

Estudio de la resistencia a la tracción de muros en tapia pisada con inclusión de Biomasa residual en suelos de la ciudad de Bucaramanga, Santander.

Hernando Luis Ardila Sarmiento

ID: 000269285

Facultad de ingeniería Civil
Universidad Pontificia Bolivariana
Seccional Bucaramanga

2019

Estudio de la resistencia a la tracción de muros en tapia pisada con inclusión de Biomasa residual en suelos de la ciudad de Bucaramanga, Santander.

Hernando Luis Ardila Sarmiento

ID: 000269285

Proyecto de grado para optar por el título de:

INGENIERO CIVIL

Director:

Sergio Manuel Pineda Vargas

Doctor en Ingeniería Civil

Facultad de ingeniería Civil

Universidad Pontificia Bolivariana

Seccional Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Así como la parte más importante de una casa en tierra son una buena cimentación y una buena cubierta, puedo decir que mis padres han sabido ser esa cimentación sobre la cual he podido levantar mis sueños y los demás miembros de mi familia esa cubierta que me protege de la tempestad en todo momento. A todos ellos muchas gracias.

Tabla de contenidos

	Pág.
Introducción	15
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo general	18
1.2 Objetivos específicos	18
2. Marco teórico	19
2.1 La tapia pisada	19
2.2 Formación y origen de los suelos.....	19
2.3 Identificación y selección de suelos para la tapia pisada	23
2.3.1 Ensayos de campo	23
2.3.2 Ensayos de laboratorio	28
2.4 Fuerzas internas	32
2.5 Esfuerzos de tracción en tierra comprimida.....	36
2.6 Influencia de la composición química de los materiales en el comportamiento a tracción. ...	39
2.7 Biomasa residual de caña de azúcar.....	40
3. Metodología	41
3.1 Etapa 1: Extracción y recolección del material.....	41
3.2 Etapa 2: Caracterización del material	42
3.3 Etapa 3: fabricación de los especímenes para el ensayo a tracción	43
3.4 Etapa 4: Ensayo de resistencia a la tracción	46

4. Implementación y ejecución	49
4.1 Etapa 1: Extracción y recolección del material.....	50
4.2 Etapa 2: Caracterización del material	53
4.3 Etapa 3: fabricación de los especímenes para el ensayo a tracción	64
4.4 Etapa 4: Ensayo de resistencia a la tracción	68
5. Análisis y discusión de resultados	72
5.1 Análisis de la caracterización de los materiales.....	72
5.2 Análisis de la resistencia a la tracción.	74
5.2.1 Análisis de la resistencia a la tracción en el material A.....	74
5.2.2 Análisis de la resistencia a la tracción en el material B.....	76
5.2.3 Análisis de la resistencia a la tracción en el material C.....	78
6. Conclusiones y recomendaciones	81
Lista de Referencias	83
Apéndices.....	87

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Descripción de los horizontes del suelo según el Soil Sorvey manual.</i>	22
Tabla 2. <i>Test del cordón.</i>	25
Tabla 3. <i>Test de la cinta.</i>	26
Tabla 4. <i>Test de la resistencia seca.</i>	27
Tabla 5. <i>Test del rollo.</i>	27
Tabla 6. <i>Limites porcentuales de granulometría adecuada para construcción en tierra comprimida.</i>	30
Tabla 7. <i>Valores probables del ensayo de Proctor modificado.</i>	32
Tabla 8. <i>La forma en el ensayo a tracción indirecta.</i>	37
Tabla 9. <i>Clasificación INVIAS para extracción y recolección de las muestras según las necesidades de investigación del material.</i>	42
Tabla 10. <i>Formato de recolección de datos del ensayo de resistencia a la tracción indirecta.</i> ...	48
Tabla 11. <i>Extracción de los materiales.</i>	51
Tabla 12. <i>Resultados para clasificación SUCS obtenidos del ensayo INVE-123.</i>	55
Tabla 13. <i>Resultados para clasificación SUCS del ensayo INVE-125.</i>	57
Tabla 14. <i>Resultados para clasificación SUCS del ensayo INVE-126.</i>	58
Tabla 15. <i>Clasificación del suelo A por medio de la INVE-181-13.</i>	59
Tabla 16. <i>Clasificación del suelo B por medio de la INVE-181-13.</i>	59
Tabla 17. <i>Clasificación del suelo C por medio de la INVE-181-13.</i>	60

Tabla 18. <i>Resultados de análisis químico por EDX.</i>	61
Tabla 19. <i>Resultados análisis SEM.</i>	62
Tabla 20. <i>Humedades optimas de compactación.</i>	64
Tabla 21. <i>Bitácora de fabricación de los especímenes.</i>	67
Tabla 22. <i>Resultados ensayo a tracción material A.</i>	70
Tabla 23. <i>Resultados ensayo a tracción material B.</i>	70
Tabla 24. <i>Resultados ensayo a tracción material C.</i>	70
Tabla 25. <i>Comparativa entre INVI-123 y test del vidrio.</i>	72

Lista de ilustraciones

	Pág.
<i>Ilustración 1.</i> Capilla de nuestra Señora de los Dolores, construcción en tapia en la ciudad de Bucaramanga.....	16
<i>Ilustración 2.</i> Mapa Colombiano de amenaza sísmica.	17
<i>Ilustración 3.</i> Test de sedimentación.	24
<i>Ilustración 4.</i> Clasificación de los suelos mediante el test del vidrio.	24
<i>Ilustración 5.</i> Composición granulométrica de suelos aptos para la construcción con tapia pisada.	25
<i>Ilustración 6.</i> Formato para dibujo de curva granulométrica.	29
<i>Ilustración 7.</i> Fuerzas internas.	33
<i>Ilustración 8.</i> Equilibrio estático.....	34
<i>Ilustración 9.</i> Curva tensión deformación para materiales frágiles.	35
<i>Ilustración 10.</i> Módulo de elasticidad	35
<i>Ilustración 11.</i> Distribución de tensiones teóricas [24]	38
<i>Ilustración 12.</i> Tipos de falla en el ensayo de tracción indirecta cilíndrico	39
<i>Ilustración 13.</i> Proceso metodológico.	41
<i>Ilustración 14.</i> Método para obtener las características del Proctor modificado en campo.	44
<i>Ilustración 15.</i> Montaje de ensayo de resistencia a la tracción.....	47
<i>Ilustración 16.</i> Ubicación de los suelos.	49
<i>Ilustración 17.</i> Trituración de la biomasa residual de caña.	52

<i>Ilustración 18.</i> Tamaños y texturas de la biomasa residual de caña.	52
<i>Ilustración 19.</i> Lavado del suelo en el tamiz 200.	54
<i>Ilustración 20.</i> Juego de tamices usados.	54
<i>Ilustración 21.</i> Pasta en estado de humedad para aplicarse a la cazuela.	56
<i>Ilustración 22.</i> Aplicación de la pasta a la Casagrande.	56
<i>Ilustración 23.</i> Bola de 2 gramos para ensayo de límite plástico e índice de plasticidad.	57
<i>Ilustración 24.</i> Muestras listas para ser llevadas al laboratorio de nanociencia y nanotecnología.	61
<i>Ilustración 25.</i> Humedecimiento del material.	63
<i>Ilustración 26.</i> Pesado del cilindro compactado.	63
<i>Ilustración 27.</i> Secado en estufa.	65
<i>Ilustración 28.</i> Suelo A con 6% de biomasa.	65
<i>Ilustración 29.</i> Desencofrado de un espécimen.	66
<i>Ilustración 30.</i> Especímenes envueltos en papel vinipel en etapa de curado.	67
<i>Ilustración 31.</i> Montaje usado para el ensayo de resistencia a tracción.	68
<i>Ilustración 32.</i> Medición de especímenes.	69
<i>Ilustración 33.</i> Especímen dañado por exceso de biomasa.	69
<i>Ilustración 34.</i> Planos típicos de falla.	71
<i>Ilustración 35.</i> Resistencia a la tracción promedio del material A.	74
<i>Ilustración 36.</i> Relación entre densidad y resistencia a la tracción del material A.	75
<i>Ilustración 37.</i> Curva esfuerzo desplazamiento vertical del material A.	76
<i>Ilustración 38.</i> Resistencia a la tracción promedio del material B.	76
<i>Ilustración 39.</i> Relación entre densidad y resistencia a la tracción del material B.	77

Ilustración 40. Curva esfuerzo desplazamiento vertical del material B. 78

Ilustración 41. Resistencia a la tracción promedio del material C. 78

Ilustración 42. Relación entre densidad y resistencia a la tracción del material C. 79

Ilustración 43. Curva esfuerzo desplazamiento vertical del material C. 80

Lista de ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1. Cálculo del número de golpes por capa.	31
Ecuación 2. Humedad evaporable de la muestra.	45
Ecuación 3. Humedad óptima para tierra comprimida.	45
Ecuación 4. Cantidad necesaria de agua.	46
Ecuación 5. Resistencia a la tracción en ensayo de tracción indirecta con forma cilíndrica.	47

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Registro fotográfico	87
Registro fotográfico del sector de malpaso.....	93
Apéndice B. Ensayos de campo.....	96
Apéndice C. Ensayos de laboratorio.....	99
Apéndice D. Límites de consistencia.....	102
Resultados tierra A: Límites de consistencia.....	102
Apéndice E. Ensayo de compactación modificado.....	105

13/8/2019

www.upbga.edu.co/biblioteca/formaton.php**RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

TITULO: Estudio de la resistencia a la tracción de muros en tapia pisada con inclusión de Biomasa residual en suelos de la ciudad de Bucaramanga, Santander.

AUTOR(ES): Hernando Luis Ardila Sarmiento

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Sergio Manuel Pineda Vargas

RESUMEN

Las técnicas de construcción en tierra específicamente la de la tapia pisada o tierra comprimida están ligadas con el departamento de Santander y su capital la ciudad de Bucaramanga ya que en estos se ha desarrollado dicha técnica desde épocas ancestrales para tener auge en el siglo XX y un declive posterior debido a los prejuicios y preferencias por otros materiales que está finalizando en esta época con la reanudación por el interés por esta técnica gracias a sus beneficios estéticos de gran belleza arquitectónica, ambientales y energéticos que produce la construcción con tierra comprimida o tapial. Producto de este renovado interés se analiza aquí el comportamiento a tracción de elementos en esta técnica fabricados con tierra de Bucaramanga con adición de biomasa residual de la producción de caña para examinar los efectos de esta ante un fenómeno por el cual inician las fisuras estructurales en los elementos de este método constructivo.

PALABRAS CLAVE:

Tapia pisada, tierra comprimida, geomaterial, tensión, construcción tierra, tracción indirecta.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

13/8/2019

www.upbga.edu.co/biblioteca/formatoi.php**GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

TITLE: Study of the tensile strength of compressed earth walls, including residual biomass in soils of the city of Bucaramanga, Santander.

AUTHOR(S): Hernando Luis Ardila Sarmiento

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Sergio Manuel Pineda Vargas

ABSTRACT

The earth building techniques specifically that of the rammed earth are linked to the department of Santander and its capital, the city of Bucaramanga, since these techniques have been developed from ancient times to have boom in the twentieth century and a subsequent decline due to the prejudices and preferences for other materials that is ending at this time with the resumption of interest in this technique thanks to its aesthetic benefits of great architectural beauty, environmental and energy that produces the construction with rammed earth. As a result of this renewed interest, the tensile behavior of elements in this technique manufactured with Bucaramanga earth with the addition of residual biomass from cane production is analyzed here to examine the effects of this before a phenomenon whereby structural cracks begins in the elements of this constructive method.

KEYWORDS:

rammed earth, tensile , geomaterial, tensile behavior, splitting test, construction

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

La tapia pisada es un sistema constructivo vernáculo basado en el uso de la tierra IN-SITU y posterior compactación en estado húmedo de ésta para la construcción de paredes en los distintos tipos de edificaciones que se han desarrollado con esta técnica.

Al ser la tapia pisada un sistema en tierra adquirió distintas expresiones en los diferentes lugares en los que se le adoptó, siendo distinta su apariencia debido a las diferentes condiciones climáticas, geológicas y culturales que se ofrecen en las distintas partes del mundo.

En Colombia la construcción en tierra tuvo su auge hasta comienzos del siglo xx y su declive entre los años de 1929 a 1940 periodo donde el país hace su transición de nación rural a urbana [1]. Durante su esplendor se construyeron en el país un gran número de edificaciones hoy algunas de ellas declarados monumentos nacionales como es el caso de la capilla de nuestra señora de los dolores ubicada en la ciudad de Bucaramanga (ver ilustración 1) [2] y muchas otras viviendas ya en el olvido debido al cambio de paradigma constructivo en la región en el cual se dio prioridad a otros materiales constructivos como el cemento y el acero.



Ilustración 1. Capilla de nuestra Señora de los Dolores, construcción en tapia en la ciudad de Bucaramanga.

Fuente: Capilla dolores. Disponible en: <https://bit.ly/2FkBx3X>

En el departamento de Santander se empezó a dar inicio a la construcción de los primeros núcleos poblacionales durante la época de la colonia con técnicas de construcción en tierra como la tapia pisada, la cual tiene como principal exponente al municipio de Barichara el cual fue declarado patrimonio cultural de la nación en 1997 [3].

Además de Barichara el departamento de Santander cuenta con muchos otros lugares de interés histórico y turístico que lo ayudan a situar como la séptima mejor región turística del país [4]. Lugares como Bucaramanga, Zapatoca, Socorro y San Gil en donde todavía hay construcciones antiguas en esta técnica y en donde se ha hecho tendencia el volver a construir usando la tapia pisada debido a sus acabados estéticos y arquitectónicos son muestra de la

importancia del estudio de esta técnica de construcción en una zona que está catalogada como de alta sismicidad por la NSR10 como se puede apreciar en la ilustración 2.

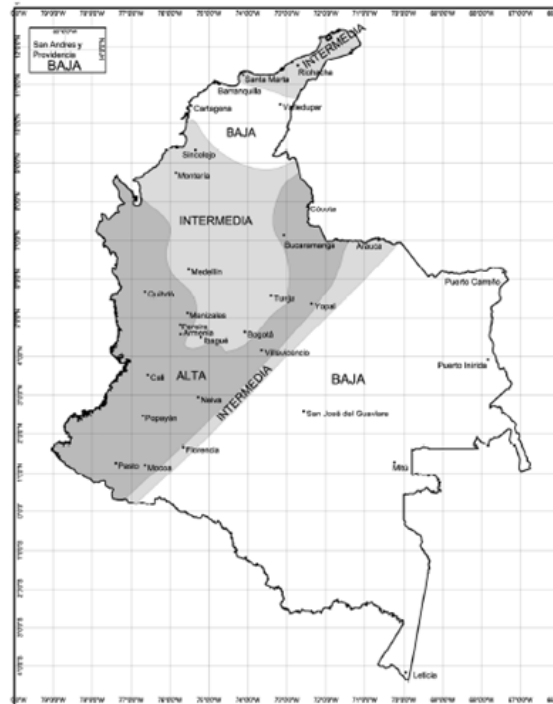


Ilustración 2. Mapa Colombiano de amenaza sísmica.

Fuente: Tomado del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)

En las estructuras construidas con tierra comprimida las fisuras estructurales se inician por la tracción ya que al estar estas compuestas por un material frágil como lo es la tierra las fallas están asociadas a deformaciones unitarias últimas por tracción las cuales son mucho menores a las producidas por las deformaciones últimas a compresión [5].

Actualmente el primer paso para la evaluación del comportamiento ante los eventos sísmico de las estructuras en tapia pisada es la caracterización de los parámetros del cortante, los cuales son el ángulo de fricción ϕ y la cohesión c . Estos parámetros alimentan los modelos numéricos del material de la tierra comprimida [6].

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Estudiar los cambios de la resistencia a la tracción que pueden sufrir los muros en tapia pisada con inclusión de biomasa residual, utilizando suelos de la ciudad de Bucaramanga, Santander.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar suelos disponibles en el área metropolitana de Bucaramanga en el departamento de Santander, aptos para la construcción de muros de tapia pisada.
- Analizar el comportamiento a la tracción de la tapia pisada con inclusión de biomasa residual mediante el ensayo a tracción en cilindros.
- Analizar la influencia de la composición granulométrica del material en el comportamiento a tracción.

2. Marco teórico

En el ámbito de la arquitectura y construcción con tierra los conceptos de suelo y tierra se diferencian el uno del otro ya que se considera a la tierra como el suelo adecuado para la construcción y el concepto de suelo involucra una parte de clasificación y caracterización [7].

2.1 La tapia pisada

La tierra apisonada o tapial es una técnica constructiva en este ámbito de la arquitectura y construcción con tierra y consiste en rellenar un encofrado de 60 a 50 cm de altura con capas de tierra de 10 a 15 cm compactadas mediante un pisón de manera manual, eléctrica o neumática. Este método por lo general se realiza con suelos presentes en los lugares de construcción y por lo tanto necesita de una adecuada selección de la tierra como materia prima de construcción proveniente de un suelo. Los pisones usados para esta técnica no deben tener una base menor a 60 cm² ni mayores a 200 cm² y su peso debe estar entre 5 a 9 kg [8].

2.2 Formación y origen de los suelos

El suelo que es donde se obtiene la tierra que es la materia prima de esta técnica proviene de los procesos de erosión de las rocas en la corteza terrestre a causa de las acciones físicas (gravas, arenas o limos) y químicas (arcillas) ocurridas a lo largo de la historia. A las causas de la erosión producto de las acciones físicas se les conoce como erosión in-situ y erosión por transporte. La primera es causada por cuatro fenómenos, el primero es los cambios de temperatura que sufre a

lo largo del tiempo y que por acción repetitiva produce el rompimiento de la roca madre. El segundo causal es el crecimiento de cristales debido al paso del agua en las grietas y microfisuras de la roca que por acción de cambios de temperatura puede congelarse y finalmente agrandar la fisura y quebrar la roca madre por tracción. La tercera causa de erosión física in-situ es producto de las tensiones de la corteza terrestre como por ejemplo los terremotos. La cuarta y última causa de la erosión física in-situ es la que es producto de la acción de la gravedad y que al momento de presentar el golpe termina generando partículas de menor tamaño. Por su parte la erosión por transporte es provocada por la acción del agua, el viento y los glaciares que funcionan como transporte del material de manera natural hasta un depósito final. Las causas químicas de la erosión por su lado producen la mayor cantidad de suelos finos y partículas de arcilla y los principales actores en estos procesos son: la hidratación consiste en la adición de agua a otro compuesto causando la generación de uno nuevo, la hidrólisis que consiste en la descomposición química de las sustancias por medio del agua, la disolución que a pesar de ser un fenómeno físico en este tema específico actúa acompañado de una combinación y cambio químico y finalmente tenemos el fenómeno por oxidación que actúa en los óxidos ferrosos cambiándolos a óxidos férricos debido a la liberación por hidrólisis de los primeros [9].

