

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO MECÁNICO DE MUROS EN
TAPIA PISADA CON INCLUSIÓN DE BIOMASA RESIDUAL**

MARIA FERNANDA NARDEZ GIRALDO

FIRMA DEL ESTUDIANTE_____

DOCENTE SUPERVISOR:

Ing. SERGIO MANUEL PINEDA VARGAS PhD.

VISTO BUENO SUPERVISOR_____

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

**ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

BUCARAMANGA

2018

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 11 |
| OBJETIVOS | 16 |
| Objetivo General | 16 |
| Objetivos Específicos..... | 16 |
| MARCO TEÓRICO | 17 |
| DISEÑO METODOLÓGICO | 25 |
| Etapa I. Recolección de Información | 25 |
| Etapa II. Extracción y Clasificación del Suelo Usado en la investigación..... | 25 |
| Fase 1. Método de Apique para Extracción de Materia Prima..... | 25 |
| Fase2. Ensayos de Clasificación de la materia prima..... | 26 |
| Fase 3. Método de Clasificación de Suelo. | 39 |
| Etapa III. Ensayo de resistencia a la compresión. | 44 |
| Etapa III. Ensayo de conductividad térmica..... | 48 |
| IMPLEMENTACIÓN Y EJECUCIÓN DE PRUEBA | 50 |
| Ejecución de etapa I. Recolección de Información | 50 |
| Ejecución de etapa II. Extracción y Clasificación del Suelo Usado en la investigación..... | 51 |
| Fase 1. Método de Apique para Extracción de Suelo..... | 51 |
| Fase2. Ensayos de Clasificación del Suelo. | 52 |
| Fase 3. Clasificación de la materia prima..... | 67 |
| Etapa III. Desarrollo del ensayo de resistencia a la compresión. | 68 |
| Etapa III. Ejecución del ensayo de conductividad térmica..... | 81 |
| ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 84 |
| Análisis de la Clasificación del Suelo Usado en la investigación. | 84 |
| Análisis de resultados del ensayo de resistencia a la compresión. | 84 |
| Análisis de resultado del ensayo de conductividad térmica. | 85 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 88 |
| ANEXOS | 90 |
| ANEXO A. FORMATOS DE ENSAYOS | 90 |
| ANEXO A.1. Formato de Granulometría. | 90 |
| ANEXO A.2. Formato de Límites. | 91 |
| ANEXO A.3. Formato de Ensayo de Proctor Estándar. | 92 |

| | |
|--|-----|
| ANEXO A.4. Formato de determinación de densidad de la biomasa. | 93 |
| ANEXO A.5. Formato de ensayo a compresión. | 94 |
| ANEXO A.6. Formato de Ensayo de Conductividad Térmica. | 95 |
| ANEXO B. RESULTADOS DE ENSAYOS | 96 |
| ANEXO B.1. Formato con Resultados de la Granulometría..... | 96 |
| ANEXO B.2. Formato con Resultados de los Límites..... | 97 |
| ANEXO B.3. Formato de Ensayo de Proctor Estándar..... | 98 |
| ANEXO B.4. Formato de determinación de densidad de la biomasa. | 99 |
| ANEXO B.5. Resultados de Ensayo de Resistencia a la Compresión | 100 |
| ANEXO B.6. Resultados de Ensayo de Conductividad Térmica..... | 104 |
| ANEXO C. NORMATIVA USADA EN ENSAYOS | 107 |
| ANEXO C.1. I.N.V. E -13 | 107 |
| ANEXO C.2. NORMA 080 | 108 |
| REFERENCIAS | 109 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Capacidad instalada de energía por tecnología/recurso..... | 11 |
| Tabla 2. Conductividad de materiales de construcción. | 21 |
| Tabla 3. Cantidad de residuos bagazo de caña de azúcar. | 23 |
| Tabla 4. Conductividad térmica de materiales aislantes..... | 23 |
| Tabla 5. Serie de tamices de malla cuadrada..... | 28 |
| Tabla 6. Número de golpes por contenido de agua. | 32 |
| Tabla 7. Métodos para realizar el ensayo normal de compactación. | 37 |
| Tabla 8. Tipos de suelos gruesos para el sistema de clasificación SUCS. | 41 |
| Tabla 9. Especificaciones de especímenes para ensayo a compresión. | 44 |
| Tabla 10. Especificaciones de especímenes para ensayo de conductividad térmica. | 48 |
| Tabla 11. Suelo retenido por tamiz..... | 53 |
| Tabla 12. Tabla granulométrica..... | 54 |
| Tabla 13. Resultados de ensayo de límite líquido. | 59 |
| Tabla 14. Resultados completos del ensayo de límite líquido..... | 59 |
| Tabla 15. Pesos registrados del ensayo de límite plástico. | 62 |
| Tabla 16. Resultados completos del ensayo de límite plástico. | 62 |
| Tabla 17. Detalle de método A, para realizar el ensayo normal de compactación..... | 64 |
| Tabla 18. Humedad y densidad del suelo. | 72 |
| Tabla 19. Especificaciones de especímenes para ensayo a compresión con nuevos porcentajes..... | 78 |
| Tabla 21. Composición del suelo para construcción en tapia..... | 84 |
| Tabla 22. Composición del suelo utilizado en el proyecto..... | 84 |

Tabla 23. Conductividad térmica por porcentaje. 87

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Ilustración 1. Composición de la generación de energía eléctrica 2014 – 2015. | 12 |
| Ilustración 2. Consumo de energía en los sectores económicos de Colombia 2009. | 12 |
| Ilustración 3. Etapas del ciclo de vida de una vivienda. | 13 |
| Ilustración 4. Aislantes térmicos según su origen. | 14 |
| Ilustración 5. Vivienda construida en tapia pisada. | 17 |
| Ilustración 6. Extracción de materia prima y elaboración de muros de tapia pisada. | 18 |
| Ilustración 7. Factores que influyen en el balance energético. | 19 |
| Ilustración 8. Pérdidas térmicas una vivienda. | 20 |
| Ilustración 9. Estructura del sistema SIRWALL. | 22 |
| Ilustración 10. dimensiones de la técnica de apique (vista superior – vista frontal) | 26 |
| Ilustración 11. Tabla guía del formato de granulometría. | 29 |
| Ilustración 12. Colocación del suelo dentro de la cazuela. | 33 |
| Ilustración 13. Método manual para formar rollos de suelo. | 35 |
| Ilustración 14. Sistema de clasificación SUCS, identificación de suelo grueso. | 40 |
| Ilustración 15. Sistema de clasificación SUCS, Clasificación de suelo grueso. | 40 |
| Ilustración 16. Sistema de clasificación SUCS, Clasificación de Gravas. | 41 |
| Ilustración 17. Sistema de clasificación SUCS, Clasificación de Arenas. | 42 |
| Ilustración 18. Sistema de clasificación SUCS, identificación de suelo fino. | 42 |
| Ilustración 19. Sistema de clasificación SUCS, Clasificación de Suelos finos. | 43 |
| Ilustración 20. Sistema de clasificación SUCS, Clasificación de Suelos finos. | 43 |
| Ilustración 21. Dimensiones de los especímenes. | 44 |
| Ilustración 22. Tabla para determinar cantidades. (Datos ya determinados). | 45 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 23. Tabla para determinar cantidades. (Datos encontrados a través de ensayos) | 45 |
| Ilustración 24. Fase 1. Pesos tomados del ensayo con picnómetro. | 46 |
| Ilustración 25. Tabla para determinar cantidades. | 47 |
| Ilustración 26. Módulo de conducción de calor lineal. TXC-CL | 49 |
| Ilustración 27. Ubicación del lugar de extracción de suelo. | 50 |
| Ilustración 28. Tipos de Bagazo provenientes de CENICAÑA “Tipo A” (izquierda), “Tipo B” (derecha) | 51 |
| Ilustración 29. Ejecución de la técnica de apique. | 52 |
| Ilustración 30. Serie de tamices para granulometría. | 53 |
| Ilustración 31. Gráfico de granulometría, | 55 |
| Ilustración 32. Gráfico de granulometría, valores de D60, D30 y D10 para Cu y Cc. | 56 |
| Ilustración 33. Muestra de suelo para ensayo de limite líquido y plástico. | 57 |
| Ilustración 34. Muestra de suelo tamizada para ensayo de limite líquido y plástico. | 57 |
| Ilustración 35. Mezcla de la muestra previamente preparada y agua, buscando contenidos adecuados. | 58 |
| Ilustración 36. Colocación de la mezcla de suelo dentro de la cazuela. | 58 |
| Ilustración 37. Curva de fluidez. | 60 |
| Ilustración 38. Preparación de material para ensayo de límite plástico. | 61 |
| Ilustración 39. Muestras de suelo desmoronado listas para secar en horno. | 62 |
| Ilustración 40. Curva de compactación. | 66 |
| Ilustración 41. Carta de plasticidad para el suelo en análisis. | 67 |
| Ilustración 42. Sistema de clasificación SUCS, Clasificación de Suelos finos, ANALIZADO. | 68 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 43. Muestra secada al aire libre y en el horno. | 69 |
| Ilustración 44. Tamizado de la materia prima. | 69 |
| Ilustración 45. Bagazo tipo A. (Sin proceso)..... | 70 |
| Ilustración 46. proceso de triturado de bagazo tipo A..... | 70 |
| Ilustración 47. Cernida del material triturado..... | 70 |
| Ilustración 48. Bagazo tipo B. (Procesada y compactada) | 71 |
| Ilustración 49. Trituración en la máquina de los ángeles (Bagazo tipo B)..... | 71 |
| Ilustración 50. Cernida del material triturado..... | 71 |
| Ilustración 51. Bagazo en estado saturado (tipo A y tipo B)..... | 72 |
| Ilustración 52. Secado superficial del bagazo (tipo A y tipo B)..... | 72 |
| Ilustración 53. Proceso de pesaje del matraz (vacío - con agua)..... | 73 |
| Ilustración 54. Pesaje de la fibra SSS. (tipo A - tipo B)..... | 73 |
| Ilustración 55. Pesaje de la fibra en matraz con agua. (tipo A - tipo B)..... | 74 |
| Ilustración 56. Molde y mazo de compactación. | 77 |
| Ilustración 57. Ensayo de contenido de humedad en campo..... | 77 |
| Ilustración 58. Especímenes con alteraciones (Bagazo tipo A)..... | 78 |
| Ilustración 59. Especímenes con bagazo tipo A, reformulados..... | 79 |
| Ilustración 60. Especímenes con bagazo tipo b, reformulados..... | 79 |
| Ilustración 62. Especímenes fallados a compresión, Bagazo tipo A. | 80 |
| Ilustración 61. Especímenes fallados a compresión, Bagazo tipo B. | 81 |
| Ilustración 64. Piezas cuna. | 82 |
| Ilustración 65. Pieza cuna y aro (con espécimen). | 83 |
| Ilustración 63. Resultados de ensayo a compresión, Bagazo tipo B. | 85 |
| Ilustración 66. Conductividad térmica de especímenes con el 0% de contenido. | 86 |

