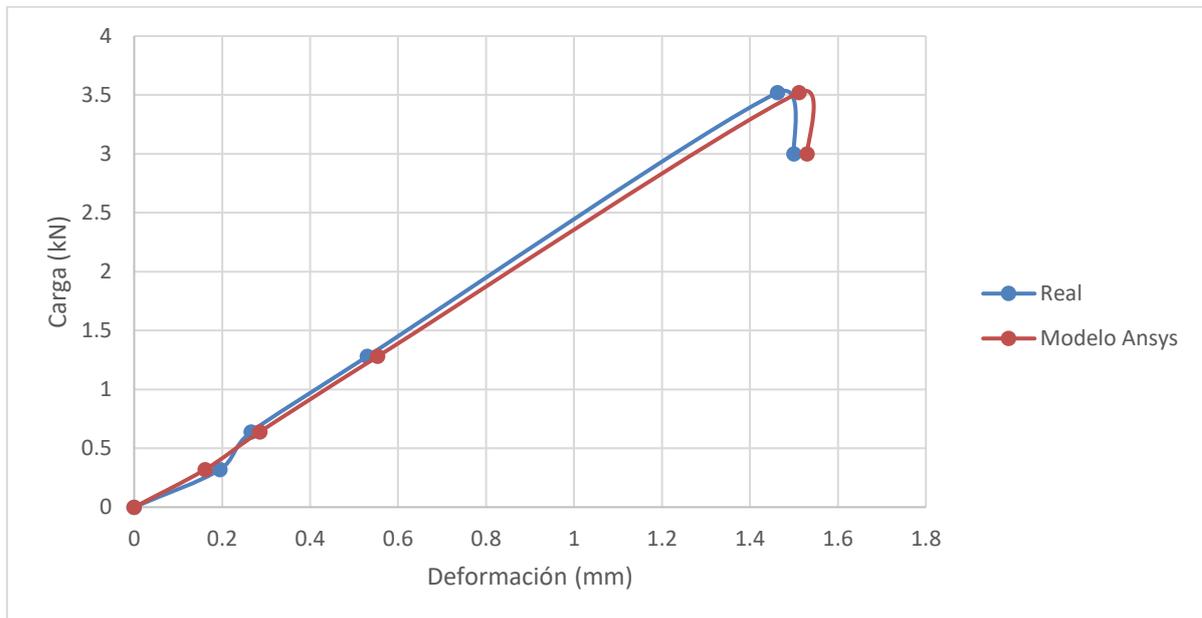


Figura 42: Curva esfuerzo vs deformación del muro sin refuerzo

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

En el caso del muro reforzado, las deformaciones se mantienen parecidas hasta que el muro modelado en Ansys alcanza una fuerza de corte de 6 kN, cercana al doble de la carga que soporta el muro sin refuerzo. Esto se debe a que el programa puede modelar correctamente el comportamiento del muro real hasta este punto, ya que la deformación residual de carga y descarga es mínima respecto a las siguientes cargas a las que se somete el muro.

El modelo realizado en Ansys permite realizar el análisis de muro, máximo hasta la segunda fase del ensayo de flexión del muro, siendo los 6 kN la primera carga y descarga sobre este. A partir de la tercera fase del ensayo – segunda carga y descarga, la pendiente de la curva esfuerzo deformación disminuye y genera mayores deformaciones ante las diferentes cargas que se le aplican al muro (ver figura 43).

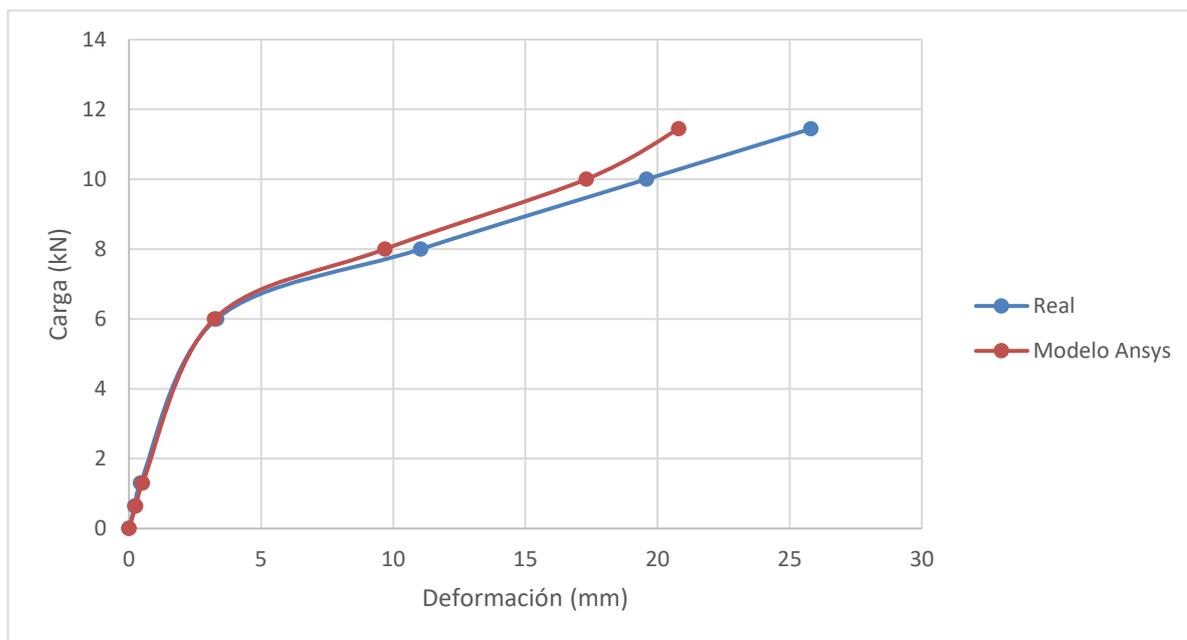


Figura 43: Curva esfuerzo vs deformación del muro reforzado con geomalla

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

A partir de la tercera fase del análisis a flexión en el muro reforzado, su comportamiento no se puede predecir correctamente debido a que el modelo en Ansys realiza un análisis estático diferente al que se realiza en el modelo real que es un análisis dinámico. Sin embargo se puede decir que bajo condiciones de carga estática el modelo desarrollado en Ansys permite predecir satisfactoriamente las deformaciones del muro.

Esta tercera fase de análisis es difícil de predecir puesto que las deformaciones residuales en el muro son mayores y alcanzan el orden de 5 mm, además de que la geomalla está en la zona plástica de deformación, cercana a su límite máximo de tensión, y son características propias del material, que básicamente el programa no suele interpretar.

A partir de los 6 kN de carga, en el modelo en Ansys se cambió los módulos elásticos de los materiales, para acercarse lo más posible a las deformaciones generadas en el modelo real.

Los resultados anteriores, son la pauta principal que permitieron realizar los diferentes análisis a los modelos planteados de la presente investigación.

**CAPÍTULO IV**  
**RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Resultados de caracterización de suelos.**

Los resultados de los ensayos de caracterización de suelos se muestran a continuación. Como se mencionó en el apartado 3.3, se trabajó con 5 tipos de suelos obtenidos de 3 diferentes cantones de la provincia de Loja:

- Macará, un punto.
- Catamayo, un punto.
- Loja, tres puntos.

La caracterización in situ de los suelos permitió determinar que los tres tipos de suelos fueron aptos para elaborar los bloques de suelo. En el caso de los suelos de Loja, tanto el punto 1 y 2 consistían en el mismo tipo de suelo de acuerdo a la clasificación que se obtuvo. En cuanto al punto 3, este no brindaba las condiciones necesarias para elaborar adobes porque contenía demasiada arcilla. Estos suelos se encontraron en condiciones húmedas debido a las frecuentes precipitaciones que ocurren en la ciudad de Loja.

El suelo de Macará presentaba un color marrón, visualmente se pudo decir que ello se debía a que contenía una gran cantidad de óxidos de hierro, esta coloración de suelos principalmente se dan en zonas de clima cálido, de ahí su color, además su condición de saturación se encontraba en estado semi-seco.

En lo que respecta al suelo de Catamayo, su estado de saturación era parcialmente seco, se pudo observar que contenía gran cantidad de arena, la sensación al tacto permitió determinar que existía presencia de arcilla en su matriz, el color que presentaba era gris claro.

Estos ensayos de caracterización de suelos in situ fueron la pauta principal para escoger los suelos, sin embargo la información brindada se constata con la que se obtiene de los ensayos de laboratorio.

Los ensayos de laboratorio de análisis granulométrico y límites de consistencia se presentan en las siguientes páginas, mediante sus resultados se logró establecer la clasificación de suelos para cada uno de ellos.

La caracterización de suelos indica el tipo de suelo que se utiliza, para posteriormente establecer los porcentajes de finos y arena que se utilizan en el modelo multi-tabla del hexágono (ver sección 3.6).

## Análisis granulométrico

Tabla 19: Datos de la curva granulométrica - Macará

Tamiz Nro.	Tamiz (mm)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)
3/4"	19.05	0	100.00
3/8"	9.52	0	100.00
Nº4	4.76	0	100
10	2	29	71
40	0.425	54	46
200	0.075	79	21

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

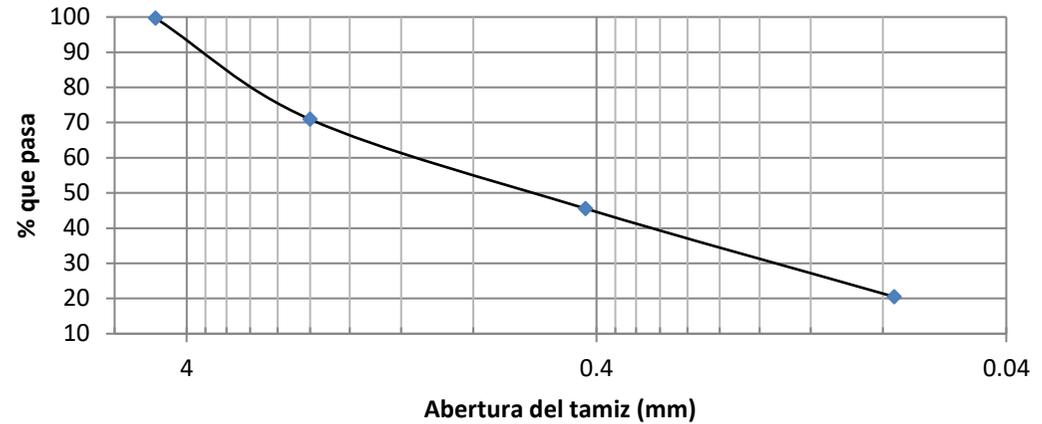


Figura 44: Curva granulométrica del suelo proveniente del cantón Macará

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Tabla 20: Datos de la curva granulométrica - Catamayo

Tamiz Nro.	Tamiz (mm)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)
3/4"	19.05	0	100
3/8"	9.52	1	99
Nº4	4.76	1	99
10	2	9	90
40	0.425	35	64
200	0.075	71	28

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

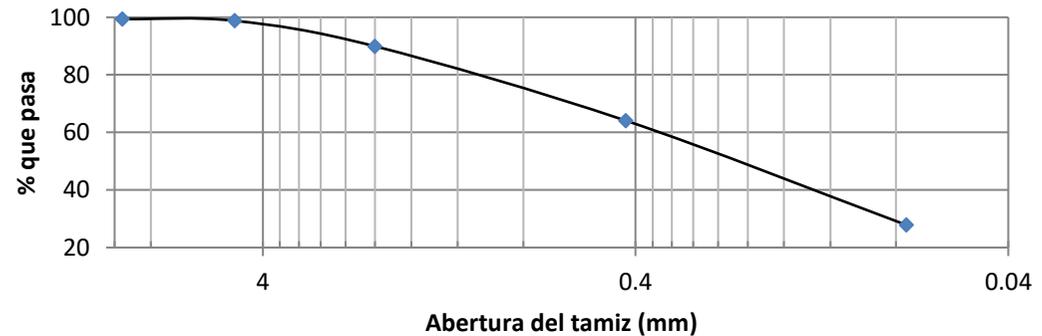


Figura 45: Curva granulométrica del suelo proveniente del cantón Catamayo

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Tabla 21: Datos de la curva granulométrica - Loja punto 1

Tamiz Nro.	Tamiz (mm)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)
1"	25.4	0	100
1/2"	12.7	3	97
3/8"	9.52	6	94
Nº4	4.76	14	86
10	2	33	53
40	0.425	49	37
200	0.075	64	22

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

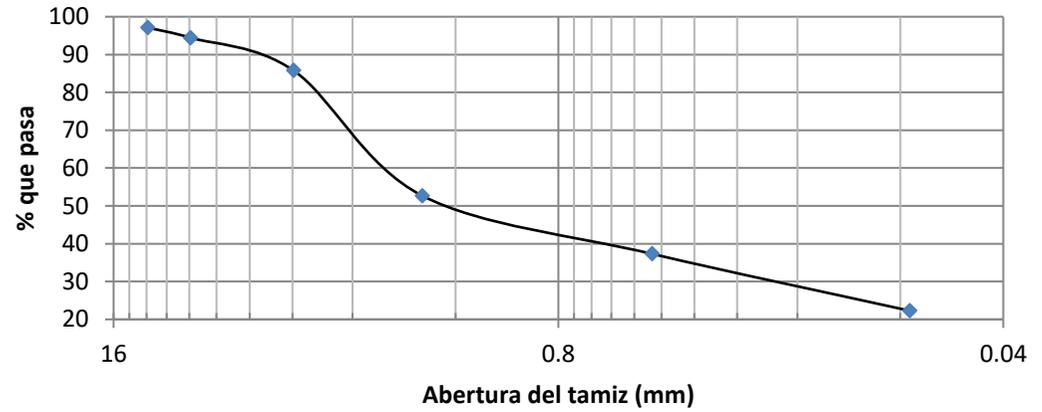


Figura 46: Curva granulométrica del suelo proveniente del cantón Loja Punto 1  
Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Tabla 22: Datos de la curva granulométrica - Loja punto 2

Tamiz Nro.	Tamiz (mm)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)
1"	25.4	0	100
1/2"	12.7	5	95
3/8"	9.52	7	93
1/4"	6.35	11	89
Nº4	4.76	13	87
10	2	11	76
40	0.425	27	60
200	0.075	65	22

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

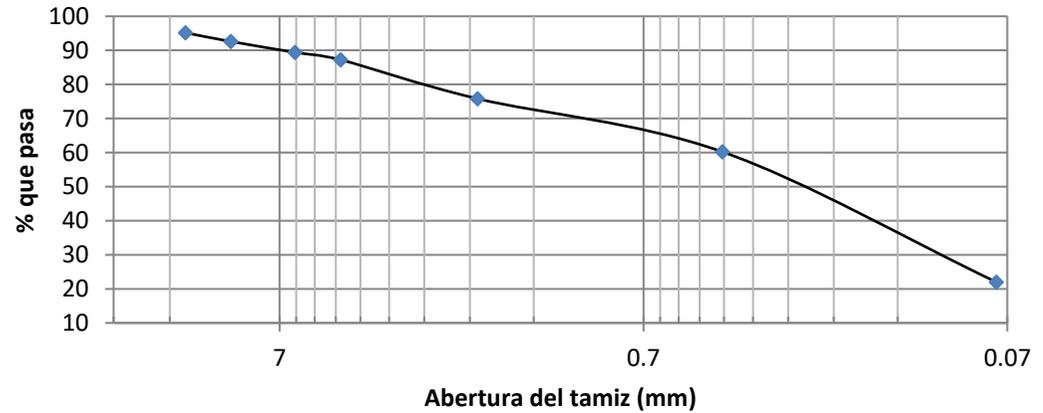


Figura 47: Curva granulométrica del suelo proveniente del cantón Loja Punto 2  
Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Tabla 23: Datos de la curva granulométrica – Loja punto 3

Tamiz Nro.	Tamiz (mm)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)
1"	25.4	0	100
1/2"	12.7	0	100
3/8"	9.52	0	100
Nº4	4.76	2	98
10	2	5	93
40	0.425	22	76
200	0.075	65	33

Fuente: El autor  
 Elaboración: El autor

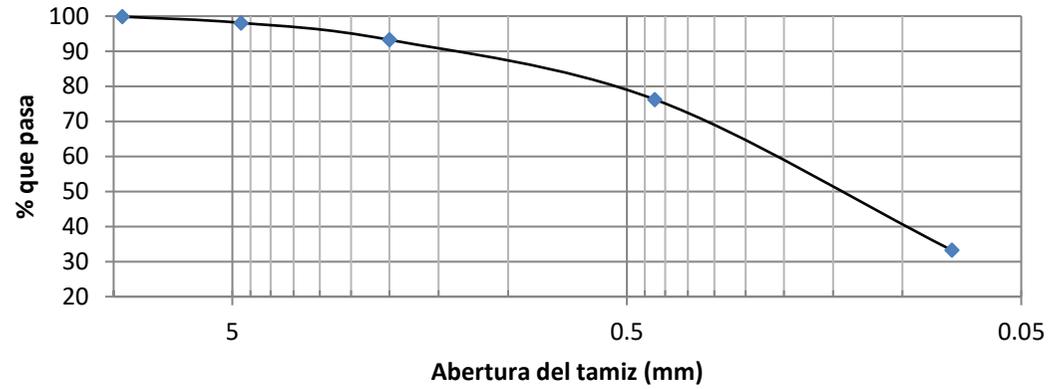


Figura 48: Curva granulométrica del suelo proveniente del cantón Loja Punto 3  
 Fuente: El autor  
 Elaboración: El autor

### Límites de Atterberg.

En la tabla a continuación se expone los resultados referentes a los límites de consistencia de los suelos ensayados:

Tabla 24: Resultados de los límites de consistencia de los suelos

Muestra de suelo	Límite líquido	Límite plástico	Índice de Plasticidad
Macará	28	23	5
Catamayo	54	37	17
Loja Pto. 1	22	19	3
Loja Pto. 2	25	21	4
Loja Pto. 3	38	27	11

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

### Clasificación de suelos.

Los ensayos de granulometría y límites de consistencia permitieron definir la siguiente clasificación de los suelos:

Tabla 25: Clasificación de suelos según AASHTO y SUCS

Muestra de suelo	Clasificación según AASHTO	Clasificación según SUCS
Macará	A – 2 – 4 Arena limosa	SM – ML Arena con limo de baja compresibilidad
Catamayo	A – 2 – 7 Arena arcillosa	SC – CH Arena con arcilla de alta compresibilidad
Loja Pto. 1	A – 2 – 4 Arena limosa	SM-ML Arena con limo de baja compresibilidad
Loja Pto. 2	A – 2 – 4 Arena limosa	SM-ML Arena con limo de baja compresibilidad
Loja Pto. 3	A – 2 – 6 Arena arcillosa	SC-CL Arena con arcilla de baja compresibilidad

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

#### 4.2. Análisis de la clasificación de suelos

Los resultados del análisis granulométrico permitieron determinar en forma cuantitativa la distribución de las partículas de los suelos tratados. En la siguiente tabla se presenta las proporciones de arena y finos que se encuentran en los suelos:

Tabla 26: Porcentajes de arenas y finos en los suelos

Suelo proveniente de	Macará	Catamayo	Loja pto. 1	Loja pto. 2	Loja pto. 3
Arenas (%)	79	71	64	65	65
Finos (%)	21	28	22	22	33

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 26, los suelos principalmente se encuentran conformados por arenas en un orden del 64% hasta el 79%.

Los suelos obtenidos de los cantones Macará y Catamayo no cuentan con gravas al igual que el obtenido en el punto 3 de Loja. En cambio tanto el punto 1 y punto 2 de Loja si presentan pequeñas proporciones de grava en el orden del 14% y 13% respectivamente.

Aunque los suelos cumplen con los requisitos mínimos de porcentaje de finos, se plantea como alternativa fijar proporciones a cada uno de ellos (ver sección 3.6).

En cuanto a los límites de Atterberg se logró determinar que el suelo proveniente de Catamayo absorbe mayor cantidad de agua para poder ser moldeado, su índice de plasticidad es de 17; asimismo que el suelo del punto 3 de Loja que presenta un IP de 11. Estos resultados se prevén porque las matrices de estos suelos se encuentran conformadas por arcilla, según la clasificación que se presenta en la tabla 25.

Para el caso de los suelos restantes, su matriz consiste en suelos arenosos con limos de baja compresibilidad, los límites líquidos y plásticos son menores respecto a los suelos citados en el párrafo anterior. Los índices de plasticidad obtenidos van del orden del 3% a 5%. Se puede deducir que estos suelos requieren de menor contenido de agua para ser moldeados.

Los porcentajes de los límites de consistencia son la pauta principal para definir la cantidad de agua que se agrega a los suelos. Se ha tomado un promedio del límite líquido y el límite plástico como el porcentaje de agua que requieren los suelos para elaborar las pastillas de tracción indirecta.

### 4.3. Resultados del ensayo de tracción indirecta.

La mezcla óptima se obtuvo planificando diferentes dosificaciones a los distintos tipos de suelos con que se cuenta (sección 3.6). Se desarrolló el ensayo de tracción indirecta como procedimiento indispensable para ahorrar material además de tiempo. Se analizaron las mezclas con dos tipos de fibras: tamo de arroz y tallo de la planta de arroz. Las tablas siguientes presentan los resultados obtenidos para cada una de las proporciones planteadas.

#### Mezclas de suelo con tamo de arroz.

Tabla 27: Resultados de tracción indirecta de los distintos suelos combinados con tamo de arroz.