La tierra está compuesta por arcilla, limo, arena y en algunas ocasiones material de mayor tamaño como grava y piedras. Las arcillas son producto de la erosión del feldespato y algunos otros minerales como la mica y la illita. Sus tonos característicos son el amarillo y el rojo debido a que las arcillas se mezclan con componentes químicos como el óxido de hierro, aunque también se puede encontrar un tono marrón debido a la presencia de manganeso o blanco ante la presencia de cal y el magnesio blanco. El rol de la arcilla es muy importante en la selección del suelo ya que esta va a funcionar como unión entre los limos, arenas y gravas, materiales estos

que tienen propiedades distintas a las de las arcillas y son producto de la erosión de las rocas. La capacidad aglutinante y la resistencia a la compresión de los suelos que van a ser usados como tierra dependen del tipo y la cantidad de cationes [8].

Los horizontes del suelo

Los suelos de donde se extrae el material para la construcción en tierra tienen perfiles estratigráficos variados producto de los procesos históricos de la erosión en las diferentes regiones del mundo, cuando estas características son producto de los procesos de pedogénesis reciben el nombre de horizontes genéticos o horizontes del suelo [10].

El Soil Survey manual clasificó los horizontes en diez y los simbolizó con las siguientes letras: O, L, V, A, E, B, C, R, M y W que identifican los distintos horizontes y capas del suelo, en la tabla 1 se presenta una breve descripción según el Soil Survey manual de los distintos tipos de capas [11].

Tabla 1. Descripción de los horizontes del suelo según el Soil Sorvey manual.

Horizonte del suelo	Descripción
O	Presencia en gran cantidad de materiales orgánicos y muy poco de material mineral.
L	Incluye material orgánico y mineral
V	Son horizontes minerales y fueron formados en la superficie del suelo o bajo una capa de fragmentos de toca
A	Son horizontes minerales que se encuentran en la superficie del terreno o debajo de un horizonte O.
E	Son horizontes minerales cuya mayor característica es la perdida por eluviacion de las arcillas de silicato, hierro, aluminio o alguna combinación entre estos que terminan por causar una concentración alta de arena y limos.
B	Son horizontes minerales en las que ya no quedan vestigios de la estructura de roca original y se encuentran formados por debajo de los horizontes A, V, E ó O. Este tipo de horizonte presenta propiedades causadas por los procesos de pedogénesis como lo es la concentración aluvial de arcillas, hierro, aluminio, humus, carbonatos, yeso y sílice; concentración de óxidos, sesquióxidos y arcillas; los recubrimientos de sesquióxidos que producen una coloración mas roja en tono que los horizontes inferiores y superiores.
C	Son horizontes minerales en donde los procesos de pedogénesis no han actuado. En este horizonte se incluyen las capas que presentan gran cantidad de sílice, carbonatos, yeso que no presentan relación genética con los horizontes superiores.
R	Están compuestos por roca fuertemente cementada o endurecida. El granito, la cuarcita, el basalto y la arenisca son ejemplos de este tipo de horizonte.
M	Representan las capas de material manufacturado por el hombre como por ejemplo geotextiles, asfaltos y concretos.
W	Representan la presencia de agua como capa en el suelo.

Fuente: Autor a partir de (Soil Sorvey manual)

En la construcción en tierra se descarta el uso del suelo de los horizontes tipo O y el tipo A puede resultar no viable, mientras que los más viables son los tipo E y tipo B [12]. En las zonas semiáridas y áridas es probable conseguir suelos adecuados en las superficies mediante la remoción de todo el material orgánico presente, en general las propiedades más importantes para la selección de suelos para la construcción en tierra son la composición granulométrica, la plasticidad y la retracción; mientras que las propiedades importantes para la fase de control durante la ejecución son la humedad y el grado de compactación [7].

2.3 Identificación y selección de suelos para la tapia pisada

Al ser una técnica vernácula la tapia pisada se vale de la tierra in situ de la zona de construcción y para analizar esta hace uso tanto de ensayos de campo como de ensayos de laboratorio que permiten la identificación, selección y mejoramiento de las propiedades de la tierra presente en el área [7].

2.3.1 Ensayos de campo

Test del vidrio

Este test se basa en la sedimentación y consiste en colocar en un recipiente cilíndrico y transparente una porción de tierra seca correspondiente a $1/3$ del tamaño del recipiente para luego adicionar agua a $2/3$ de la altura del recipiente y agitar vigorosamente para luego dejar en reposo durante una hora para luego volver a agitar y dejar en reposo durante otra hora para realizar los cálculos presentados en la ilustración 3 de acuerdo a los diferentes contenidos de arcilla, limo y arena.

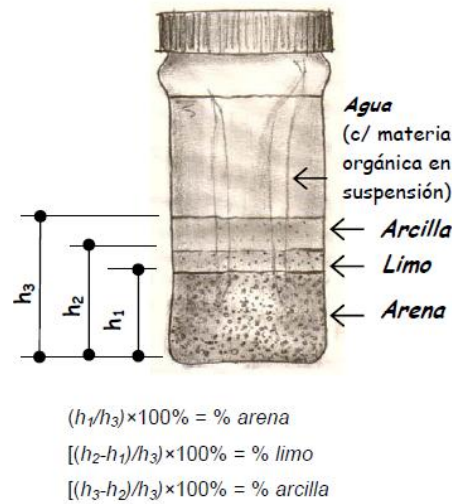


Ilustración 3. Test de sedimentación.

Fuente: Manual de selección de suelos y métodos de control en la construcción en tierra de Proterra

Estos diferentes porcentajes de arena, limo y arcilla permiten clasificar el tipo de suelo de acuerdo a la ilustración 4 y también permiten identificar la aptitud del suelo para la construcción en tapia pisada, como también identificar que suelos no son aptos y cuales necesitan ser estabilizados en base a la ilustración 5.

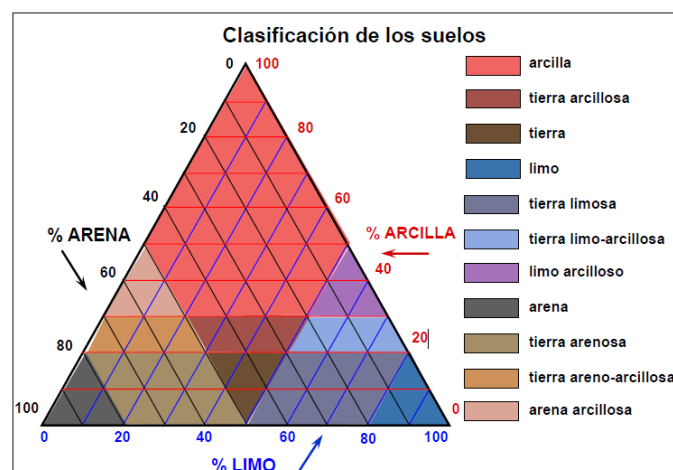


Ilustración 4. Clasificación de los suelos mediante el test del vidrio.

Fuente: Manual de selección de suelos y métodos de control en la construcción en tierra de Proterra

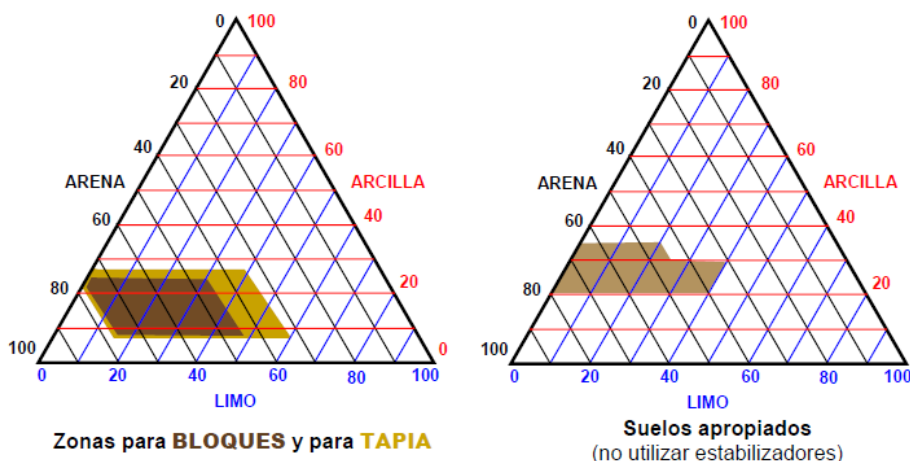


Ilustración 5. Composición granulométrica de suelos aptos para la construcción con tapia pisada.

Fuente: Manual de selección de suelos y métodos de control en la construcción en tierra de Proterra

Test del cordón o ensayo de consistencia

Este test consiste en formar con la muestra de material un cordón que se rompa con 3mm de diámetro para luego con este formar una bola que se va aplastar con el pulgar, en base a el esfuerzo que se necesite para quebrar la bola se puede obtener información sobre la composición de la muestra, como se indica en la tabla 2.

Tabla 2. Test del cordón.

Tipo del cordón	Ruptura de la bola	Clasificación y interpretación
Duro	Solo se puede quebrar la bola con mucho esfuerzo o no se quiebra	Demasiada arcilla; tierra de alta plasticidad
Suave	Poco resistente, se fisura y desmorona fácilmente	Tierra arcillo limosa, arenosa o areno-arcillosa; plasticidad mediana
Frágil	Frágil. No se puede remoldar la bola debido a su fragilidad	Bastante limo o arena y poca arcilla; baja plasticidad
Suave y esponjoso	Esponjosa y suave. Si es comprimida, vuelve a esponjarse	Suelo orgánico. No es apto para ningun tipo de construcción

Fuente: Autor a partir de (Manual de selección de suelos y métodos de control en la construcción en tierra de Proterra)

Test de la cinta

Este test relaciona la plasticidad con el tipo de tierra mediante un experimento que consiste en formar con la tierra húmeda un cordón del tamaño de un cigarrillo con el cual se arma una cinta de 3 a 6 mm de espesor y del largo que sea posible. En base a esto se analizan los resultados de acuerdo a la tabla 3.

Tabla 3. Test de la cinta.

Tipo de la cinta	comportamiento de la cinta
Es posible formar una cinta de 25 a 30 cm sin dificultad	Mucha arcilla; tierra de alta plasticidad
Es posible formar una cinta de 5 a 10 cm con dificultad	Tierra arcillo-limosa, arenosa o areno-arcillosa; plasticidad mediana
No se hace la cinta	Bastante limo o arena y poca arcilla; sin plasticidad

Fuente: Autor a partir de (Manual de selección de suelos y métodos de control en la construcción en tierra de Proterra)

Test de cohesión o ensayo de caída de bola

Este test consiste en formar una bola con el menor contenido de humedad posible del tamaño de la mano, para luego ser arrojada en posición perpendicular al suelo a una altura entre 1 y 1,5 m de alto. Los resultados de la prueba se analizan según las fisuras ocasionadas por la caída de la bola. Entre menos fisuras el material presenta mayor contenido de arcillas y más fisuras representan un material con poco contenido de estas y más contenido de arenas.

Test de la resistencia seca

Este test clasifica la tierra según su resistencia mediante la creación de pastillas de tierra húmeda de 1 cm de espesor y diámetro entre 2 a 3 cm, las cuales son dejadas al sol durante dos o más días para luego ser falladas con el índice y el pulgar. Los resultados son analizados según la tabla 4.

Tabla 4. Test de la resistencia seca.

Esfuerzo de ruptura	Comportamiento	Clasificación e interpretación
Resistente	No se pulveriza	Suelo inorgánico de alta plasticidad; arcilla
Poco resistente	Es posible reducir los pedazos a polvo	Tierra arcillo limosa, tierra arcillo arenosa o arena arcillosa.
No resiste	Fácil disgregación	Falta de cohesión. Suelo arenoso, limoso inorgánico u otro con poca arcilla

Fuente: Autor a partir de (Manual de selección de suelos y métodos de control en la construcción en tierra de Proterra)

Test del rollo o contenido ideal de arcilla para la tapia pisada.

Este test consiste en verificar los contenidos de arcilla adecuados para la construcción con tapia pisada formando un rollo de 20 cm de largo y 1,5 cm de diámetro para luego ser expuesto a un voladizo de manera gradual. En base al quiebre del rollo se analizan los datos en la tabla 5.

Tabla 5. Test del rollo.

ruptura del cordón	interpretación
menos de 80 mm	no hay arcilla suficiente
entre 80 y 120 mm	cantidad ideal de arcilla
mayor a 120 mm	exceso de arcilla

Fuente: Autor a partir de (Manual de selección de suelos y métodos de control en la construcción en tierra de Proterra)

2.3.2 Ensayos de laboratorio

Granulometría

La composición de la tierra se puede observar mediante la distribución granulométrica, que según Rico y Del Castillo se denomina como la distribución granulométrica de un suelo a la división del mismo en diferentes fracciones, seleccionadas por el tamaño de sus partículas componentes; las partículas de cada fracción se caracterizan porque su tamaño se encuentra comprendido entre un valor máximo y un valor mínimo, en forma correlativa para las distintas fracciones, de tal modo que el máximo de una fracción es el mínimo de la que le sigue correlativamente [13].

Esta composición se visualiza por lo general a través de lo que se conoce como una curva granulométrica, la cual se encarga de mostrar la relación entre cantidad y dimensión de las partículas presentes [7]. En el eje vertical se visualiza el peso en porcentajes del total de cada tamaño de grano presente en la muestra, parámetro el cual se grafica en el eje horizontal usando una escala logarítmica en un formato como el que se observa en la ilustración 6.

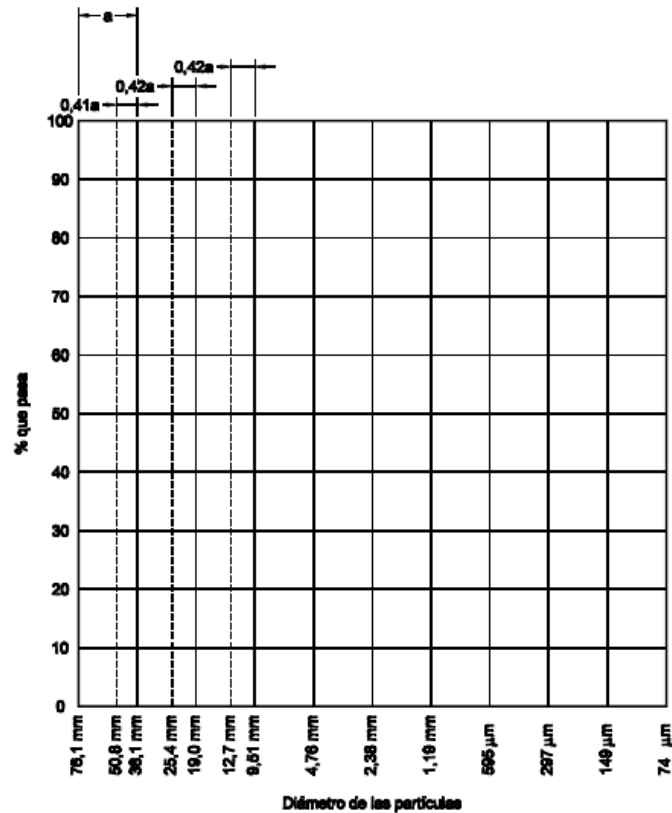


Ilustración 6. Formato para dibujo de curva granulométrica.

Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC-1522

Para la determinación de las partículas menores a $75\mu\text{m}$ se utiliza un proceso de sedimentación mediante el uso de un hidrómetro el cual mide la velocidad de decantación de las partículas presentes en el agua en relación al cambio de la densidad de la solución [14].

Para la tapia pisada una granulometría adecuada es aquella que se encuentra entre los límites porcentuales mostrados en la tabla 6.

Tabla 6. Límites porcentuales de granulometría adecuada para construcción en tierra comprimida.

Límites porcentuales de granulometría para la construcción en tapia pisada	
Gravillas	0 al 15%
Arenas	40 a 50%
Limos	20 al 35%
Arcillas	15 a 25%

Fuente: repositorio.sena.edu.co

Ensayos de plasticidad mediante los límites de Atterberg

Se conocen como límites de Atterberg a el límite líquido (LL), límite plástico (LP) y límite de contracción (LC) y se denominan así en honor al científico sueco que desarrolló estos conceptos que giran alrededor del comportamiento del suelo en relación a los contenidos de agua presentes en estos. El límite líquido se define como el contenido de humedad según el porcentaje de peso del suelo seco entre el límite entre el estado plástico y líquido de este; Este límite se encuentra usando la cápsula de Casagrande mediante el número de golpes necesarios para que dos mitades de una muestra se unan. Por su parte el límite plástico se define como el contenido de humedad existente en un suelo en medio del estado plástico y sólido del mismo, la diferencia entre el límite líquido y el plástico es el índice de plasticidad que es un indicador del intervalo plástico del suelo; este límite se define como el menor contenido de humedad mediante el cual puede ser moldeada una muestra en barras con forma cilíndrica de diámetro cada vez menor hasta llegar a los 3mm de diámetro. El límite de contracción es el contenido de agua en el cual el volumen de suelo ya no se atenúa cuando se seca, este límite se diferencia de los demás ya que es producto de un hecho físico que es causado en el momento en que la tensión capilar alcanza su valor

máximo de manera que la evaporación produce la retracción del agua hasta el interior del suelo [15].

Ensayo de humedad y compactación

La resistencia y la durabilidad de la tierra usada como material de construcción está íntimamente relacionada con el grado de humedad en el cual se consigue la mayor masa específica seca y la menor porosidad, este grado de humedad es conocido como grado de humedad óptimo de compactación y por lo general se encuentra con un ensayo de laboratorio conocido como ensayo normal de compactación [7], el cual en Colombia está regido por la norma INVIAS E-141.

Para fines experimentales es posible usar la fórmula de energía de compactación para calcular el número de golpes necesarios por capa en base a la energía de compactación del ensayo Proctor [16], tal como se puede observar en la ecuación 1.

Ecuación 1. Cálculo del número de golpes por capa.

$$N = \frac{E * V}{n * w * h}$$

En donde E es la energía de compactación Proctor (6kg*cm/cm³), V el volumen de suelo compactado, n el número de capas, w el peso del pisón y h la altura de caída del pisón.