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO MECÁNICO DE MUROS EN TAPIA PISADA CON INCLUSIÓN DE BIOMASA RESIDUAL

AUTOR(ES): Maria Fernanda Nardez Giraldo

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): PhD Sergio Manuel Pineda

RESUMEN

La eficiencia energética se ha convertido en una tendencia creando hábitos culturales y generado inversiones a niveles tecnológicos, buscando una reducción de consumo de energía en las actividades que realiza el ser humano. La construcción es una de estas actividades que junto con la industria genera altos consumos de energía, siendo la segunda la generadora de insumos para el sector construcción, ya que en Colombia los sistemas constructivos más utilizados como la mampostería confinada, necesitan de procesos industriales donde la materia prima se transforma usando energía y produciendo emisiones de CO₂. Por este motivo se deben considerar sistemas de construcción alternativos, donde los materiales a utilizar ayuden a disminuir estos indicadores. La tapia pisada es una alternativa de construcción de viviendas que genera ahorro en todas las tres etapas en las que se producen consumos energéticos: en la manufactura de materiales, construcción y operación. Esta investigación se enfoca en la etapa de operación, donde los consumos se generan por el uso de aparatos, normalmente eléctricos, para crear ambientes de confort dentro de las viviendas, los cuales pueden ser omitidos en las construcciones de tapia pisada gracias a las propiedades de absorción-transpiración que regulan el comportamiento térmico dentro de la misma. Se analizó aquí entonces, el comportamiento fisicomecánico del material que compone los muros de tapia pisada incluyendo biomasa residual en diferentes porcentajes, realizando ensayos de compresión simple y conductividad térmica para identificar la relación del porcentaje de participación de la biomasa en el comportamiento estructural y térmico del muro. Se encontró que a mayor porcentaje de biomasa la capacidad de carga inicialmente mejora y el nivel de aislamiento térmico aumenta. Sin embargo, el material pierde cohesión, forma y homogeneidad.

PALABRAS CLAVE:

Conductividad térmica, comportamiento físico-mecánico, tapia pisada, apique, biomasa.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: ANALYSIS OF THE MECHANICAL PHYSICAL BEHAVIOR OF WALLS IN TAPIA PISADA WITH INCLUSION OF RESIDUAL BIOMASS

AUTHOR(S): Maria Fernanda Nardez Giraldo

FACULTY: Facultad de Ingenieria Civil

DIRECTOR: PhD Sergio Manuel Pineda

ABSTRACT

Energy efficiency has become a trend creating cultural habits and generating investments at technological levels, seeking a reduction of energy consumption in the activities carried out by the human being. Construction is one of these activities that together with the industry generates high energy consumption, being the second the generator of inputs for the construction sector, since in Colombia the most used construction systems such as confined masonry, need industrial processes where the raw material is transformed using energy and producing CO2 emissions. For this reason, alternative construction systems should be considered, where the materials to be used help to reduce these indicators. The stepped wall is an alternative to housing construction that generates savings in all three stages in which energy consumption occurs: in the manufacture of materials, construction and operation. This research focuses on the stage of operation, where consumption is generated by the use of appliances, usually electrical, to create comfort environments within homes, which can be omitted in the construction of footprints thanks to the properties of absorption-transpiration that regulate the thermal behavior within it. The physical-mechanical behavior of the material composing the stepped wall walls including residual biomass in different percentages was analyzed here, performing simple compression tests and thermal conductivity to identify the ratio of the percentage of participation of the biomass in the structural behavior and thermal of the wall. It was found that the higher the percentage of biomass the load capacity initially improves and the level of thermal insulation increases. However, the material loses cohesion, form and homogeneity.

KEYWORDS:

Thermal conductivity, physical-mechanical behavior, footprint, apique, biomass

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales en los últimos años han generado preocupación en la mayoría de los países alrededor del mundo, según un artículo del TIEMPO publicado en el año 2016, “América latina y el caribe son una de las regiones más vulnerable a las crisis ambientales” (Steiner, 2016), esto se debe a la dependencia hacia los servicios que ofrece el ecosistema.

Tabla 1. Capacidad instalada de energía por tecnología/recurso.

| TECNOLOGÍA /RECURSO | CAPACIDAD EFECTIVA NETA [MW] | CAPACIDAD EFECTIVA NETA [%] |
|----------------------|------------------------------|-----------------------------|
| ACPM | 931,0 | 5.57% |
| AGUA | 11.679,6 | 69.92% |
| BAGAZO | 128,7 | 0.77% |
| BIOGAS | 4,0 | 0.02% |
| BIOMASA | 0,0 | 0.00% |
| CARBON | 1.352,0 | 8.09% |
| COMBUSTOLEO | 187,0 | 1.12% |
| GAS | 2.093,0 | 12.53% |
| JET-A1 | 46,0 | 0.28% |
| MEZCLA GAS – JET-A1 | 264,0 | 1.58% |
| VIENTO | 18,4 | 0.11% |
| Total general | 16.703,6 | 100% |

Fuente de datos: (UPME, 2017)

En Colombia, esta dependencia se puede evidenciar con la generación de energía. Al observar las diferentes tecnologías que conforman la matriz eléctrica en el país (Tabla 1), aproximadamente un 70% es generada por recursos hídricos, es decir, energía hidráulica. Este tipo de energía además de ofrecer una serie de ventajas, como la de ser una fuente de energía limpia y renovable (relativamente limpia e inagotable), ofrece también algunas desventajas, como la pérdida de fauna y suelo fértil en la construcción de los embalses y su dependencia para la generación hacia el ecosistema, lo que la convierte en una fuente vulnerable para cualquier fenómeno climático.

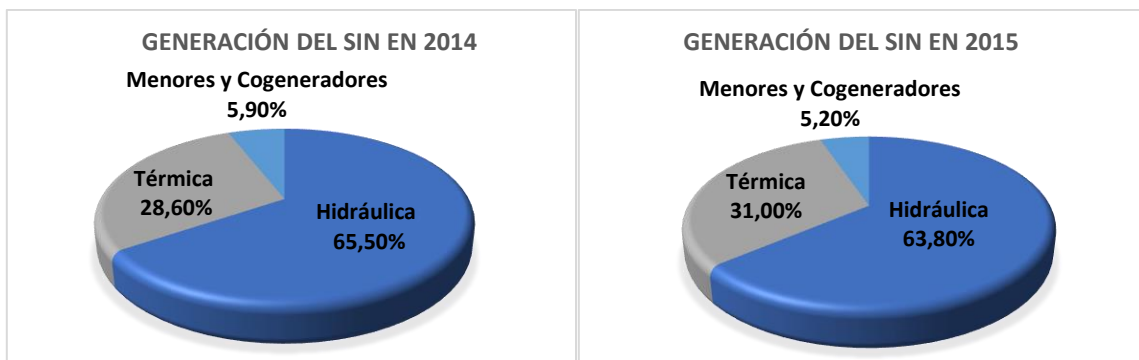


Ilustración 1. Composición de la generación de energía eléctrica 2014 – 2015.

Fuente de datos: (XM, 2016)

Esta vulnerabilidad, se pudo observar en el país entre los años 2014 - 2015 (Ver Ilustración 1), donde un déficit en la generación de energía hidráulica por el fenómeno de El Niño que se desarrolló durante el segundo semestre del 2015 ocasionado un crecimiento en la generación de energía térmica (XM, 2016), lo cual, es un problema ambiental mayor para el país ya que este tipo de energía genera, emisiones contaminantes y riesgo de contaminación por los materiales usados en su producción. Teniendo en cuenta los problemas que ocasiona cualquier fenómeno climático en la generación de energía eléctrica en Colombia, es importante buscar alternativas que ayuden en la disminución de los consumos de energía.

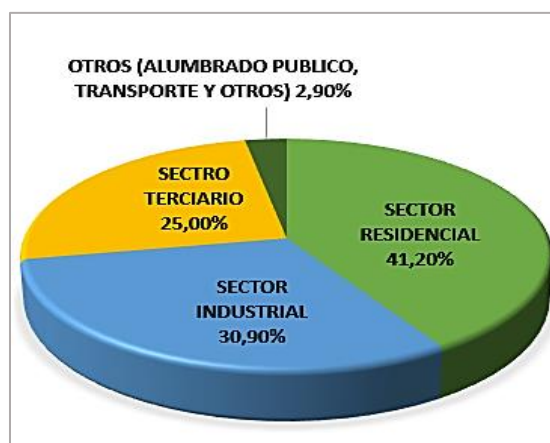


Ilustración 2. Consumo de energía en los sectores económicos de Colombia 2009.