Mezcla finos/fibra	CATAMAYO			LOJA			MACARÁ		
	Probeta	Carga máxima resistente (Kg)	Resistencia a la tracción indirecta (Kg/cm <sup>2</sup> )	Probeta	Carga máxima resistente (Kg)	Resistencia a la tracción indirecta (Kg/cm <sup>2</sup> )	Probeta	Carga máxima resistente (Kg)	Resistencia a la tracción indirecta (Kg/cm <sup>2</sup> )
25/1.5	17	84	2.37	9	40.3	1.27	21	156.95	4.37
	18	66.91	2.02	10	38.41	1.25	22	173.04	4.81
	20	73.52	2.25	12	33.13	1.15	24	163.89	4.51
29/2	13	102.68	3.13	1	35.86	1.11	17	157.69	4.28
	15	84.09	2.53	2	41.81	1.25	19	137.7	3.8
	16	90.88	2.68	4	34.16	1.09	20	151.95	4.09
37/2	21	83.05	2.39	25	34.73	1.1	5	134.68	3.77
	22	94.09	2.6	26	42.38	1.3	6	172.4	4.75
	23	71.25	2.26	27	43.22	1.29	7	178.69	4.89
41/1.5	25	99.57	2.87	13	36.81	1.13	1	152.82	4.17
	27	100.51	3.05	14	42.28	1.26	2	145.53	4.09
	28	120.42	3.6	16	38.88	1.09	4	158.46	4.34
37/1	9	70.03	2.22	17	46.72	1.36	9	161.02	5.04
	10	71.44	2.32	18	56.15	1.78	10	163.24	4.92
	12	81.64	2.51	18	56.15	1.78	11	167.22	5.24
29/1	5	70.12	2.16	5	45.11	1.27	25	113.06	3.52
	6	87.86	2.64	7	42	1.35	26	141.19	3.91
	8	85.22	2.69	8	52.19	1.62	27	99.85	2.87
33/1.5	1	118.44	3.5	22	45.96	1.39	13	156.85	4.61
	3	92.58	2.74	23	44.36	1.31	14	157.04	5.02
	4	113.35	3.4				15	146.1	4.68

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

### Mezcla de suelo con tallo de arroz.

Tabla 28: Resultados de tracción indirecta de los distintos suelos combinados con tallo de arroz.

Mezcla finos/fibra	CATAMAYO			LOJA			MACARÁ		
	Probeta	Carga máxima resistente (Kg)	Resistencia a la tracción indirecta (Kg/cm <sup>2</sup> )	Probeta	Carga máxima resistente (Kg)	Resistencia a la tracción indirecta (Kg/cm <sup>2</sup> )	Probeta	Carga máxima resistente (Kg)	Resistencia a la tracción indirecta (Kg/cm <sup>2</sup> )
25/1.5	2	28.12	0.87	2	35.39	1.01	2	104.66	2.84
	3	38.79	1.19	3	32.09	0.9	3	110.99	2.85
	4	33.41	0.99	4	35.01	1.02	4	109.1	2.89
29/2	17	40.77	1.26	6	26.99	0.8	22	92.96	2.49
	18	38.69	1.13	7	30.48	0.87	23	96.08	2.68
	19	42	1.24	8	30.48	0.86	24	104.66	3.13
37/2	14	18.03	0.54	25	21.8	0.66	18	119.2	3.11
	15	17.18	0.51	26	20.76	0.6	19	113.82	2.99
	16	15.76	0.49	27	19.44	0.54	20	104.66	2.87
				28	21.05	0.62			
41/1.5	9	43.22	1.27	17	26.99	0.77	10	110.52	3.27
	10	32.94	0.99	18	23.88	0.71	11	94.09	2.66
	11	39.54	1.18	19	26.52	0.78	12	94.47	2.65
				20	23.31	0.68			
37/1	21	42.66	1.31	10	27.46	0.81	14	134.96	3.82
	23	45.96	1.4	11	31.24	0.9	15	99.76	2.88
				12	30.01	0.9	16	121.84	3.51
29/1	26	35.2	1.03	13	21.05	0.67	26	110.7	3.25
	28	32.09	0.95	14	25.2	0.77	27	110.7	3.11
				16	29.82	0.87	28	121.09	3.34
33/1.5	5	28.6	0.88	21	20.76	0.61	5	120.24	3.68
	6	32.84	0.98	23	26.24	0.73	7	123.63	3.56
	7	30.86	0.85	24	22.56	0.66	8	111.46	3.17

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

Los resultados obtenidos permiten determinar que las fibras actúan tanto a favor como en contra de mejorar la resistencia de los suelos. Las mezclas realizadas con la fibra del tamo de arroz presentan mayor resistencia a tracción indirecta que la obtenida en las mezclas con la fibra del tallo de arroz.

Las fibras del tamo de arroz permiten combinarse de mejor manera con todos los suelos tratados. El tamaño de la fibra de por sí es un elemento indispensable que se debe tener en cuenta al momento de agregar a una mezcla de suelo, en el caso de esta, sus dimensiones son aptas y aunque la fibra del tallo de la planta de arroz no cumplía con ellas, se procedió a cortarlas bajo las mismas dimensiones, pero su adherencia a los suelos no fue la esperada.

Las fibras del tallo de arroz empeoraron la resistencia de las probetas, ocupaban mayor espacio y aunque se encontraran bajo las mismas dimensiones que las otras fibras, su adherencia a los suelos fue mala y ello provocó que se generen grietas, que a la larga fueron las zonas más proclives por donde se transmitieron las fisuras provocadas por los esfuerzos de tracción.

Las mezclas de Catamayo bajan abruptamente su resistencia cuando se las combina con las fibras del tallo de arroz. En las probetas ensayadas se pudo visualizar que en sus caras se notaba claramente la presencia de las fibras y las fisuras que se generaban. La resistencia se redujo  $\frac{1}{3}$  parte que la obtenida con las fibras con tamo de arroz.

En el caso de las mezclas de Loja con la fibra del tallo de arroz, la resistencia se reducía a las  $\frac{3}{4}$  partes, mientras que las mezclas de Macará se reducían a las  $\frac{2}{3}$  partes que las obtenidas inicialmente con las fibras de tamo de arroz.

Algo que se debe tener en cuenta, es que al agregar las fibras, las mezclas de suelo requerían de mayor cantidad de agua que la que inicialmente se planificó.

De las tablas anteriores se logró determinar que las mejores combinaciones de suelo correspondieron a las mezclas del suelo proveniente de Macará con las fibras del tamo de arroz, en una proporción 37/1 de finos y fibra respectivamente. De ello se logró determinar una resistencia a tracción indirecta promedio de 5.07 Kg/cm<sup>2</sup>.

El análisis de la resistencia a tracción de las probetas permite determinar la mezcla óptima, sin embargo es necesario aclarar que la presente investigación compara y evalúa la resistencia en cada uno de los suelos, y para cada uno de ellos existe una mezcla óptima, que bien puede usarse para elaborar los adobe, pero por cuestiones de tiempo se procedió a evaluar la mejor mezcla y desechar las otras para los análisis posteriores.

#### 4.4. Caracterización de los materiales a partir de la mezcla óptima.

Los resultados anteriores permitieron obtener la mezcla óptima y a partir de ella elaborar bloques de tierra con dimensiones de 30 cm, 15 cm y 15 cm, para el largo, ancho y alto respectivamente.

La caracterización de los BT básicamente consistió en ensayarlos a compresión simple y obtener sus densidades. La actual normativa ecuatoriana no contempla valores mínimos de resistencia a compresión simple para BT, por ello se tomó como referencia los valores mínimos que se plantean en la normativa peruana.

Los bloques fueron ensayados según lo expone la normativa peruana “Norma Técnica de Edificación NTE E.080 Adobe”.

La presente norma expone que la resistencia a la compresión del bloque se determina ensayando cubos cuya arista será igual a la menor dimensión del adobe. El esfuerzo resistente a compresión se obtendrá de un mínimo de 6 probetas y será igual al esfuerzo que sobrepase el 80% de los bloques ensayados. La resistencia última mínima debe ser superior a 12 kg/cm<sup>2</sup> ( $\cong$  1,2 MPa).

En la tabla siguiente se presenta las propiedades físicas de los adobes, junto con la resistencia a compresión obtenida.

Tabla 29: Determinación de la resistencia a compresión simple de los bloques de tierra.

Nº Muestra	Edad de rotura (días)	Largo (cm)			Ancho (cm)			Carga P <sub>máx</sub> (KN)	Resistencia (MPa)
1	46	14.67	14.59	13.96	16.32	16.50	16.24	75.5	3.20
2	46	14.61	14.45	14.41	15.98	16.17	16.05	76.5	3.29
3	46	14.77	14.93	14.71	16.09	16.29	16.04	74.3	3.11
4	46	16.60	16.50	16.38	13.78	13.20	13.40	43.8	1.97
5	46	16.98	17.10	17.05	15.18	14.90	14.48	80.4	3.18
6	46	15.20	15.30	15.50	15.05	14.80	14.70	73.6	3.23

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

La resistencia promedio a compresión simple es de 3.2 MPa. Los resultados anteriores permitieron determinar que los bloques de tierra cumplen con los requerimientos mínimos que exige la norma en cuanto a resistencia mínima (1.2 MPa).

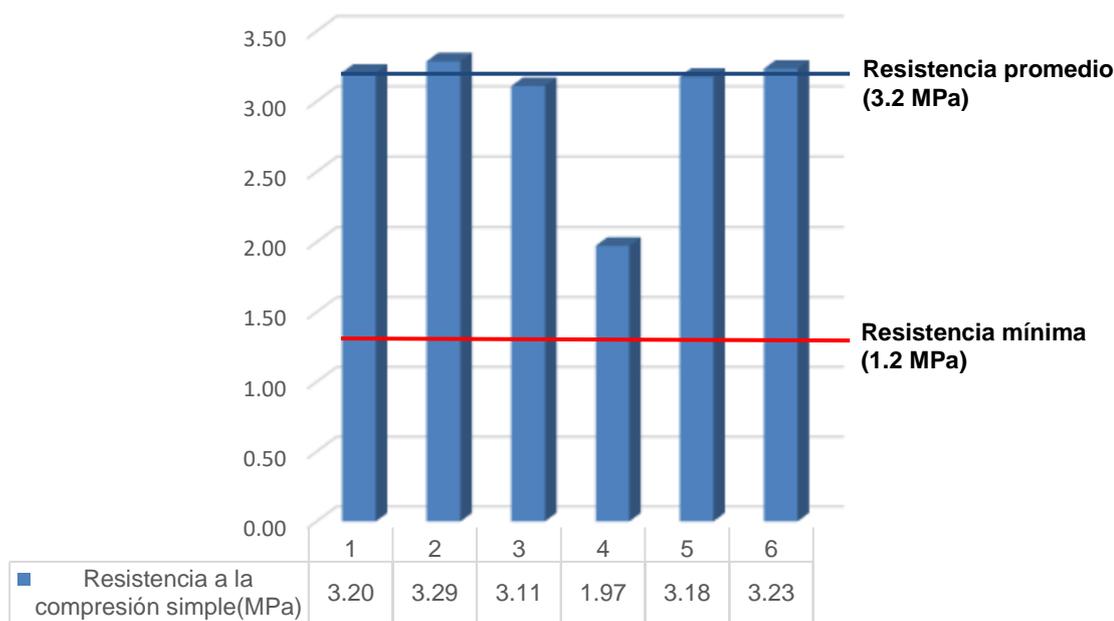


Figura 49: Ensayo de compresión simple de las muestras de adobe  
 Fuente: El autor  
 Elaboración: El autor

De igual manera se procedió a calcular la densidad del adobe, obteniéndose una densidad promedio de 1760 Kg/m<sup>3</sup>. En la tabla a continuación se muestran los resultados del cálculo.

Tabla 30: Determinación de la densidad de los BT.

Nº Muestra	Peso (kg)	Largo (cm)			Ancho (cm)			Alto (cm)			Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1	5.842	14.67	14.59	13.96	16.32	16.50	16.24	14.43	14.29	13.61	1757.38
2	5.906	14.61	14.45	14.41	15.98	16.17	16.05	14.05	14.06	14.50	1786.11
3	6.238	14.77	14.93	14.71	16.09	16.29	16.04	14.92	14.85	14.72	1760.52
4	12.385	29.59	30.47	31.02	16.98	16.43	16.40	14.03	13.03	14.73	1763.79

Fuente: El autor  
 Elaboración: El autor

En cuanto al mortero se aplicó el método gravimétrico del picnómetro para el cálculo de las densidades. Los resultados se presentan a continuación:

*Densidad relativa (gravedad específica):*

$$\text{Árido secado al horno (SH)} = 2191.20 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Árido saturado superficialmente seco (SSS)} = 2329.63 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Densidad aparente} = 2544.28 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Absorción} = 6.32\%$$

#### 4.5. Resultados del análisis a flexión de los muros portantes de suelo mediante elementos finitos.

##### Deformación total:

##### Muro de 15 cm de espesor:

Tabla 31: Deformación total en el muro de 15 cm de espesor

Tiempo (s)	Carga (MPa)	Sin refuerzo	Reforzado
		Deformación total (mm)	Deformación total (mm)
0	0	0	0
1	0.005	2.7985	2.2191
2	0.008	4.4279	3.4055
3	0.006* (0.01**)	5.5351*	4.1964**
4	0.02	0	8.0156
5	0.02	0	8.7194
6	0.01	0	10.015

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

\* Carga para el muro sin refuerzo.

\*\* Carga para el muro reforzado.

Las zonas sombreadas indican los puntos donde los muros han alcanzado su límite máximo de tracción.

Las deformaciones reales que se generan en el muro de 15 cm sin refuerzo así como el reforzado con geomalla sometidos a cargas horizontales presentan una deformación máxima de 4.4279 mm y 8.0156 mm respectivamente (ver tabla 31). El primer muro alcanza una carga máxima de 0.008 MPa, mientras que en el reforzado es de 0.02 MPa. Las deformaciones máximas se generan en el centro del muro (longitudinalmente) puesto que tanto el lado superior como el inferior se encuentran restringidos.

La carga actuante debido a su origen y lugar en que se aplica genera esfuerzos a compresión en la carga posterior del muro (zona donde actúa la carga), mientras que los esfuerzos a tensión se generan en la cara frontal.

La zona de compresión se encuentra debajo del eje neutro de la sección, mientras que los esfuerzos a tracción se generan en la zona superior.

La deformación para ambos casos disminuye paulatinamente en las fibras que están en los extremos superior e inferior del muro, obteniéndose deformaciones iguales a cero debido a la restricción de movimiento en estas zonas (ver anexo 2– Deformación total del muro de 15 cm de espesor sin refuerzo y reforzado con geomalla).

En el muro sin refuerzo la deformación es mayor, la rigidez a flexión que aportan los adobes y el mortero es menor respecto a la que brinda este mismo sistema más la geomalla, ello se debe a que la malla aporta mayor rigidez puesto que su resistencia a tracción es superior.

El espesor del muro es factor fundamental para conocer el trabajo de la geomalla. Los muros esbeltos son susceptibles a flexión respecto a un muro robusto (ver tablas 31 y 32).

En muros esbeltos la resistencia a flexión de la geomalla se exterioriza con una mayor participación de ella para rigidizar, es decir absorbe esfuerzos de flexión de forma progresiva. La rigidez del muro sin refuerzo se basa en la sujeción y fricción que aporta el mortero, además su resistencia a flexión es menor porque tiene una sección menor y por tanto un momento de inercia también menor, lo que genera que se desarrollen mayores momentos flexionantes y esfuerzos de flexión.

A su vez, en muros robustos la participación de la geomalla bajo las mismas condiciones de carga es menor respecto a muros esbeltos, ya que su espesor es mayor genera un mayor momento de inercia, por lo que los momentos flexionantes son menores y los esfuerzos generados también.

Lo antes mencionado permite deducir que las grietas de tracción en muros de mayor espesor se generan bajo condiciones de carga mayores a las que normalmente requiere un muro de menor espesor.

Muro de 30 cm de espesor:

Tabla 32: Deformación total en el muro de 30 cm de espesor

Tiempo (s)	Carga (MPa)	Sin refuerzo	Reforzado
		Deformación total (mm)	Deformación total (mm)
0	0	0	0
1	0.005	0.68385	0.69602
2	0.01	1.0415	1.0726
3	0.0065* (0.02**)	1.441*	1.931**
4	0.04	0	3.6356
5	0.04	0	4.0504
6	0.02	0	4.1738

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

\* Carga para el muro sin refuerzo.

\*\* Carga para el muro reforzado.

Las zonas sombreadas indican los puntos donde los muros han alcanzado su límite máximo de tracción.

Los muros son sometidos bajo las mismas condiciones de carga durante un período de 6 segundos. Las cargas que se transmiten al muro a través de la barra de acero abarcan condiciones que permiten conocer las deformaciones del muro en el período en que éste trabaja en condiciones elásticas.

Las deformaciones máximas para el muro sin refuerzo y reforzado se presentan en la tabla 32. La rigidez a flexión para un muro de 30 cm de espesor por parte de la geomalla es nula respecto a un muro de menor espesor mientras no se alcance el límite máximo de resistencia del sistema adobe-mortero. Como se puede ver en la tabla 32 las deformaciones con geomalla son mayores que las que se tiene sin refuerzo bajo las mismas condiciones de carga.

A diferencia del muro de 15 cm de espesor, el muro de 30 cm solicita menor esfuerzo de rigidización a la malla por su robustez.

Se evidencia que la participación de la geomalla en cuanto a deformación total máxima se refiere es la siguiente: En el muro de 15 cm de espesor sin refuerzo, la zona crítica de fallo se alcanza bajo una carga de 0.008 MPa, la geomalla logra reducir la deformación a un valor de 1.0726 mm, 76.91% respecto del valor real (absorbe un 23.09% de deformación); mientras que en el muro de 30 cm de espesor la deformación máxima total sin refuerzo alcanza un valor de 1.0415 mm, reforzado con geomalla aumenta un 2.99% (0.0311 mm), que equivale a que el elemento en lugar de rigidizar aumenta la ductilidad del muro.

Sin embargo, los datos antes mencionados se realizaron bajo condiciones de carga mayores en los muros de espesor de 30 cm respecto al muro de 15 cm de espesor. Se puede deducir que la rigidez de un muro está relacionada directamente con el espesor del muro y la relación  $e/h$  (espesor/altura de muro) que presente a más de la resistencia que otorga el mortero de pega. Un espesor mayor genera mayores esfuerzos resistentes.

Con los datos presentados en las tablas 31 y 32, se ha logrado determinar que en muros esbeltos la geomalla aporta rigidez, mientras que en robustos brinda mayor flexibilidad, siempre y cuando los esfuerzos que se generan estén por debajo del límite elástico del material.

La mención anterior no quiere decir que en caso de que se agregase una geomalla a un muro robusto lo hace menos resistente, sino que su forma de actuar depende mucho de la sollicitación del sistema adobe-mortero. Para ambos casos en los análisis siguientes se puede evidenciar que la geomalla aporta rigidez o flexibilidad según sea el caso.

## Deformación unitaria:

### Muro de 15 cm de espesor:

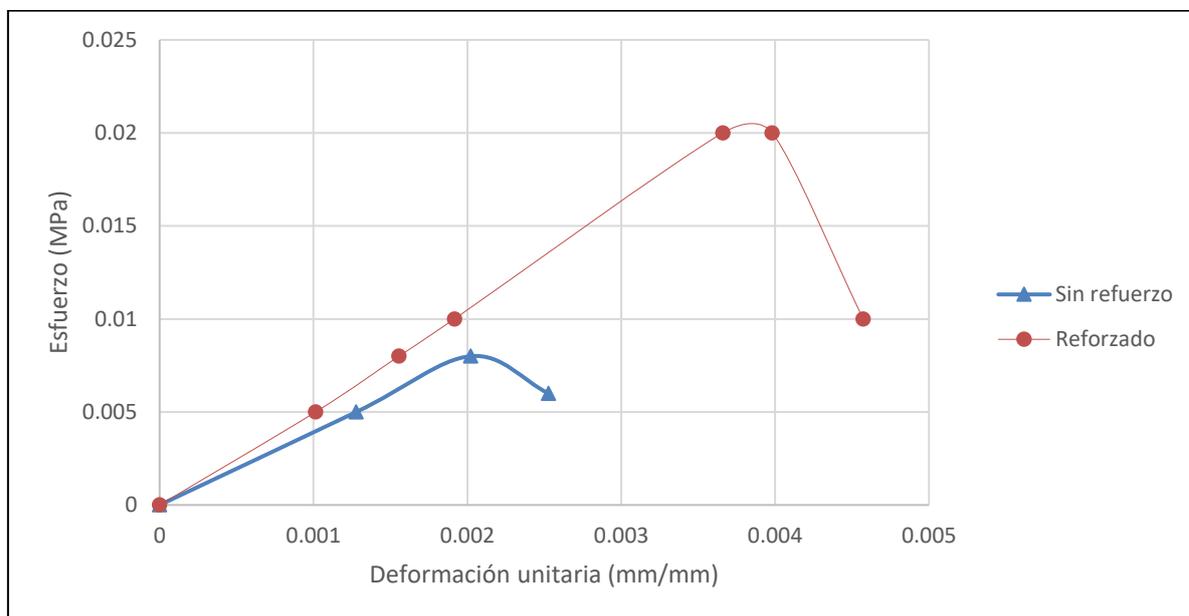


Figura 50: Curva esfuerzo vs deformación del muro de 15 cm de espesor

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

La figura 50 presenta las curvas esfuerzo-deformación que se generan en el muro de 15 cm de espesor sin refuerzo y reforzado con geomalla.

Gráficamente se puede evidenciar que el muro reforzado alcanza mayores esfuerzos de tracción, y por ende una mayor ductilidad respecto al muro sin refuerzo.

El muro reforzado con geomalla presenta mayor resistencia a la deformación, alcanza mayores deformaciones porque el sistema adobe-mortero solicita mayor participación de ella por su esbeltez. Es necesario enfatizar que la geomalla no trabaja a compresión sino solo a tensión, por lo que se puede evidenciar que las deformaciones unitarias máximas se generan en la cara posterior del muro, zona en donde se producen los esfuerzos de compresión (ver anexo 2 – Esfuerzos equivalentes del muro de 15 cm de espesor).

En cambio en el muro sin refuerzo la deformación unitaria es menor por ser menos dúctil, alcanza una resistencia máxima de 0.008 MPa que genera una deformación aproximada de  $2/1000 \text{ mm/mm}$ . El muro reforzado llega a alcanzar una deformación máxima de  $3.6/1000 \text{ mm/mm}$  bajo una carga de 0.02 MPa.

La relación entre la deformación total y la deformación unitaria es proporcional, mientras exista mayor deformación total, mayor es la deformación unitaria (ver tablas 31, 32 y 33).

Las deformaciones unitarias que genera el muro reforzado con geomalla son mayores por su esbeltez y porque la geomalla no falla hasta alcanzar su límite máximo de tracción. Al incorporarla al muro, lo abraza por completo y no cede hasta que se rompe.