Existen también datos que muestran algunas humedades óptimas de compactación basadas en la clasificación del suelo, como el que se puede observar en la tabla 7.

Tabla 7. Valores probables del ensayo de Proctor modificado.

valores probables del Ensayo proctor modificado	
Tipo de suelo	Valor porcentual probable del contenido optimo de humedad
Grava tipo afirmado	4 a 8
Arena	6 a 10
Arena limosa	8 a 12
Limo	11 a 15
Arcilla	13 a 21

Fuente: Autor a partir de (mecánica de suelos 1 UNH 2014)

Expansión y retracción

La expansión es el fenómeno que experimenta el barro al entrar en contacto con el agua, mientras que la retracción ocurre al secado de éste. Estos fenómenos se deben evitar y básicamente dependen del tipo y la cantidad de arcillas presentes y de la distribución granulométrica del limo y la arena. En Colombia mediante el ensayo INVIAS E-127 es posible calcular los límites de contracción, la relación de contracción, el cambio volumétrico y la contracción lineal [17].

2.4 Fuerzas internas

Se conoce a la tracción y a la compresión como los efectos internos de las fuerzas que actúan en un cuerpo y cuyo objetivo es el de conocer las deformaciones de los cuerpos de variadas formas y bajo diferentes cargas. El caso más básico para analizar el comportamiento de los materiales a la tracción y la compresión es el de la barra cargada axialmente, recta y de sección constante la cual se ve sometida a dos fuerzas colineales en sentidos opuestos en el centro de la

sección, que según su dirección se conocerán como tracción o compresión, como se puede apreciar en la ilustración 7 [18].

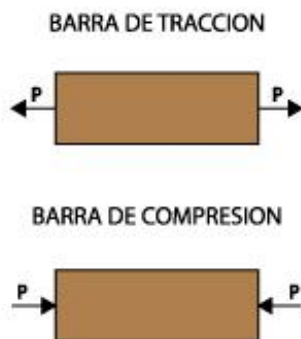


Ilustración 7. Fuerzas internas.

Fuente: Autor a partir de (Nash, William A. Resistencia de materiales)

Para que se presente un equilibrio estático se debe presentar la misma magnitud en las fuerzas y estas originan otras fuerzas internas dentro de la barra las cuales se pueden estudiar con un plano que corte en un punto cualquiera que sea perpendicular al eje longitudinal y no estar ubicado cerca a los extremos de la barra. Si se supone que se quita la parte de la barra que se encuentra a la derecha del plano de corte, deberá cambiarse por el efecto que ejerce sobre la parte izquierda de manera que las fuerzas que eran internas en un principio se convierten ahora en externas respecto a la parte del cuerpo que queda, por lo tanto para que exista equilibrio en la parte de la izquierda debe haber una fuerza horizontal e magnitud P que es en realidad la resultante de las fuerzas repartidas que actúan en el plano de corte en sentido perpendicular, como se puede apreciar en la ilustración 8 [18].

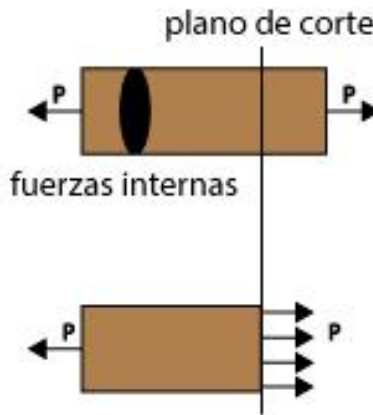


Ilustración 8. Equilibrio estático.

Fuente: Autor a partir de (Nash, William A. Resistencia de materiales)

Curva tensión deformación

Es la gráfica que se obtiene mediante los pares de valor de la tensión normal y la deformación normal. La deformación normal es el alargamiento por unidad de longitud, es decir $\epsilon = \frac{\Delta}{L}$. Mientras que la tensión normal es la intensidad de la fuerza normal por unidad de superficie y se expresa de este modo $\sigma = \frac{P}{A}$.

Los elementos en tierra al ser materiales frágiles tienen una curva tensión-deformación característica como la mostrada en la ilustración 9 en donde además se presenta un límite elástico convencional el cual ocurre cuando el material presenta una deformación permanente cuando se suprime la carga, esta es representada con la letra Y [18].

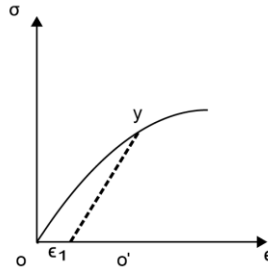


Ilustración 9. Curva tensión deformación para materiales frágiles.

Fuente: Autor a partir de (Nash, William A. Resistencia de materiales)

Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es la relación entre la tensión unitaria y la deformación unitaria, también se conoce como módulo de Young y tiene las mismas unidades que la tensión. Su estudio se va a limitar a la región lineal de la curva tensión de formación como se puede apreciar en la ilustración 10.

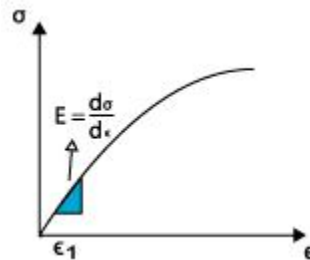


Ilustración 10. Módulo de elasticidad

Fuente: Autor a partir de (Nash, William A. Resistencia de materiales)

En los elementos en tierra comprimida de este módulo va depender de la escala del espécimen y los métodos de medida debido a la importancia del contenido de agua y la energía de compactación en el comportamiento de estas estructuras [19].

2.5 Esfuerzos de tracción en tierra comprimida

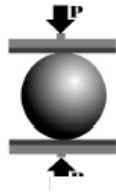
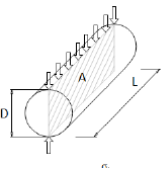
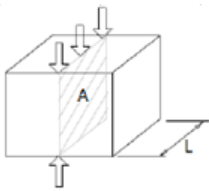
Los esfuerzos a tracción en la tierra comprimida son causados por los impedimentos de las deformaciones los cuales producen grietas debido a los bajos parámetros de la resistencia a la tracción de estos elementos estructurales [20], en muros de tierra comprimida mediante ensayos en mesas vibratorias se observaron fallas a tracción en la parte baja de estos por la acción de cargas sísmicas lo cual hace importante mejorar este parámetro para el desempeño de estas estructuras ante los eventos sísmicos [21].

Para evaluar estos esfuerzos de tracción en los geo materiales se hacen usos de diversos test como lo son el ensayo de tracción directa, el ensayo de flexión y el ensayo de tracción indirecta [22].

Ensayo de traccion indirecta

Como se mencionó en el planteamiento del problema, el estudio de la resistencia a la tracción en la tapia pisada es relevante ya que las fallas están asociadas a las deformaciones unitarias últimas por tracción. La resistencia a la tracción del barro en estado plástico depende principalmente del contenido y los tipos de minerales de arcillas presentes en el material [8]. Para conocer los esfuerzos producidos por la tracción se hace uso de la teoría de elasticidad para materiales frágiles mediante el uso de prensas de carga vertical que fallan los distintos especímenes según su forma como se indica en la tabla [5].

Tabla 8. La forma en el ensayo a tracción indirecta.

Forma	Esfuerzo máximo de tracción horizontal	Nomenclatura	imagen
Esferica	$\sigma_t = \beta \cdot P / 2\pi R^2$	P= Carga maxima vertical; R= Radio de la esfera; β =factor de ajuste	
Cilindrica	$\sigma_t = 2P / \pi \cdot A$	P= Carga maxima vertical; A=L*D	
Cubica	$\sigma_t = \phi \cdot 2P / \pi \cdot L^2$	ϕ = factor de ajuste; L = lado del cubo. A=area	

Fuente: Autor a partir de (Vargas–Neumann. Normas de Tierra: Ensayos de Tracción Indirecta)

Debido a la forma cilíndrica del espécimen y a la geometría de las cargas aplicadas en el ensayo de tracción indirecta se forma una zona de tensión a lo largo del eje vertical debido a la distribución de las tensiones que se producen durante la aplicación de las cargas de compresión diametral [23] las cuales propician la falla por tracción de los materiales de naturaleza frágil como se puede observar en la siguiente ilustración.

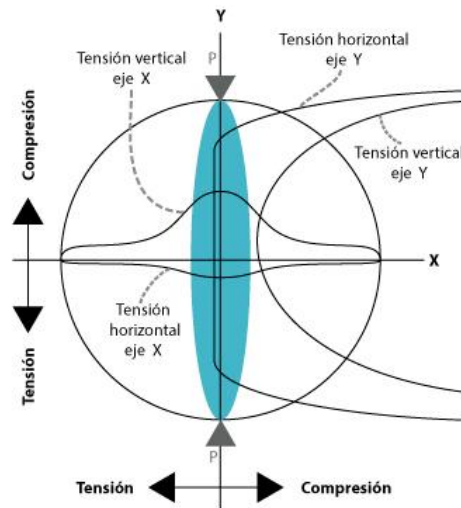


Ilustración 11. Distribución de tensiones teóricas [24]

Fuente: Autor a partir de (Hadley, W. O., Hudson, W. R., & Kennedy, T. W. (1969). *An evaluation of factors affecting the tensile properties of asphalt-treated materials*. Center for Highway Research, University of Texas at Austin)

De acuerdo a la norma ASTM C1144-89 [25], las fallas más comunes que se presentan en el ensayo de tracción indirecta son la falla a tracción normal la cual es la ideal para determinar la tensión. Además de esta también se puede producir una falla conocida como de triple hendimiento la cual es una variación del primer tipo de rotura mencionado y cuyos resultados también se consideran válidos para obtener la resistencia a la tracción. También es posible que durante el ensayo se presenten fallas de compresión y corte en los cuales los especímenes se trituran cerca de los puntos de aplicación de la carga o en cualquier punto lejos de la carga diametral haciendo que los resultados sean inválidos como resultado de la resistencia a la tracción. En la siguiente ilustración se pueden observar los anteriormente mencionados tipos de falla.

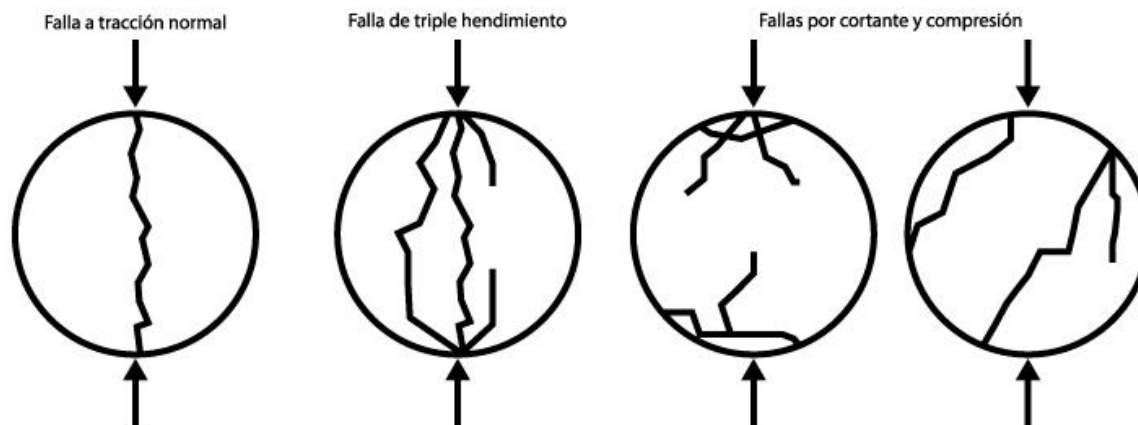


Ilustración 12. Tipos de falla en el ensayo de tracción indirecta cilíndrico

Fuente: Autor a partir de (ASTM., Standard Test Method for Splitting Tensile Strength for Brittle Nuclear Waste Forms, ASTM C1144 - 89 (Reapproved 2004)., 1989)

Para encontrar el esfuerzo máximo a tracción la norma Peruana E080 propone trabajar con el ensayo brasileño de tracción el cual utiliza las formas cilíndrica (6 x 12 cm o 15.24 x 30.48 cm de diámetro y largo) y trabaja con humedades iniciales de 20 a 25% para el control de adobes y 10 a 15 % para el control del tapial, en esta norma se sugiere un secado cubierto al sol y al viento de 28 días en donde de seis muestras ensayadas se selecciona el promedio de las cuatro mejores, el cual debe ser según su normatividad mayor a una resistencia ultima de $0.08\text{MPa} = 0.81\text{ kgf/cm}^2$ [26].

2.6 Influencia de la composición química de los materiales en el comportamiento a tracción.

Se ha observado en distintos estudios los efectos de la presencia de hidróxido de calcio y cloruro de magnesio y sus efectos positivos cuando las concentraciones de cloruro de magnesio son menores al 15% [27] como también se han notado los efectos negativos de la presencia de

altos contenidos de cloruro de magnesio ya que el hidróxido de calcio no es ionizable en estos niveles afectando de esta manera la cementación artificial [28].

También se ha observado en otros estudios que en suelos ricos en sales los iones de magnesio, cloruro y sulfato impiden la cementación de compuestos como el silicato cálcico hidratado y el aluminato cálcico hidratado disminuyendo así las propiedades físico mecánicas de los elementos en tierra comprimida [29].

2.7 Biomasa residual de caña de azúcar

En Colombia el cultivo de caña de azúcar es el segundo cultivo de mayor extensión con una producción de aproximadamente de 6 millones de toneladas de las cuales 5 millones terminan siendo quemados en calderas [30]. En la caña de azúcar Estudios revelan la presencia de magnesio (además de nitrógeno, fosforo, potasio, calcio y azufre) debido a la acumulación de macronutrientes durante los procesos de absorción durante el crecimiento de la planta [31] así como también en la sílice extraída a partir del residuo del bagazo también se puede apreciar presencia de magnesio además de sílice, oxígeno, carbono y potasio [32]. Por su parte las cenizas producto de la quema en calderas mostraron el óxido de silicio como el mayor componente como también presencia de calcio, aluminio, fosforo, potasio y hierro [33].

3. Metodología

El proceso metodológico de este proyecto de investigación está centrado en 4 Etapas que buscan que se pueda lograr en campo las mismas condiciones óptimas de producción que se usaron en el laboratorio para la producción de especímenes de tierra comprimida para el análisis de su resistencia a la tracción, este proceso se puede observar a continuación en la ilustración 11.

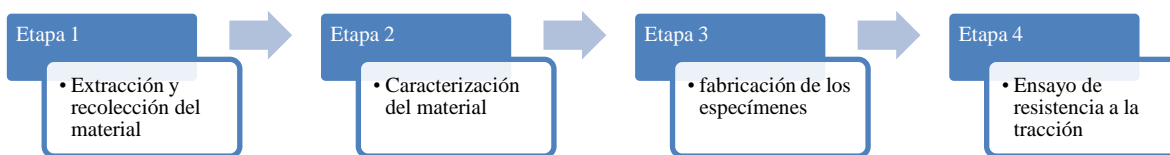


Ilustración 13. Proceso metodológico.

Fuente: Autor

3.1 Etapa 1: Extracción y recolección del material

Para la extracción del material de tierra se realizará el método de apiques o extracción superficial según las condiciones topográficas de los sitios de investigación. La conservación y el transporte de las muestras se realizará de acuerdo a la norma INV E-103-13 la cual tiene por objetivo establecer métodos de conservación para las muestras después de ser obtenidas del terreno para su adecuado transporte y manejo, esta norma clasifica los métodos según las necesidades de la investigación en cuatro grupos distintos (ver tabla 9). Este proyecto clasificaría dentro del grupo B.

Tabla 9. Clasificación INVIAS para extracción y recolección de las muestras según las necesidades de investigación del material.

Grupo A	Grupo B	Grupo C	GRUPO D
Muestras que requieren únicamente identificación visual.	Muestras las cuales necesitan únicamente ensayos de contenidos de humedad y clasificación, compactación y densidad relativa; o el perfil de la perforación; y muestras en bruto para someterlos a ensayos de presión y porcentajes de expansión, consolidación, permeabilidad, resistencia al corte, CBR, estabilómetro, etc.	Muestras intactas, formadas naturalmente o preparadas en el campo para determinaciones de peso unitario; o para realizar medidas de presión y porcentaje de expansión, consolidación, ensayos de permeabilidad y resistencia al corte, con y sin medidas de esfuerzo-deformación y cambios de volumen, incluyendo ensayos dinámicos y cíclicos.	Muestras frágiles o altamente sensibles, para las cuales se requieren los ensayos mencionados para el grupo C.

Fuente: Autor a partir de (INV E-103-13)

Las muestras de este grupo pueden ser conservadas y empacadas en bolsas plásticas alejadas de la humedad y es necesario llevar un registro de fecha, localización, profundidad o cotas de extracción.

3.2 Etapa 2: Caracterización del material

La producción de muros en tierra comprimida necesita primero un proceso de identificación de las características de la tierra que permita conocer las propiedades fundamentales a la hora de su comportamiento estructural como lo son la clasificación granulométrica, la capacidad aglutinante de las arcillas del material y la humedad optima de compactación con la cual se logra la mejor densidad seca entre partículas.

Para la clasificación granulométrica se puede hacer uso de ensayos de campo como los descritos en el marco teórico los cuales permiten tener una noción rápida de las características de la tierra pero para una mayor precisión ingenieril se hace uso del sistema unificado de clasificación de suelos SUCS descrito por la norma INVE-181-13, el cual hace uso del ensayo de

determinación de los tamaños de las partículas INVE-123 así como también de la determinación del límite líquido de los suelos INVE-125 y del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INVE-126.

La capacidad aglutinante de las arcillas para la tapia pisada se puede evaluar con el ensayo de campo de test del rollo y la carta de plasticidad pero para conocer más afondo las propiedades de las distintas arcillas es posible realizar un análisis EDX y SEM los cuales arrojan la composición química e imágenes de hasta de 1'000.000 de aumentos y en escalas de hasta 1 nanómetro de las distintas tierras a trabajar para tener una noción de cómo algunos elementos químicos propios de los distintos materiales contribuyen a cambios de color como también a la capacidad aglutinante de las arcillas.

Finalmente, para conocer la humedad óptima de compactación que permita fabricar los especímenes en sus mejores condiciones se puede realizar el ensayo normal de compactación INVE E-141 o el ensayo modificado de compactación INVE-142. Para este proyecto de investigación se optó por el segundo ya que es el que mayor energía de compactación utiliza y por lo tanto es el que mayores beneficios arrojará gracias a este factor.