Fuente: (UPME, 2010)

Para encontrar alternativas que ayuden en la disminución de energía, es importante identificar en el país donde se generan los consumos principales. Según el Sistema Interconectado Nacional – SIN en el informe de demanda de energía de Colombia publicado por la UPME en el año 2010, los sectores en los que se realizan mayores consumos son el sector residencial con 41,20%, y el sector industrial con 30,90% (Ver Ilustración 2). Estos dos sectores son esenciales para el desarrollo de la construcción y necesarios en el ciclo de vida de una vivienda (Ver Ilustración 3), es decir que es en este ciclo donde se deben buscar alternativas que disminuyan los consumos energéticos.



Ilustración 3. Etapas del ciclo de vida de una vivienda.

Fuente: Autor a partir de (Creara Internacional, 2012)

La tapia pisada es un sistema de construcción vernáculo tradicional en Colombia, y es una alternativa factible para lograr la disminución de los consumos de energía frente a los sistemas convencionales en todas las etapas del ciclo de vida de una vivienda. En la última etapa denominada operación del ciclo de vida de una vivienda, las construcciones generan consumos por el uso de electrodomésticos, iluminación, preparación de alimentos, calefacción y aires acondicionados. En general, por actividades que hacen más confortable su habitabilidad.

En viviendas construidas con sistemas como los industrializados y mampostería, las pérdidas de energía a través de las paredes de la vivienda son de aproximadamente 35% según la UPME (Creara Internacional, 2012); esto no ocurre con la tapia pisada gracias a la propiedad

de absorción/desorción de humedad que posee la tierra apisonada logrando disminuciones en este porcentaje. Conociendo estas pérdidas en los sistemas comunes, se deben tomar medidas pasivas de ahorro energético, que disminuyan este indicador; estas adaptaciones implementadas en ocasiones generan consumos adicionales como ocurre con las medidas activas. Una medida pasiva común es la de uso aislantes, como paneles o en combinación con el material usado para las envolventes de las edificaciones, controlando los niveles térmicos y acústicos dentro de las viviendas.

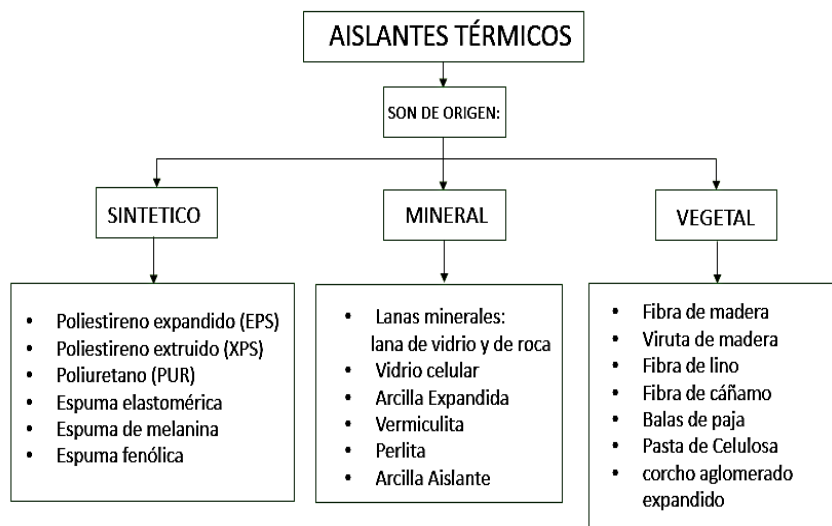


Ilustración 4. Aislantes térmicos según su origen.

Fuente: Autor

Los diferentes orígenes de los aislantes (Ver Ilustración 4) requieren para su fabricación de procesos industriales, como es el caso de los aislantes de origen sintético y mineral que generan consumos energéticos adicionales. Una alternativa que ayude en la esta disminución es trabajar con aislantes de origen vegetal que se puedan usar con pocos o ningún proceso industrial. La biomasa es un buen ejemplo amigable generado por el sector agrícola, gracias a su baja conductividad térmica.

En Colombia del 44,77% de la superficie destinada a la actividad agropecuaria, 4'058.470 Ha son dedicadas a cultivos de especies permanentes y transitorias, lo que la convierte en una fuente productora continua de biomasa (Jaramillo, 2012).

Esta investigación, tiene como finalidad el analizar el comportamiento físico-mecánico de muros de tapia pisada construidos con inclusión de biomasa residual, proveniente de cultivos extensivos en el departamento de Santander e identificar el porcentaje de participación de la biomasa en el comportamiento térmico de la tapia.

OBJETIVOS

Objetivo General

Analizar el comportamiento físico-mecánico de muros de tapia pisada construidos con inclusión de biomasa residual proveniente de cultivos extensivos en el departamento de Santander e identificar el porcentaje de participación de la biomasa en el comportamiento térmico de la tapia.

Objetivos Específicos

- Diseñar experimentos para la medición de parámetros físico-mecánicos de tierra armada con contenido de biomasa.
- Analizar el desempeño estructural de muros en tierra armada tradicionales en Santander con la inclusión de biomasa residual.
- Estudiar la variación en la conductividad térmica de los muros de tierra armada con la inclusión de diversos tipos de biomasa.
- Evaluar el comportamiento térmico de la tapia con inclusión de biomasa.

MARCO TEÓRICO

Después de analizar los sectores y actividades que generan alto consumo de energía, se logró identificar que es en el ciclo de vida de las viviendas donde se deben buscar alternativas que ayuden a la disminución de este consumo.



Ilustración 5. Vivienda construida en tapia pisada.

Fuente: Autor. Taller de construcción en tapia, diciembre 2016, Barichara, Santander.

Es entonces la tapia en una de estas alternativas que, además de ser un sistema vernáculo y de los más antiguos en Colombia, posee propiedades constructivas que ayudan a disminuir consumo energético en las diferentes etapas del ciclo de vida mencionado. Realizando una comparación entre sistemas tradicionales de mampostería e industrializados con los sistemas de tierra apisonada (Tapia) en este ciclo podemos observar que, en la etapa de MANUFACTURA DE MATERIALES la tapia pisada, gracias a su proceso constructivo y materia prima utilizada, no genera consumos considerables por extracción, procesos industriales y transporte, debido a que la materia prima esencial se obtiene directamente del sitio de construcción cuando se excava los cimientos de la misma vivienda (Gatti, Arquitectura y Construcción en Tierra, 2012). Para esta extracción tampoco se requiere

maquinaria especializada ya que con herramientas menores (como picas y palas) se puede realizar esta labor (Ver Ilustración 6). Por esto último se eliminan o disminuye también el consumo energético proveniente de combustibles fósiles que alimentan la maquinaria tradicional, en las obras.



Ilustración 6. Extracción de materia prima y elaboración de muros de tapia pisada.

Fuente: Autor. Taller de construcción en tapia, diciembre 2016, Barichara, Santander.

De manera similar a la etapa anterior, en la etapa de CONSTRUCCIÓN, la tapia pisada no genera consumos de combustible por transporte de material gracias a que la manufactura de materiales no es necesaria fuera del sitio de obra pues la materia prima se encuentra en el terreno. El sistema constructivo hace que los muros sean modelados por compresión dentro de un encofrado llamado tapial (Ver Ilustración 6), realizados de manera artesanal.

Adicionalmente, en la OPERACIÓN comparando los dos sistemas de construcción, los consumos de electricidad en una vivienda generalmente se dan por el uso de electrodomesticos, aparatos que ayudan a mejorar la iluminación y el clima dentro de las residencias, el cual se puede disminuir desarrollando medidas de ahorro activas y pasivas (Creara Internacional, 2012). La primera de estas medidas ahorro, las activas son todas

aquellas estrategias medioambientales que se puedan aplicar como, la educación, cultura y el uso racional de equipos más eficientes además de sostenibles.

Por otra parte, las medidas pasivas son todas las estrategias que se enfocan en la aplicación de diseños y materiales que ayuden en la disminución de los consumos energéticos. En la construcción de viviendas con sistemas convencionales, para lograr una disminución se realizan diseños de balance energético (Ver Ilustración 7), donde se analizan la influencia de factores internos y externos en las pérdidas y ganancias de energía donde los factores tanto internos como externos influyen, y es ahí donde se desarrollan estrategias como, el uso de aislantes, aprovechamiento de infiltraciones de aire y luz solar.

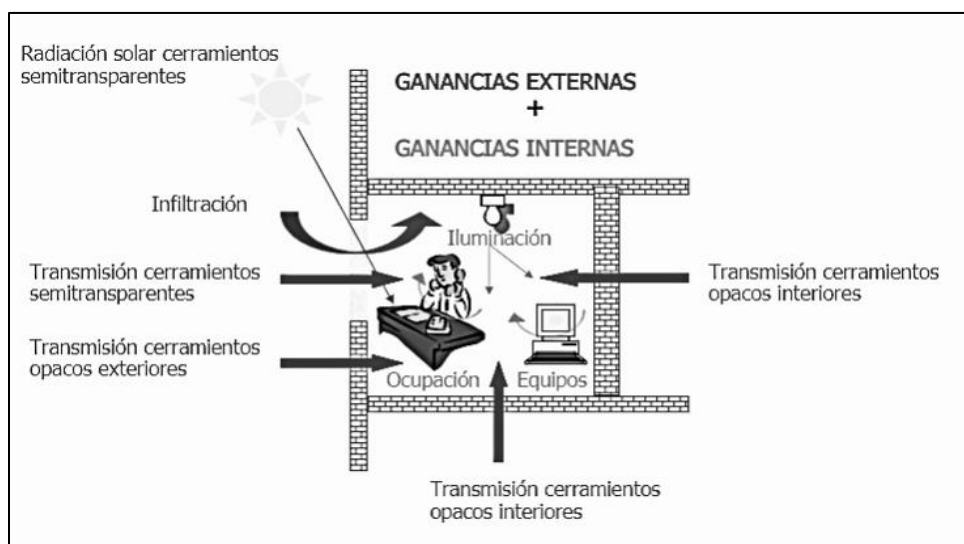


Ilustración 7. Factores que influyen en el balance energético.