Muro de 30 cm de espesor:

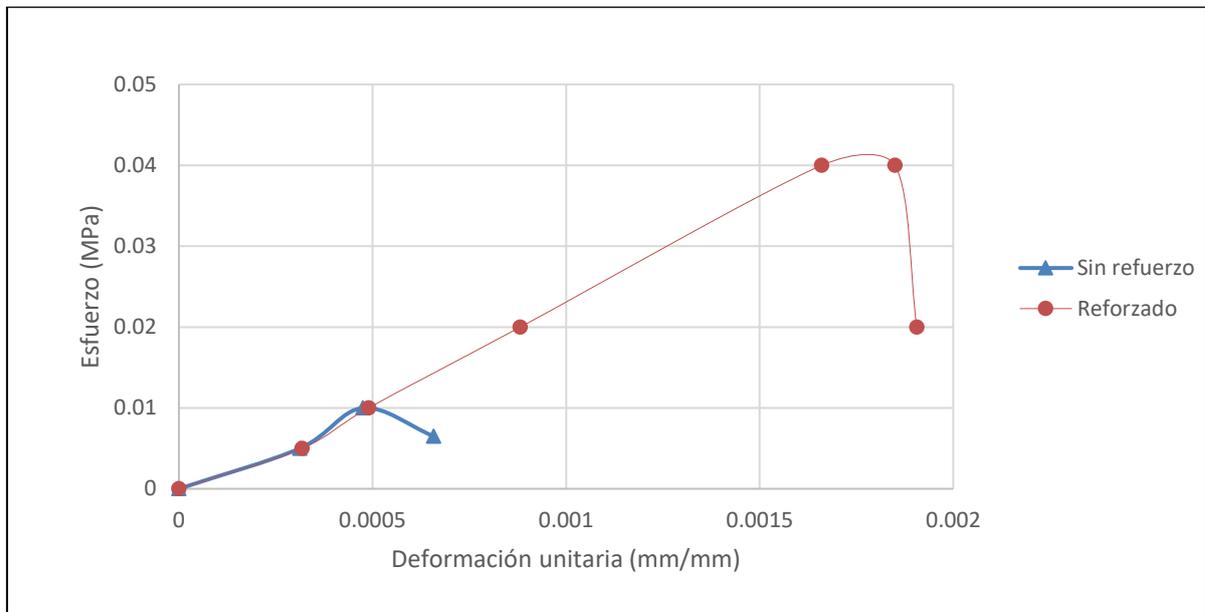


Figura 51: Curva esfuerzo vs deformación del muro de 30 cm de espesor

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

A diferencia del muro esbelto en el que se requiere mayor rigidez, este elemento robusto solicita que la geomalla trabaje a flexión, es decir mayor ductilidad. Aunque en la gráfica de la deformación total la participación de la malla aparentemente es nula en cuanto a rigidización (aporta flexibilidad), rigidiza en cuanto el sistema adobe-mortero haya alcanzado su límite máximo de resistencia a tracción.

Tal como se mencionó anteriormente, la geomalla actúa de acuerdo a lo solicitado por el muro. Para muros esbeltos es necesario que exista mayor presencia de la geomalla por lo que ésta tiende a rigidizar el muro mientras la carga se incrementa. En cambio en muros robustos como viene a ser el caso del muro de 30 cm de espesor, la malla actúa de forma contraria, en este sentido el efecto que debe producir es de flexión sin limitar la resistencia a tracción del muro.

El muro al ser más robusto (presenta una sección transversal mayor) permite que se generen menores deformaciones totales puesto que el muro sin refuerzo posee condiciones de resistir los esfuerzos de tracción y compresión mientras no se superen sus límites permisibles; no así en el caso del muro reforzado con geomalla, ya que al incorporar la geomalla, ésta no presenta

resistencia a compresión, por lo que genera que en las zonas de compresión existan mayores deformaciones totales.

La mención anterior permite deducir que las deformaciones unitarias están ligadas directamente a las deformaciones totales, como se mencionó anteriormente existe una razón de proporcionalidad entre estas dos variables.

Aunque inicialmente se partió con una idea de que la adición de la geomalla primordialmente era para rigidizar el muro y que al envolverlo por completo generaría menores deformaciones totales respecto a los muros sin refuerzo el análisis final evidencia que la geomalla si rigidiza más el muro al alcanzar mayores esfuerzos de tracción, y no solo eso, sino que también le brinda mayor ductilidad, todo ello depende de la sollicitación del sistema y cuan factible es el muro para soportar las cargas flexionantes.

El muro sin refuerzo alcanza una carga máxima de 0.01 MPa, mientras que si se agrega la geomalla su resistencia llega hasta los 0.04 MPa. La ductilidad del elemento reforzado se evidencia porque logra llegar hasta una deformación unitaria de  $1.6/1000 \text{ mm/mm}$ , respecto a las  $0.48/1000 \text{ mm/mm}$  que logra el muro sin refuerzo.

En las tablas siguientes (tablas 33 y 34) se puede ver la participación de la geomalla. En el caso del muro de 15 cm de espesor se indica que la geomalla logra reducir las deformaciones en tantos puntos porcentuales de los que se logran bajo las mismas cargas del elemento sin refuerzo. La malla actúa por completo (100%) cuando el sistema adobe-mortero alcanza su límite máximo de tracción.

En el caso del muro de 30 cm de espesor, los valores negativos indican que la geomalla aunque logra reducir los esfuerzos de tracción en el sistema adobe-mortero, prioritariamente brinda ductilidad. La geomalla empieza a rigidizar por completo (100%) cuando los esfuerzos resistentes del adobe y mortero son superados.

Para ambos muros los porcentajes equivalentes al 0% indican que la malla alcanzó su resistencia última a tracción y llegó a romperse.

## Participación de la geomalla:

### Muro de 15 cm de espesor:

Tabla 33: Porcentaje de rigidización de la geomalla en el muro de 15 cm de espesor

Tiempo (s)	Carga (MPa)	Sin refuerzo	Reforzado	Participación de geomalla (%)
		Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	
0	0	0	0	0.00
1	0.005	0.001277854	0.001013288	79.30
2	0.008	0.002021872	0.001555023	76.91
3	0.01	0.002527443	0.001916164	100.00
4	0.02	0	0.003660091	100.00
5	0.02	0	0.003981461	100.00
6	0.01	0	0.004573059	0.00

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

### Muro de 30 cm de espesor:

Tabla 34: Porcentaje de rigidización de la geomalla en el muro de 30 cm de espesor

Tiempo (s)	Carga (MPa)	Sin refuerzo	Reforzado	Participación de geomalla (%)
		Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	
0	0	0	0	0.00
1	0.005	0.00031226	0.000317817	-1.78
2	0.01	0.000475571	0.000489772	-2.99
3	0.02	0.000657991	0.000881735	100.00
4	0.04	0	0.001660091	100.00
5	0.04	0	0.001849498	100.00
6	0.02	0	0.001905845	0.00

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

Las zonas sombreadas indican que los materiales han alcanzado su límite máximo de tracción.

La hipótesis inicial supone que la geomalla al envolver el muro por completo no solo ayuda a evitar deformaciones, sino que lo vuelve más elástico debido a que la malla no presenta una resistencia a compresión, pero sí a tensión.

La geomalla irá absorbiendo paulatinamente el esfuerzo a tracción pese a que el sistema adobe-mortero aún no alcance su límite máximo de tracción. Cuando éste sistema haya alcanzado su resistencia última a tracción la geomalla absorberá por completo los esfuerzos traccionantes (se evidencia porque en el muro se generan grietas o bien los adobes se despegan) y cederá por completo cuando la malla se rompa.

El resultado que se obtiene al agregar la geomalla va a ser el mismo para ambos casos. Aunque suene contradictorio porque al muro esbelto la geomalla lo rigidiza al hacerlo menos susceptible a deformaciones y en el muro robusto lo vuelve elástico ya que las deformaciones aumentan, a final de cuentas cuando el sistema adobe-mortero alcanza su resistencia máxima a tracción la geomalla absorberá el total de los esfuerzos.

Los modelos desarrollados permiten conocer el comportamiento que adquieren los muros de mampostería al vincularlos con una geomalla, indistintamente si se considera como un muro robusto o esbelto.

A continuación se presentan los esfuerzos de tracción producidos en los muros. Los esfuerzos producidos en la geomalla no se consideran en el caso de los reforzados.

Tabla 35: Esfuerzos de tracción en los muros de 15 cm de espesor

Tiempo (s)	Carga (MPa)	Sin refuerzo	Reforzado
		Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0
1	0.005	0.060124	0.047452
2	0.008	0.096199	0.058754
3	0.01	-----	0.066288
4	0.02	-----	0.10909
5	0.02	-----	-----
6	0.01	-----	-----

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Tabla 36: Esfuerzos de tracción en los muros de 30 cm de espesor

Tiempo (s)	Carga (MPa)	Sin refuerzo	Reforzado
		Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0
1	0.005	0.046009	0.025031
2	0.01	0.092019	0.050062
3	0.02	-----	0.065501
4	0.04	-----	0.099106
5	0.04	-----	-----
6	0.02	-----	-----

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Los esfuerzos máximos de tracción se dan en el centro longitudinal del muro en la cara frontal (ver anexo 2 - Esfuerzos equivalentes del muro de 15 cm y 30 cm de espesor). Con la comparativa anterior se puede deducir que la participación de la geomalla es muy importante porque al proveer de mayores esfuerzos resistentes a flexión, reduce los esfuerzos en adobes y mortero.

#### 4.6. Resultados del análisis a compresión de los muros portantes de suelo mediante elementos finitos.

##### Deformación total:

Tabla 37: Deformación total por compresión de los muros de 15 cm y 30 cm de espesor

Carga (kN/m <sup>2</sup> )	Muro de 15 cm de espesor		Muro de 30 cm de espesor	
	Sin refuerzo	Reforzado	Sin refuerzo	Reforzado
	Def total (mm)	Def total (mm)	Def total (mm)	Def total (mm)
0	0	0	0	0
10	1.6858	1.6858	1.7106	1.8091
20	2.2435	2.3355	2.2703	2.4925
30	2.8012	2.9876	2.83	3.1765
41.65* (42.3**)	3.4509*	3.7484*	3.5182**	4.0178**

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

##### Deformación unitaria:

###### Muro de 15 cm de espesor:

Tabla 38: Deformación unitaria por compresión del muro de 15 cm de espesor

Carga (kN/m <sup>2</sup> )	Sin refuerzo	Reforzado	Participación de geomalla (%)
	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	
0	0	0	0.00
10	0.000769772	0.000769772	0.00
20	0.001024429	0.001066438	-4.10
30	0.001279087	0.001364201	-6.65
41.65	0.001575753	0.001711598	-8.62

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

###### Muro de 30 cm de espesor:

Tabla 39: Deformación unitaria por compresión del muro de 30 cm de espesor

Carga (kN/m <sup>2</sup> )	Sin refuerzo	Reforzado	Participación de geomalla (%)
	Deformación unitaria (mm/mm)	Deformación unitaria (mm/mm)	
0	0	0	0.00
10	0.000781096	0.000826073	-5.76
20	0.001036667	0.001138128	-9.79
30	0.001292237	0.001450457	-12.24
42.3	0.001606484	0.001834612	-14.20

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

## Participación de la geomalla:

### Muro de 15 cm de espesor:

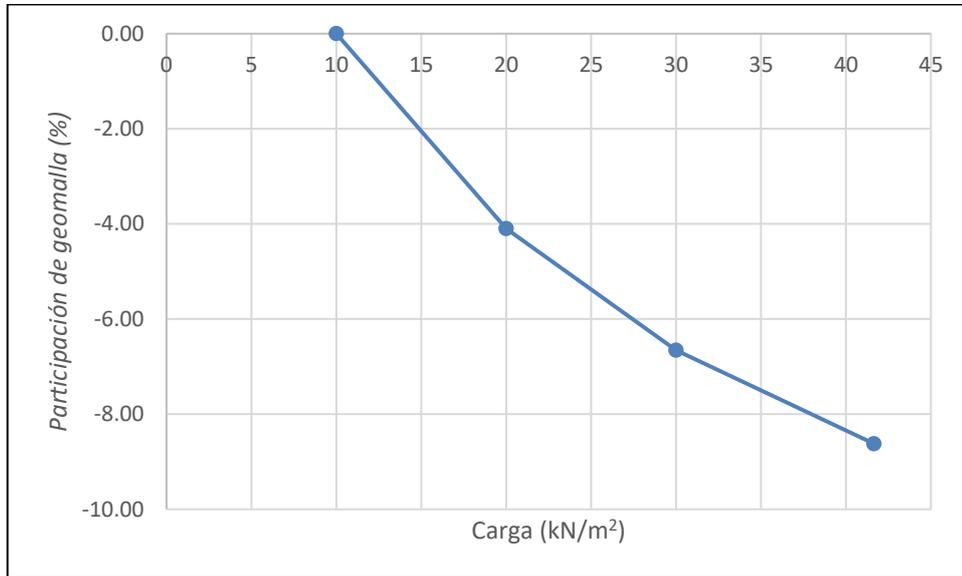


Figura 52: Curva de participación de la geomalla en el muro de 15 cm de espesor

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

### Muro de 30 cm de espesor:

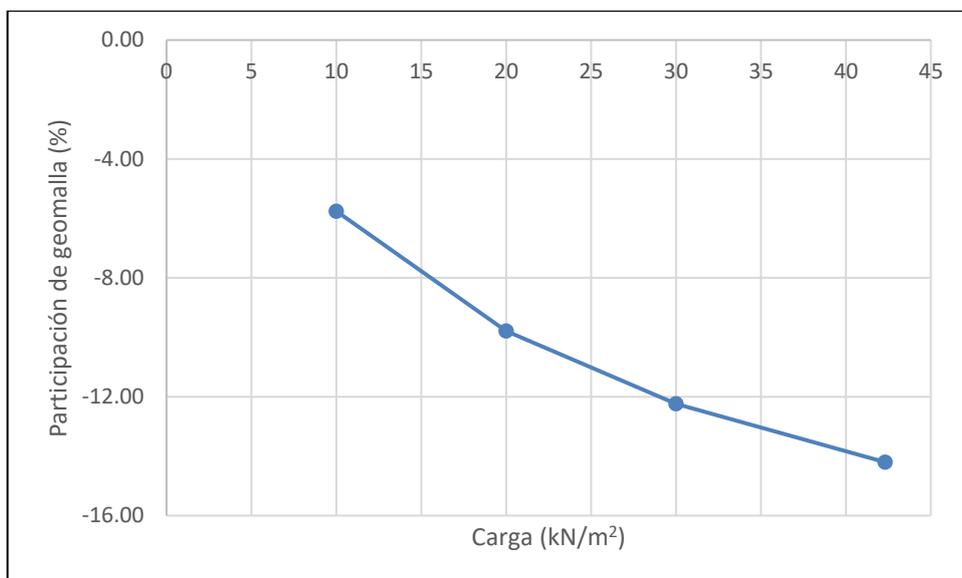


Figura 53: Curva de participación de la geomalla en el muro de 30 cm de espesor

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

Las deformaciones totales en los muros se presentan en la tabla 37. Para los distintos espesores evaluados se obtiene que la deformación para los muros reforzados son mayores que las que se tienen en los no reforzados. Estos resultados se obtienen porque la geomalla no trabaja a compresión, solo a tracción.

Las figuras 52 y 53 permiten determinar que la participación de la geomalla bajo las cargas de servicio o cargas de compresión es nula. Con ello se concluye la idea inicial de que la geomalla solo trabaja a tracción y no a compresión.

Las deformaciones unitarias se presentan en las tablas 38 y 39; para el muro de 15 cm de espesor es de  $1.58/1000 \text{ mm/mm}$  y  $1.71/1000 \text{ mm/mm}$  sin refuerzo y reforzado. En el caso del muro de 30 cm de espesor los resultados para los casos sin refuerzo y reforzado son respectivamente  $1.61/1000 \text{ mm/mm}$  y  $1.83/1000 \text{ mm/mm}$ . La deformación unitaria es directamente proporcional a la deformación total.

Los resultados negativos de la participación de la geomalla se pueden explicar de la siguiente manera, mientras mayor es la carga de servicio, mayor es la deformación en los muros reforzados, no así sucede en los muros sin refuerzo.

Los muros sin refuerzo son más rígidos, mientras que en los muros reforzados la geomalla le aporta ductilidad. Su elasticidad la hace ser más deformable.

El aporte de la malla es la siguiente, mientras mayor es el espesor del muro mayor ductilidad le brinda, 8.62% en el muro esbelto y 14.2% para el muro robusto.

## CONCLUSIONES

- La caracterización de suelos permite establecer los porcentajes de finos y arenas, y a partir de ello planificar la metodología para elaborar las distintas mezclas que se ensayan mediante tracción indirecta.
- En la tabla 26 se presentan los porcentajes de finos y arenas de los suelos. Los suelos cumplen con los porcentajes mínimos de finos, pero para proporciones mayores al 33% no, por ello se consideró dividir los suelos mediante tamices y así agregar mayores proporciones de finos, que se analizan para obtener un mayor rango de análisis.
- El ensayo de tracción indirecta permitió establecer que el suelo con mejores características para elaborar mezclas de adobe es el proveniente del cantón Macará. Posee una mejor disposición de granos y un índice de plasticidad de 5, acorde con los procesos de elaboración de los bloques.
- Mediante el ensayo de tracción indirecta se obtuvo una mezcla óptima de 37/1 con el suelo del cantón Macará, relación suelo fino – fibra vegetal, siendo el tamo de arroz el elemento que brinda mayor resistencia a tracción.
- Los resultados de tracción indirecta presentados en la sección 4.3 indican que la fibra con tamo de arroz genera mayor resistencia que la fibra con tallo de arroz, ésta última genera fisuras visibles en las caras de las probetas, especialmente con las mezclas de Catamayo, además su adherencia a las partículas de suelo es pésima, de ahí su baja resistencia.
- Se logró elaborar bloques de suelo con dimensiones óptimas de 30cm x 15cm x 15cm, la relación entre cada uno de los lados se basó en las recomendaciones que brindan los autores citados en la sección 3.8.
- Los adobes fueron ensayados a compresión simple bajo la recomendación de la normativa peruana. Se obtuvo una resistencia promedio de 3.2 MPa, mayor a 1.2 MPa, que es la resistencia mínima que establece la norma citada.
- Las propiedades de los materiales que interviene en los análisis de flexión y compresión se obtuvieron de ensayos de laboratorio (compresión simple, densidades y tracción indirecta). Características que no se lograron establecer se adoptaron de la bibliografía estudiada.
- Análisis a flexión:

Con el análisis a flexión mediante elementos finitos se establecieron los siguientes criterios:

- En muro esbelto, de 15 cm de espesor, la geomalla rigidiza mientras la carga se incrementa paulatinamente.
- En muro robusto, de 30 cm de espesor, la geomalla aporta ductilidad al sistema adobe-mortero.

La geomalla al envolver por completo al muro lo confina, le brinda mayor ductilidad y rigidez. Actúa acorde a la sollicitación del muro e irá incrementando su participación mientras mayor sea la carga, absorberá por completo los esfuerzos de tracción cuando el adobe y mortero hayan alcanzado su límite máximo de tracción.

Las figuras 50 y 51 establecen que los muros reforzados siguen trabajando a tracción pese a que el adobe y mortero han fallado. La malla brinda ductilidad y resistencia a los esfuerzos hasta que llegue a su punto máximo de tracción, zona en donde el muro falla por completo.

La participación de la geomalla produce que el adobe y mortero bajo las mismas condiciones de carga reducen sus esfuerzos de tracción (ver tablas 35 y 36).

- Análisis a compresión:

Con el análisis a compresión mediante elementos finitos se establece que la geomalla bajo condiciones de cargas de servicio su participación es nula, es más, al ser flexible se deforma más, lo que produce que en el muro se generen mayores deformaciones totales y unitarias (ver tablas 37, 38 y 39)

La participación a compresión de la geomalla bajo la condición de rigidez es nula, al igual que a flexión su aporte es de ductilidad.

El aporte de ductilidad de la malla es proporcional al espesor del muro. El muro robusto presenta mayores deformaciones unitarias que el muro esbelto bajo las mismas condiciones de carga.