3.3 Etapa 3: fabricación de los especímenes para el ensayo a tracción

Para la fabricación de los especímenes para el ensayo a tracción se optó por la forma cilíndrica y se deben tener en cuenta principalmente los factores de humedad óptima y energía de compactación.

Los especímenes se elaboran utilizando el ensayo de Proctor modificado en moldes de 10 cm de diámetro por 12 cm de alto siguiendo el mismo procedimiento mencionado anteriormente

durante la etapa de caracterización ya que con este método es posible simular resultados en campo tal como se puede observar en la ilustración 12 [34].

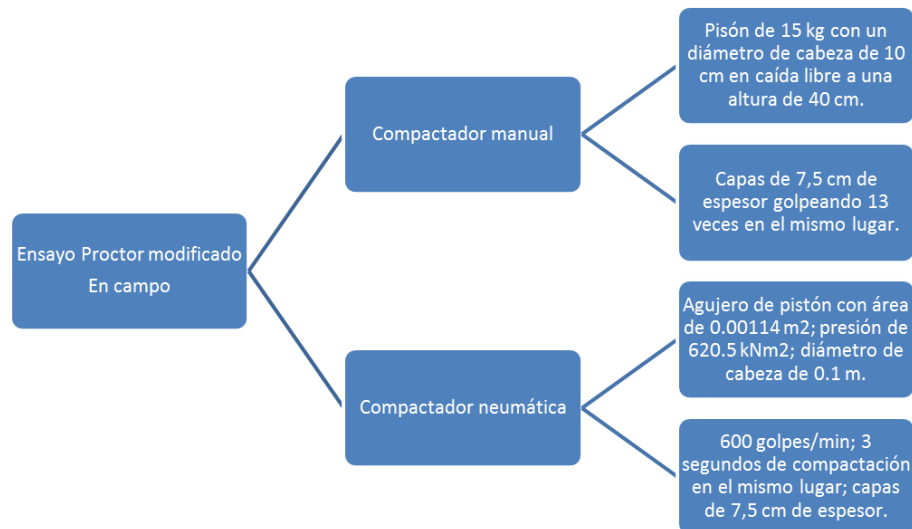


Ilustración 14. Método para obtener las características del Proctor modificado en campo.

Fuente: Autor a partir de (Jafari, Arsalan. 2015).

Por cada tipo de suelo se analizaran cuatro porcentajes distintos de adición de biomasa (0,2, 4 y 6 %) [35] en una cantidad de 4 especímenes por porcentaje utilizando en todos el mismo martillo de compactación y trabajando cinco capas de entre 3 a 4,5 cm de altura.

Finalmente para asegurar la humedad óptima de compactación para la tapia pisada se trabajó con la norma neozelandesa la cual menciona que el contenido óptimo de humedad debe estar dentro del 3% de esta para garantizar la máxima densidad seca del material [35], para lograr esto se trabajó con el procedimiento mencionado en la norma INV E-216-13 cuyo título es “contenido total de agua evaporable de los agregados por secado”, en donde se determina el contenido de

humedad del material mediante un secado en estufa de una muestra húmeda previamente pesada con un método fácilmente reproducible en campo de la siguiente manera:

Ecuación 2. Humedad evaporable de la muestra.

$$Wp = \frac{W - D}{D} * 100$$

Dónde: Wp : Humedad evaporable de la muestra

W : Masa original de la muestra, g;

D : Masa de la muestra secada, g.

Con este valor se dispone así a llevar este contenido de humedad del material al contenido óptimo de humedad para tapia pisada de la siguiente manera.

Ecuación 3. Humedad óptima para tierra comprimida.

$$Wt = Wp + (Wo - Wp) + NZE$$

Dónde: Wt : Humedad óptima para tierra comprimida, %;

Wp : Humedad evaporable de la muestra, %;

Wo : Humedad optima de compactación del Proctor, %;

NZE : Estándar de Nueva Zelanda, 3%.

Para con estos datos encontrar la cantidad de agua necesaria para fabricar un espécimen con la siguiente ecuación y así llevar el material a su humedad adecuada para luego mezclarse con la biomasa residual y ser sometida al proceso de compactación.

Ecuación 4. Cantidad necesaria de agua.

$$Wn = (Wt - Wp) * Wm$$

Dónde: Wn : Cantidad necesaria de agua, [ml];

Wm : Cantidad de tierra [gr]

Finalmente, cada espécimen debe ser cubierto en papel vinipel y almacenado durante catorce días antes de ser sometido a los ensayos de tracción.

3.4 Etapa 4: Ensayo de resistencia a la tracción

El ensayo de resistencia a la tracción se realizara utilizando la forma cilíndrica detallada antes en la tabla G basándonos en la norma ASTM C-496-96 que lleva por nombre método estándar para la resistencia a la tracción en especímenes de concreto, la cual hace uso de una máquina de prueba que aplique cargas continuas y sin impactos a un rango de 100 a 200 psi por minuto, haciendo uso si es necesario de una placa de cojinete y unas barras de rodamiento de 2,5 cm aproximadamente de ancho y una longitud del tamaño del espécimen si la maquina lo necesita como se puede apreciar en la siguiente ilustración 13.

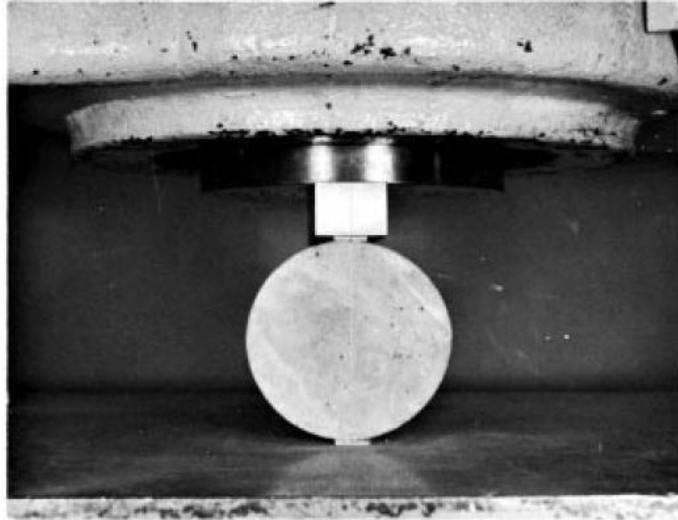


Ilustración 15. Montaje de ensayo de resistencia a la tracción.

Fuente: ASTM C-496-96

Los datos necesarios en este ensayo para los cálculos de la resistencia a la tracción son los siguientes [36]:

Ecuación 5. Resistencia a la tracción en ensayo de tracción indirecta con forma cilíndrica.

$$T = 2P/\pi ld$$

Dónde: T: Resistencia a la tracción, psi (kPa);

P: Carga máxima aplicada indicada en la máquina, lbf (kN);

l: Longitud, in (m);

d: diámetro, in (m).

Toda esta información se recolectará y se reportará como se indica en la siguiente tabla 10:

Tabla 10. Formato de recolección de datos del ensayo de resistencia a la tracción indirecta.

suelo	% biomasa	Peso, gr	Diametro, m	Longitud, m	Carga Maxima, lbf	Carga Maxima, kN	Resistencia a la tracción, kPa	volumen, m3	densidad, gr/m3

Fuente: Autor a partir de (ASTMC-496-96)


Además, se tomará registro de las cargas y desplazamientos (medidos por el transductor de desplazamiento externo) por medio de videos para la obtención de las relaciones de esfuerzo-desplazamiento.

de algunas que cumplieron su función alguna vez. El B se encuentra en la Comuna 6 en el barrio La Concordia en la dirección Diagonal 15 #52 (Frente a la Parroquia nuestra señora del perpetuo Socorro) una vía de Bucaramanga donde confluyen varios barrios de la ciudad como La Concordia, San Miguel, Candiles, Aeropuerto Gómez Niño, Ricaurte, La Ceiba, La Salle y La Victoria, lugares donde todavía se conservan algunas construcciones en tierra. Por último, la tierra C se obtuvo de la Comuna 11 sur en el sector de los chircales (cantera de la ladrillera Olarte) sector en donde por sus formaciones geológicas se ubican varias ladrilleras con sus respectivas canteras. Un acercamiento visual de las condiciones sociales, culturales y de construcciones en tierra es presentada en el Anexo A por medio de fotografías de los distintos sectores.

4.1 Etapa 1: Extracción y recolección del material

Para la extracción del material de tierra se procedió a ir a los respectivos lugares con las herramientas necesarias como lo son la pica, la pala y las bolsas plásticas de alta resistencia para la recolección de aproximadamente 60 kilos de material por zona para el desarrollo completo de la metodología. En la tabla 11 se describen los métodos de extracción para cada uno de los suelos y sus respectivos detalles.

Tabla 11. Extracción de los materiales.

Material	Tipo de extracción	Detalle	Fotografía
A	Apique	1,75m de profundidad x 1,5 m de ancho x 1,5 de largo por debajo de un horizonte tipo M	
B	Apique	1,5m de profundidad x 0,5m de ancho x 1,5m de largo por debajo de horizontes tipo M.	
C	Superficial	El material estaba sobre el pie de un talud de la zona y se extrajo en condición grumosa.	

Fuente: Autor

Después de extraído y recolectado el material se transportó hasta el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga en donde se almaceno en el laboratorio de suelos.

Por su parte la biomasa residual proviene del centro de investigación de la caña de azúcar en el valle del cauca y es producto del residuo de la extracción del jugo de esta.

Este residuo se sometió a un proceso de trituración para reducir su tamaño como se puede observar en la ilustración 15 para luego ser cernido en el tamiz No 4, con el cual alcanzo una

textura y tamaños como se pueden observar en la ilustración 16 en donde las longitudes máximas de las fibras son alrededor de los 5 cm.

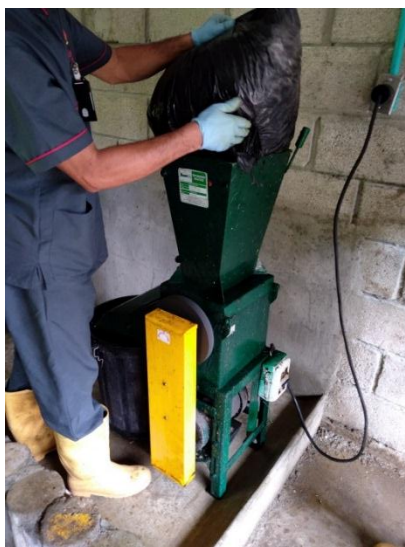


Ilustración 17. Trituración de la biomasa residual de caña.

Fuente: Autor



Ilustración 18. Tamaños y texturas de la biomasa residual de caña.

Fuente: Autor

4.2 Etapa 2: Caracterización del material

Clasificación granulométrica

Como se mencionó en la metodología para la clasificación granulométrica de los materiales se hará uso del sistema unificado de clasificación de suelos el cual clasifica estos en base a los resultados de los ensayos de distribución de los tamaños de las partículas, determinación del límite líquido de los suelos y del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. Una clasificación mediante ensayos de campo se puede observar en el Anexo B.

Ensayo de determinación de los tamaños de las partículas INVE-123

En este ensayo para cada uno de los suelos se pesaron 500 gr de material secado al horno para después ser sometido a un cuidadoso lavado por medio de el tamiz 200 (ver ilustración 17) en el cual el material retenido en éste se almaceno en un platón metálico previamente pesado para ser sometido a un nuevo proceso de secado al horno a 120°C durante uno a dos días del cual se tomó registro de su peso finalizado este secado.



Ilustración 19. Lavado del suelo en el tamiz 200.

Fuente: Autor

Posteriormente el material secado es tratado por medio de un proceso de tamizado a través de un juego de tamices como el mostrado en la ilustración 18 para luego mediante una agitación manual durante 20 minutos registrar la masa retenida en cada uno de estos.

Tamiz No	Diam (mm)
4	4,75
10	2
20	0,84
40	0,425
60	0,25
140	0,106
200	0,075
BANDEJA	




Ilustración 20. Juego de tamices usados.

Fuente: Autor

Con los datos de masa retenida en cada uno de los tamices se obtuvieron los resultados presentados en el Anexo C de los cuales se obtuvieron los siguientes datos relevantes para la clasificación como se puede apreciar en la tabla 12.

Tabla 12. Resultados para clasificación SUCS obtenidos del ensayo INVE-123.

Datos	Material		
	A	B	C
Gravas	0.3%	6.3%	0%
Arenas	85.4%	71.1%	38.7%
Limos y Arcillas	14.3%	22.7%	61.3%
CU	3.93	5.57	2.11
CC	0.78	0.91	0.99

Fuente: Autor

Ensayo de determinación del límite líquido de los suelos INVE-125

Para este ensayo es necesario tamizar mediante el tamiz No 40 la cantidad suficiente de material necesaria para llenar una tasa cerámica especial para laboratorio de suelos.

Se aplicó cuidadosamente un contenido de humedad para llevar el material a su límite líquido, este estado de humedad se observa cuando el material se vuelve una pasta uniforme como se puede ver en la ilustración 19. Obtenida esta pasta uniforme se dispone a colocarse la pasta sobre la cazuela de Casagrande encima del punto donde esta descansa en la base para comprimirse y extenderse utilizando una espátula mediante movimientos paralelos a la base de la cazuela (ver ilustración 20) hasta dejarla con una profundidad de 10 mm en el punto de mayor espesor teniendo el cuidado de no pasar muchas veces la espátula y sin dejar vacíos.



Ilustración 21. Pasta en estado de humedad para aplicarse a la cazuela.

Fuente: Autor

Después de colocada la muestra sobre la cazuela con las recomendaciones anteriores, esta se corta mediante el uso de un ranurador por todo el centro de la muestra, para así activar el mecanismo eléctrico de la cazuela previamente calibrada y marcar el número de golpes necesarios para que se junten 13 mm de la muestra dividida para luego retirar el material que se juntó en esta zona con una espátula y almacenarlo en una capsula previamente pesada para finalmente obtener su peso seco mediante un proceso de 2 días de secado al horno a 120°C.



Ilustración 22. Aplicación de la pasta a la Casagrande.

Fuente: Autor

Todo este proceso se repite a distintas humedades limpiando la cazuela y la espátula para obtener datos en los rangos de 25-35; 20-30 y 15-25 golpes.

Finalmente, de los datos obtenidos se logran los resultados presentados en el Anexo D y cuyos datos clave son presentados a continuación en la tabla 13.

Tabla 13. Resultados para clasificación SUCS del ensayo INVE-125.

Límites líquidos de los suelos		
A	B	C
35%	34%	32%

Fuente: Autor

Ensayo de límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INVE-126.

Para este ensayo se tamiza mediante el tamiz No 40 la cantidad suficiente de material para formar 4 bolas de 2 gr de material humedecido hasta alcanzar una consistencia pastosa como se puede observar en la ilustración 21.



Ilustración 23. Bola de 2 gramos para ensayo de límite plástico e índice de plasticidad.

Fuente: Autor

Se toma esta masa y se hace rodar entre la palma de la mano o los dedos sobre una placa de vidrio hasta formar rollos de diámetros uniformes e ir reduciendo su diámetro a 3.2 mm para luego dividir este rollo en varios trozos y juntarlos hasta formar otra masa elipsoidal para luego ser enrollada de nuevo para volver a formar rollos de 3,2 mm hasta que no se puedan remodelar más, cuando esto pasa dichos pedazos se separan de los demás y se almacenan en capsulas previamente pesadas para ser tomar su peso en estado húmedo y luego en estado seco.

El límite líquido se calcula como la diferencia porcentual entre peso del agua y peso del suelo seco con los datos obtenidos del proceso anterior y sus resultados pueden ser observados en el Anexo D. A continuación se presentan los datos claves obtenidos de este proceso (ver tabla 14) y cuyo fin es el de clasificar los materiales.

Tabla 14. Resultados para clasificación SUCS del ensayo INVE-126.

Suelo		
A	B	C
Límite plástico		
15.7%	21.3%	16.3%
Índice de plasticidad		
19.5%	12.2%	15.9%

Fuente: Autor

Sistema unificado de clasificación de suelos “SUCS” INVE-181-13

En base a los resultados obtenidos de los ensayos anteriores se procedió a clasificar los suelos según el procedimiento de la norma INVE-181-13 y cuyos resultados se pueden observar en las siguientes tablas: 15, 16 y 17, las cuales contienen la denominación que dicho sistema propone para cada uno de estos suelos.

Tabla 15. Clasificación del suelo A por medio de la INVE-181-13.

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS PARA PROPOSITOS DE INGENIERIA			
Suelos gruesos		Suelos Finos	
más del 50% de su masa seca tiene un tamaño mayor que la abertura del tamiz No. 200 (se divide en arenas y gravas)		mas del 50% de la masa seca pasa por el tamiz No. 200. (se divide en limos y arcillas).	
Gravas	Arenas	LL<50%	LL≥50%
Mas del 50% de la fracción mayor al tamiz No. 200 queda retenida en el tamiz No. 4	Mas del 50% de la fracción mayor al tamiz No. 200 pasa el tamiz No. 4	se adopta un símbolo de grupo según el índice de plasticidad.	se adopta un símbolo de grupo según la carta de plasticidad.
se adopta un símbolo de grupo según el porcentaje y carta de plasticidad de finos, CC Y CU.	se adopta un símbolo de grupo según el porcentaje y carta de plasticidad de finos, CC Y CU		
SIMBOLO DEL GRUPO			
SC			
DENOMINACIÓN DEL GRUPO			
Arena arcillosa			

Fuente: Autor a partir de (INVE-181-13)

Tabla 16. Clasificación del suelo B por medio de la INVE-181-13.

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS PARA PROPOSITOS DE INGENIERIA			
Suelos gruesos		Suelos Finos	
más del 50% de su masa seca tiene un tamaño mayor que la abertura del tamiz No. 200 (se divide en arenas y gravas)		mas del 50% de la masa seca pasa por el tamiz No. 200. (se divide en limos y arcillas).	
Gravas	Arenas	LL<50%	LL≥50%
Mas del 50% de la fracción mayor al tamiz No. 200 queda retenida en el tamiz No. 4	Mas del 50% de la fracción mayor al tamiz No. 200 pasa el tamiz No. 4	se adopta un símbolo de grupo según el índice de plasticidad.	se adopta un símbolo de grupo según la carta de plasticidad.
se adopta un símbolo de grupo según el porcentaje y carta de plasticidad de finos, CC Y CU.	se adopta un símbolo de grupo según el porcentaje y carta de plasticidad de finos, CC Y CU		
SIMBOLO DEL GRUPO			
SC			
DENOMINACIÓN DEL GRUPO			
Arena arcillosa			

Fuente: Autor a partir de (INVE-181-13)

Tabla 17. Clasificación del suelo C por medio de la INVE-181-13.