Fuente: (Energesis, 2016)

El balance energético tiene como finalidad en las viviendas y edificaciones el desarrollar ambientes de confort a sus habitantes o usuarios, manteniendo temperaturas adecuadas sin importar las condiciones climatológicas exteriores. Para identificar cual es la estrategia más eficaz enfocada en la conservación de este confort, se debe analizar en donde se generan las

pérdidas térmicas, las cuales según la UPME, se dan en mayor proporción en una vivienda por la falta de aislamiento térmico de las envolvente o superficie exterior de la vivienda (Creara Internacional, 2012); esta pérdida de energía a través de las paredes es de aproximadamente del 35% (Ver Ilustración 8).

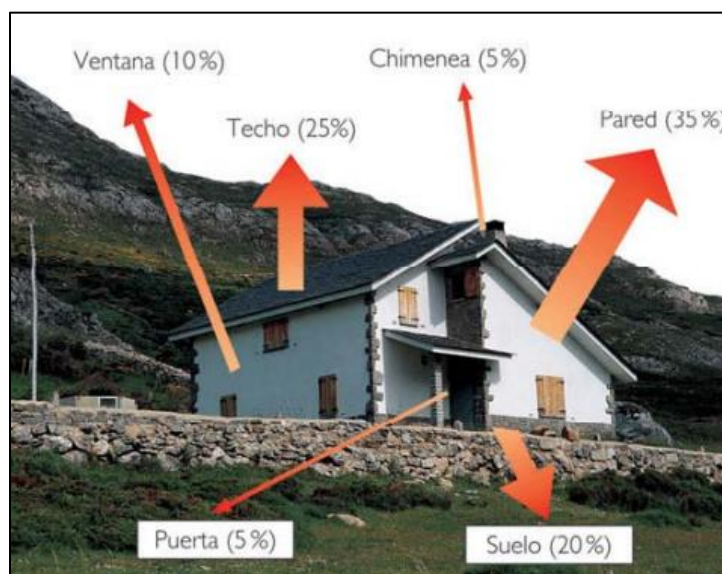


Ilustración 8. Pérdidas térmicas una vivienda.

Fuente: (Creara Internacional, 2012)

Estos aislantes térmicos, aun empleándolos no son una solución perfecta térmicamente hablado. Esta imperfección se debe a la variabilidad del clima exterior en las diferentes épocas del año, lo que ocasionaría ganancias de calor en verano y perdidas en invierno. En Colombia el no contar con estaciones climatológicas debido a la uniformidad térmica a lo largo del año, no garantiza la inexistencia de variaciones en clima, ya que existen diferentes escalas temporales debido a los fenómenos climatológicos (El niño – La niña), que hacen aún más complicado identificar el aislante que controle perdidas en las construcciones tradicionales.

La tapia pisada cuenta con cualidades que la convierten un sistema propicio para diferentes condiciones climáticas (Gatti, 2012), una de estas es la de absorción, donde los excesos de humedades pueden ser liberados después de un tiempo cuando el interior de la vivienda se encuentre seco o las absorbe cuando el ambiente este húmedo, también es de gran ayuda su espesor que varía entre 50 y 120 cm (Gallego, 2012). La absorción y espesor además de la materia prima típico de este tipo de construcción, dificulta la capacidad de transmitir las vibraciones sonoras y mejora sus comportamiento como aislante térmico debido a que su conductividad térmica (**k**); la conductividad es la capacidad de un material de transmitir calor a través de su masa (Callister, 2007), en la tapia esta conductividad es menor a la de los materiales más comunes para la construcción de viviendas (Ver Tabla 2) .

Tabla 2. Conductividad de materiales de construcción.

| MATERIAL | DENSIDAD [Kg/m ³] | CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [W/m*k] |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| TAPIAL | 1400 | 0,6 |
| BTC | 1700 | 0,81 |
| ADOBE | 1200 | 0,46 |
| HORMIGON ARMADO | 2300-2500 | 2,3 |
| HORMIGON EN MASA IN SITU | 2000-2300 | 1,65 |
| BLOQUE DE HORMIGON | 860 | 0,91 |
| PARED DE LADRILLO MACIZO | 2170 | 1,04 |
| PARED DE LADRILLO HUECO | 670 | 0,22 |

Fuente de datos: (S. Bestraten, E. Hormías, & A. Altemir, 2010)

Aunque, no es muy común el uso de aislantes en los muros de tapia existe sistemas ya patentados. Uno de estos es el SIREWALL, (Ver Ilustración 9) un sistema sándwich con la particularidad de incluir barras de refuerzo de acero corrugado para fijar un aislamiento de poliestireno extruido (S. Bestraten, E. Hormías, & A. Altemir, 2010). El problema con este sistema es el uso de poliestireno extruido que, al ser un aislante de origen sintético, generan preocupaciones sanitarias y medioambientales.

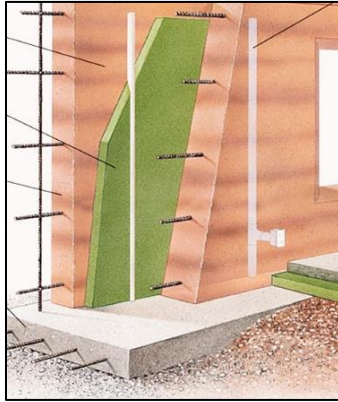


Ilustración 9. Estructura del sistema SIRWALL.

Fuente: (SIREWALL, 2018)

Para que la tapia se considere como sistema ahorrador de consumo energético, el material que se use para mejorar sus cualidades térmicas también debe aportar reducción en su elaboración, aplicación y retiro. Una alternativa es el uso de biomasa, que son todos los residuos que se generan a partir de los procesos de transformación natural o artificial de la materia viva, según la UPME. En Colombia se utilizan 4'058.470 Ha para los cultivos de especies transitoria y permanentes, que cada cosecha del proceso de corte y transformación se generan diferentes tipos de biomasa residual. Los cultivos transitorios como la caña de azúcar son el tercer cultivo con mayor generación de biomasa en Colombia (Ver Tabla 3) según, El Atlas del Potencial Energético de la Biomasa de Colombia (UPME, UIS, IDEAM, 2010).

La cantidad de residuos a nivel nacional es de 15.534.591 (t/año), de la cual gracias a sus propiedades una parte es usada por la industria para la generación de combustibles, pero son estas mismas las que lo convierten un material alternativo propicio como aislante que no necesita en la mayoría de los casos de un tratamiento industrial para su uso.

Tabla 3. Cantidad de residuos bagazo de caña de azúcar.

| MATERIAL | AREA SEMBRADA [Ha] | CANTIDAD DE RESIDUOS [TJ/año] |
|--------------------|-------------------------------|--|
| Caldas | 2.625 | 194.903 |
| Cauca | 34.486 | 2'317.443 |
| Cesar | 1.734 | 64.889 |
| Norte de Santander | 969 | 61.895 |
| Risaralda | 2.719 | 227.841 |
| Valle del Cauca | 168.033 | 12'667.620 |
| TOTAL | 210.566 | 15'534.591 |

Fuente: (UPME, UIS, IDEAM, 2010)

Si miramos su comportamiento en combinación con otros materiales de construcción, según Sera (1990) sus propiedades físico-mecánicas y morfológicas, lo catalogan como un material adecuado como Fibrorefuerzo en el concreto. Otra propiedad física importante en los aislantes es conductividad térmica, que al ser la relación entre el calor transportado por unidad de tiempo la convierte en una propiedad específica de cada material. Si comparamos la conductividad del bagazo con la de otros materiales aislantes más comunes (Ver Tabla 4), podemos observar que el valor para el bagazo es menor entre dos y tres veces lo cual es una ventaja para este material.

Tabla 4. Conductividad térmica de materiales aislantes.

| MATERIAL | CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [W/h m²] |
|------------------------|--|
| Lana mineral | 0,041 |
| Poliestireno expandido | 0,035 |
| Espuma de vidrio | 0,046 |
| Bagazo | 0,015 |

Fuente: autor a partir de (IRAM, 2002)

Conociendo las características térmicas de la tapia con su propiedad de absorción y las de la biomasa con su baja conductividad térmica, es posible que esta combinación presente

mejoras por lo cual es fundamental realizar ensayos térmicos. Si bien esta combinación puede mejorar térmicamente el sistema constructivo, lo más posible es que también genere cambios en el comportamiento mecánico, como lo es la resistencia.

DISEÑO METODOLÓGICO

Para el desarrollo de la investigación se diseñaron cuatro (4) etapas metodológicas que buscan el cumplimiento de los objetivos propuestos. Estas etapas se encuentran fundamentadas en normas y ensayos, para generar resultados óptimos.

Etapa I. Recolección de Información

En esta etapa, se realizará la búsqueda de información primaria y secundaria referente a los consumos y producción de energía, producción de biomasa en Colombia, propiedades y procedimientos constructivos de la técnica de muros de tapia pisada, además, de la identificación y caracterización de materiales aislantes. También se adelantarán los procesos de verificación de disponibilidad y horario de los laboratorios donde se realizarán los ensayos respectivos de la investigación.

Etapa II. Extracción y Clasificación del Suelo Usado en la investigación.