- De los análisis realizados se logró establecer que el uso de la geomalla es factible para casos en los que el muro está sometido a cargas de flexión, más no de compresión. Su importancia radica porque los muros de adobe fallan por flexión cuando existen movimientos sísmicos.
- La técnica de refuerzo con geomalla es muy importante porque no solo puede ser utilizada en construcciones nuevas, sino más bien en construcciones patrimoniales de adobe, que siguiendo los criterios respectivos se puede colocar.
- El uso de la malla geotextil es una técnica de rigidización viable, porque al combinarse con construcciones de adobe es una alternativa económica, y no solo eso, sino además ambiental, porque su producción altera en mínimo al ambiente, y no requiere de procesos complicados de fabricación como sucede en materiales de construcción comunes.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda elaborar los bloques de suelo bajo una proporción de 60/40 de arena y finos, respectivamente. La proporción adecuada de finos permite la adherencia de las partículas de suelo con las fibras. El porcentaje de fibra natural óptimo que se recomienda es del 1%, en peso del material, mayores proporciones reducen la resistencia del material, generan grietas en el mismo.
- La resistencia óptima esperada en los adobes depende mucho de la técnica de fabricación y el secado al que se somete el material. El porcentaje de agua es un factor fundamental y se agrega acorde a los límites de consistencia obtenidos en laboratorio, siendo el promedio entre el límite plástico y líquido el óptimo.
- Se debe tener en cuenta que al agregar las fibras a las mezclas de suelo, es necesario considerar una verificación del porcentaje de agua. Las fibras provocan que la mezcla solicite mayor cantidad de agua que la esperada.
- El proceso de secado del adobe se debe realizar en una zona libre, bajo sombra, y pueden ser ensayados a compresión simple a partir de los 30 días.
- El método de elementos finitos requiere de un correcto modelado del o los elementos que se analizan, las propiedades de cada uno de los materiales deben ser obtenidas en laboratorio o bien referenciadas de la bibliografía.
- Las restricciones de movimiento del elemento estructural así como las cargas que experimente deben estar sujetas a las condiciones reales en que se implanta, ello se debe a que el análisis de elementos finitos realiza una serie de iteraciones para resolver los problemas, basándose en las condiciones iniciales de movimiento implantadas por el usuario.
- Los resultados obtenidos son un reflejo aparente de como trabajaría el muro, sin embargo no sucederán por completo de esta manera por la variabilidad de construcción de cada uno de los adobes, mortero, así como geomalla. Es necesario evaluar bajo condiciones reales de carga el modelo desarrollado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre Asanza, J. (2007). *Elementos de Geología aplicados a la práctica de la Ingeniería Civil*. Loja: Editorial de la Universidad Técnica Particular de Loja.
- Ansys. (2016). ANSYS Inc. Recuperado el 16 de Noviembre de 2016, de ANSYS Inc.: <http://www.ansys.com/es-ES>
- Arquigrafiko. (2014). *Arquigrafiko*. Recuperado el 5 de Febrero de 2016, de <http://www.arkigrafico.com/>: <http://www.arkigrafico.com/etabs-uno-de-los-mejores-programas-de-diseo-y-analisis-de-estructuras/>
- Arteaga Medina, K., Medina, Ó., y Guitérrez Junco, Ó. (2011). Bloque de tierra comprimida como material construct. *Dialnet*, 14. Recuperado el 16 de Enero de 2016, de <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3914194.pdf>
- Bañón Blázquez, L. (15 de Septiembre de 1999). *Universidad de Alicante*. Recuperado el 12 de Enero de 2016, de [sirio.ua.es: http://sirio.ua.es/proyectos/manual\\_%20carreteras/02010103.pdf](http://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010103.pdf)
- Blog del Ingeniero Civil. (2 de Diciembre de 2010). *Blog del Ingeniero Civil*. Recuperado el 15 de Enero de 2016, de <http://notasingenierocivil.blogspot.com/>: [http://notasingenierocivil.blogspot.com/2011/05/propiedades-fisicas-del-suelo\\_1019.html](http://notasingenierocivil.blogspot.com/2011/05/propiedades-fisicas-del-suelo_1019.html)
- Blondet, M., Vargas, J., Torrealva, D., y Rubiños, Á. (2010). *Manual de construcción con adobe reforzado con geomallas* (Primera ed.). Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Blondet, M., Villa García, G., y Brzev, S. (Abril de 2003). *The World Housing Encyclopedia*. Recuperado el 16 de Enero de 2016, de <http://www.world-housing.net/>: [http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/06/Adobe\\_Tutorial\\_Spanish\\_Blondet.pdf](http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/06/Adobe_Tutorial_Spanish_Blondet.pdf)
- Bonilla, A. (Enero de 2003). *Bizkaia*. Recuperado el 16 de Noviembre de 2016, de Bizkaia: <http://www.bizkaia.eus/>
- Caballero Caballero, M., Silva Santos, L., y Montes Bernabé, J. L. (2010). Resistencia mecánica del adobe compactado incrementada por bagazo de agave. *SOMIM*, 7.
- Carrión, F. (18 de Enero de 2003). *FLACSO Ecuador*. Recuperado el 28 de Diciembre de 2015, de [www.flacso.edu.ec](http://www.flacso.edu.ec): <http://www.flacso.org.ec/docs/edtproviv.pdf>
- Coburn, A., Hughes, R., Pomonis, A., y Spencer, R. (1995). *Technical Principles of Building for Safety*. Londres: Intermediate Technology Publications.
- Cosanher. (4 de Octubre de 2014). *Construcción en consultoría*. Obtenido de Construcción en consultoría: [www.cosanher.com](http://www.cosanher.com)
- Das, B. (2012). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*. México D.F.: CENGAGE Learning.
- Frias, E. (12 de Noviembre de 2004). Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos. *Universitat Politècnica de Catalunya*, 352.

- Galán Marín, C., y Rivera Gómez, C. A. (2 de Agosto de 2012). *Secretariado de Transferencia de Conocimiento y Emprendimiento de la Universidad de Sevilla*. Obtenido de Secretariado de Transferencia de Conocimiento y Emprendimiento: <http://otri.us.es/>
- Galíndez, F. (2009). Bloques de tierra comprimida sin adición de cemento (BTC) Aportación al ahorro energético. *MAPFRE*, 12.
- GeoSoluciones. (2015). *Geomembranas*. Recuperado el 16 de Enero de 2016, de <http://www.geomembranas.com.co/>: <http://www.geomembranas.com.co/productos/geosinteticos/geomallas/>
- GITECO Universidad de Cantabria. (2000). *GITECO Universidad de Cantabria*. Recuperado el 17 de Enero de 2016, de <http://www.giteco.unican.es/>: <http://www.giteco.unican.es/pdf/publicaciones/AYC30-X-2000.pdf>
- Gracomaq. (2015). *Gracomaq*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2015, de Gracomaq: <http://www.gracomaq.net/>
- Ingemecánica. (2015). *Ingemecánica*. Recuperado el 15 de Enero de 2016, de <http://ingemecanica.com/>: <http://ingemecanica.com/tutoriales/geotecnia.html>
- Jiménez, A. (14 de Mayo de 2004). *Universidad de las Américas Puebla*. Recuperado el 16 de Noviembre de 2016, de Tesis Digitales UDLAP: <http://catarina.udlap.mx/>
- Lourdes-Rapife. (188 de Julio de 2012). *Rapife*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2015, de Rapife.com: <http://www.rapife.com/blog/las-ventajas-de-las-fibras-naturales.html>
- Mannise, R. (16 de Julio de 2012). *Ecocosas*. Recuperado el 16 de Enero de 2016, de [ecocosas.com](http://ecocosas.com): <http://ecocosas.com/arq/el-adobe/>
- Mapas del Mundo. (7 de Junio de 2014). <http://espanol.mapsofworld.com/>. Obtenido de <http://espanol.mapsofworld.com/>: <http://espanol.mapsofworld.com/>
- Mapas Ecuador. (Enero de 2016). <http://www.mapasecuador.net/>. Obtenido de <http://www.mapasecuador.net/>: <http://www.mapasecuador.net/>
- Maza, B. H. (2008). *El rol de la prefabricación y el pretensado y su potencial dentro del sector de la vivienda social*. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2000). Análisis Granulométrico de suelos por tamizado. *Manual de ensayo de materiales (EM 2000)*. Lima, Lima, Perú: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Molero, B. (7 de Febrero de 2011). *IBERISA*. Obtenido de [iberisa.wordpress.com](http://iberisa.wordpress.com): <https://iberisa.wordpress.com/2011/02/07/tutorial-femap-y-nx-nastran-mallado-con-elementos-hexaedricos-hex-meshing/>
- Morales, R., Torres, R., Rengifo, L., y Irala, C. (Marzo de 1993). Manual para la construcción de viviendas de adobe. *Manual para la construcción de viviendas de adobe*. Lima, Perú: CISMID.
- Ortiz, A., Ruiz, O., y Ortiz, J. (29 de Octubre de 2013). *Repositorio digital de la Facultad de Ingeniería - UNAM*. Recuperado el 16 de Noviembre de 2016, de Repositorio digital de la Facultad de Ingeniería - UNAM: <http://www.ptolomeo.unam.mx/>

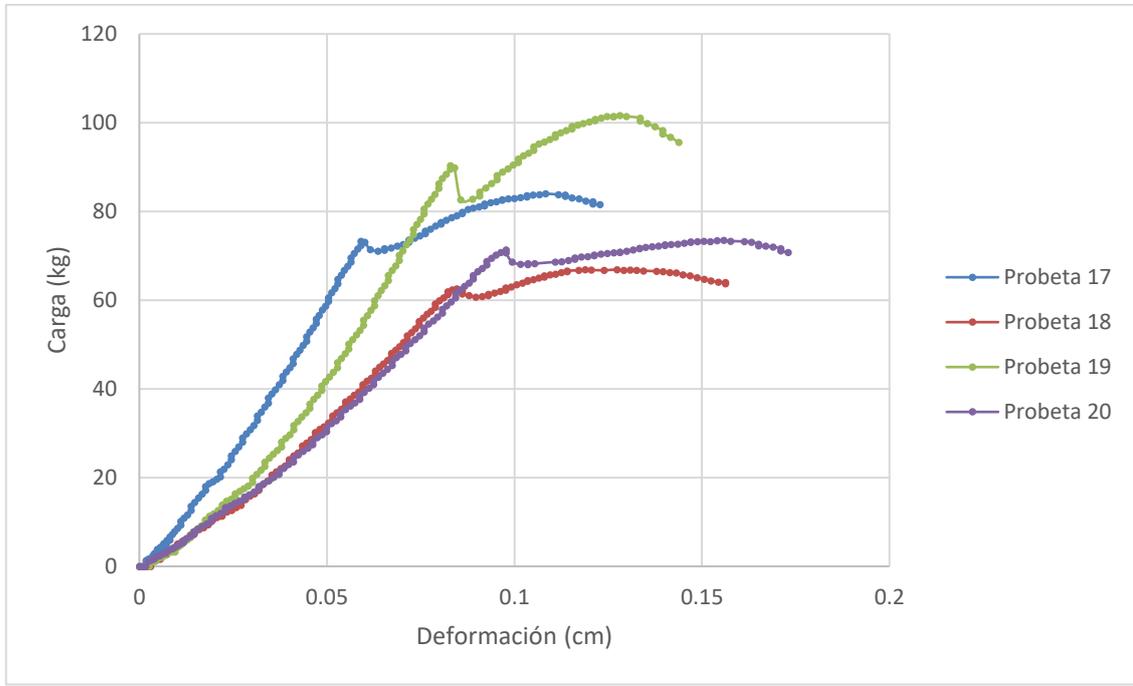
- Palacio, J. (14 de Julio de 2015). *La historia de las cosas*. Recuperado el 2016 de Noviembre de 2016, de La historia de las cosas: <https://lahistoriadelascosas.wordpress.com>
- RESESCO. (1997). *Reglamento para la seguridad estructural de las construcciones: folleto complementario adobe (Regulations for the structural security of constructions: complementary brochure adobe)*. El Salvador: Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos, Ministerio de Obras Públicas.
- Rivera, J., y Muñoz, E. (2012). Caracterización estructural de materiales de sistemas constructivos en tierra: El adobe. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 14.
- Rodríguez, H. H. (2010). *Blog PUCP*. Recuperado el 16 de Enero de 2016, de <http://blog.pucp.edu.pe/>: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/wp-content/uploads/sites/82/2010/06/Toba-Rodriguez.pdf>
- Roux Gutiérrez, R. S., y Espuna Mújica, J. A. (25 de Septiembre de 2012). Bloques de tierra comprimida adicionados con fibras naturales. *Bloques de tierra comprimida adicionados con fibras naturales*. Tamaulipas, Tamaulipas, México: Plaza y Valdés S.A. de C.V.
- Sagaseta Millán, C., y Cañizal Berini, J. (2010). *Universidad de Cantabria*. Recuperado el 15 de Enero de 2016, de OCW de la Universidad de Cantabria: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/geotecnia-i/materiales-de-clase/capitulo6.pdf>
- Solís, M., Torrealva, D., Santillán, P., y Montoya, G. (2015). *Análisis del comportamiento a flexión de muros de adobe reforzados con geomallas*. *Informes de la Construcción*, 67(539).
- Torrealva, D. (2009). *Diseño sísmico de muros de adobe reforzados con geomallas*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Zea Constantino, C., y Rivera Constantino, R. (2004). *Facultad de Ingeniería de la UNAM*. Recuperado el 15 de Enero de 2016, de Facultad de Ingeniería de la UNAM: <http://www.ingenieria.unam.mx/~posgradoingcivil/DocsGeotecnia/PropeFunMecSue2005V1.pdf>
- Zelaya Jara, V. (2007). *Provias Nacional del Ministerio de Transporte y Comunicaciones de Perú*. Recuperado el 16 de Enero de 2016, de <http://www.proviasnac.gob.pe/>: <http://www.proviasnac.gob.pe/frmContenido.aspx?IdArchivo=427>
- Zienkiewicz, O., y Taylor, R. (1994). *El método de los elementos finitos, formulación básica y problemas lineales* (Vol. IV). Barcelona, España: Mc Graw Hill.

## **ANEXOS**

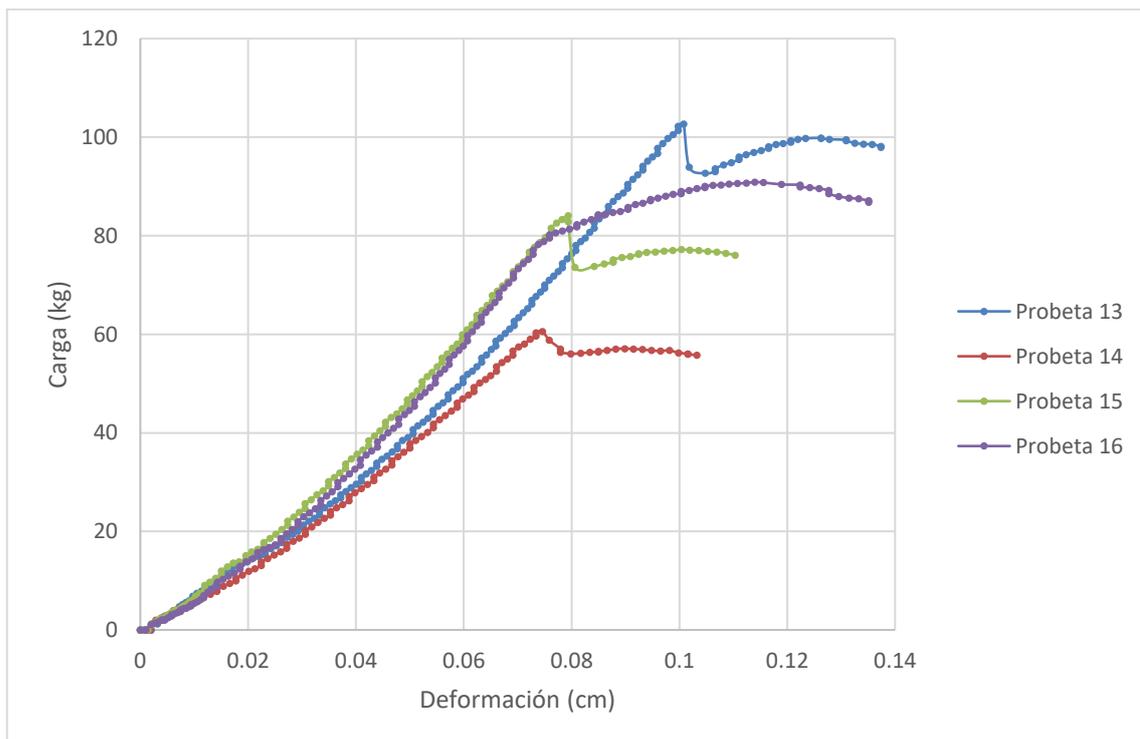
## Anexo 1: Resultados de los ensayos a tracción indirecta.