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS PARA PROPOSITOS DE INGENIERIA			
Suelos gruesos		Suelos Finos	
más del 50% de su masa seca tiene un tamaño mayor que la abertura del tamiz No. 200 (se divide en arenas y gravas)		mas del 50% de la masa seca pasa por el tamiz No. 200. (se divide en limos y arcillas).	
Gravas	Arenas	LL<50%	LL≥50%
Mas del 50% de la fracción mayor al tamiz No. 200 queda retenida en el tamiz No. 4	Mas del 50% de la fracción mayor al tamiz No. 200 pasa el tamiz No. 4	se adopta un símbolo de grupo según el índice de plasticidad.	se adopta un símbolo de grupo según la carta de plasticidad.
se adopta un símbolo de grupo según el porcentaje y carta de plasticidad de finos, CC Y CU.	se adopta un símbolo de grupo según el porcentaje y carta de plasticidad de finos, CC Y CU		
SÍMBOLO DEL GRUPO			
CL			
DENOMINACIÓN DEL GRUPO			
Arcilla de baja compresibilidad			

Fuente: Autor a partir de (INVE-181-13)

Análisis por EDX y SEM

Para este ensayo se procedió a secar en horno a 120°C durante un día porciones de cada uno de los materiales (ver ilustración 22) para luego ser llevados al laboratorio de nanociencia y nanotecnología de la Universidad Pontifica Bolivariana en donde fueron sometidas a un análisis químico elemental por EDX en un detecto marca BRUKER y a un análisis SEM en un microscopio electrónico de barrido.

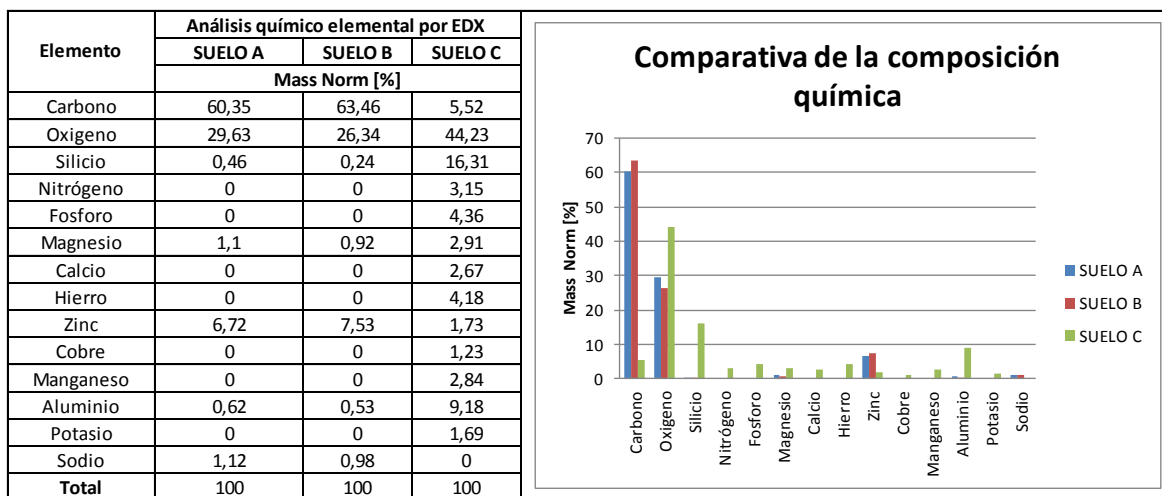


Ilustración 24. Muestras listas para ser llevadas al laboratorio de nanociencia y nanotecnología.

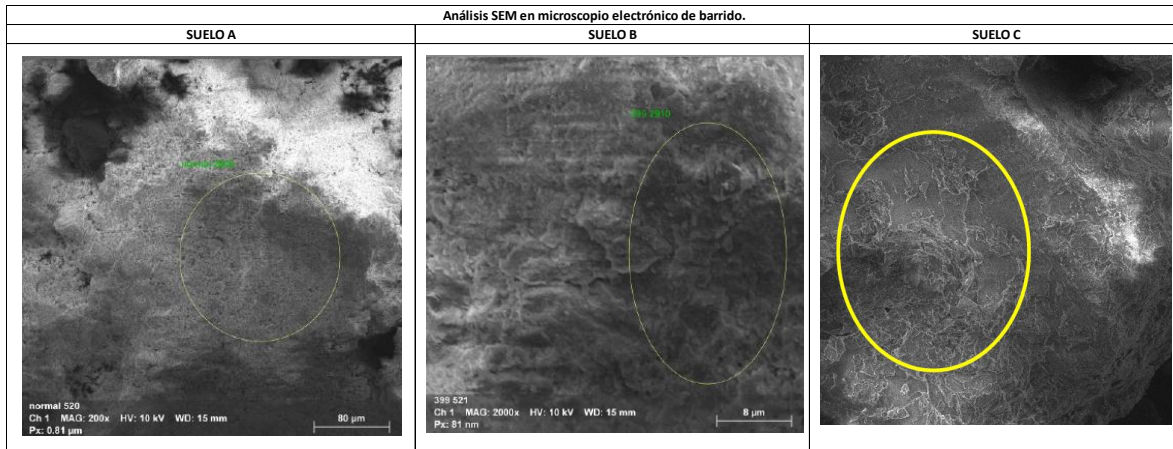
Fuente: Autor

Los resultados del análisis químico elemental por EDX es presentado en la tabla 18 la cual contiene la composición en masa normal porcentual de cada una de las muestras de estudio y una comparativa de la composición de estas mismas por medio de una gráfica de barras, por su parte los resultados del análisis SEM por microscopio electrónico de barrido son expuestos en la tabla 19.

Tabla 18. Resultados de análisis químico por EDX.



Fuente: Autor

Tabla 19. Resultados análisis SEM.

Fuente: Autor

Ensayo modificado de compactación INVE-142

Para el ensayo modificado de compactación se utilizó el método A de la INVE-142 utilizando moldes previamente pesados y medidos con un diámetro de 10 cm y una altura de 12 cm.

Para este ensayo se pesaron 3000 gr para cada uno de los materiales de la investigación que pasaran por el tamiz de 3/8 secados en el horno por aproximadamente 1 día a 120°C. El material se extendió sobre una bandeja en donde se agregó según cada suelo un contenido de humedad inicial como se puede apreciar en la ilustración 23 para luego ser compactada en el molde por medio de 5 capas de 3 a 4,5 cm de altura cada una compactada a 25 golpes del martillo normativo a caída libre.



Ilustración 25. Humedecimiento del material.

Fuente: Autor

Luego es necesario quitar el collar superior al molde, enrazar la tapa del collar inferior del molde y pesar en la balanza anotando este dato como puede verse en la ilustración 24, para finalmente en latas pequeñas previamente pesadas medir el peso de una muestra del centro de cada cilindro compactado.



Ilustración 26. Pesado del cilindro compactado.

Fuente: Autor

Este procedimiento se repite a distintas humedades hasta obtener una serie de puntos que completan la curva de densidad seca – humedad de compactación, en el Anexo E se pueden observar todos los resultados de estos ensayos con sus respectivas gráficas y en la siguiente tabla se pueden apreciar el dato de humedad optima de compactación de los suelos de estudio.

Tabla 20. Humedades optimas de compactación.

SUELO A	SUELO B	SUELO C
Humedad optima de compactación		
11%	15%	11%

Fuente: Autor

4.3 Etapa 3: fabricación de los especímenes para el ensayo a tracción

Para la fabricación de los especímenes se usó el procedimiento antes mencionado en la metodología en donde se midió en primera medida la humedad evaporable de las muestras de tierra por medio de una estufa con temperatura alrededor de 115°C con unas cintas de papel como indicador para la presencia de vapor de agua presente en la tierra (ver ilustración 25) para así conocer la cantidad de agua necesaria para agregar a la muestra.



Ilustración 27. Secado en estufa.

Fuente: Autor

Conocida la cantidad de agua se agregaba esta al material y se mezclaba manualmente con él para después agregar el porcentaje necesario de biomasa como se observa en la ilustración 26.



Ilustración 28. Suelo A con 6% de biomasa.

Fuente: Autor

Con el material en su humedad óptima para tierra comprimida y con su porcentaje de biomasa necesario se realizó el proceso de compactación del mismo modo con el que se realizó el ensayo modificado de compactación INVE-142 según el método A para así obtener los especímenes y desencofrarlos en un gato hidráulico como se observa en la próxima ilustración 27.



Ilustración 29. Desencofrado de un espécimen.

Fuente: Autor

Finalmente, el espécimen desencofrado se envuelve en vinipel (ver ilustración 28) y se almacena en un lugar libre de humedad durante catorce días para ser sometido al ensayo de resistencia a la tracción.



Ilustración 30. Especímenes envueltos en papel vinipel en etapa de curado.

Fuente: Autor

En la tabla 21 esta condensada toda la información de producción de los especímenes con las respectivas fechas para el ensayo de resistencia a la tracción.

Tabla 21. Bitácora de fabricación de los especímenes.

Bitácora de fabricación de los especímenes										
Identificación	biomasa [%]	cantidad de material [gr]	Wp [%]	Wo[%]	NZE [%]	Wt [%]	Wn [ml]	No de especímenes	Fecha de fabricación	Fecha de ensayo a tracción
Suelo A	0	10000	8	11	3	14	600	4	25/04/2019	09/05/2019
	2	9800	8,6	11	3	14	529,2	4	02/05/2019	16/05/2019
	4	9600	10,56	11	3	14	330,24	4	06/05/2019	20/05/2019
	6	9400	5	11	3	14	846	4	08/05/2019	22/05/2019
Suelo B	0	10000	7	15	3	18	1100	4	30/04/2019	14/05/2019
	2	9800	10,13	15	3	18	771,26	4	13/05/2019	27/05/2019
	4	9600	10	15	3	18	768	4	24/05/2019	07/06/2019
	6	9400	10	15	3	18	752	4	24/05/2019	07/06/2019
Suelo C	0	10000	9,13	11	3	14	487	4	07/05/2019	21/05/2019
	2	9800	11	11	3	14	294	4	09/05/2019	23/05/2019
	4	9600	11	11	3	14	288	4	17/05/2019	31/05/2019
	6	9400	8,7	11	3	14	498,2	4	22/05/2019	05/06/2019

Fuente: Autor

4.4 Etapa 4: Ensayo de resistencia a la tracción

El ensayo de resistencia a la tracción fue ejecutado en la prensa HUMBOLDT MasterLoader HM-3000 del laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana utilizando la forma cilíndrica detallada antes en la tabla 8 y haciendo uso de unas platinas metálicas de la longitud de los especímenes para lograr la distribución de las fuerzas a lo largo de estos a un ritmo de 0,03637 in/min en un montaje como el que se puede apreciar en la ilustración 29.

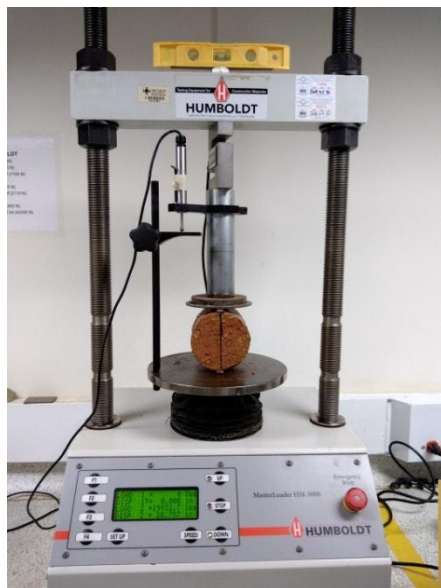


Ilustración 31. Montaje usado para el ensayo de resistencia a tracción.

Fuente: Autor

Con el montaje listo se lleva a cabo la puesta en marcha del ensayo y se reporta cada uno de los datos necesarios para completar el formato de recolección de datos del ensayo de resistencia a la tracción propuesto en la metodología midiendo diámetros y longitudes como se puede ver en la ilustración 30. Los resultados de estos ensayos para los materiales A, B Y C están expuestos

en las tablas 22, 23 y 24 respectivamente en donde los especímenes con carga nula se dañaron antes del ensayo a la tracción debido al exceso de fibras en alguna capa de compactación como se puede observar en la ilustración 31.



Ilustración 32. Medición de especímenes.

Fuente: Autor



Ilustración 33. Espécimen dañado por exceso de biomasa.

Fuente: Autor

Tabla 22. Resultados ensayo a tracción material A.

Material	% biomasa	Peso, gr	Diametro, m	Longitud, m	Carga Maxima, lbf	Carga Maxima, kN	Resistencia a la tracción, kPa	volumen, m3	densidad, gr/m3
A	0	1954,27	0,1	0,117	1080	4,804079328	261,3993067	0,000918916	2126712,688
A	0	1982,11	0,1	0,118	1194	5,31117659	286,5423756	0,00092677	2138729,52
A	0	1966,77	0,1	0,12	780	3,469612848	184,0686784	0,000942478	2086807,783
A	0	1900,71	0,1	0,12	962	4,279189179	227,0180367	0,000942478	2016715,946
A	2	1892,5	0,1	0,117	537	2,388694999	129,9735441	0,000918916	2059492,17
A	2	1838,7	0,1	0,12	527	2,344212783	124,3643507	0,000942478	1950921,292
A	2	1892,2	0,1	0,118	643	2,860206489	154,3105088	0,00092677	2041715,141
A	2	1874,1	0,1	0,12	890	3,958917224	210,0270818	0,000942478	1988481,859
A	4	1662,5	0,1	0,12	698	3,104858677	164,7178686	0,000942478	1763967,286
A	4	1646,6	0,1	0,121	342	1,521291787	80,04003563	0,000950332	1732658,045
A	4	1544,9	0,1	0,12	508	2,259696573	119,8806265	0,000942478	1639189,811
A	4	1721,4	0,1	0,12	0	0	0	0,000942478	1826462,127
A	6	1619,7	0,12	0,126	505	2,246351908	94,58148414	0,001425026	1136610,5
A	6	1694,1	0,1	0,127	840	3,736506144	187,3018654	0,000997456	1698421,349
A	6	1707,7	0,1	0,126	483	2,148491033	108,5533232	0,000989602	1725643,786
A	6	1445,8	0,1	0,116	392	1,743702867	95,69618295	0,000911062	1586939,426

Fuente: Autor

Tabla 23. Resultados ensayo a tracción material B.

Material	% biomasa	Peso, gr	Diametro, m	Longitud, m	Carga Maxima, lbf	Carga Maxima, kN	Resistencia a la tracción, kPa	volumen, m3	densidad, gr/m3
B	0	1998,5	0,1	0,12	267	1,187675167	63,00812454	0,000942478	2120474,358
B	0	1993,1	0,1	0,115	244	1,08536607	60,08395657	0,000903208	2206690,206
B	0	1994,7	0,1	0,118	248	1,103158957	59,51633931	0,00092677	2152314,339
B	0	2016,2	0,1	0,119	306	1,36115581	72,81837828	0,000934624	2157231,572
B	2	1898,43	0,1	0,12	570	2,535486312	134,5117265	0,000942478	2014296,791
B	2	1887,18	0,1	0,12	441	1,961665726	104,069599	0,000942478	2002360,17
B	2	1906,02	0,1	0,118	462	2,055078379	110,8731805	0,00092677	2056627,15
B	2	1913,61	0,11	0,12	530	2,357557448	113,7020974	0,001140398	1678019,232
B	4	1853,24	0,101	0,121	630	2,802379608	145,9823474	0,000969433	1911673,263
B	4	1903,88	0,101	0,124	713	3,171582001	161,2178067	0,000934624	1916396,008
B	4	1845,78	0,1	0,12	625	2,7801385	147,4909282	0,000942478	1958433,406
B	4	1927,66	0,101	0,121	718	3,193823109	166,3735325	0,000969433	1988439,75
B	6	1647,17	0,101	0,127	800	3,55857728	176,6165633	0,001017505	1618833,093
B	6	1697,79	0,1	0,126	766	3,407337746	172,1570301	0,000989602	1715629,656
B	6	1655,43	0,1	0,12	783	3,482957513	184,7766349	0,000942478	1756465,783
B	6	1687,54	0,1	0,13	0	0	0	0,001021018	1652802,047

Fuente: Autor

Tabla 24. Resultados ensayo a tracción material C.

Material	% biomasa	Peso, gr	Diametro, m	Longitud, m	Carga Maxima, lbf	Carga Maxima, kN	Resistencia a la tracción, kPa	volumen, m3	densidad, gr/m3
C	0	1963,4	0,1	0,115	348	1,547981117	85,69351183	0,000903208	2173807,411
C	0	1967,7	0,1	0,117	355	1,579118668	85,92292024	0,000918916	2141327,737
C	0	1967,4	0,1	0,12	280	1,245502048	66,07593585	0,000942478	2087476,234
C	0	1969,9	0,1	0,117	410	1,823770856	99,23492197	0,000918916	2143721,863
C	2	1850,1	0,1	0,12	557	2,477659431	131,4439152	0,000942478	1963017,068
C	2	1817,9	0,1	0,119	535	2,379798556	127,3131777	0,000934624	1945060,646
C	2	1837,7	0,1	0,12	483	2,148491033	113,9809893	0,000942478	1949860,259
C	2	1767,2	0,1	0,12	553	2,459866545	130,4999733	0,000942478	1875057,436
C	4	1726,81	0,101	0,121	496	2,206317914	114,9321338	0,000969433	1781256,884
C	4	1733,47	0,102	0,122	650	2,89134404	147,9176137	0,000996896	1738866,635
C	4	1726,78	0,102	0,12	585	2,602209636	135,3446165	0,000980554	1761025,071
C	4	1715,41	0,101	0,12	0	0	0	0,000961422	1784243,25
C	6	1556	0,101	0,117	430	1,912735288	103,0451979	0,000937386	1659935,076
C	6	1673,8	0,101	0,121	436	1,939424618	101,0290531	0,000969433	1726575,461
C	6	1697,4	0,1	0,125	470	2,090664152	106,4766509	0,000981748	1728957,443
C	6	1664,3	0,101	0,117	0	0	0	0,000937386	1775469,117

Fuente: Autor

Los planos de falla típicos después de superados los estados máximos de resistencia a la tracción son presentados en la ilustración 32, en donde de izquierda a derecha se encuentran los materiales A, B y C respectivamente y de arriba abajo los distintos porcentajes trabajados.