En esta etapa se realizarán, todos los métodos y ensayos necesarios para la extracción, y clasificación del suelo. En el caso la extracción de materia prima se utilizará el método de apique y posteriormente los ensayos necesarios para determinar su composición (granulometría, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad). Para finalizar, con los resultados obtenidos utilizando los métodos AASTHO y SUCS se determinará la clasificación del suelo.

Fase 1. Método de Apique para Extracción de Materia Prima.

En la construcción con tapia pisada la materia prima es suelo, razón por la cual, es necesario obtener una muestra de este material para los diferentes ensayos a realizar (granulometría,

límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, resistencia a compresión y conductividad térmica). Esta extracción de muestra de suelo se realizará usando apiques.

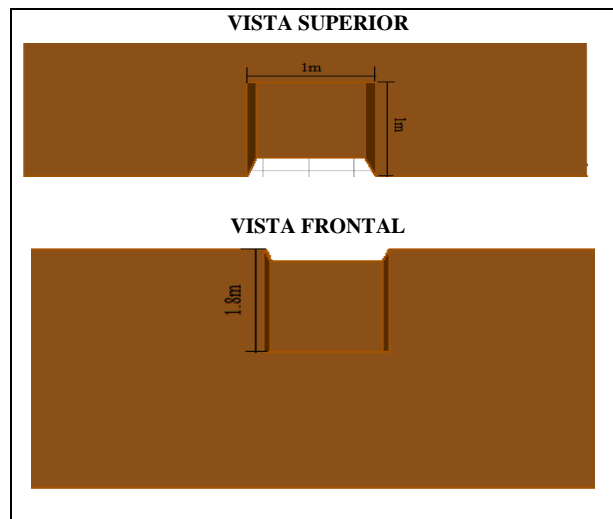


Ilustración 10. dimensiones de la técnica de apique (vista superior – vista frontal)

Fuente: Autor

Esta técnica de excavación a cielo abierto debe realizar a una profundidad de 1.8m y un área superficial de 1m^2 (Ver Ilustración 11), con la ayuda de herramienta menor (pica, azadón, barra, etc.) debido a su poca profundidad en terrenos sin alteraciones antrópicas. Para comenzar, el primer paso será la remoción de materia orgánica (raíces, humus y organismos vivos) presente en la superficie. A medida que se avanza en la excavación, se extrae y distribuye con ayuda de una pala en sacos parte del suelo extraído para ser usados en los ensayos propios de la investigación. Al momento de la realizar este tipo de extracción de suelo, es necesario tomar todas las precauciones necesarias, además, de contar con las medidas de seguridad adecuadas para evitar accidentes.

Fase2. Ensayos de Clasificación de la materia prima.

En esta fase se realizarán los siguientes ensayos necesarios para la clasificación del suelo.

Determinación de los Tamaños de las Partículas de los Suelos.

Este ensayo descrito en la norma INV E – 123 -13 (Ver Anexo C.1.1.) tiene como finalidad, determinar la distribución cuantitativa del tamaño de partículas de una muestra de suelo a través del tamizado. Para el ensayo son necesario los siguientes equipos y materiales:

- Balanzas con una sensibilidad de 0,01g.
- Juego de tamices de malla cuadrada (Ver Tabla 4).
- Cepillo y brocha para limpiar los tamices.
- Recipientes para obtener los pesos el material retenido en cada tamiz.
- Agua para realizar los lavados.
- Horno termostáticamente controlado, regulable a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Antes de comenzar con el tamizado, se debe preparar la muestra. El primer paso es el lavado del material, a través del tamiz N°200 (0.075 mm) con agua potable, asumiendo la finalización cuando sea de un color claro el agua que pase a través del tamiz. La cantidad de la muestra de suelo debe ser no inferior a 500g, pero superior a 2000g, registrando siempre el peso antes y después del lavado.

Al terminar con el lavado, se transfiere el material a un recipiente adecuado para realizar el secado en horno. Este secado tomará entre uno y dos días a una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Al terminar, se registra el peso de la muestra.

Posteriormente, con el material seco y lavado se comienza con el tamizado manual. Para este procedimiento es necesario el uso de una serie de tamices de malla cuadrada (Ver Tabla 5).

Tabla 5. Serie de tamices de malla cuadrada.

| MALLA N° | ABERTURA (MM) |
|---------------------|--------------------------|
| 3/8" | 9.52 |
| N°4 | 4.75 |
| 10 | 2.00 |
| 20 | 0.850 |
| 40 | 0.425 |
| 60 | 0.250 |
| 100 | 0.106 |
| 200 | 0.075 |

Fuente: Autor a partir de (INVIAS, 2013)

Después de armada la serie de tamices, se agrega la muestra previamente secada y lavada para comenzar con el tamizado. Esta actividad se realiza sacudiendo la serie de tamices con movimientos laterales y verticales acompañado de vibraciones recorriendo circunferencias, de forma que la muestra se mantenga en movimiento continuo sobre las mallas durante (1) un minuto. Al finalizar el minuto de movimientos continuos, se comienza con el desmonte de la serie. Al momento de realizar el desmonte, se tomará peso del material retenido por cada tamiz que conforma la serie de mallas. Para tener en cuenta:

1. Las partículas atrapadas en las mallas se deben separar con una brocha o cepillo y reunir las con lo retenido en el tamiz. Se debe tener especial cuidado con los tamices de malla fina.
2. El peso obtenido en cada una deberá ser registrado el formato de granulometría (Ver Anexo A.1).
3. En ningún caso se puede girar o manipular fragmentos de la muestra para que pase a través del tamiz.
4. El material perdido durante el lavado se tomará como material de fondo.

Los datos obtenidos durante el ensayo se escriben en el formato de granulometría (Ver Anexo A.1), verificando que la suma total del peso del suelo retenido no sea menor o mayor del 1% al peso de la muestra antes de realizar el tamizado manual. Para completar el formato de granulometría (Ver Anexo A.1), se debe determinar el valor del porcentaje retenido parcial (Ver Ecuación 1) y porcentaje que pasa (Ver Ecuación 2) (Ver Ecuación 3).

| GRANULOMETRÍA POR MALLAS | | | | |
|--|----------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|
| PESO DEL TAZON (gr) | | | | |
| PESO DE LA MUESTRA DESPUES DE LAVAR (gr) | | | PMDL | |
| PESO DE LA MUESTRA ANTES DE LAVAR (gr) | | | | |
| MALLA | ABERTURA | PESO DEL SUELO RETENIDO | PORCENTAJE RETENIDO PARCIAL | PORCENTAJE QUE PASA |
| ---- | mm | gr | % | % |
| 3/8" | 9,5 | PSRT x100 | %RP | %P |
| N°4 | 4,75 | | | |
| 10 | 2 | | 100 | |
| 20 | 0,84 | | | |
| 40 | 0,42 | | | |
| 60 | 0,25 | | | |
| 100 | 0,149 | | | %PA |
| 200 | 0,074 | | %RP | %P |
| Pasa 200 | ---- | | | |

Ilustración 11. Tabla guía del formato de granulometría.

Fuente: Autor (Ver Anexo A.1)

- Porcentaje retenido parcial (%RP)

$$\%RP = \frac{PSRT * 100}{PMDL} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$\%RP$ = Porcentaje retenido parcial (%)

$PMDL$ = Peso de la muestra despues de lavar (g)

$PSRT$ = Peso del suelo retenido por el tamiz (g)

- Porcentaje que pasa (%P)

Para determinar el primer porcentaje que pasa se utiliza la siguiente:

$$\%P = 100 - \%RP \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

%P = Porcentaje que pasa (%)

%RP = Porcentaje retenido parcial (%)

Los otros porcentajes que pasan se determinan con la siguiente ecuación:

$$\%P = \%PA - \%RP \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

%P = Porcentaje que pasa (%)

%PA = Porcentaje que pasa anterior (%)

%RP = Porcentaje retenido parcial (%)

Para finalizar con los cálculos, se procede a realizar la gráfica diámetro de malla vs porcentaje que pasa, la cual será necesaria para realizar la clasificación del suelo. De esta grafica se determina el coeficiente de uniformidad (Cu) (Ver Ecuación 4) y el coeficiente de curvatura (Cc) (Ver Ecuación 5).

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

D_{60} = *Diametro cuando el porcentaje que pasa es 60 (mm)*

D_{30} = *Diametro cuando el porcentaje que pasa es 30 (mm)*

D_{10} = *Diametro cuando el porcentaje que pasa es 10 (mm)*

Determinación del Límite Líquido de los Suelos.

Con este ensayo descrito en la norma INV E- 125 -113 (Ver Anexo C.1.2.), se determina el límite líquido o contenido de humedad del suelo expresado en porcentaje. Para la elaboración son necesario los siguiente materiales y equipos.

- Aparato de limite liquido o cazuela casa grande.
- Ranurador de metal o plástico.
- Calibrador para ajustar la altura de caída libre de la cazuela.
- Espátula de hoja flexible.
- Balanza con legibilidad a 0.01g.
- Capsulas para la determinación de humedad.
- Horno termostáticamente controlado, regulable a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Recipiente para mezclar y almacenar las muestras preparadas, evitando perdidas en las humedades.
- Agua.

Antes de realizar el ensayo es necesario preparar la muestra y siguiendo la norma se realizará por el método de vía seca. Para este método es necesario el uso de una muestra representativa del suelo, la cual deberá ser de máximo 2000g. Esta muestra se debe secar a la temperatura ambiente o en un horno a una temperatura no superior a 60°C (140°F),

hasta que los terrones de suelo se puedan disgregar con facilidad y se encuentre completamente seca. Con la ayuda de un mortero se pulveriza el material; si en algún momento se encuentran materiales frágiles, se retirará manualmente siempre evitándolos. Al terminar, se realizará un tamizado del material a través del tamiz No.40 (425 μ m), para asegurar la separación de la fracción fina. En ningún caso los materiales frágiles anteriormente mencionados se triturarán para ser obligarlos a pasar por el tamiz. El material retenido por el tamiz se coloca en un recipiente y se sumerge en una pequeña cantidad de agua. La mezcla formada se pasará por el tamiz nuevamente y después del secado se vierte en el recipiente que contiene el suelo seco previamente tamizado.