### CATAMAYO – TAMO DE ARROZ

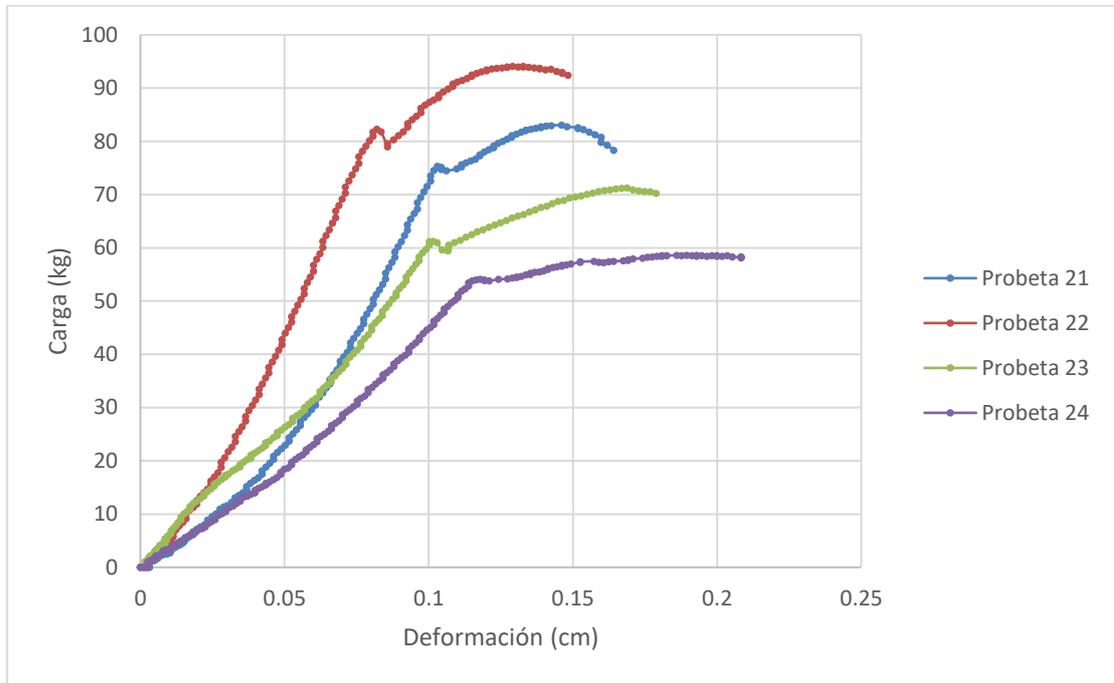
Mezcla 25/1.5



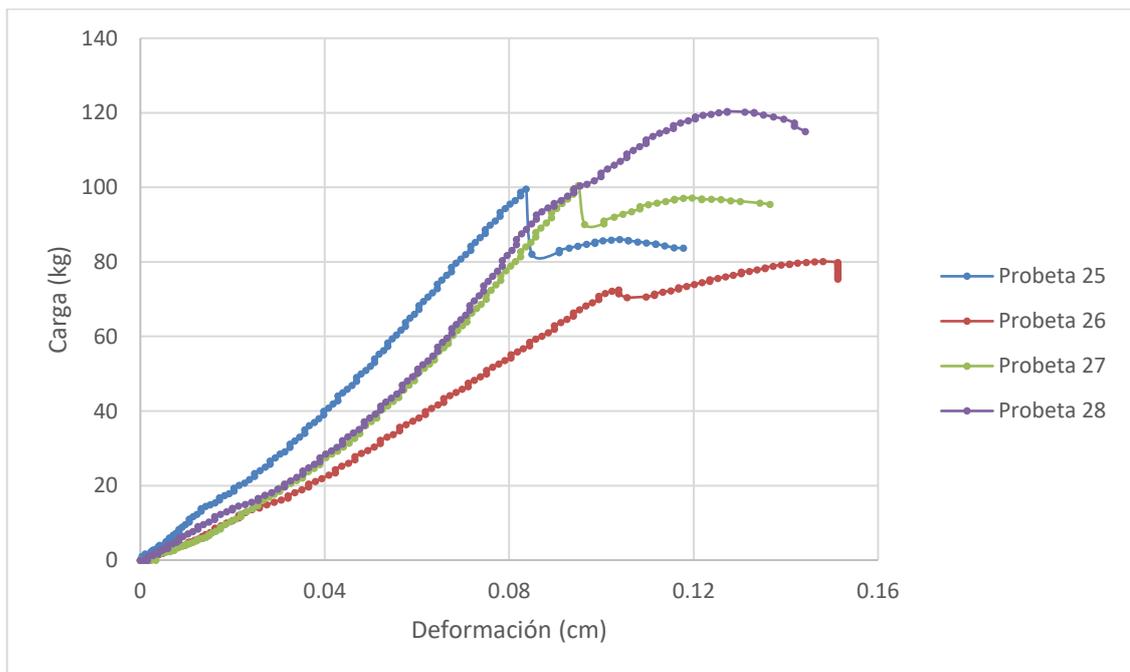
Mezcla 29/2



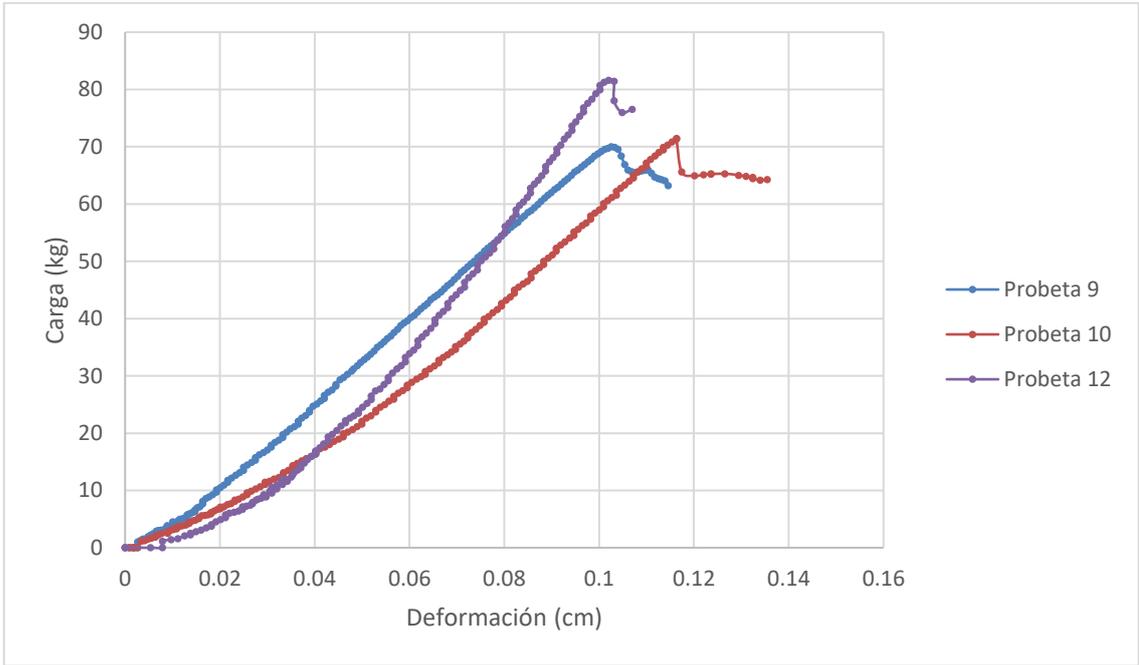
### Mezcla 37/2



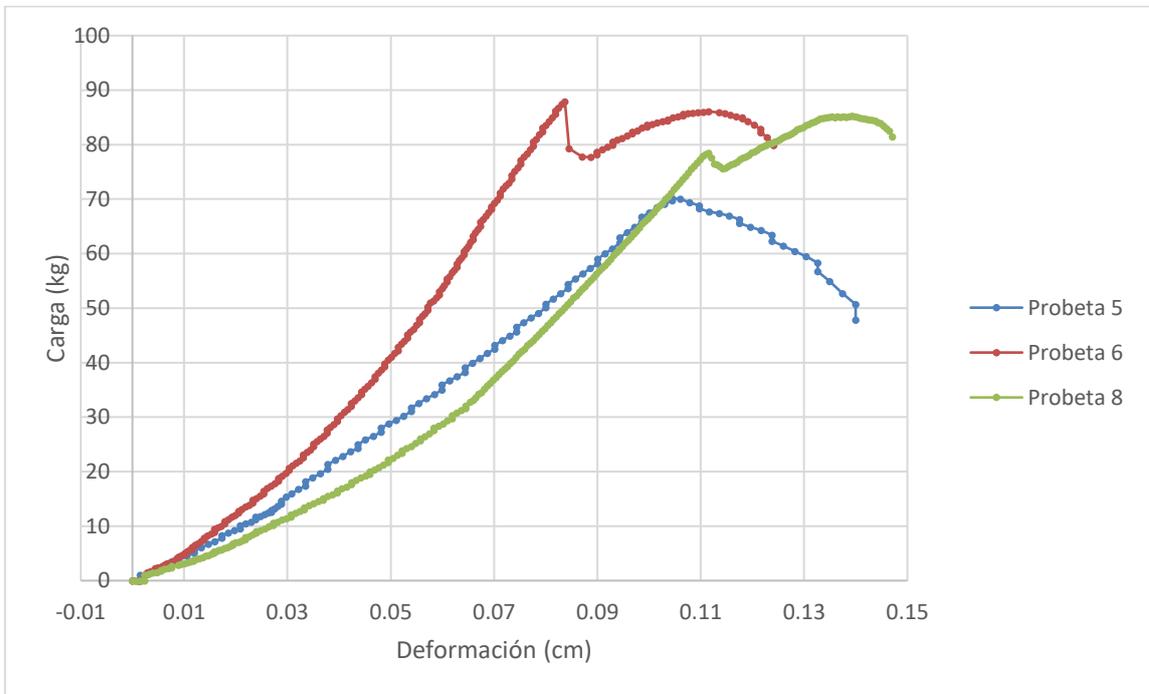
### Mezcla 41/1.5



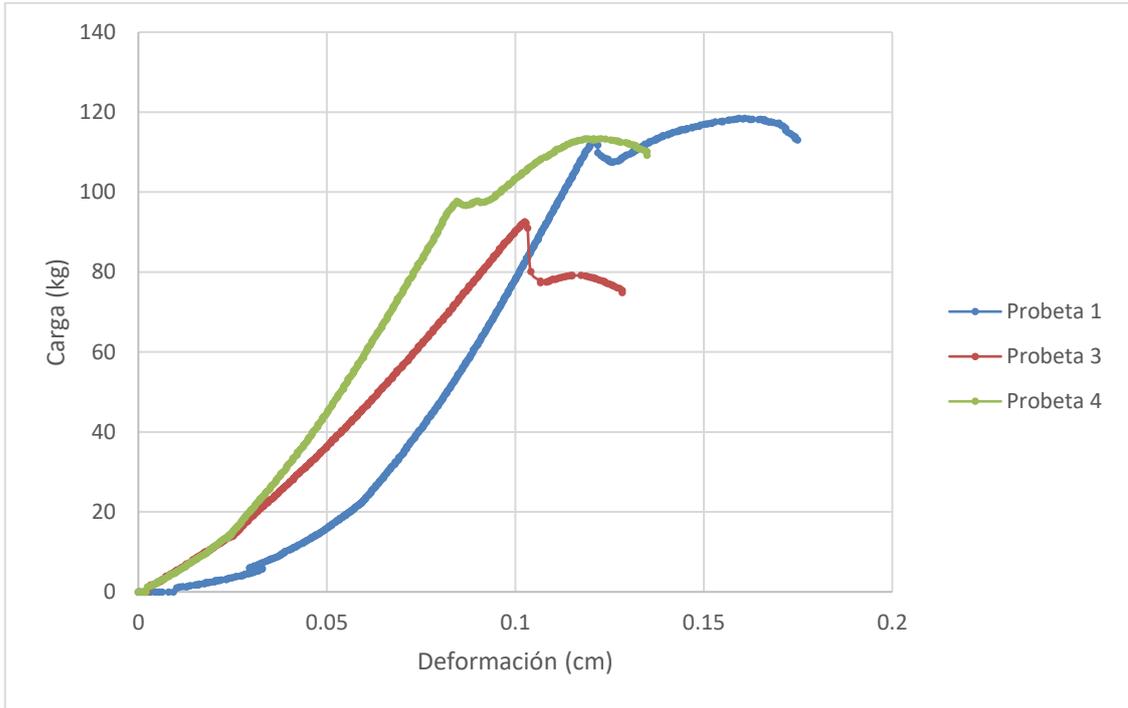
Mezcla 37/1



Mezcla 29/1

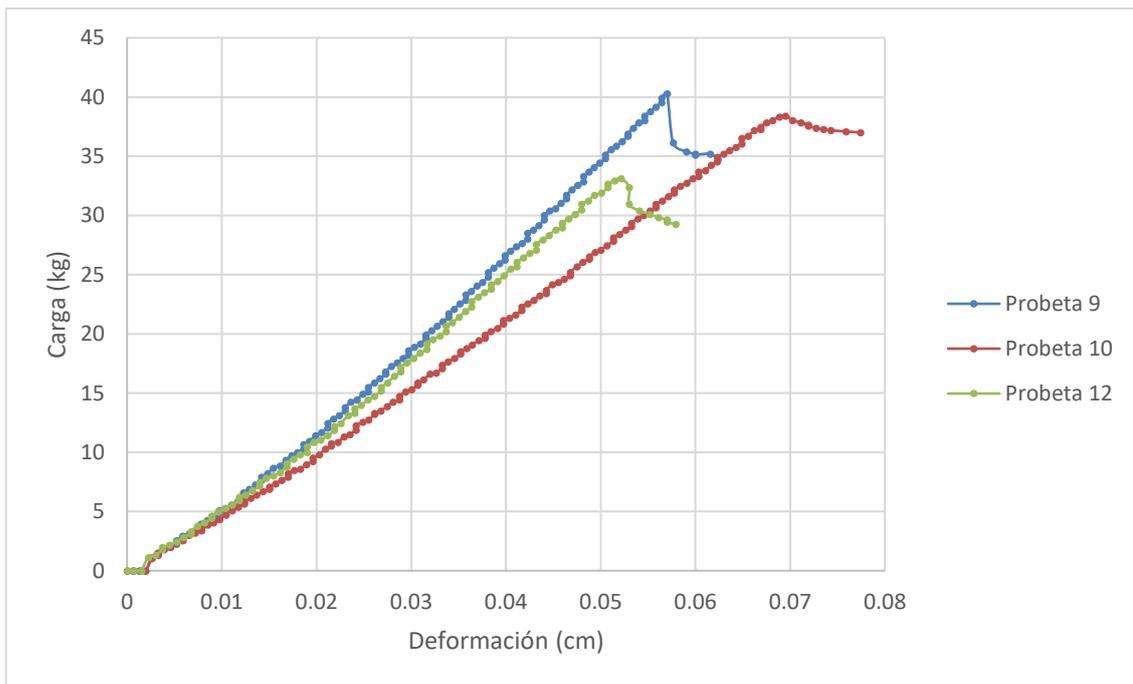


### Mezcla 33/1.5

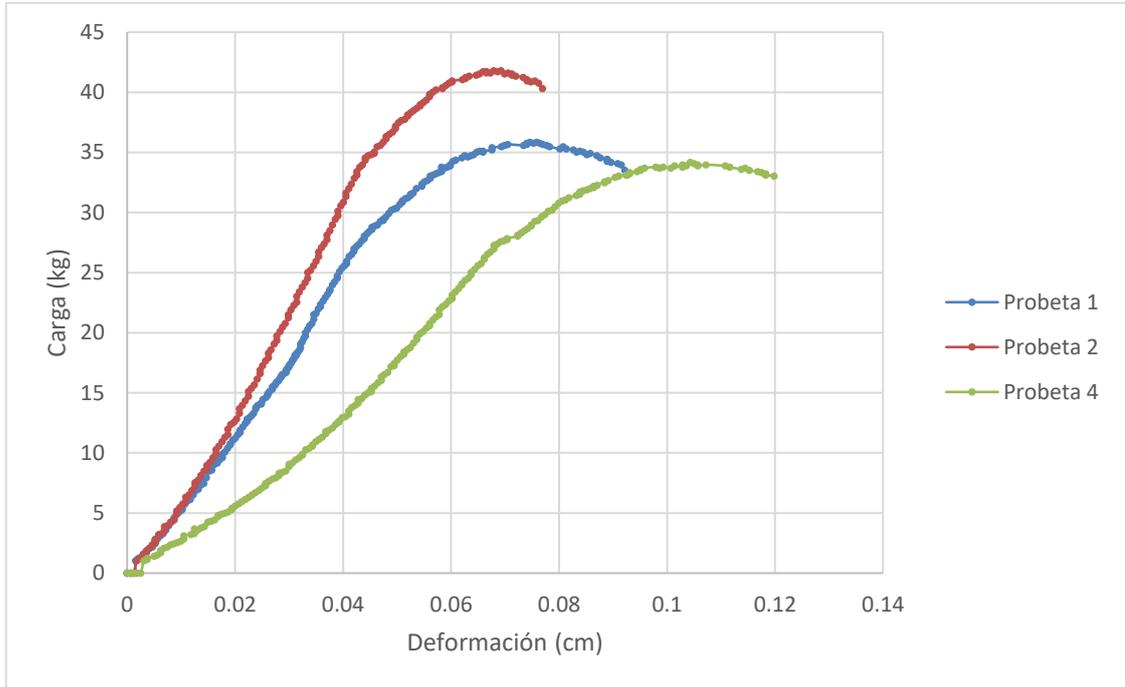


### LOJA – TAMO DE ARROZ

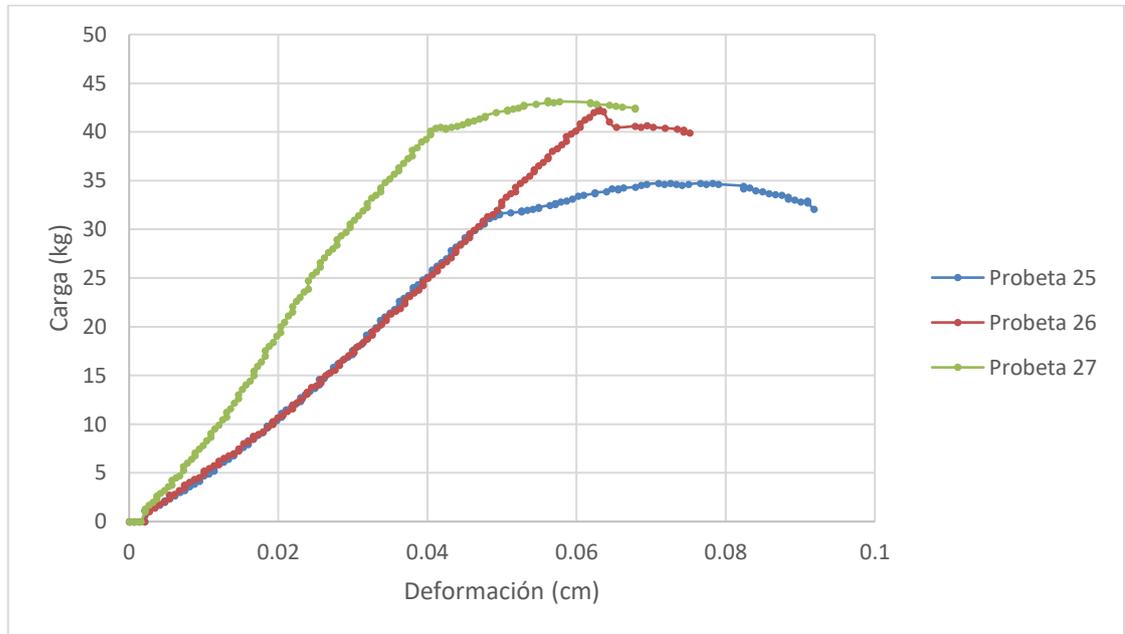
#### Mezcla 25/1.5



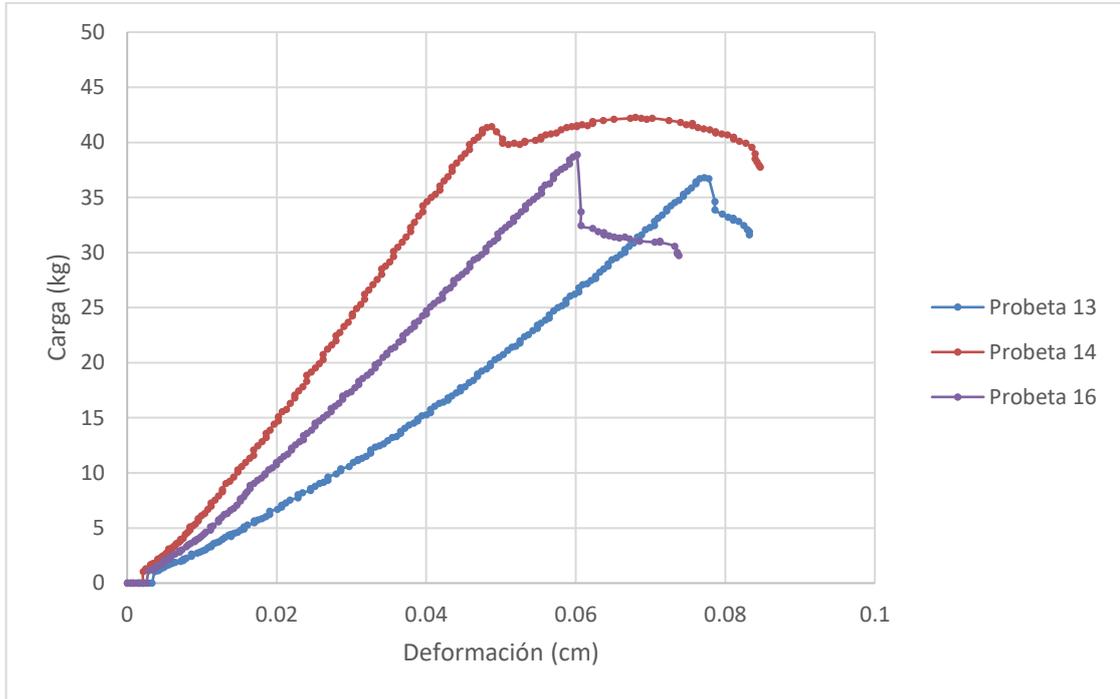
Mezcla 29/2



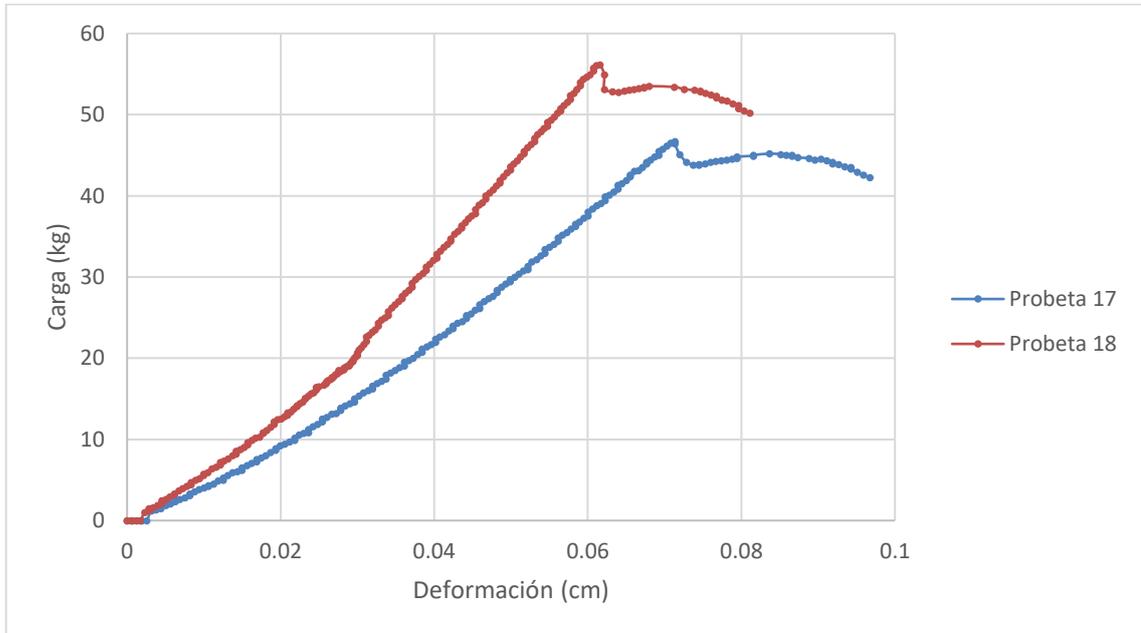
Mezcla 37/2



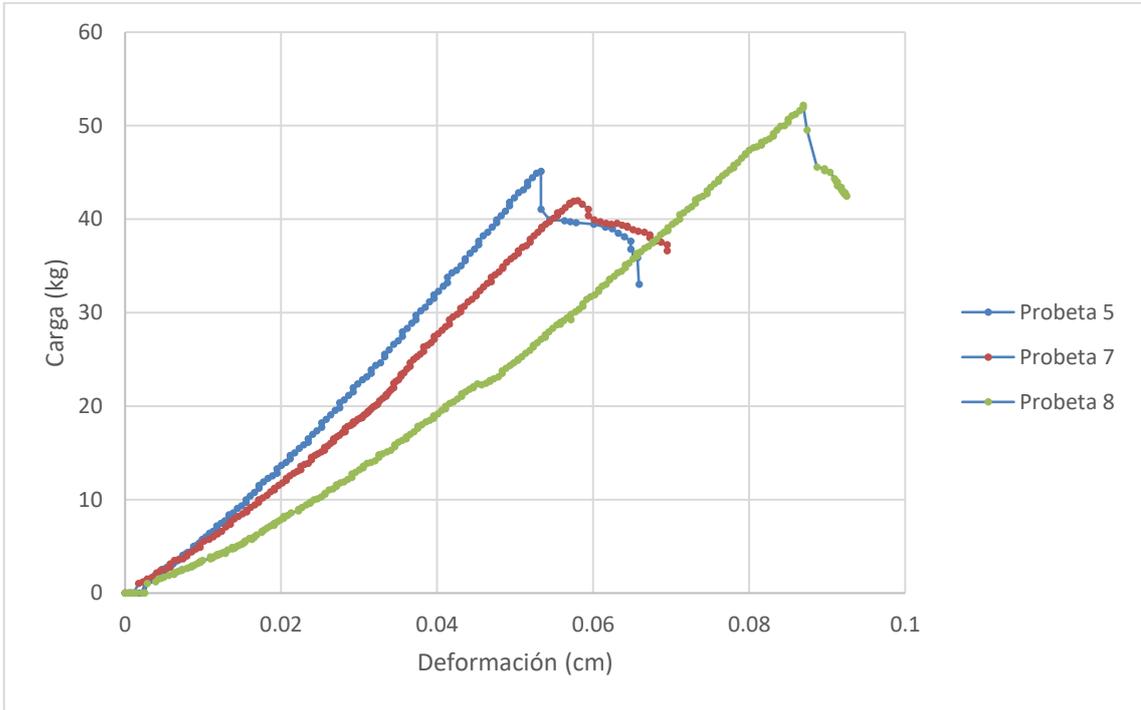
Mezcla 41/1.5



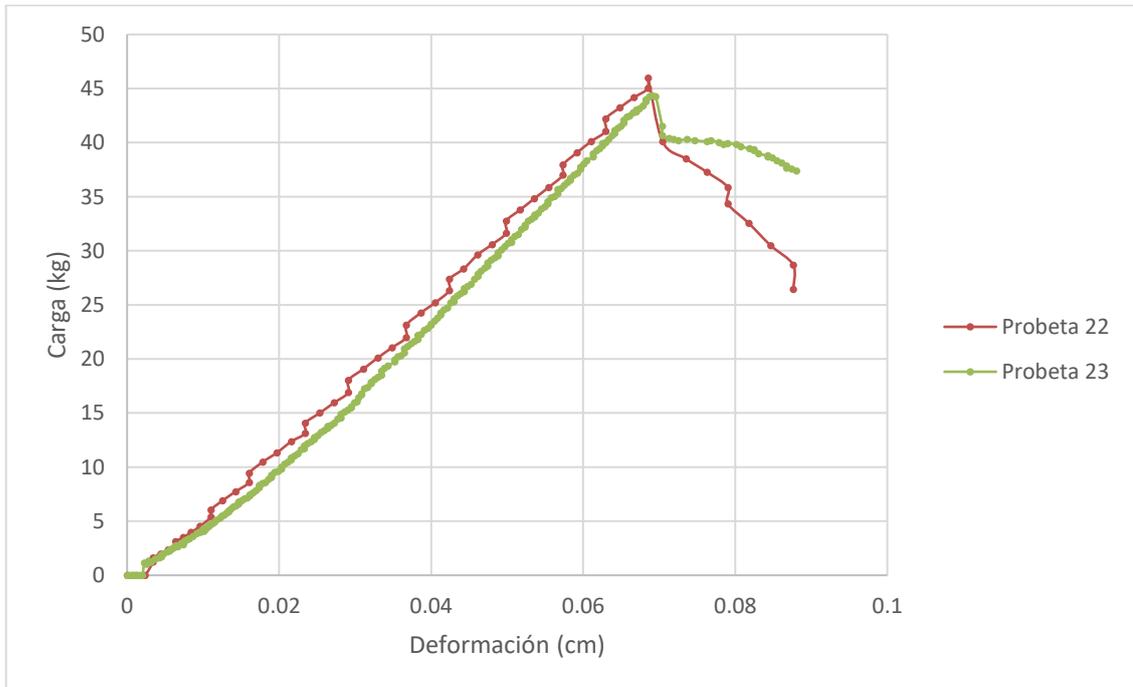