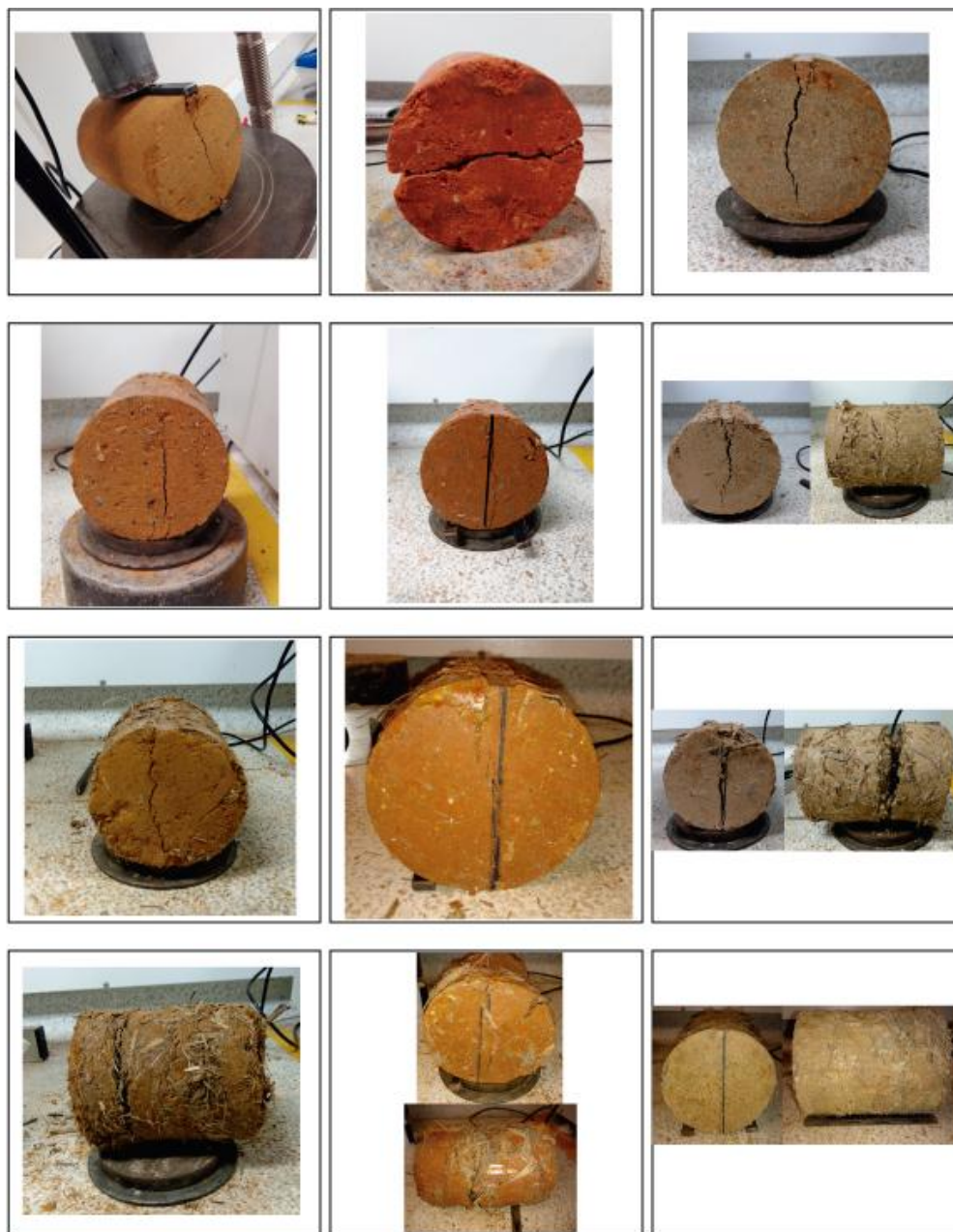


Ilustración 34. Planos típicos de falla.

Fuente: Autor

5. Análisis y discusión de resultados

5.1 Análisis de la caracterización de los materiales

Por medio de los ensayos de campo en primera medida se pudo determinar que los materiales A y B son arenas arcillosas la cual es una característica que hace que esta tierra sea buena para la construcción de muros en tapia pisada. Por su parte el material C es una arcilla lo cual hace que no sea un material ideal para la construcción en tierra comprimida, pero si lo hace propicio para ser mejorado con fibras naturales como las de biomasa residual. También los resultados de clasificación de los ensayos de campo fueron iguales a los del SUCS mas sin embargo el test del vidrio como método para determinar la composición granulometría presento un porcentaje de error promedio del 46% como se puede apreciar en la tabla.

Tabla 25. Comparativa entre INVI-123 y test del vidrio.

TECNICA DE CLASIFICACIÓN							
INVE-123			ENSAYOS DE CAMPO			DESCRIPCIÓN DEL AGREGADO	
TIERRA A	TIERRA B	TIERRA C	TIERRA A	TIERRA B	TIERRA C		
85,7	77,3	38,7	59	72	45	Gravas y arenas	
14,3	22,7	61,3	41	28	55	Finos	
TIERRA A		TIERRA B		TIERRA C		TIPO DE TIERRA	
31%		7%		16%		% error gravas y arenas	
187%		23%		10%		% error finos	
						% error prom	46%

Fuente: Autor

Por otro lado, con la precisión de los ensayos de laboratorio se obtuvo una granulometría más acertada de cada uno de los materiales como la mostrada en la tabla 12, donde se observa que el material A presenta la menor cantidad de finos con un 14.3 % lo cual lo pone en una situación

límite por la baja presencia de estos. También se observa que la arena del material A clasifica según la SUCS como una arena mal gradada y su contenido es aceptable para el manual Proterra pero insuficiente para el manual del Sena. Por su lado el material B presenta la mayor cantidad de gravas y un mayor contenido de finos que el A con una presencia del 23% además de poseer una arena que también clasifica como mal gradada y en un contenido bueno según el manual Proterra y con el coeficiente de uniformidad más grande de los tres materiales que lo acercaron a casi clasificar como arena bien gradada. Finalmente, el material C ratifico ser una arcilla que tiene un contenido de material fino del 61% que hace que esté por debajo de las recomendaciones de arena y por encima de las de contenido de finos, pero con la recomendación del manual Proterra para la selección de suelos y métodos de control de ser un material apto para un mejoramiento con fibras naturales.

Finalmente, del análisis químico elemental por EDX mostrado en la tabla 18 se identificó en los materiales A y B la presencia de los mismos elementos como el carbono y el oxígeno en altos porcentajes, zinc en un contenido intermedio para después observarse la presencia de silicio, magnesio, zinc, aluminio y sodio en porcentajes más bajos. Mientras que en el material C se registró poca presencia de carbono lo cual es un signo de poca presencia de materia orgánica a diferencia de los otros dos materiales, así como también se observan contenidos relevantes de silicio y aluminio, así como la aparición de otros elementos como el nitrógeno, fosforo, calcio, hierro, cobre, manganeso y potasio además de no presentar registro de sodio en comparación a los materiales A y B.

De este análisis es posible observar la formación de cloruro de magnesio en los tres materiales ante la presencia de agua, así como de hidróxido de calcio en el material C. También se puede intuir la composición de elementos cementantes en el material C como el silicato cálcico

hidratado y el aluminato cálcico hidratado como también se puede notar que ante la presencia de calcio, sílice y magnesio en la biomasa residual de caña se puede componer el silicato cálcico hidratado, el aluminato cálcico hidratado y el hidróxido de calcio en las mezclas de tierra comprimida que con solo agua no producirían estos componentes.

5.2 Análisis de la resistencia a la tracción.

5.2.1 Análisis de la resistencia a la tracción en el material A.

En esta tierra se puede apreciar una disminución del comportamiento de la resistencia a la tracción a medida que aumentan los porcentajes de adición de la biomasa residual esto posiblemente debido al bajo contenido de material fino que presentaba la muestra en su estado natural, sin embargo, la disminución de la resistencia a la tracción no es menor que la propuesta en la norma peruana E080 como se puede observar en la ilustración 33.

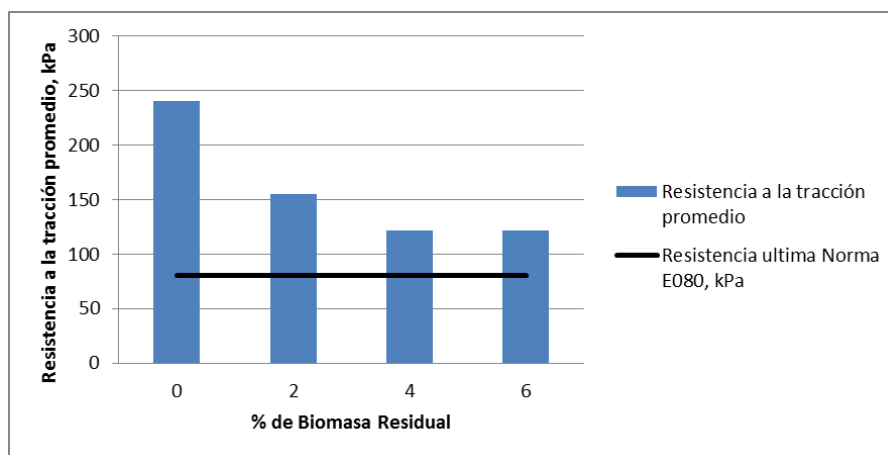


Ilustración 35. Resistencia a la tracción promedio del material A.

Fuente: Autor

Por otro lado, la densidad del material disminuye a medida que aumenta el contenido de biomasa residual perdiendo el 4, 17 y 26 % de su densidad original como se puede observar en la ilustración 34.

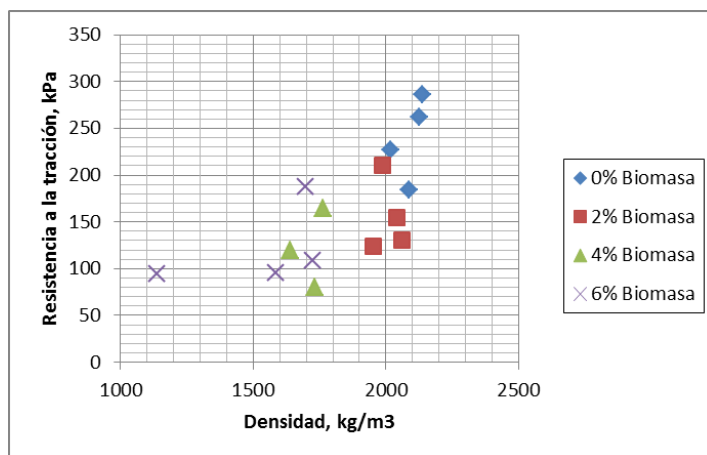


Ilustración 36. Relación entre densidad y resistencia a la tracción del material A.

Fuente: Autor

Finalmente podemos observar como los desplazamientos son similares para el 0 y 2 % de adición de biomasa pero después se nota un crecimiento alto en estas relacionado con la disminución de los esfuerzos a la tracción causados posiblemente por el bajo porcentaje de contenido de finos del material y su disminución debido al aumento de la presencia de biomasa residual como se muestra en la ilustración 35 en donde se hace evidente también un aumento de los desplazamientos antes de alcanzar la resistencia máxima a compresión relacionada con el aumento de los porcentajes de biomasa.

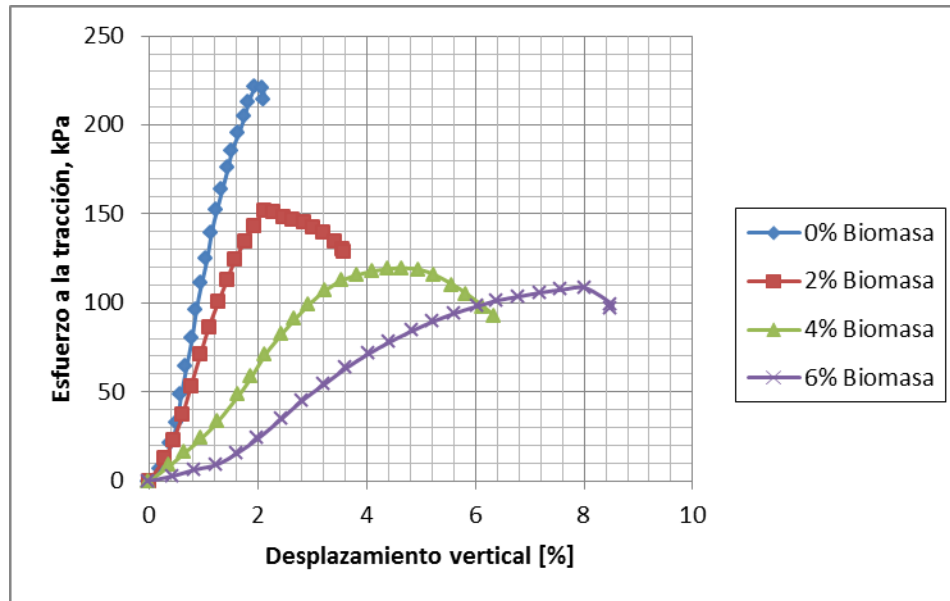


Ilustración 37. Curva esfuerzo desplazamiento vertical del material A.

Fuente: Autor

5.2.2 Análisis de la resistencia a la tracción en el material B.

El material B presentó una mejora significativa a medida que aumentaron los porcentajes de adición de biomasa tanto que superó con el 2, 4 y 6% la resistencia última propuesta por la norma peruana E080 tal como se puede ver en la ilustración 36.

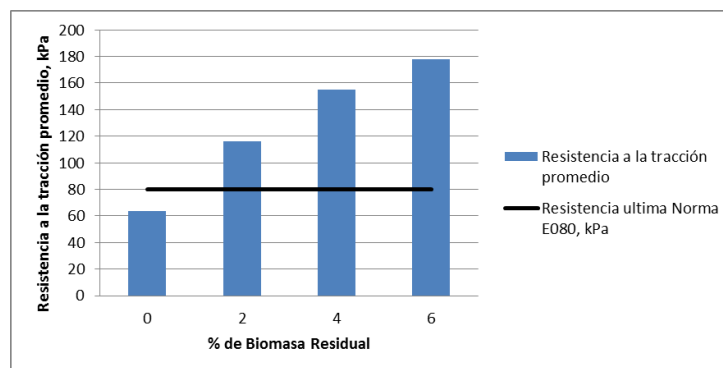


Ilustración 38. Resistencia a la tracción promedio del material B.

Fuente: Autor

También se puede observar en la ilustración 37 la disminución de la densidad de los especímenes a medida que aumentan los porcentajes de adición de biomasa residual perdiendo entre el 6, 10 y 32% respectivamente de su densidad con respecto a las muestras de 0% mientras aumenta su resistencia a la tracción significativamente.

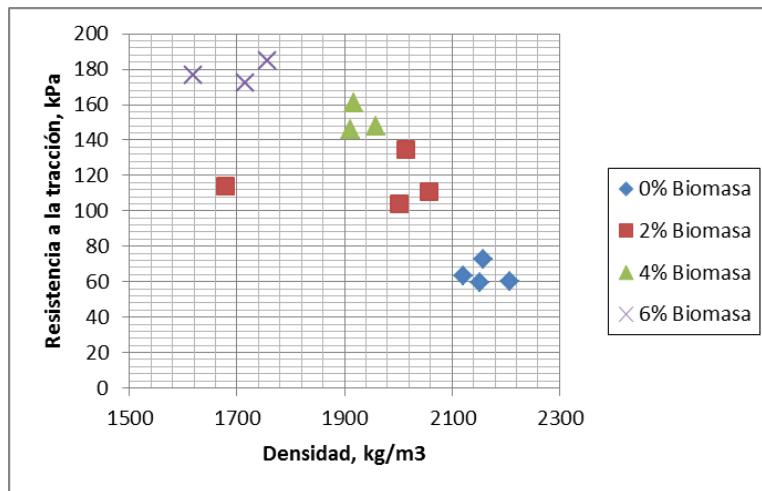


Ilustración 39. Relación entre densidad y resistencia a la tracción del material B.

Fuente: Autor

Finalmente se puede apreciar en la curva esfuerzo deformación presentada en la ilustración 38 como la adición de biomasa aumenta los rangos en los desplazamientos como también la resistencia a la tracción máxima de los especímenes esto posiblemente debido al rebajado de la granulometría producto de la adición de las fibras como también a la presencia de los elementos cementantes productos del magnesio y la sílice que aporta la biomasa residual a la mezcla.

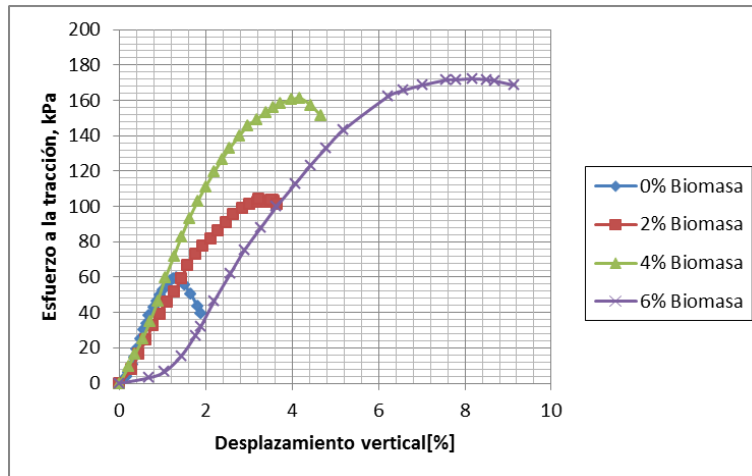


Ilustración 40. Curva esfuerzo desplazamiento vertical del material B.

Fuente: Autor

5.2.3 Análisis de la resistencia a la tracción en el material C.

En este material la resistencia a la tracción promedio está bastante cerca al valor de resistencia última propuesto por la norma peruana E080 y como se puede observar en la ilustración 39 con la adición de biomasa residual entre el 2 y 4% hay una mejora para luego disminuir su valor promedio en el 6% de adición, pero todavía superando el umbral de la norma.