Para la determinación del límite líquido, de la muestra previamente preparada se toma de 150 a 200 g en un recipiente, añadiendo pequeños incrementos de agua y con la ayuda de una espátula se mezcla el material buscando el contenido de agua necesario. Este contenido será, el que requiera el suelo en la cazuela para que los golpes cierren la ranura (Ver Tabla 6).

Tabla 6. Número de golpes por contenido de agua.

| CONTENIDO DE AGUA | N° DE GOLPES |
|-------------------|--------------|
| Contenido 1 | 25 - 35 |
| Contenido 2 | 20 - 30 |
| Contenido 3 | 15 - 25 |

Fuente: (INVIAS, 2013)

Al encontrar el contenido deseado, se coloca la cantidad adecuada de suelo desde donde comienza la cazuela hasta el punto de su máximo espesor extendiéndolo (Ver Ilustración 11).



Ilustración 12. Colocación del suelo dentro de la cazuela.

Fuente: (INVIAS, 2013)

El suelo colocado sobre la cazuela de bronce se divide con una pasada firme de ranurador, hundiendo el lado biselado de este hacia adelante en una línea desde el punto más alto hasta el más bajo del borde de la cazuela. Se pone en funcionamiento el equipo registrando el número de golpes requerido para cerrar la ranura a una distancia de 13mm aproximadamente. El número de golpes para cada contenido de agua debe estar entre los indicados anteriormente (Ver Tabla 5).

Al encontrar el contenido y número de golpes deseados, se toma parte del suelo de la cazuela y se deposita en capsulas. Estas capsulas serán pesadas antes y después de agregar el material, siempre registrando los pesos.

Para calcular este límite y realizar el análisis, es necesario diligenciar el formulario con los pesos y número de golpes registrados (Ver Anexo A.2). El contenido del agua es el cálculo necesario para diligenciar el formato y se obtiene realizando la siguiente ecuación:

$$\text{Contenido de agua} = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{peso del suelo secado al horno}} * 100 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Con los datos diligenciados en el formato se realiza la curva de fluidez, que es una línea promedio, que representa la relación entre el contenido de humedad y el correspondiente número de golpes de la cazuela.

Para tener en cuenta:

1. Registrar siempre todos los pesos antes y después del secado.
2. **El límite líquido** corresponde a la intersección de la curva de fluidez con la abscisa de 25 golpes y se redondea al número entero más cercano.

Límite Plástico e Índice de Plasticidad en los Suelos.

El límite plástico (LP), es el contenido de agua del suelo, expresado en porcentaje cuando se halla en el límite entre los estados plástico y semisólido. Por otra parte, el rango de contenidos de agua, dentro del cual se comporta plásticamente, es el índice de plasticidad. Este ensayo se refiere a la determinación de estos dos valores. Para realizar este ensayo descrito en la norma INV E – 126 -13, es necesario el uso de los siguientes equipos y materiales:

- Placa de vidrio esmerilado.
- Aparato de enrollamiento (opcional).
- Papel para el aparato de enrollamiento.
- Espátula de hoja flexible.
- Capsula para evaporación de porcelana o similar, para mezcla y almacenamiento de las muestras.
- Balanza con legibilidad a 0.01g.
- Capsulas para la determinación de humedad.

- Botella plástica con dispositivo adaptado para aplicar agua en forma de rocío.
- Horno termostáticamente controlado, regulable a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Tamiz No. 40 ($425\mu\text{m}$).
- Agua.

La preparación de la muestra para este ensayo se hará de la misma manera que en el ensayo anterior, según la norma INV E-126-13. A esta muestra que será de 20g o un poco más, se le aumenta el contenido de agua. Este contenido se reduce, hasta que alcance una consistencia que permita realizar rollos de suelo sin que se pegue en las manos, extendiendo o mezclando sobre una la placa de vidrio. Si es necesario se usan las manos para acelerar el secado.

Para determinar el límite, se selecciona una porción de 1.5 a 2.0 g con la cual se forma la masa elipsoidal. Se empieza rodando la masa de suelo entre la palma de la mano o los dedos y la placa de vidrio. Realizando una presión estrictamente necesaria se forman rollos de diámetro uniforme ($1/8''$) en toda su longitud (Ver Ilustración 13).



Ilustración 13. Método manual para formar rollos de suelo.

Fuente: (INVIAS, 2013)

Se repite este procedimiento, partiendo, juntando, amasando y enrollando, hasta que los rollos del diámetro de $1/8''$ se desmorone bajo la presión requerida para el enrollamiento y el suelo no pueda ser enrollado más al diámetro indicado. En un recipiente se depositan

las porciones de suelo desmoronado. Tomado el peso del recipiente antes y después de agregado el material. Para finalizar se depositan las muestras al horno durante 24 horas y se vuelven a pesar los recipientes, para determina los contenidos de agua del suelo.

El registro de cálculos y datos se realiza diligenciando el formato de limites (Ver Anexo A.2), calculando los contenidos de agua (Ver Ecuación 6) y posteriormente el promedio entre estos, redondeando al valor entero más cercano. Este valor es el límite plástico (LP).

Se calcula el índice de plasticidad (IP) (Ver Ecuación 7) con la siguiente ecuación.

$$IP = LL - LP \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

LL = limite liquido (%)

LP = limite plastico (%)

Si el límite líquido o plástico n se pueden determinar, o el límite plástico es igual o mayor que le límite líquido, se informara que el suelo es no plástico, NP.

Relación humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación)

Este ensayo se realizará siguiendo el procedimiento descrito en la norma I.N.V. E-141-13 (Ver Anexo C.1.4), con el fin de conocer la energía de compactación y humedad optima en las que el suelo presenta buenas condiciones de adherencia entre partículas necesaria para la realización de los ensayos de conductividad y compresión. Para el ensayo antes de realizar el procedimiento, se debe identificar el método la compactación (Ver Tabla 7), que se repetirá con diferentes humedades de modelo seleccionadas. Además del modelo, se debe tener claro que la energía de compactación aproximada para cada uno de los ensayos es de 600 kN-m/m³, y para generarla es necesario el uso de un matillo de 24,5 N el cual debe caer desde una altura de 305 mm. El tamaño de la muestra a usar también

depende el método seleccionado, para los métodos A y B la cantidad mínima es de 16 kg, y para el método C de 29 kg. Por lo tanto, de la muestra de campo se debería tomar una masa humedad de 23 y 45 kg, respectivamente.

Tabla 7. Métodos para realizar el ensayo normal de compactación.

| MÉTODO | A | B | C |
|--------------------|--|--|---|
| DIÁMETRO DEL MOLDE | 101.6 mm (4") | 101.6 mm (4") | 152.4 mm (6") |
| MATERIAL | Pasa tamiz de 4.75 mm (No. 4) | Pasa tamiz de 9.5 mm (3/8") | Pasa tamiz de 19.0 mm (3/4") |
| CAPAS | 3 | 3 | 3 |
| GOLPES/CAPA | 25 | 25 | 56 |
| USO | Si 25% o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) (Ver numeral 1.4) | Si 25% o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 9.5 mm (3/8") (Ver numeral 1.4) | Si 30% o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 19.0 mm (3/4") (Ver numeral 1.4) |
| OTRO USO | Si este requisito de | Si este requisito de | |

Fuente: (INVIAS, 2013)

Realizar el análisis y determinar la humedad óptima es necesario durante el desarrollo del procedimiento, diligenciar el formato de ensayo de Proctor (Ver Anexo A.3.) para el cual son necesario los siguientes cálculos.

- Peso de suelo húmedo compactado (PSHC)

$$PSHC = (PM + SHC) - PM \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

$$PSHC = \text{Peso de suelo húmedo compactado (g)}$$

$$PM + SHC = \text{Peso del molde + suelo húmedo compactado (g)}$$

$$PM = \text{Peso del molde (g)}$$

- Peso del agua (PA)

$$PA = (PC + SH) - (PC + SS) \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

$$PA = \text{Peso del agua (g)}$$

$$PC + SH = \text{Peso de capsula + suelo humedo (g)}$$

$$PC + SS = \text{Peso de capsula + suelo seco (g)}$$

- Peso del suelo seco (PSS)

$$PSS = (PC + SS) - PC \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

$$PSS = \text{Peso del suelo seco (g)}$$

$$PC = \text{Peso de capsula (g)}$$

$$PC + SS = \text{Peso de capsula + suelo seco (g)}$$

- Contenido de agua (CA)

$$CA = PA - PSS \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

$$CA = \text{Contenido de agua (\%)}$$

$$PA = \text{Peso del agua (g)}$$

$$PSS = \text{Peso del suelo seco (g)}$$

- Densidad del suelo húmedo (DSH)

$$DSH = \frac{PSHC}{VM} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

DSH = Densidad del suelo húmedo (g/cm^3)

$PSHC$ = *Peso de suelo humedo compactado (g)*

VM = *Volumen del molde (cm^3)*

- Densidad del suelo seco (DSS)

$$DSS = \frac{DSH}{CA+100} * 100 \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

DSS = Densidad del suelo seco (g/cm^3)

DSH = Densidad del suelo húmedo (g/cm^3)

CA = *Contenido de agua (%)*

Después de realizados los cálculos se procede a elaborar la gráfica de Contenido de agua (%) vs Densidad del suelo seco (g/cm^3), la cual dará como resultado la curva de compactación y con el vértice se determina la humedad óptima y el peso unitario seco máximo.