Mezcla 37/1



Mezcla 29/1

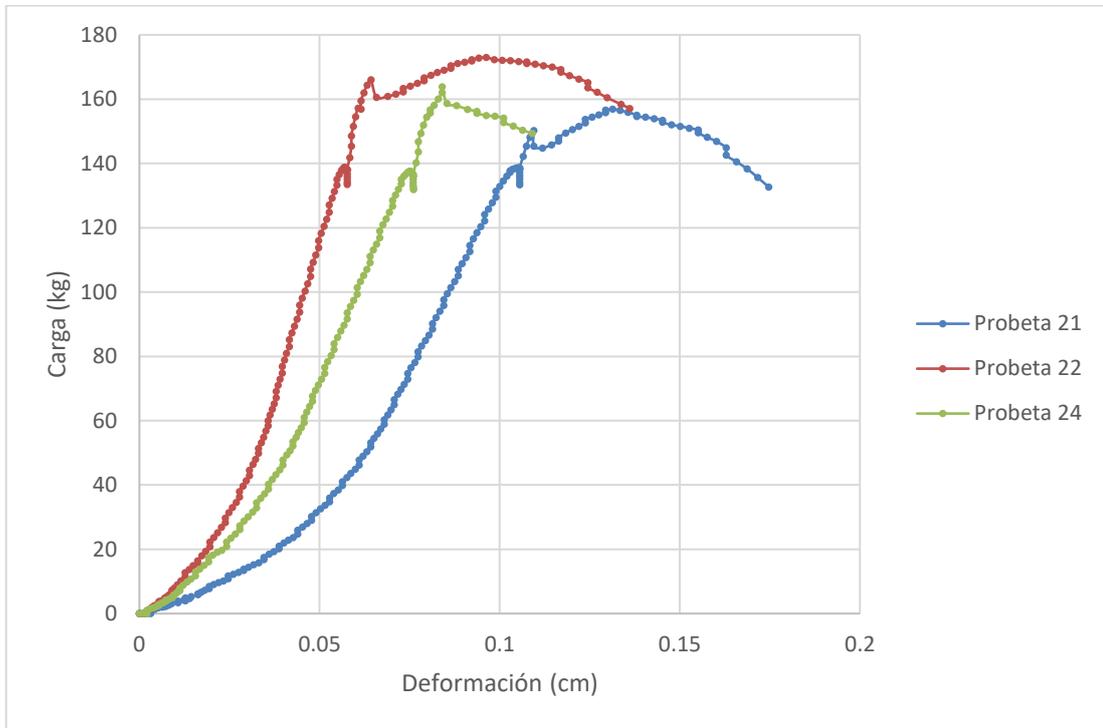


Mezcla 33/1.5

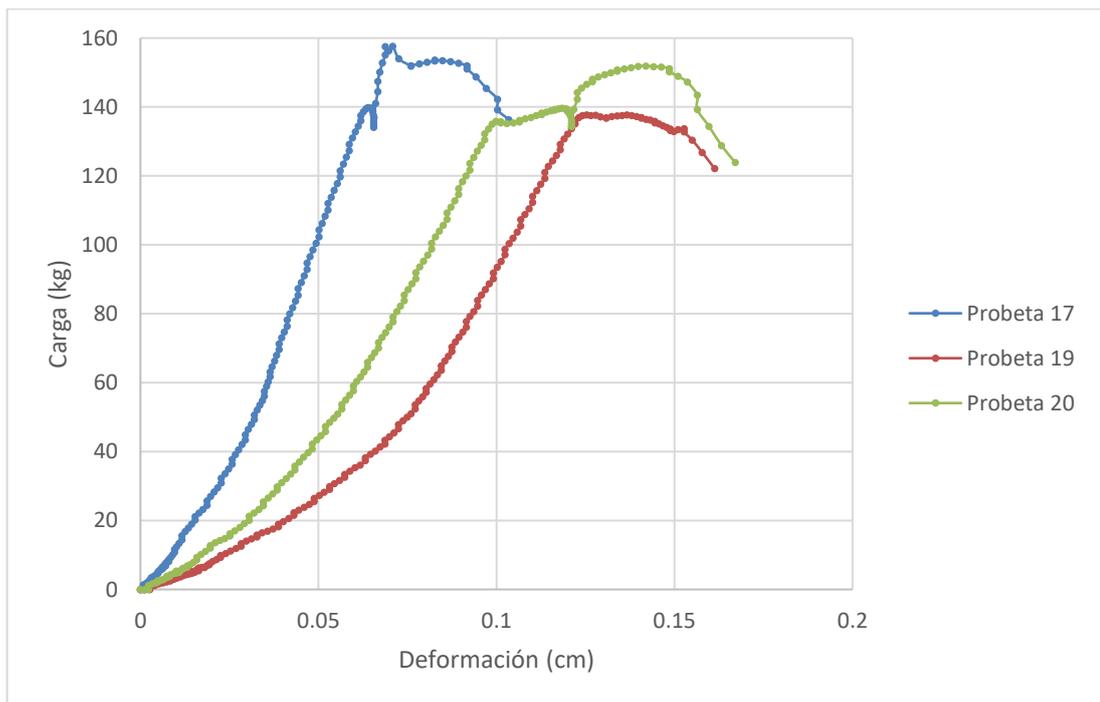


## MACARÁ – TAMO DE ARROZ

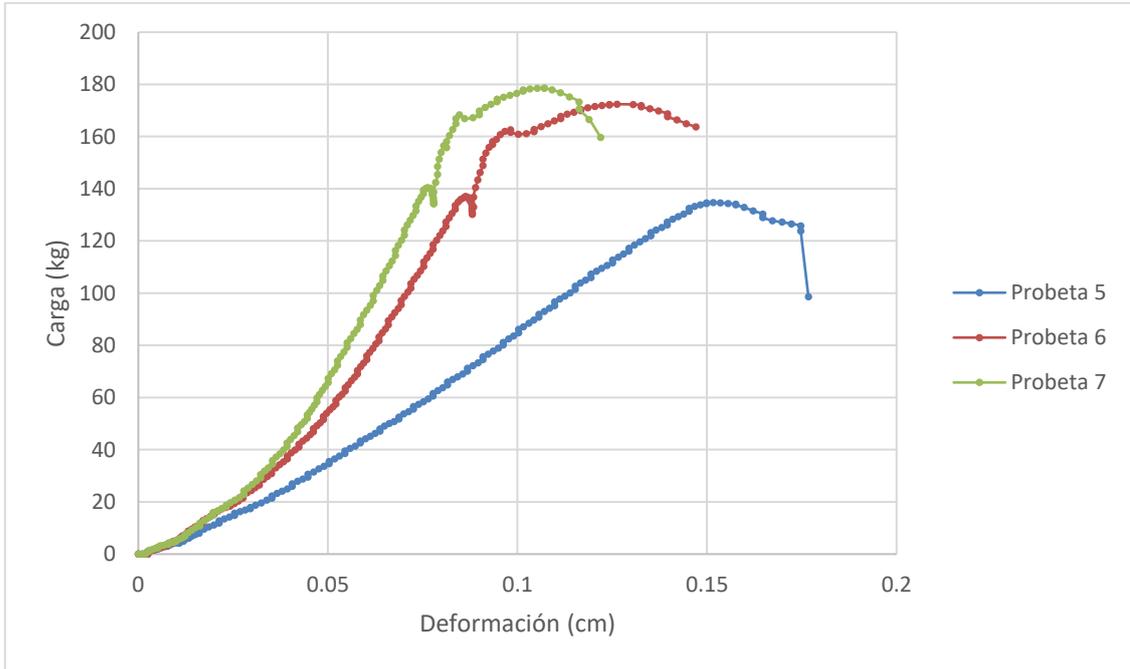
Mezcla 25/1.5



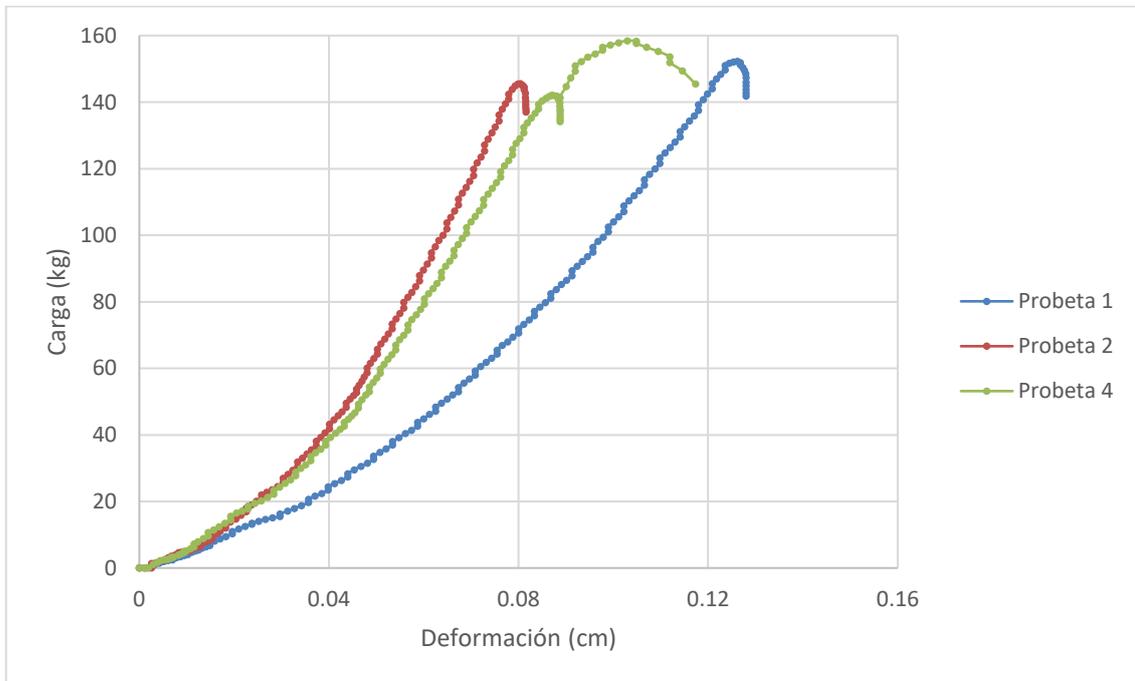
Mezcla 29/2



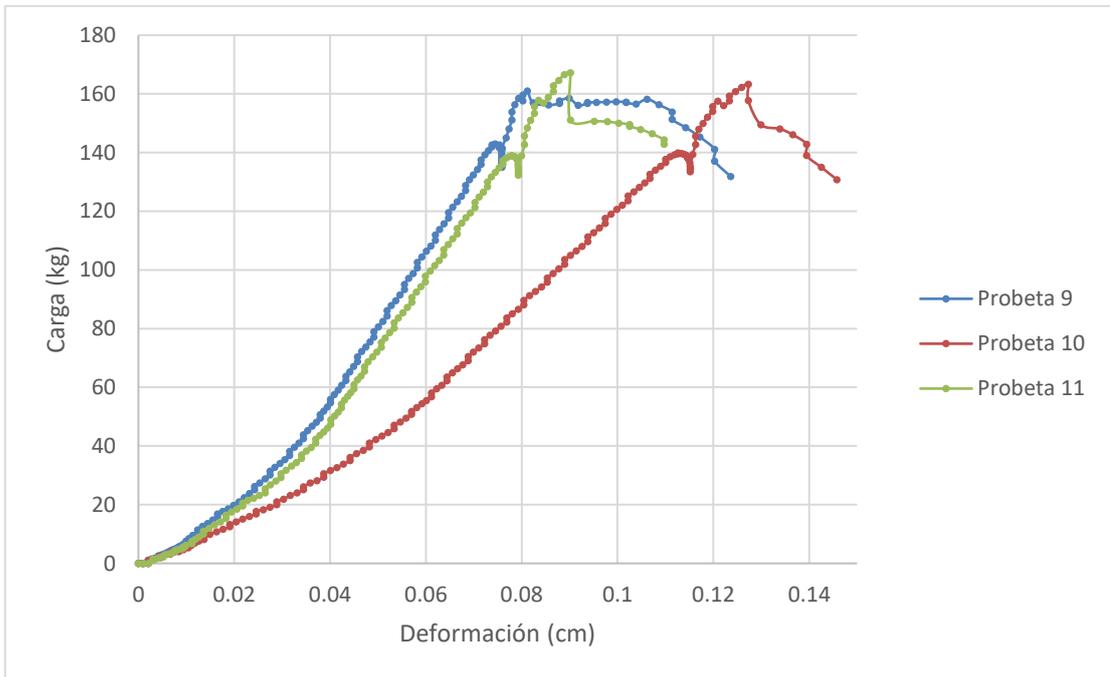
Mezcla 37/2



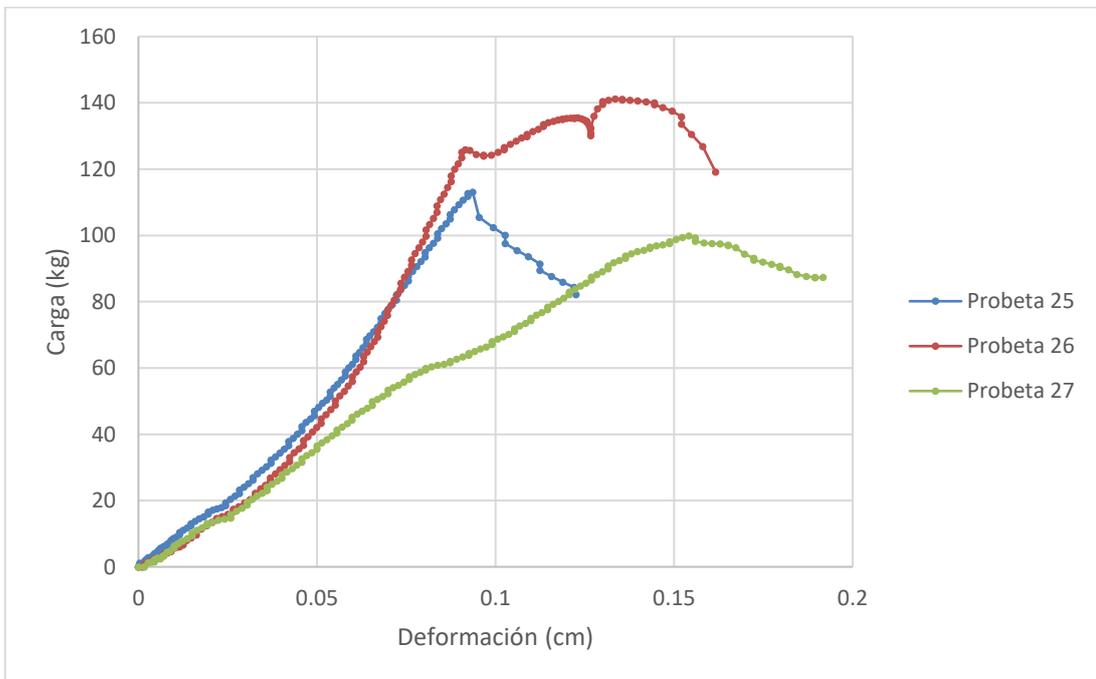
Mezcla 41/1.5



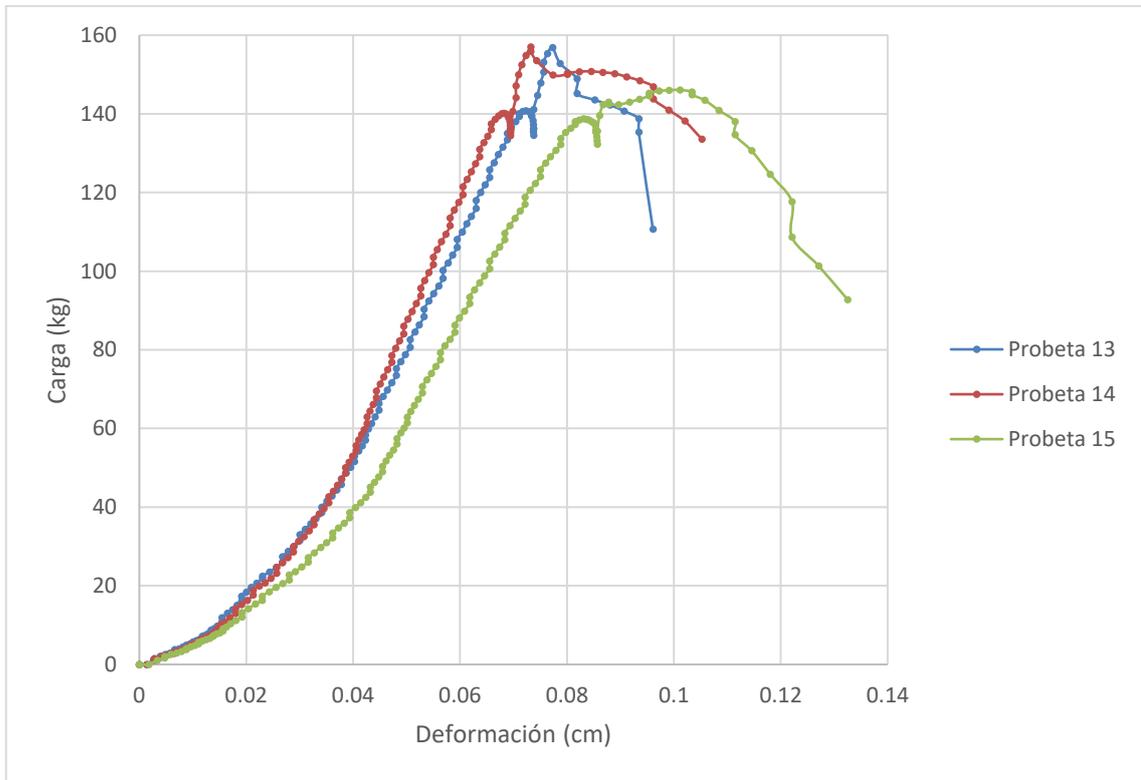
Mezcla 37/1



Mezcla 29/1

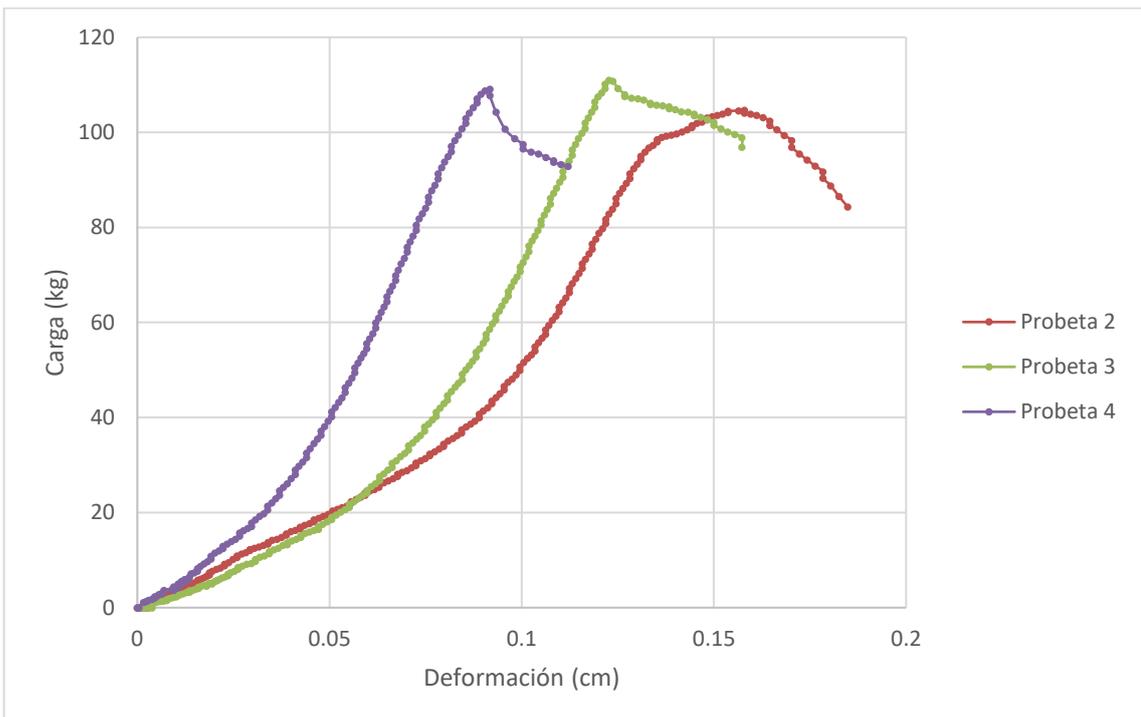


### Mezcla 33/1.5

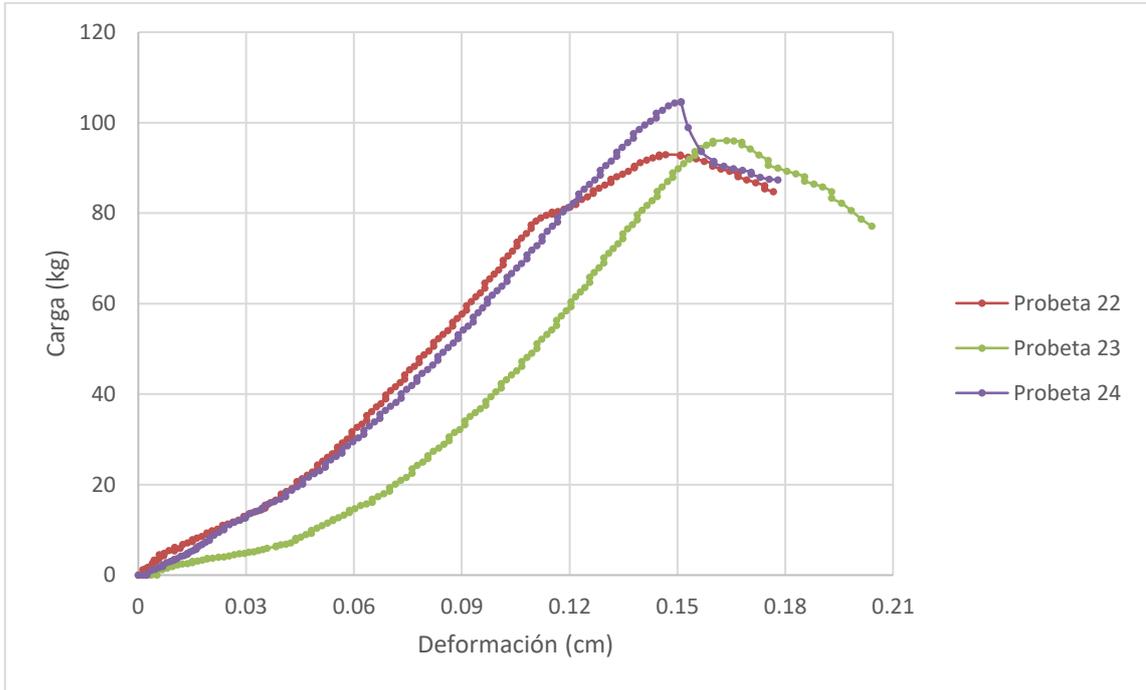


### MACARÁ – TALLO DE ARROZ

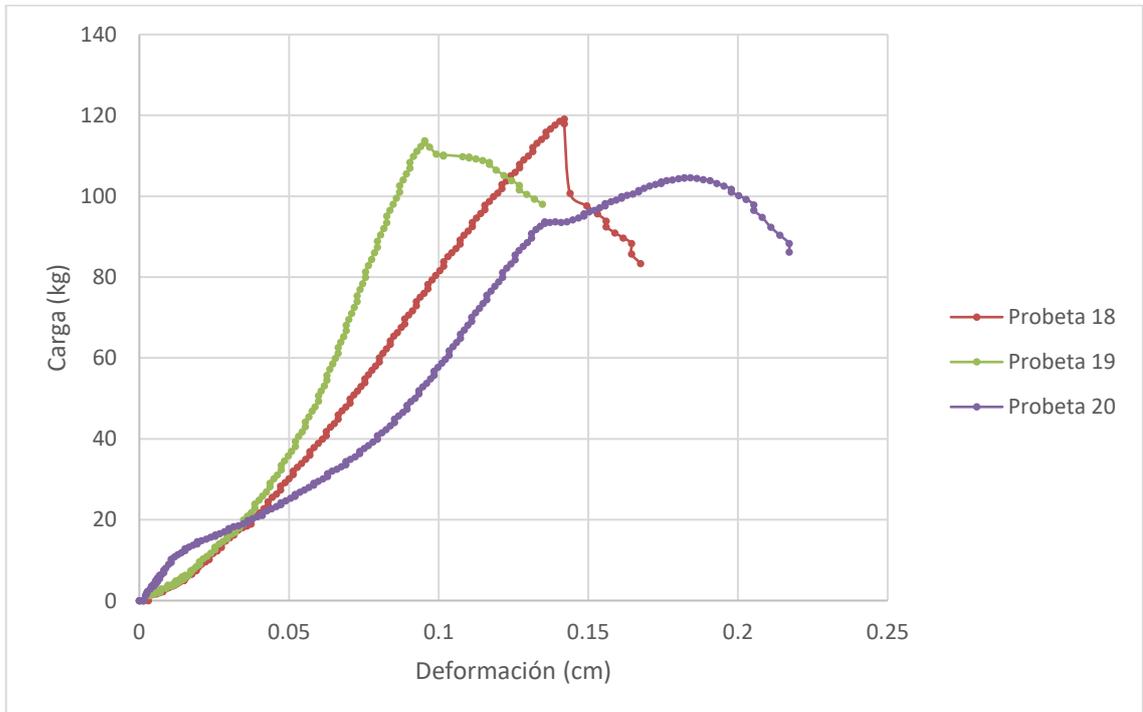
#### Mezcla 25/1.5



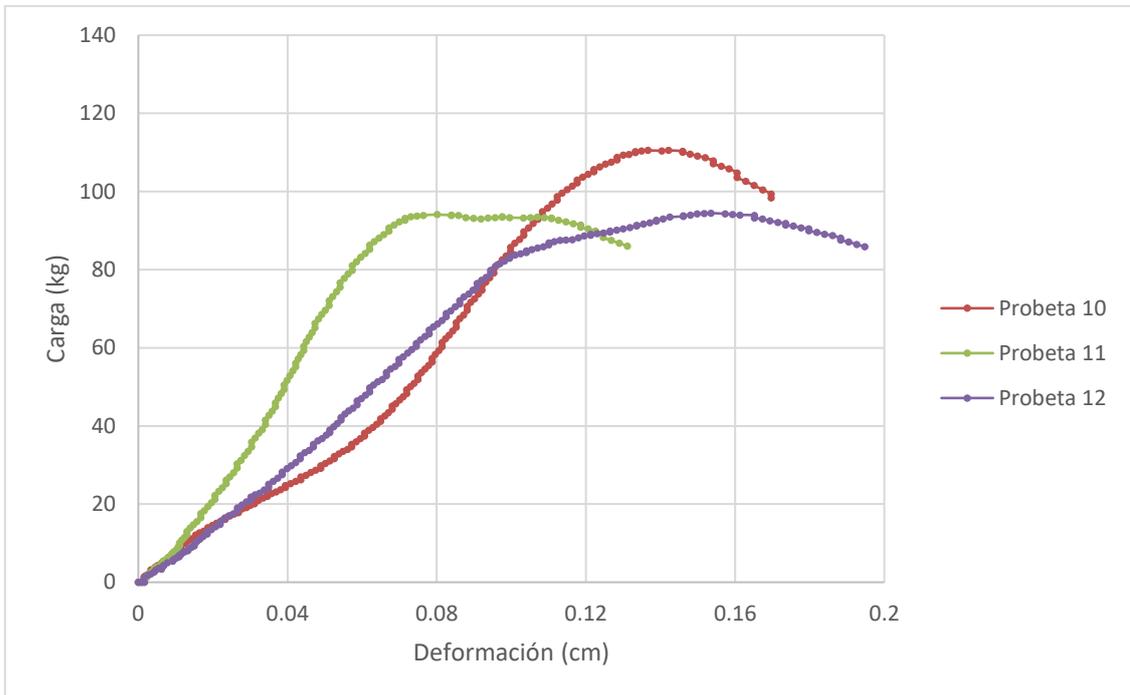
Mezcla 29/2