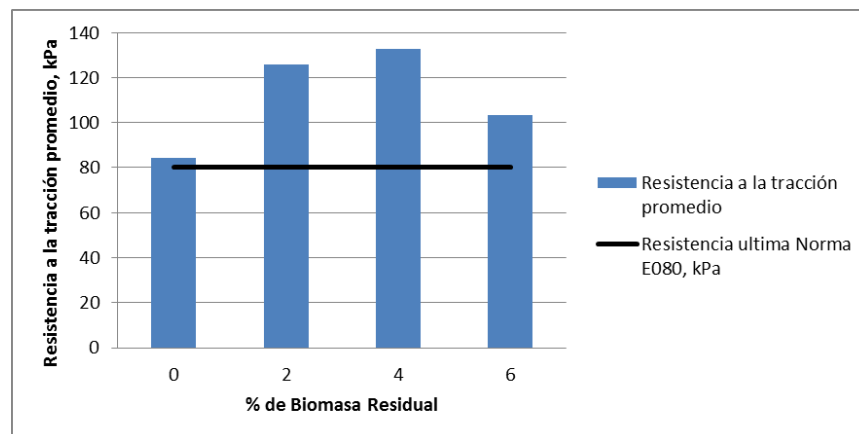


Ilustración 41. Resistencia a la tracción promedio del material C.

Fuente: Autor

Por su lado se puede apreciar que la densidad de los especímenes disminuye a medida que aumenta el porcentaje de adición disminuyendo en promedio del 5, 17 y 19 % con respecto a los especímenes sin contenido de biomasa como se observa en la ilustración 40.

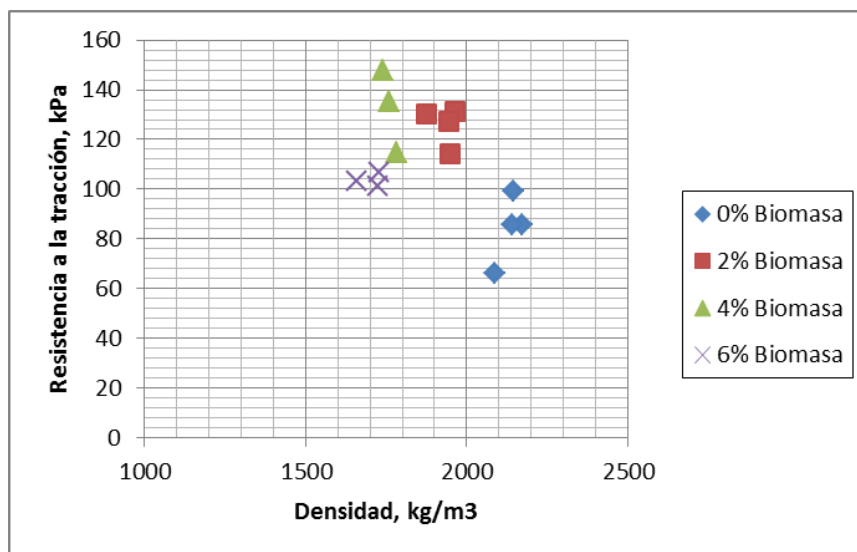


Ilustración 42. Relación entre densidad y resistencia a la tracción del material C.

Fuente: Autor

Finalmente en la curva esfuerzo deformación mostrada en la ilustración 41 es posible ver una similitud entre los módulos de elasticidad hasta contenidos de biomasa del 6% para disminuir finalmente junto con su resistencia a la tracción, esto posiblemente por la disminución de arena con la adición de biomasa como también por la posible acción del aumento de los iones de magnesio presentes en las fibras de biomasa que dificultan la cementación de compuestos como el silicato cálcico hidratado y el aluminato cálcico hidratado los cuales son posibles en este material por su composición química.

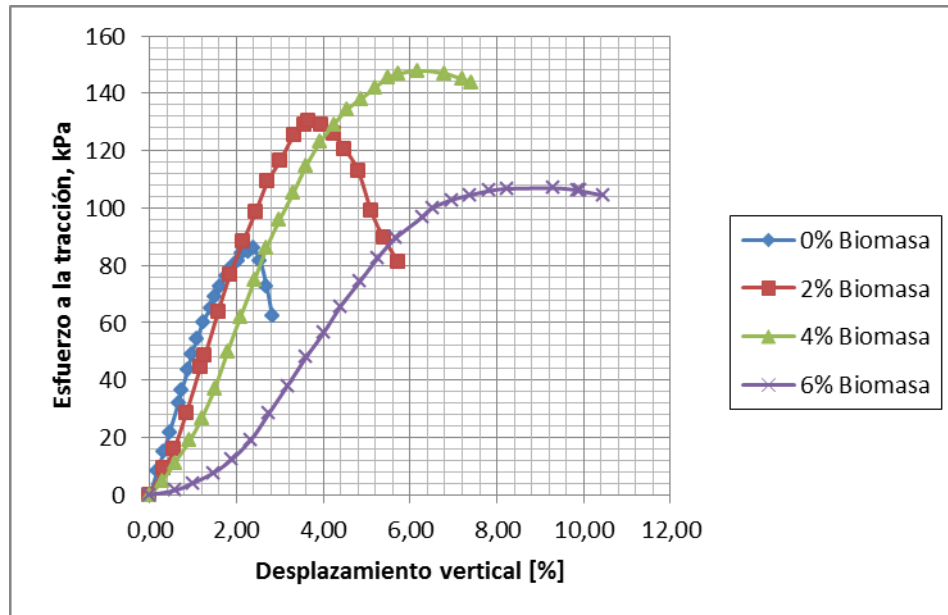


Ilustración 43. Curva esfuerzo desplazamiento vertical del material C.

Fuente: Autor.

6. Conclusiones y recomendaciones

El uso de la biomasa residual para la mejora de la resistencia del comportamiento a tracción depende de una granulometría la cual tenga niveles de arcilla por encima de los umbrales mínimos sugeridos por el manual de selección de suelos y métodos de control de la Red Iberoamericana Proterra para garantizar la cohesión entre partículas con la adición de las fibras, sin embargo, es necesario verificar esta tendencia mediante investigación en especímenes con porcentajes de arcilla variables.

La humedad propuesta por los estándares neo zelandeses y la energía de compactación Proctor arrojaron resultados satisfactorios ya que se logró superar la resistencia a la tracción última propuesta por la norma peruana en tan solo 14 días cuando en esta se exigen 28. Sin embargo, es necesario establecer estos umbrales para el caso específico de cada una de las regiones de Colombia para garantizar una construcción segura y eficiente en los sectores de alta sismicidad.

La presencia de sílice y calcio en la biomasa residual de caña produce efectos positivos debido a que colabora a la composición de un cementante como el silicato de calcio hidratado, pero sin embargo produce efectos negativos cuando los iones de magnesio impiden la cementación del aluminato de calcio hidratado como en el caso del material C en donde este cementante se presentaba en considerable proporción. También es importante considerar los efectos positivos que tuvo el calcio presente en la biomasa residual en la conformación del hidróxido de calcio siempre y cuando se presenten niveles bajos de cloruro de magnesio como en el caso del material B, sin embargo, es necesario investigar más sobre estos efectos para verificar dichas tendencias

Se recomienda un tratamiento de inmunización de la biomasa residual para evitar la presencia de hongos y plagas y el estudio de los efectos que estos procedimientos pueden tener en las reacciones químicas de las mezclas.

Lista de Referencias

- [1] S. Rivero Bolaños, «El uso masivo de la tierra como material de construcción en Colombia,» *Revista de estudios sobre patrimonio cultural*, 2007.
- [2] S. A. Acosta Lozano y R. . J. Perdomo González, «historiaabierta.org,» [En línea]. Available: <http://historiaabierta.org/mapa/items/show/8>. [Último acceso: 1 Diciembre 2018].
- [3] L. M. Silva Rojas, P. V. Vecino Torres y H. J. Jiménez, *La tapia pisada como técnica constructiva vernácula*, Bucaramanga: Universidad Santo Tomas, 2018.
- [4] Y. Rodriguez Barajas, «Santander, entre las diez regiones más turísticas del país,» *Vanguardia*, 2017.
- [5] J. Vargas Neumann, «Normas de tierra: Ensayos de tracción indirecta,» Lyon, 2016.
- [6] E.-N. Ranime, Q.-B. Bui, P. Perrotin y O. Plé, «Shear Parameters of Rammed Earth Material: Results from Different Approaches,» 2018.
- [7] C. M. Martins y O. Borges Faria, *Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra—prácticas de campo*, Lisboa: Rede Ibero-Americana Proterra., 2009.
- [8] G. Minke, *Manual de construcción en tierra.*, Uruguay: Editorial fin de siglo, 2005.
- [9] A. J. Leoni, «ingenieroleoni.com,» [En línea]. Available: <http://ingenieroleoni.com/wp-content/uploads/2015/09/Capitulo-1-Propiedades-Fisicas-de-los-suelos.pdf>. [Último acceso: 2018 Diciembre 19].
- [10] D. F. Jaramillo Jaramillo, *Introducción a la ciencia del suelo*, Medellín: Universidad Nacional de Colombia., 2002.

-
- [11] Soil Science Division Staff, Soil Survey Manual, United States Department of Agriculture, 2017.
- [12] C. Neves y O. Borges Faria, Técnicas de construcción con tierra, Bauru-SP: FEB-UNESB/PROTERRA, 2011.
- [13] A. Rico y H. Del Castillo, La ingeniería de suelos en las vías terrestres, México 1, D.F: Limusa, 1984.
- [14] ICONTEC, Norma técnica Colombiana NTC 1522, Bogotá, D.C.: Instituto Colombiano de normas técnicas y certificación (ICONTEC), 1999.
- [15] M. Del Santo y R. Sandoval, Propiedades índices de los suelos, La Plata: Universidad Nacional de La Plata facultad de ingeniería, 2013.
- [16] L. M. Bénitez Rodríguez y C. J. Navas Corena, Influencia de las propiedades físico-mecánicas en el material tierra para construcción con tapia pisada, Bucaramanga: Escuela de ingeniería civil UIS, 2009.
- [17] INVIAS, Manual de normas de ensayo de materiales para carreteras, Ministerio de transporte, 2007.
- [18] W. A. Nash, Resistencia de materiales, McGRAW-HILL, 1969.
- [19] B. Quoc-Bao, J.-C. Morel, S. Hans y N. Meunier, «Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth.,» 2009.
- [20] H. P. Backes, «Tensile strength of masonry.,» 1985.
- [21] A. Takadachi y M. Koshihara, «A study of seismic performance of rammed earth wall,» vol. 62, n° 439-443, 2010.
- [22] H. Araki, J. Koseki y S. Takeshi, «Tensile strength of compacted rammed earth materials,» vol. 56, n° 2, 2016.

-
- [23] M. H. Saad, *Elasticity. Theory, Applications, and Numerics.*, Oxford, UK: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005
- [24] W. O. Hadley, W. R. Hudson y T. W. Kennedy, *An evaluation of factors affecting the tensile properties of asphalt-treated materials.*, Texas: Center for Highway Research, University of Texas at Austin, 1969.
- [25] ASTM, *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength for Brittle Nuclear Waste Forms*, ASTM C1144 - 89 (Reapproved 2004)., 1989.
- [26] Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción, *Adobe: Norma Técnica de Edificación E-080.*, Perú, 2000.
- [27] K. Akatani, S. Otsuka, M. Takemura y K. Inagawa, *Effects of mix proportion and construction factors on strength development of rammed earth wall using traditional technique*, 2012.
- [28] Tanimoto, K, Takeshita, Y y Watanabe, M, «Consideration of Geotechnical Characteristics of Tataki soil,» 2004.
- [29] H. Xing, X. Yang, C. Xu y G. Ye, «Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil-cement,» vol. 103, n° 1-2, 2009
- [30] J. C. Cueva Orjuela, A. Hormaza Anaguano y A. Merino Restrepo, «Bagazo de caña de azúcar y su potencial aprovechamiento para el tratamiento de efluentes textiles,» vol. 84, n° 203, 2017.
- [31] M. Rengel, F. Gil y J. Montaña, « "Crecimiento y dinámica de acumulación de nutrientes en caña de azúcar. I. Macronutrientes." ,» vol. 23.1, n° 1, 2011.

-
- [32] H. Mokhtar, R. M. T, A. I. M.I, N. Huda A. H, N. Sa'adah A. H y W. Suriatty, «Characterization on silica from waste sugarcane bagasse for membrane fabrication,» vol. 78, n° 5-4, 2016.
- [33] M. A. Schettino y J. N. Holanda, «Characterization of sugarcane bagasse ash waste for Its Use in Ceramic Floor Tile,» vol. 8, 2015.
- [34] L. Taghiloha, Using rammed earth mixed with recycled aggregate as a construction material, Tesis de Maestría. Universitat Politècnica de Catalunya., 2013.
- [35] Nardez Giraldo, M. F. (2018). Análisis del comportamiento físico mecánico de muros en tapia pisada con inclusión de biomasa residual. Bucaramanga. Universidad Pontificia Bolivariana
- [36] Joint Australia/New Zealand Technical Committee. NZS 4298 (1998): Materials and workmanship for earth buildings. Materials and workmanship for earth buildings, Standards New Zealand., 1990.
- [37] ASTM, C. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, C496/C496M-11., 2011

Apéndices

Apéndice A. Registro fotográfico

Registro fotográfico del Barrio San Rafael



Casa en tierra en frente del lugar del apique con un material de color similar al extraído



La modernidad en contraste con las construcciones de vivienda clásicas del barrio San Rafael



Muros en tierra comprimida del sector

Registro fotográfico de la Comuna 6 (diagonal 15).



Casas en tierra cercanas al sector de extracción



Casa en tierra barrio la concordia



Muro en tierra de casa del barrio la concordia

Registro fotográfico del sector de malpaso



Lugar de extracción del material C



Formación montañosa del sector



Extracción del material

Apéndice B. Ensayos de campo

Formato de ensayos de campo.

Identificación de la tierra	
Nombre de la muestra	
Localización	
Operador	
Fecha de colecta	
Fecha de ejecución	
Observaciones	

Teste	Interpretación
Vidrio - %arena, limo y arcilla	
Cordón	
Cinta	
Caída de bola	
Resistencia seca	
Rollo	

Conclusión	
-------------------	--

Resultados de ensayos de campo tierra A.

Identificación de la tierra	
Nombre de la muestra	Barrio San Rafael
Localización	Bucaramanga
Operador	Hernando Luis Ardila
Fecha de colecta	4 de febrero 2019
Fecha de ejecución	14 de febrero 2019
Observaciones	ninguna

Test	Interpretación
Vidrio - %arena, limo y arcilla	59%, 32%, 9%.
Cordón	Tierra arcillo limosa, arenosa o areno-arcillosa; plasticidad mediana
Cinta	Tierra arcillo limosa, arenosa o areno-arcillosa; plasticidad mediana
Caída de bola	arcillosa
Resistencia seca	Tierra arcillo limosa, arenosa o areno-arcillosa; plasticidad mediana
Rollo	no hay suficiente arcilla

Conclusión	La tierra del barrio San Rafael es una arena arcillosa
-------------------	--

Resultados de ensayos de campo tierra B.

Identificación de la tierra	
Nombre de la muestra	Malpaso
Localización	Bucaramanga
Operador	Hernando Luis Ardila Sarmiento
Fecha de colecta	26 de marzo 2019
Fecha de ejecución	29 de marzo 2019
Observaciones	material en forma grumosa el cual fue secado al sol, compactado y tamizado

Teste	Interpretación
Vidrio - %arena, limo y arcilla	45%, 15%, 40%
Cordón	Tierra arcillo limosa, arenosa o areno-arcillosa; plasticidad mediana
Cinta	mucha arcilla; tierra de alta plasticidad
Caída de bola	arcillosa
Resistencia seca	suelo inorgánico de alta plasticidad; arcilla
Rollo	exceso de arcilla

Conclusión	Arcilla
-------------------	---------

Resultados de ensayos de campo tierra C.