Fase 3. Método de Clasificación de Suelo.

Después de realizar los ensayos necesarios (límites líquido, plástico y granulometría), se procede con los resultados a caracterizar el suelo por medio de los métodos de clasificación SUCS. Este Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) es un sistema de clasificación el cual, solo se puede realizar con los valores obtenidos de granulometría, límites plástico, límite líquido e índice de plasticidad.

El primer paso es identificar el porcentaje de suelo que pasa por el tamiz N°200, para ello se usan los datos obtenidos en la granulometría. Si más del 50% del suelo pasa por el tamiz se considera un suelo fino; por el contrario, si más del 50% de suelo es retenido por el tamiz se considera un suelo grueso (Ver Ilustración 14).

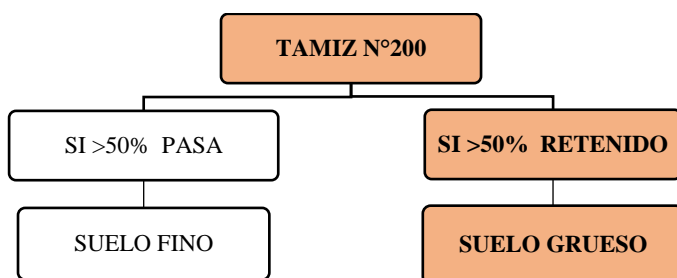


Ilustración 14. Sistema de clasificación SUCS, identificación de suelo grueso.

Fuente: Autor a partir de (INGEAS S.A.S)

Si nos arroja un suelo grueso, debemos identificar si se encuentra en el grupo de las arenas (S) o en el grupo de las gravas (G) (Ver Ilustración 15). Para poder identificarlo es necesario verificar el porcentaje del suelo que pasa y se retiene en el tamiz N°4, si más del 50% pasa por el tamiz quiere decir que está en el grupo de las arenas (Ver Ilustración 17); pero si al contrario se retiene más del 50%, el suelo entra al grupo de las gravas (Ver Ilustración 16).

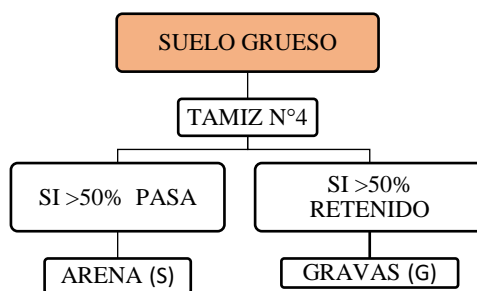


Ilustración 15. Sistema de clasificación SUCS, Clasificación de suelo grueso.

Fuente: Autor a partir de (INGEAS S.A.S)

Las gravas (G) y arenas (S) son los dos grandes grupos de suelo grueso, que también se encuentran divididos en cuatro tipos. Después de identificado y categorizado entre gravas

(G) y arenas (S), se debe identificar en cuál de los cuatro tipos se encuentra el suelo (Ver Tabla 8).

Tabla 8. Tipos de suelos gruesos para el sistema de clasificación SUCS.

| TIPO | DESCRIPCIÓN |
|----------------|---|
| GW y SW | Material bien graduado. Para considerar que se encuentre bien graduado además de tener un contenido de partículas finas menor al 5%, el coeficiente de uniformidad (Cu) debe ser mayor a 4 para gravas y 6 para arenas; mientras que el coeficiente de curvatura debe estar entre 1 y 3 para los dos. |
| GP y SP | Material mal graduado. Debe contener partículas finas de máximo el 5%, pero no cumple con ninguna otra característica que el tipo anterior en los coeficientes. |
| GM y SM | Material limoso. El contenido de finos en este tipo de suelo debe ser superior al 12%. Contiene índice de plasticidad (IP) menor a 4. |
| GC y SC | Material arcilloso. Como el tipo anterior el contenido de finos debe ser superior al 12%, pero en este caso los finos son de media a alta plasticidad. En este tipo también varía el índice de plasticidad el cual debe ser superior al 7%. |

Fuente: Autor a partir de (Cuchillo, 2015)

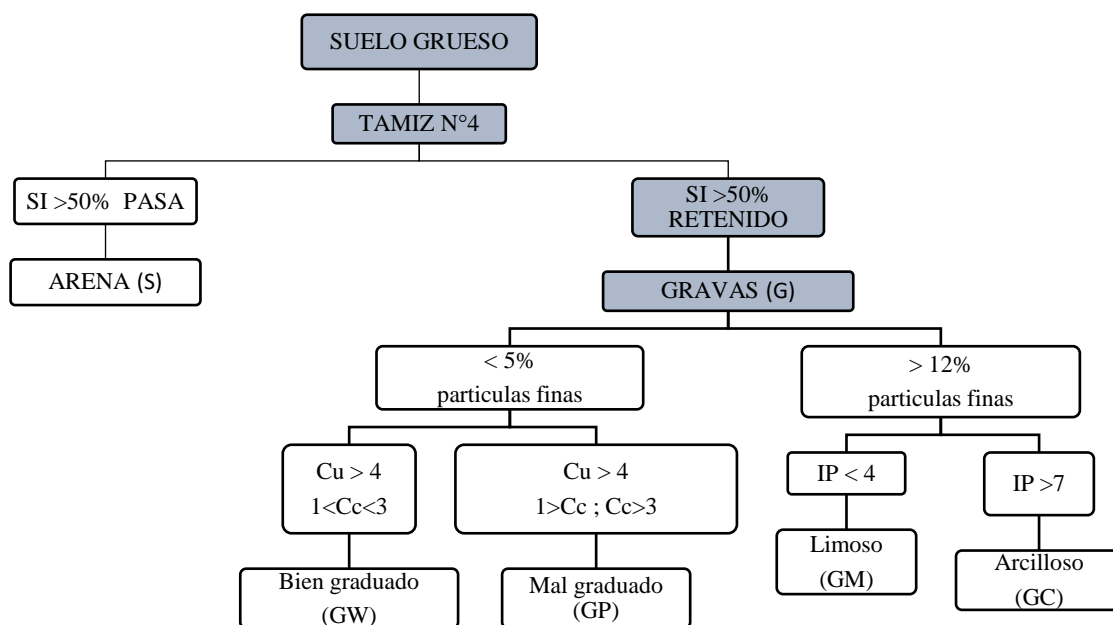


Ilustración 16. Sistema de clasificación SUCS, Clasificación de Gravillas.

Fuente: Autor a partir de (INGEAS S.A.S)

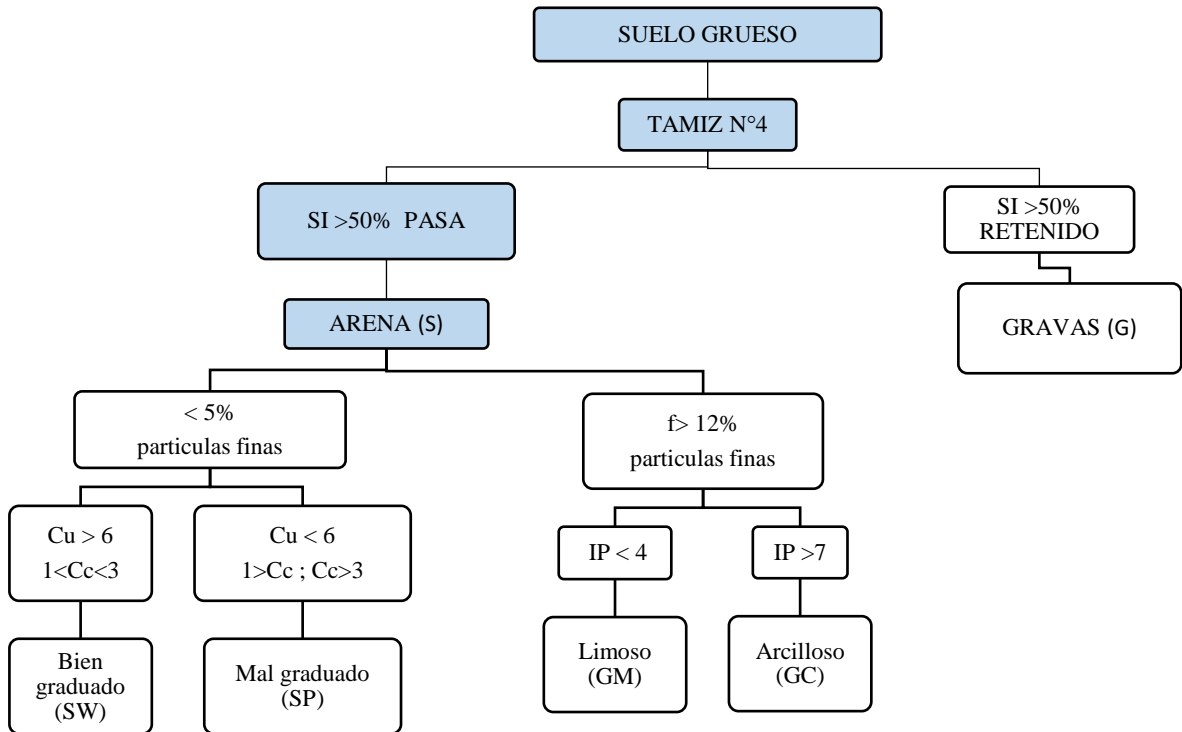


Ilustración 17. Sistema de clasificación SUCS, Clasificación de Arenas.

Fuente: Autor a partir de (INGEAS S.A.S)

Si, por el contrario, al analizar los resultados de la granulometría más del 50% del material pasa por el tamiz N°200 es decir un suelo fino (Ver Ilustración 18), el sistema de clasificación cambia. Ahora, el primer paso para este tipo de suelo es agruparlo en los tres tipos de suelo fino.