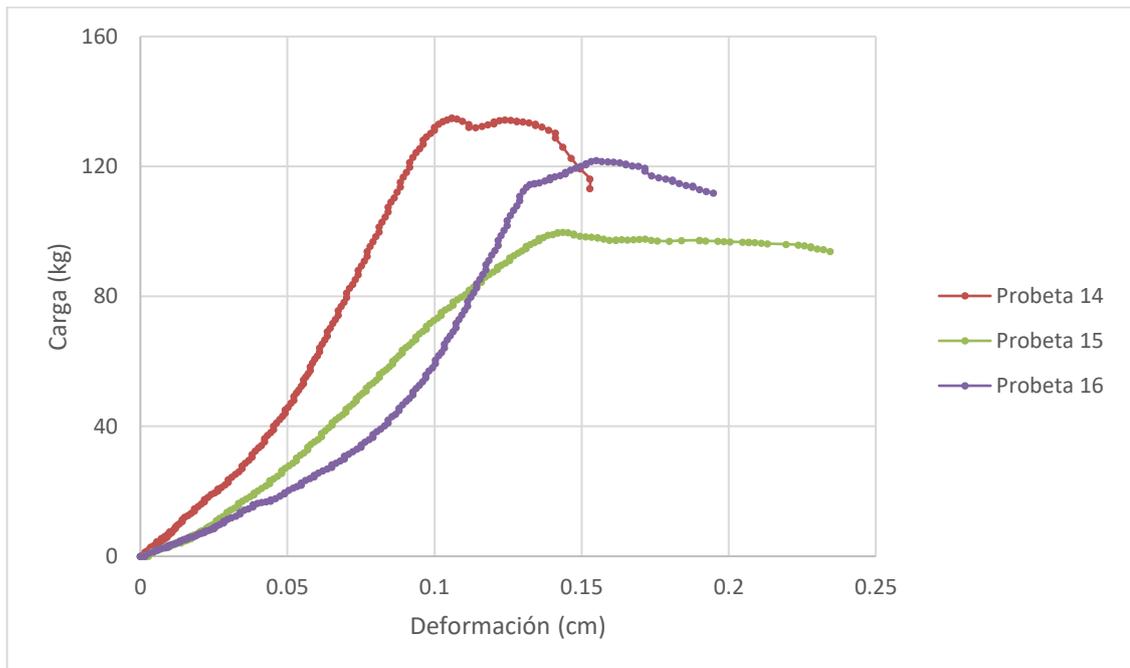
Mezcla 37/2



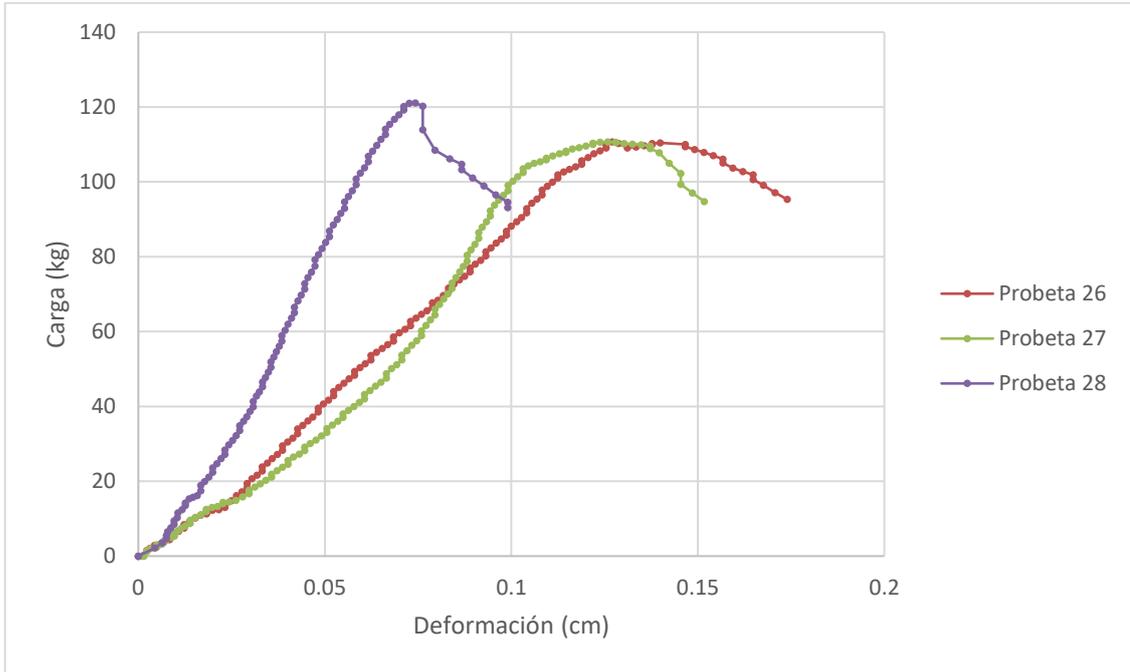
Mezcla 41/1.5



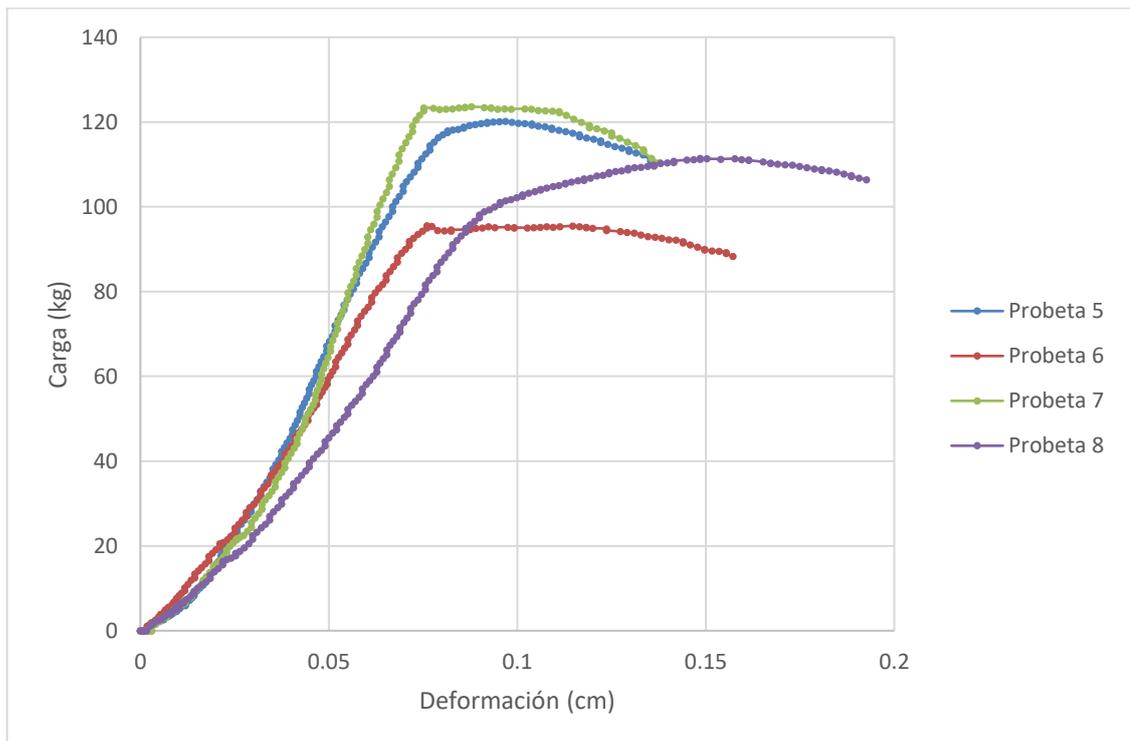
Mezcla 37/1



Mezcla 29/1



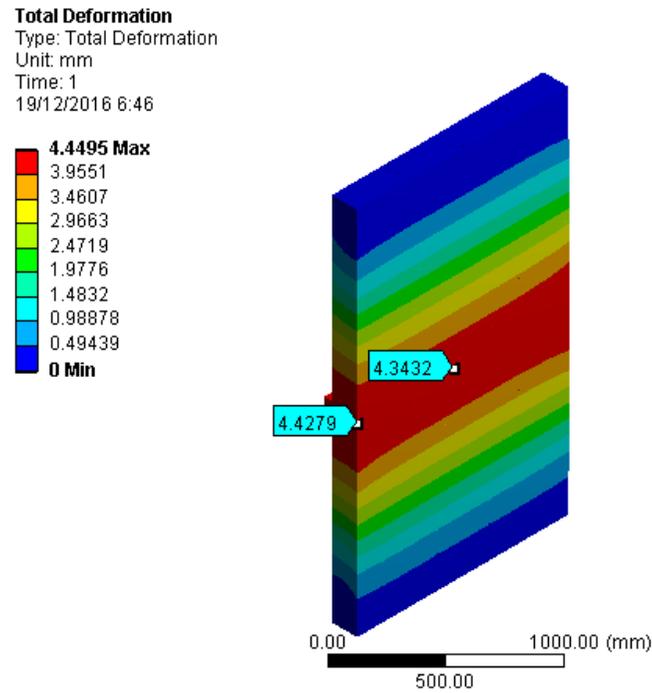
Mezcla 33/1.5



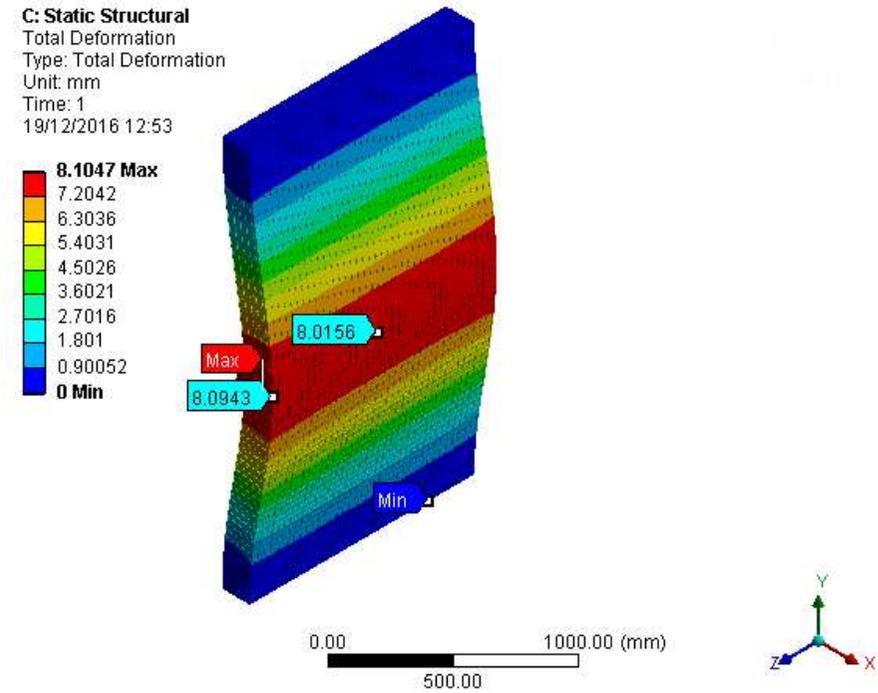
## Anexo 2: Resultados del análisis a flexión de los muros portantes de suelo mediante elementos finitos.

Deformación total del muro de 15 cm de espesor sin refuerzo y reforzado con geomalla.

a) Deformaciones totales bajo carga de 0.008 MPa



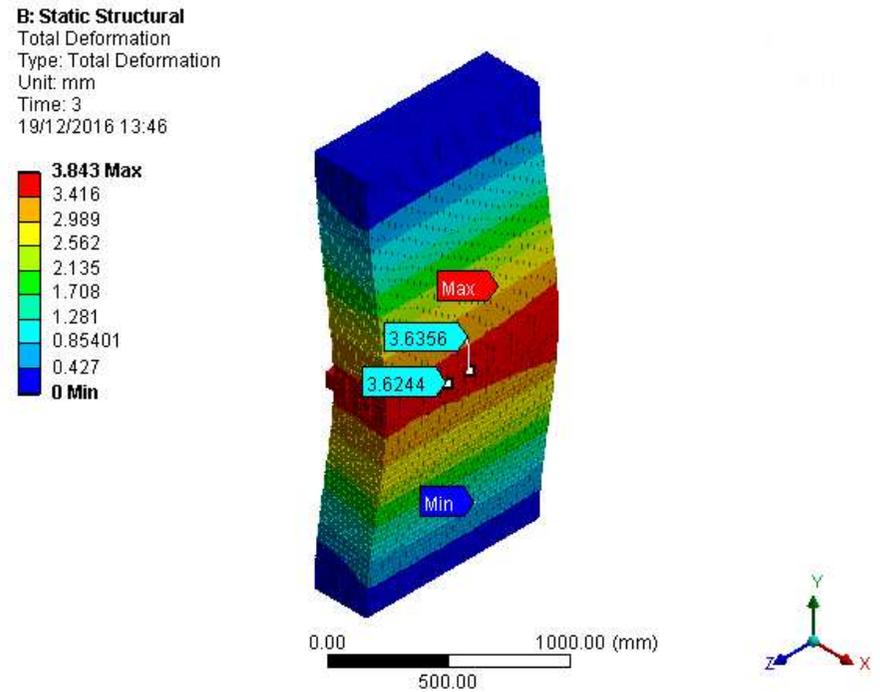
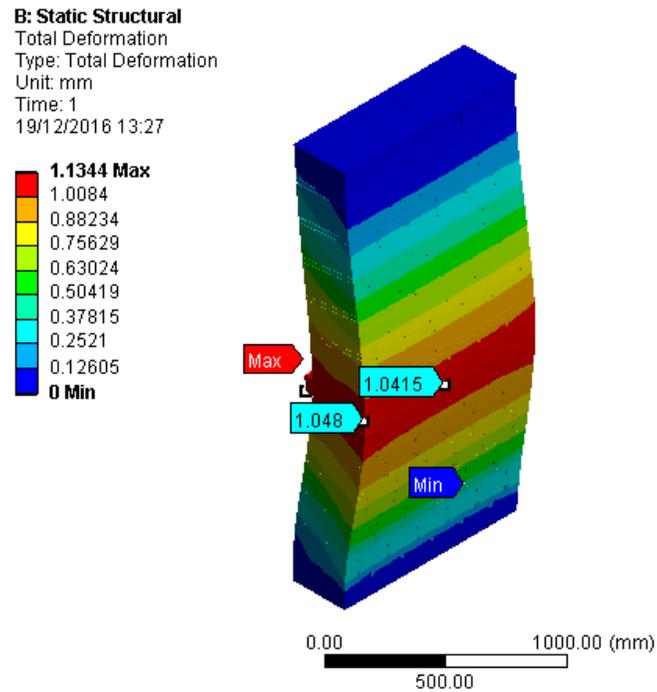
b) Deformaciones totales bajo carga de 0.02 MPa



Deformación total del muro de 30 cm de espesor sin refuerzo y reforzado con geomalla.