Identificación de la tierra	
Nombre de la muestra	Malpaso
Localización	Bucaramanga
Operador	Hernando Luis Ardila Sarmiento
Fecha de colecta	26 de marzo 2019
Fecha de ejecución	29 de marzo 2019
Observaciones	material en forma grumosa el cual fue secado al sol, compactado y tamizado

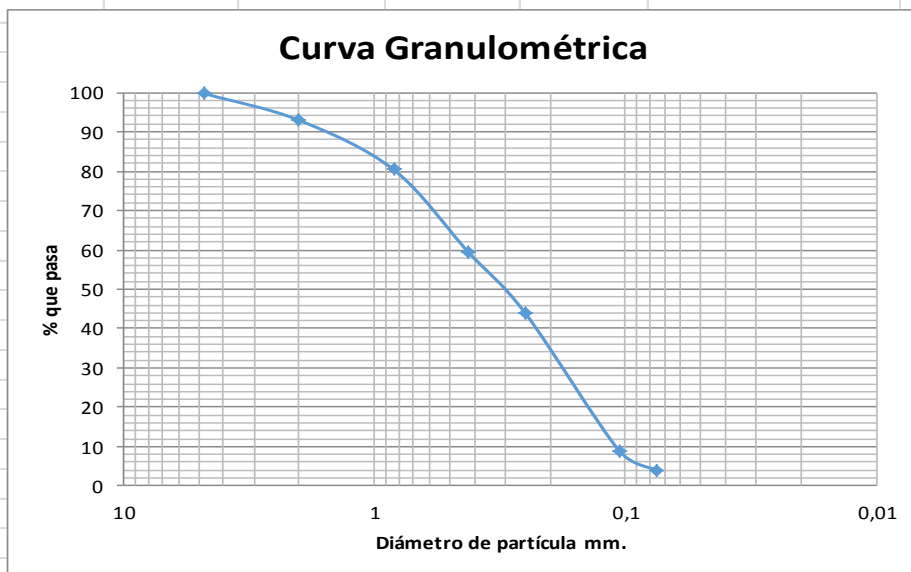
Teste	Interpretación
Vidrio - %arena, limo y arcilla	45%, 15%, 40%
Cordón	Tierra arcillo limosa, arenosa o areno-arcillosa; plasticidad mediana
Cinta	mucha arcilla; tierra de alta plasticidad
Caída de bola	arcillosa
Resistencia seca	suelo inorgánico de alta plasticidad; arcilla
Rollo	exceso de arcilla

Conclusión	Arcilla
-------------------	---------

Apéndice C. Ensayos de laboratorio

Resultados tierra A: ensayo de determinación de los tamaños de las partículas.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO				
Localización del proyecto: Universidad Pontificia Bolivariana				
Descripción del suelo: Barrio San Rafael				
Realizado por: Hernando Ardila S				
Peso de la muestra seca + recipiente		635,36	peso inicial [g] 500	
peso del recipiente		189,05	Peso lavado [g] 53,69	
peso de la muestra seca, W _s		446,31	perdidas por tamizado 0,36%	
			%pasa 200 14,3	
Análisis por tamizado y forma de granos				
Tamiz No	Diam (mm)	Peso retenido	% retenido	% que pasa
4	4,75	1,38	0,3	99,7
10	2	30,14	6,8	92,9
20	0,84	55,89	12,5	80,4
40	0,425	92,91	20,8	59,6
60	0,25	70,42	15,8	43,8
140	0,106	155,43	34,8	9,0
200	0,075	22,53	5,0	3,9
BANDEJA		16,02	3,6	0,4
		444,72	99,647	



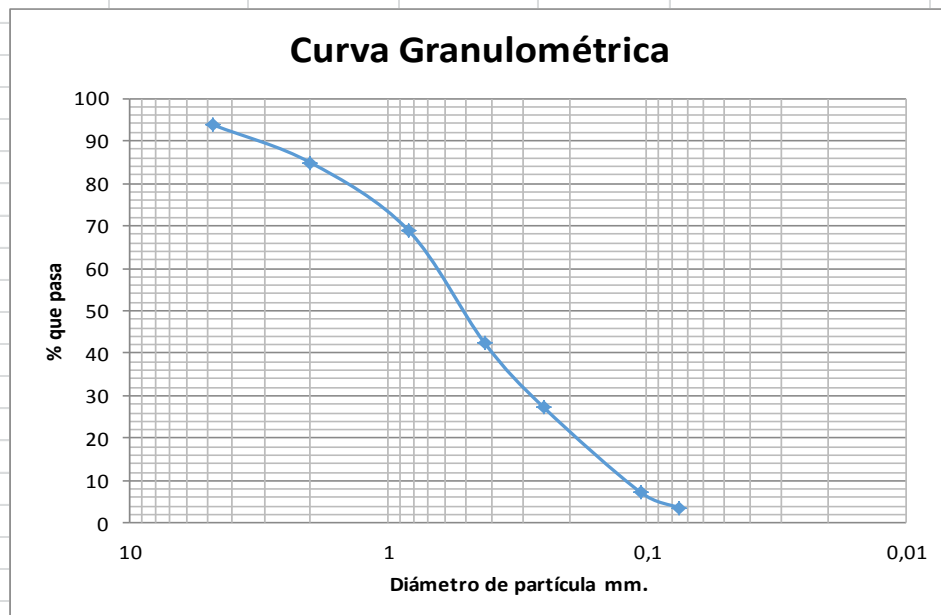
cu	3,93082116
cc	0,77972423

Resultados tierra B: ensayo de determinación de los tamaños de las partículas.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
Localización del proyecto: Universidad Pontificia Bolivariana			
Descripción del suelo: Diagonal 15			
Realizado por: Hernando Ardila S			
Peso de la muestra seca + recipiente	587,13	peso inicial [g]	500
peso del recipiente	183,02	Peso lavado [g]	95,89
peso de la muestra seca, W_s	404,11	perdidas por tamizado	0,17%
		%pasa 200	22,7

Análisis por tamizado y forma de granos

Tamiz No	Diam (mm)	Peso retenido	% retenido	% que pasa
4	4,75	25,39	6,3	93,7
10	2	35,78	8,9	84,9
20	0,84	63,92	15,8	69,0
40	0,425	107,29	26,5	42,5
60	0,25	61,81	15,3	27,2
140	0,106	80,34	19,9	7,3
200	0,075	14,83	3,7	3,6
BANDEJA		14,08	3,5	0,2
		403,44	99,836	



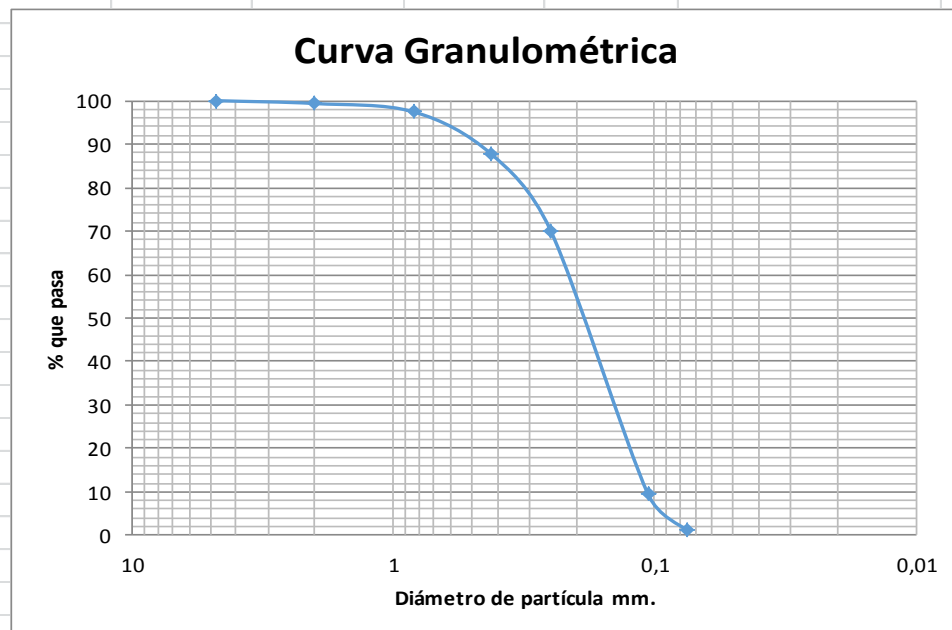
cu	5,57044897
cc	0,90784834

Resultados tierra C: ensayo de determinación de los tamaños de las partículas.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
Localización del proyecto: Universidad Pontificia Bolivariana			
Descripción del suelo: Malpaso			
Realizado por: Hernando Ardila S			
Peso de la muestra seca + recipiente	381,63	peso inicial [g]	500
peso del recipiente	187,1	Peso lavado [g]	305,47
peso de la muestra seca, W_s	194,53	perdidas por tamizado	0,89%
		%pasa 200	61,3

Análisis por tamizado y forma de granos

Tamiz No	Diam (mm)	Peso retenido	% retenido	% que pasa
4	4,75	0	0,0	100,0
10	2	1,28	0,7	99,3
20	0,84	3,66	1,9	97,5
40	0,425	18,66	9,6	87,9
60	0,25	34,53	17,8	70,1
140	0,106	117,92	60,6	9,5
200	0,075	16,28	8,4	1,1
BANDEJA		0,47	0,2	0,9
		192,8	99,120	



cu	2,10811454
cc	0,98806704

Apéndice D. Límites de consistencia

Resultados tierra A: Límites de consistencia.

DETERMINACION DE LIMITES DE ATTERBERG				
Localización del proyecto:	Universidad Pontificia Bolivariana			
Descripción del suelo:	San Rafael			
Profundidad de la muestra:	1,5 m			
<i>Determinación del Limite Líquido</i>				
N.º Lata	a	b	c	f
Peso de suelo húmedo + lata	30,58	23,98	25,53	25,93
Peso de suelo seco + lata	29,77	23,22	24,34	24,66
Peso de lata	27,35	20,98	21,06	21,3
Peso de suelo seco	2,42	2,24	3,28	3,36
Peso de agua	0,81	0,76	1,19	1,27
Contenido de humedad%	33,4710744	33,9285714	36,2804878	37,797619
Número de golpes, N	31	27	23	17
<i>Determinación del Limite Plástico</i>				
N.º Lata	1	240		
Peso de suelo húmedo + lata	27,26	39,82	Límite Líquido = 35%	
Peso de suelo seco + lata	26,5	38,7	Límite plástico = 15,7%	
Peso de lata	21,2	32,17	Índice de Plasticidad = 19,5%	
Peso de suelo seco	5,3	6,53		
Peso de agua	0,76	1,12		
Contenido de humedad%	14,3396226	17,151608		

Resultados tierra B: Límites de consistencia.

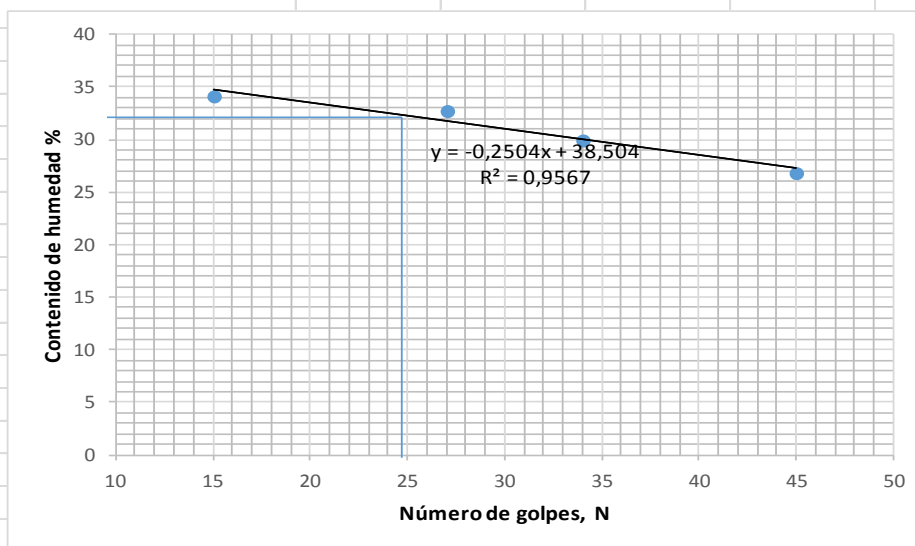
DETERMINACION DE LIMITES DE ATTERBERG				
Localización del proyecto:	Universidad Pontificia Bolivariana			
Descripción del suelo:	diagonal 15			
Profundidad de la muestra:	1,5 m			
<i>Determinación del Límite Líquido</i>				
N.º Lata	a	b	c	f
Peso de suelo húmedo + lata	23,89	31,77	23,75	28,23
Peso de suelo seco + lata	23,05	30,38	23,71	26,41
Peso de lata	21,1	26,93	22,97	21,76
Peso de suelo seco	1,95	3,45	0,74	4,65
Peso de agua	0,84	1,39	0,04	1,82
Contenido de humedad%	43,0769231	40,2898551	5,40540541	39,1397849
Número de golpes, N	18	22	31	35
<i>Determinación del Límite Plástico</i>				
N.º Lata	17	18		
Peso de suelo húmedo + lata	48,23	33,6	Límite Líquido = 34%	
Peso de suelo seco + lata	46,84	33,36	Límite plástico = 21,3%	
Peso de lata	40,72	32,15	Índice de Plasticidad = 12,2%	
Peso de suelo seco	6,12	1,21		
Peso de agua	1,39	0,24		
Contenido de humedad%	22,7124183	19,8347107		

Resultados tierra C: Límites de consistencia.

DETERMINACION DE LIMITES DE ATTERBERG	
Localización del proyecto:	Universidad Pontificia Bolivariana
Descripción del suelo:	Mal Paso
Profundidad de la muestra:	estrato inferior de cantera

Determinación del Límite Líquido

N _o Lata	a	b	c	f
Peso de suelo húmedo + lata	15,49	21,26	21,09	15,21
Peso de suelo seco + lata	14,39	20,58	19,09	14,6
Peso de lata	10,72	18,5	13,24	12,33
Peso de suelo seco	3,67	2,08	5,85	2,27
Peso de agua	1,1	0,68	2	0,61
Contenido de humedad%	29,972752	32,6923077	34,1880342	26,8722467
Número de golpes, N	34	27	15	45



Determinación del Límite Plástico

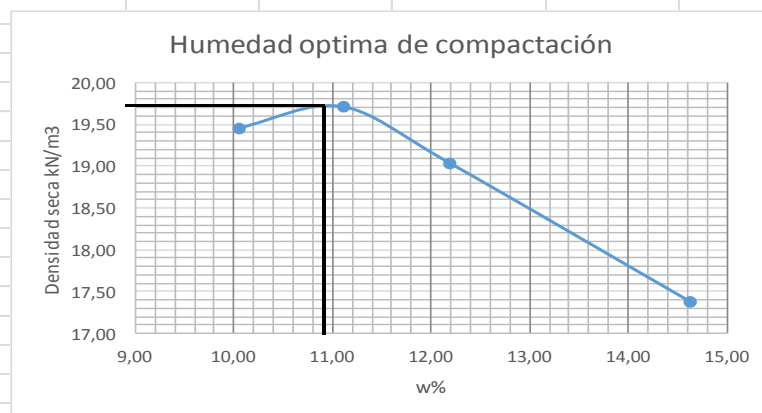
N _o Lata	38	20
Peso de suelo húmedo + lata	15,69	25,73
Peso de suelo seco + lata	14,98	24,73
Peso de lata	10,93	18,13
Peso de suelo seco	4,05	6,6
Peso de agua	0,71	1
Contenido de humedad%	17,5308642	15,1515152

Límite Líquido = 32%
 Límite plástico = 16,3%
 Índice de Plasticidad = 15,9%

Apéndice E. Ensayo de compactación modificado

Resultados tierra A: Ensayo de compactación modificado.

ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN				
Localización del proyecto:	Universidad Pontificia Bolivariana			
Descripción del suelo:	San Rafael			
Realizado por:	Hernando Ardila S		Fecha de la práctica:	01/03/2019
Golpes/capa:	25/5	N.º de capas	5	
Dimensiones del molde, cm:	Radio	5	Altura	11,6
Vol	911,06187 cm ³			
<i>Determinación del contenido de humedad</i>				
Muestra N.º	1	2	3	4
Lata N.º	111	23	6	18
Peso de lata + suelo húmedo	79	113,2	66	122,4
Peso de lata + suelo seco	74,7	104	61,1	110,9
Peso del agua	4,3	9,2	4,9	11,5
Peso de la lata	31,9	21,1	20,9	32,2
peso del suelo seco	42,8	82,9	40,2	78,7
contenido de humedad w %	10,05	11,10	12,19	14,61
<i>Determinación de la densidad</i>				
Contenido de humedad deseado	7	11	15	19
Peso suelo + molde	5783	5897	5920	5834
peso del molde	3840	3840	3840	3840
Peso de suelo seco en molde, g	1943	2057	2080	1994
Densidad húmeda, kN/m ³	20,92	22,15	22,40	21,47
Densidad seca, kN/m ³	19,46	19,71	19,04	17,39



Resultados tierra B: Ensayo de compactación modificado

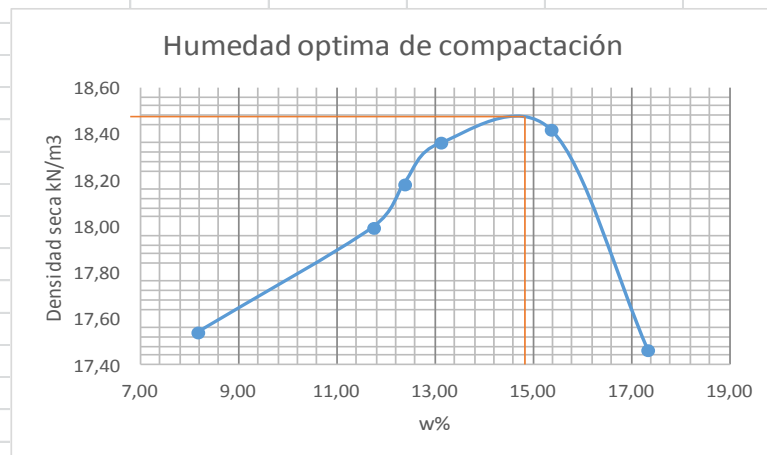
ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN					
Localización del proyecto:	Universidad Pontificia Bolivariana				
Descripción del suelo:	Diagonal 15				
Realizado por:	Hernando Ardila S			Fecha de la práctica:	01/03/2019
Golpes/capa:	25/5	N _o de capas		5	
Dimensiones del molde	Radio	5	cm	Altura	11,6
Vol	911,06187 cm ³				

Determinación del contenido de humedad

Muestra N _o	1	2	3	4	5	6
Lata N _o	370	1	19	17	36	7
Peso de lata + suelo húmedo	57,57	39,84	76,32	85,91	83,43	74,31
Peso de lata + suelo seco	56,28	37,86	71,43	80,67	75,12	67,37
Peso del agua	1,29	1,98	4,89	5,24	8,31	6,94
Peso de la lata	40,46	20,99	31,89	40,72	21,08	27,36
peso del suelo seco	15,82	16,87	39,54	39,95	54,04	40,01
contenido de humedad w %	8,15	11,74	12,37	13,12	15,38	17,35

Determinación de la densidad

Contenido de humedad deseado	7,5	10	12,5	15	17,5	20
Peso suelo + molde	5394	5490	5563	5639	5706	5660
peso del molde	3633	3633	3633	3633	3633	3633
Peso de suelo seco en molde, g	1761	1857	1930	2006	2073	2027
Densidad húmeda, kN/m ³	18,96	20,00	20,78	21,60	22,32	21,83
Densidad seca, kN/m ³	17,54	18,00	18,18	18,36	18,42	17,46



Resultados tierra C: Ensayo de compactación modificado.

ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN					
Localización del proyecto:	Universidad Pontificia Bolivariana				
Descripción del suelo:	Malpaso				
Realizado por:	Hernando Ardila S			Fecha de la práctica:	29/03/2019
Golpes/capa:	25/5	N.º de capas		5	
Dimensiones del molde, cm:	Radio	5		Altura	11,6
Vol	911,06187 cm ³				

Determinación del contenido de humedad

Muestra N.º	1	2	3	4
Lata N.º	77	2A	25	40
Peso de lata + suelo húmedo	66,88	97,91	80,59	88,36
Peso de lata + suelo seco	63,8	92,98	75,65	80,78
Peso del agua	3,08	4,93	4,94	7,58
Peso de la lata	21,47	40,89	32,1	31,68
peso del suelo seco	42,33	52,09	43,55	49,1
contenido de humedad w %	7,28	9,46	11,34	15,44

Determinación de la densidad

Contenido de humedad deseado	1	5	9	13
Peso suelo + molde	5604	5702	5792	5770
peso del molde	4688	4688	4688	4688
Peso de suelo seco en molde, g	916	1014	1104	1082
Densidad húmeda, kN/m ³	9,86	10,92	11,89	11,65
Densidad seca, kN/m ³	9,76	10,37	10,82	10,14