a) Deformaciones totales bajo carga de 0.01 MPa

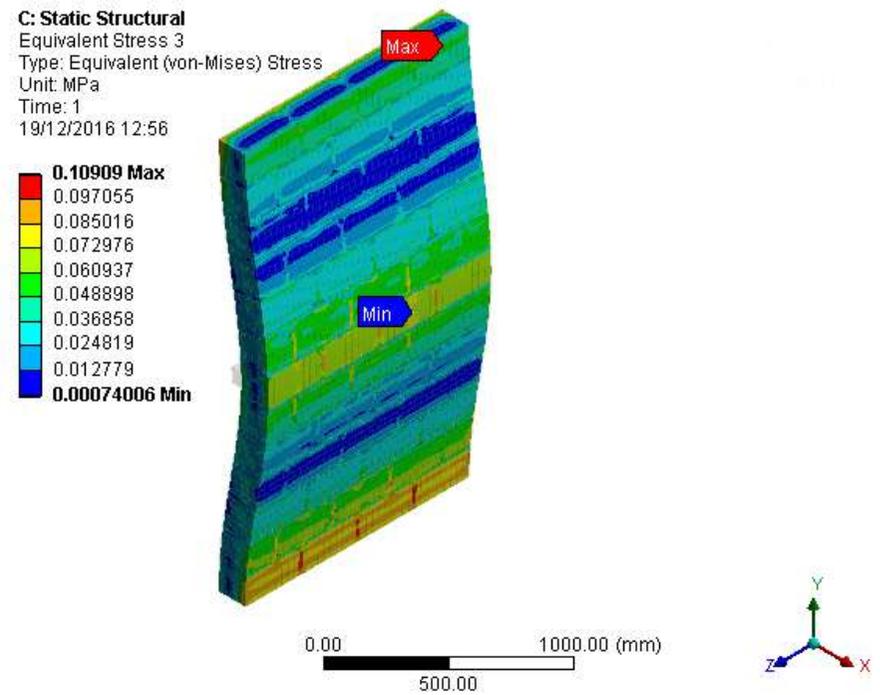
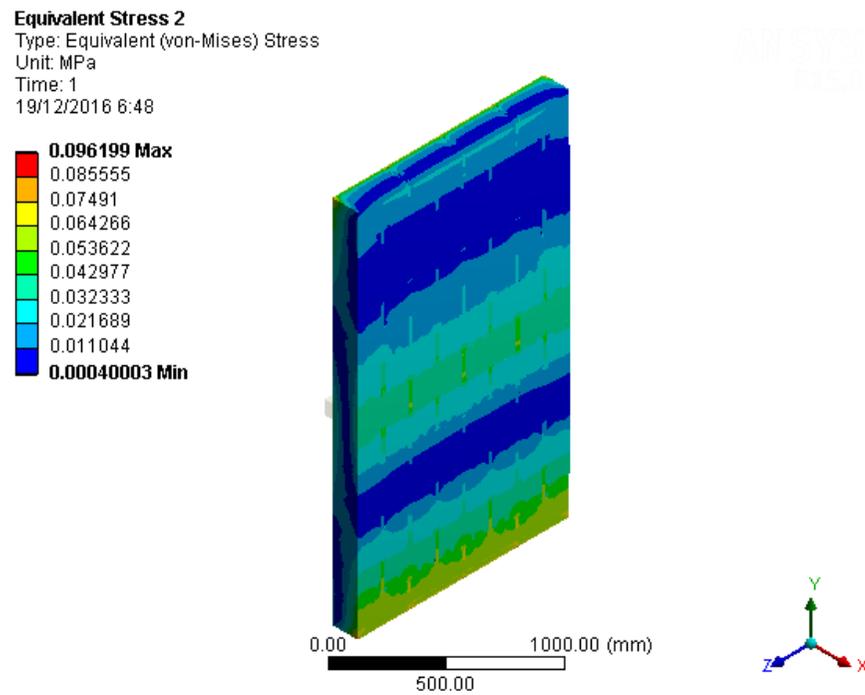
b) Deformaciones totales bajo carga de 0.04 MPa



Esfuerzos equivalentes del muro de 15 cm de espesor sin refuerzo y reforzado con geomalla sometidos a flexión.

a) Esfuerzos en el muro sin refuerzo bajo carga de 0.008 MPa

b) Esfuerzos en los adobes reforzados bajo carga de 0.02 MPa



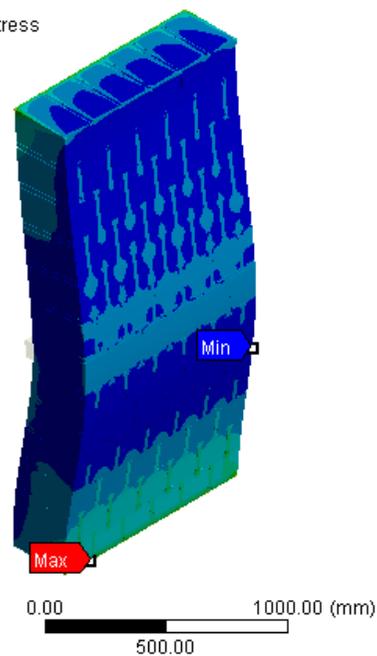
Esfuerzos equivalentes del muro de 30 cm de espesor sin refuerzo y reforzado con geomalla.

a) Esfuerzos en el muro sin refuerzo bajo carga de 0.01 MPa

b) Esfuerzos en los adobes reforzados bajo carga de 0.04 MPa

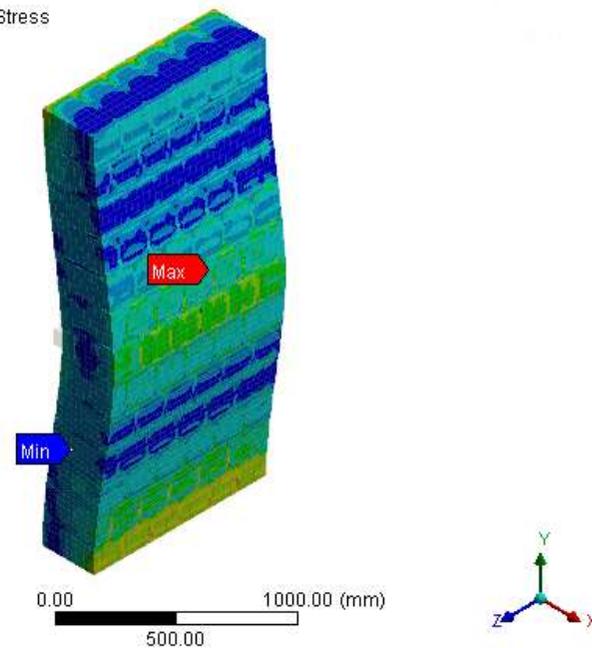
**B: Static Structural**  
Equivalent Stress 2  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
19/12/2016 13:28

**0.092019 Max**  
0.0818  
0.07158  
0.061361  
0.051141  
0.040922  
0.030703  
0.020483  
0.010264  
**4.4103e-5 Min**



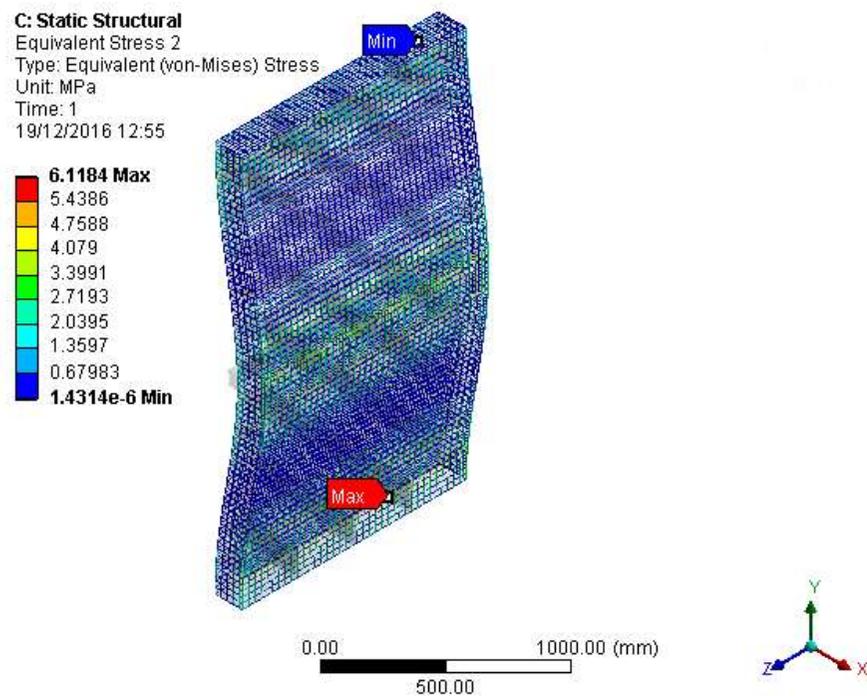
**B: Static Structural**  
Equivalent Stress 3  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 3  
19/12/2016 13:48

**0.099106 Max**  
0.088219  
0.077332  
0.066445  
0.055557  
0.04467  
0.033783  
0.022895  
0.012008  
**0.0011208 Min**

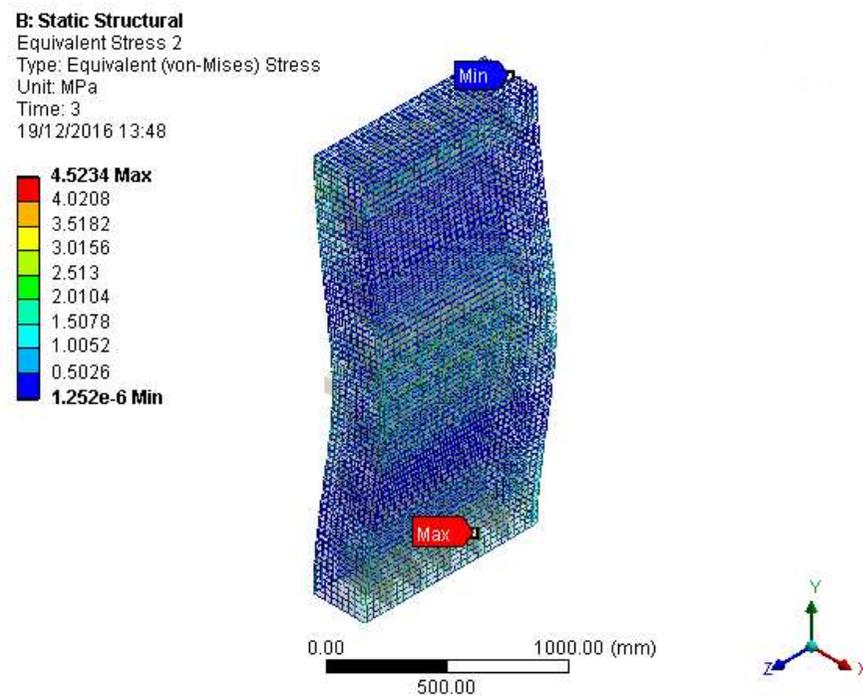


## Esfuerzos equivalentes la geomalla

a) Muro de 15 cm bajo carga de 0.02 MPa



b) Muro de 30 cm bajo carga de 0.04 MPa

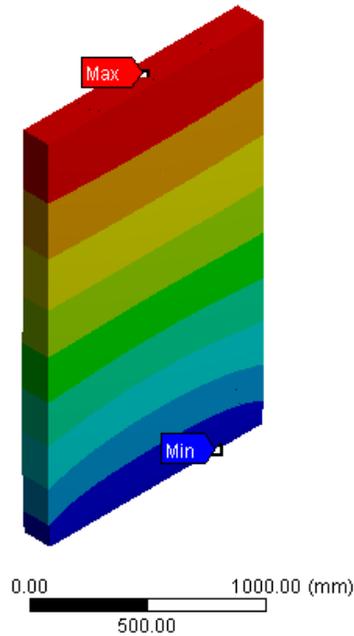
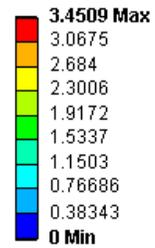


### Anexo 3: Resultados del análisis a compresión de los muros portantes de suelo mediante elementos finitos.

Deformación total del muro de 15 cm de espesor sin refuerzo y reforzado con geomalla bajo carga de servicio de 41.65 kN/m<sup>2</sup>.

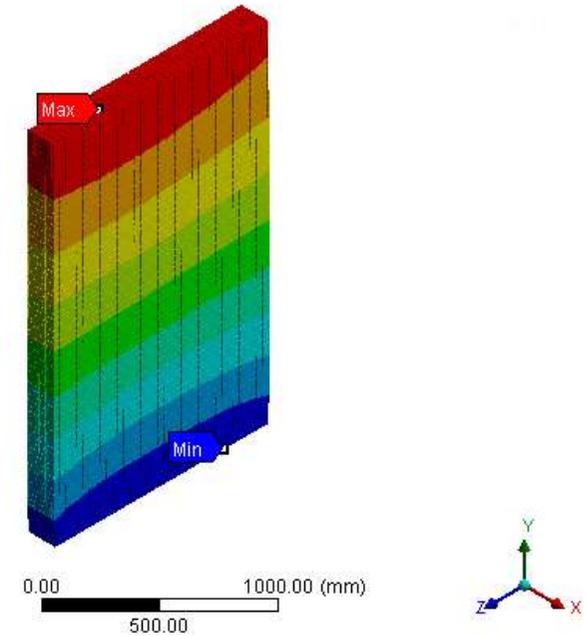
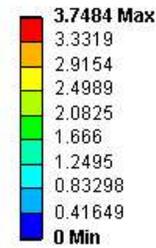
a) Muro sin refuerzo

**F: Static Structural pp**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
14/12/2016 1:54



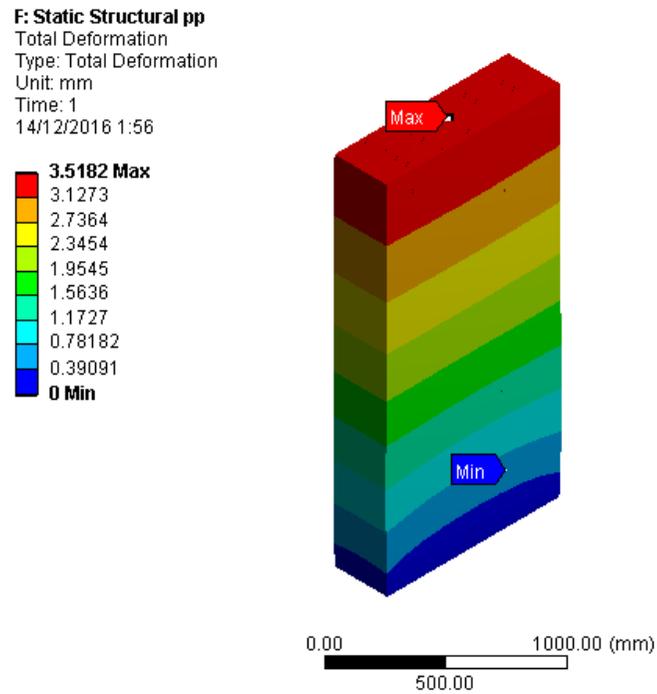
b) Muro reforzado

**G: Static Structural pp**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1  
14/12/2016 1:57

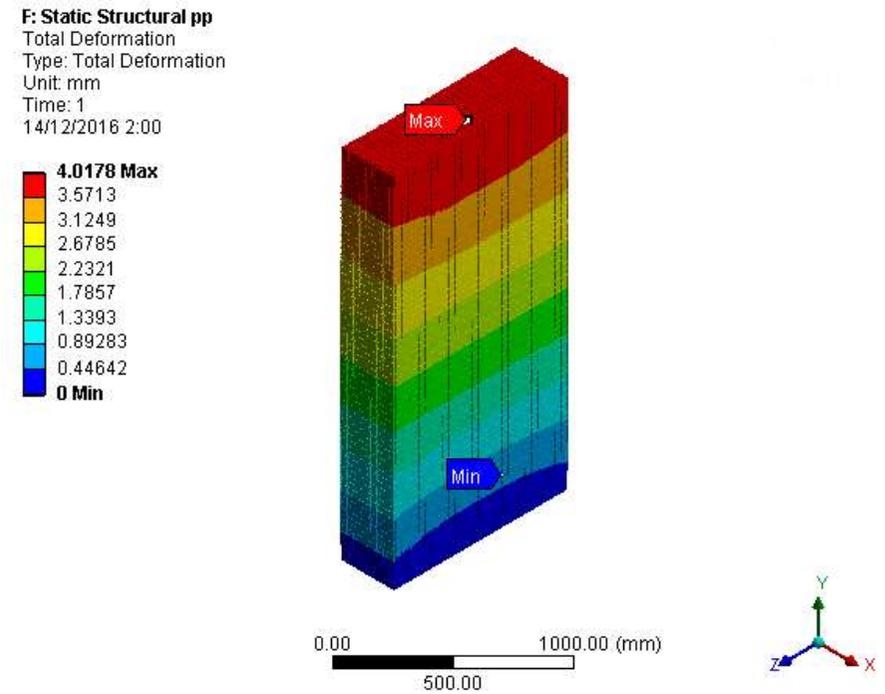


Deformación total del muro de 30 cm de espesor sin refuerzo y reforzado con geomalla bajo carga de servicio de 42.3 kN/m<sup>2</sup>.

a) Muro sin refuerzo

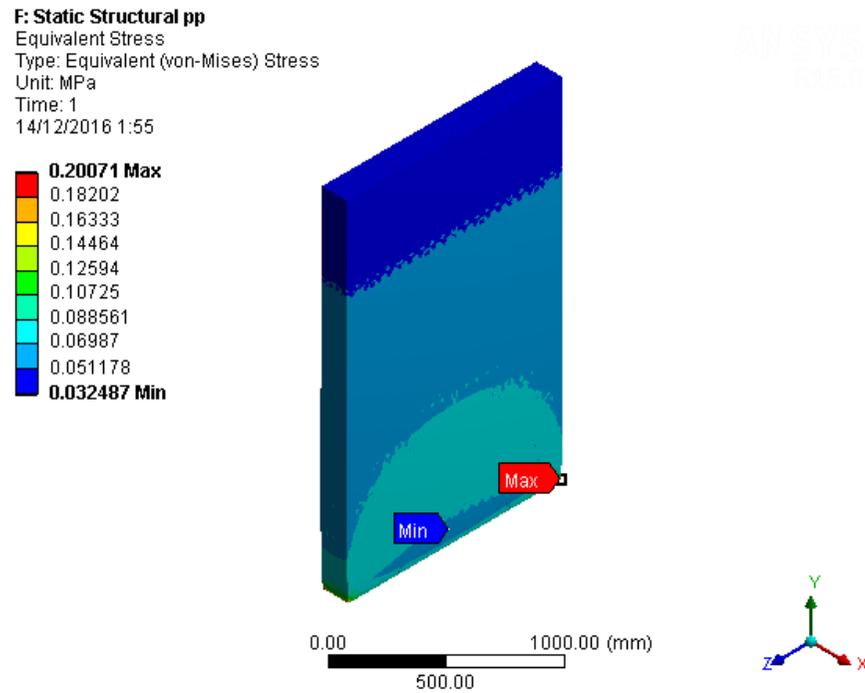


b) Muro reforzado

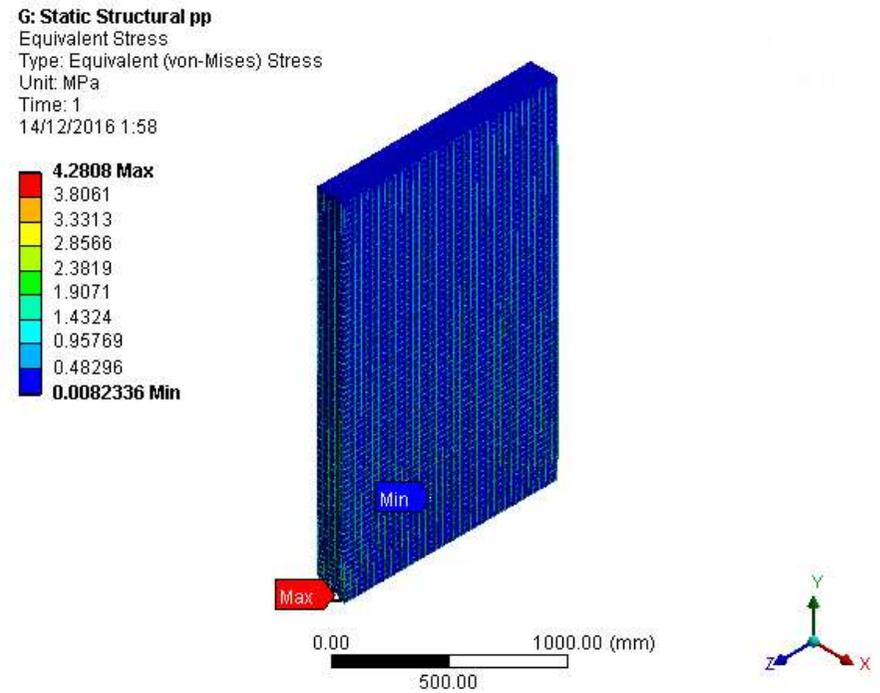


Esfuerzos equivalentes del muro de 15 cm de espesor sin refuerzo y reforzado con geomalla bajo carga de servicio de 41.65 kN/m<sup>2</sup>.

a) Muro sin refuerzo

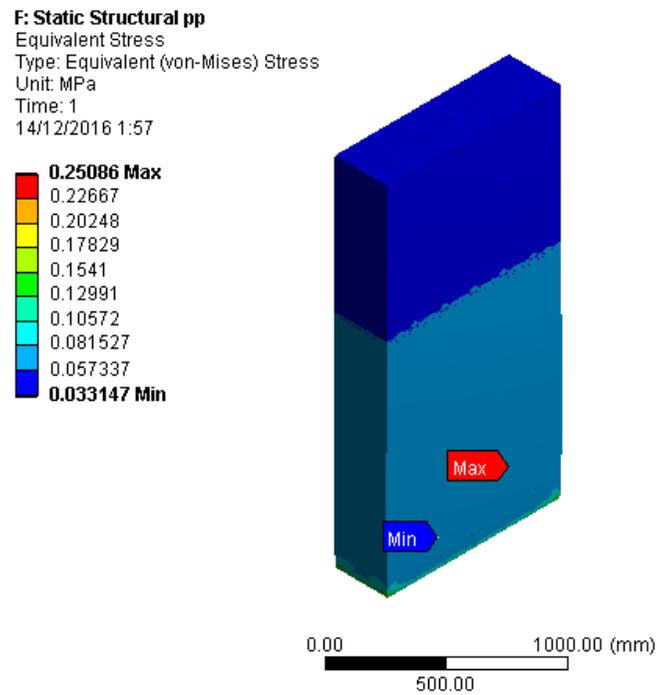


b) Muro reforzado



Esfuerzos equivalentes del muro de 30 cm de espesor sin refuerzo y reforzado con geomalla bajo carga de servicio de 42.3 kN/m<sup>2</sup>.

a) Muro sin refuerzo



b) Muro reforzado