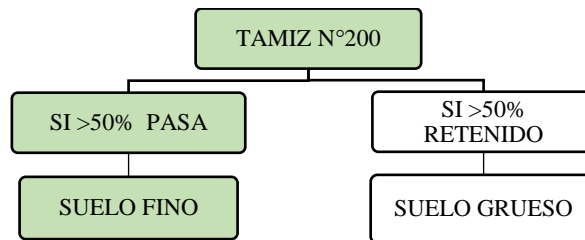


Ilustración 18. Sistema de clasificación SUCS, identificación de suelo fino.

Fuente: Autor a partir de (INGEAS S.A.S)

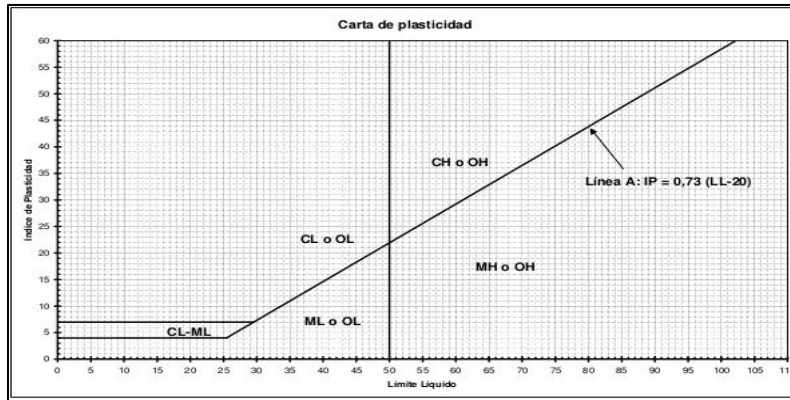


Ilustración 19. Sistema de clasificación SUCS, Clasificación de Suelos finos.

Fuente: (Gradiz, 2013)

Para la clasificación de este tipo de suelo es necesaria la carta de plasticidad (Ver Ilustración 19), que depende de los valores de límite líquido e índice de plasticidad. Los tres grupos por los que se pueden clasificar los suelos finos son, limos orgánicos (M), arcillas inorgánicas (C) y limos y arcillas orgánicas (O), los cuales se subdividen dependiendo el porcentaje del límite líquido e índice de plasticidad (Ver Ilustración 20). Si el límite líquido del suelo es menor al 50%, son suelo de baja compresibilidad por lo cual se le añade la letra (L); pero, por otro lado, si el límite líquido es superior al 50%, se le agrega la letra (H) que quiere decir que el suelo es de alta compresibilidad.

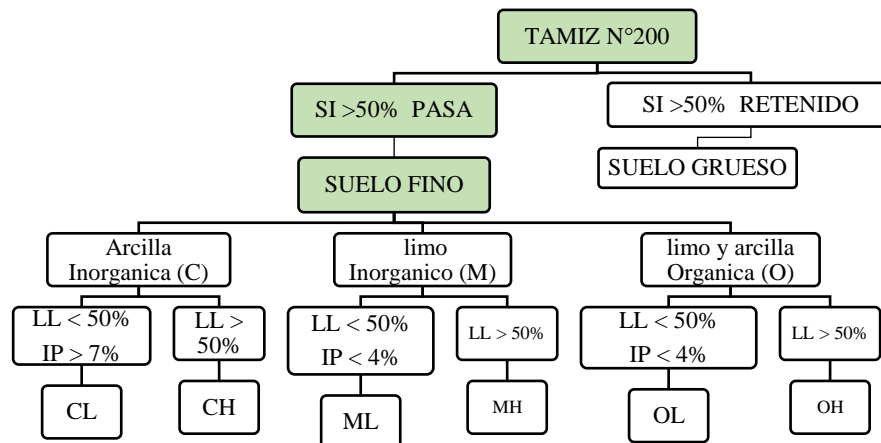


Ilustración 20. Sistema de clasificación SUCS, Clasificación de Suelos finos.

Fuente: Autor a partir de (INGEAS S.A.S)

Etapa III. Ensayo de resistencia a la compresión.

Lo que se busca con este ensayo de compresión, es determinar la resistencia de los especímenes de suelo con diferentes porcentajes de biomasa (Ver Tabla 9). Para medir esta propiedad mecánica se elaborarán para cada porcentaje, seis (6) muestras comprimidas de forma cubica, como lo indica la Norma Peruana 080 (Ministerio de vivienda, contruccion y saneamiento, 2017), en su artículo 8.1 (Ver Anexo C.2.1).

Tabla 9. Especificaciones de especímenes para ensayo a compresión.

| ESPECIMEN | CANT. DE ENSAYOS | % BIOMASA | DIMENSIONES | | |
|-----------|------------------|-----------|-------------|--------------|------------------|
| | | | ALTURA (cm) | ESPESOR (cm) | PROFUNDIDAD (cm) |
| 1 | 6 | 0 - 20 | 5 | 5 | 5 |
| 2 | 6 | 20 - 45 | 5 | 5 | 5 |
| 3 | 6 | 45 - 60 | 5 | 5 | 5 |
| 4 | 6 | 60 - 75 | 5 | 5 | 5 |
| 5 | 6 | 75 - 100 | 5 | 5 | 5 |

Fuente: Autor

Para la elaboración de los especímenes, es necesario conocer las cantidades de suelo y biomasa para cada uno de los porcentajes. Para determinar las cantidades, se comenzará diligenciando la primera tabla del formato de ensayo a compresión (Anexo A.5.) con las dimensiones de los especímenes a trabajar (Ver Ilustración 21).

| DETERMINACIÓN DE CANTIDADES DE BIOMASA Y SUELO | | | | |
|--|----------------------------|--------------|------------------|--|
| ESPECIMEN | DIMENSIONES DE ESPECÍMENES | | | |
| | ALTURA (cm) | ESPESOR (cm) | PROFUNDIDAD (cm) | |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |

Ilustración 21. Dimensiones de los especímenes.

Fuente: Autor (Anexo A.5)

Después de determinar las dimensiones, se procede a diligenciar la segunda tabla. En esta, se deben clocar los datos que ya se tienen como, la cantidad de ensayos por especímenes, el porcentaje de biomasa, el porcentaje de suelo (Ver Ilustración 22).

| ESPECIMEN | CANT. DE ENSAYOS | % BIOMASA | DENSIDAD BIOMASA (g/cm ³) | % SUELO | DENSIDAD SUELO (g/cm ³) | VOLUMEN DE ESPECIMEN (cm ³) | MASA DE BIOMASA A (g) | MASA DE BIOMASA * N° espécimen (g) | MASA DE SUELO (g) | MASA DE SUELO * N° espécimen (gr) |
|-----------|------------------|-----------|---------------------------------------|---------|-------------------------------------|---|-----------------------|------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 1 | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |

Ilustración 22. Tabla para determinar cantidades. (Datos ya determinados)

Fuente: Autor (Anexo A.5)

Para los otros datos son necesarios otros procedimientos. La cantidad de suelo por porcentaje depende de los valores de humedad y densidad, los cuales son obtenidos a través del ensayo de Proctor que se realiza en la fase 2 (Ensayos de clasificación de la materia prima).

| ESPECIMEN | CANT. DE ENSAYOS | % BIOMASA | DENSIDAD BIOMASA (g/cm ³) | % SUELO | DENSIDAD SUELO (g/cm ³) | VOLUMEN DE ESPECIMEN (cm ³) | MASA DE BIOMASA A (g) | MASA DE BIOMASA * N° espécimen (g) | MASA DE SUELO (g) | MASA DE SUELO * N° espécimen (gr) |
|-----------|------------------|-----------|---------------------------------------|---------|-------------------------------------|---|-----------------------|------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 1 | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | |

Ensayo de densidad con picnómetro.

Ensayo de Proctor.

Ilustración 23. Tabla para determinar cantidades. (Datos encontrados a través de ensayos)

Fuente: Autor (Anexo A.5)

Para la biomasa solo es necesario identificar el valor de densidad que se obtiene mediante el método de determinación de densidad con picnómetro. Este método se realizará con el siguiente procedimiento, ya utilizado para la determinación de esta propiedad con otro tipo de fibras por (César A. Juárez Alvarado, 2004).

1. Para realizar el ensayo, se toma una porción representativa de la fibra la cual debe estar saturada superficialmente seca (SSS). Este estado se obtendrá sumergiendo la muestra en agua durante 24 h, con un posterior secado eliminando los excesos de agua superficial.
2. Mientras se prepara la muestra se toman los pesos del picnómetro solo (W1) y también, con agua (W2).
3. Ya con la muestra en estado saturado superficialmente seco (SSS), se divide la muestra en dos partes y con cada una de ellas se toman los pesos del picnómetro con la fibra saturada superficialmente seca (W3) y también, con la fibra saturada superficialmente seca y agua (W4).
4. Los pesos tomados en los pasos anteriores en el ensayo se deben registrar los pesos indicados en formato de determinación de densidad de la biomasa (Ver Anexo A.4.) en la Fase 1 realizando las operaciones indicadas en cada casilla (Ver Ilustración 24).

| FASE 1. PESOS TOMADOS DEL ENSAYO CON PICNÓMETRO | | | | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|------------|------------|------------------------|
| N° MUESTRA | PESO | | | | w2-w1 (gr) | w4-w3 (gr) | (w2-w1) - (w4-w3) (gr) |
| | w1 (gr) | w2 (gr) | w3 (gr) | w4 (gr) | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

Ilustración 24. Fase 1. Pesos tomados del ensayo con picnómetro.

Fuente: Autor (Ver Anexo A.4)

5. Después de realizar el paso anterior, se procede con la fase dos del formato de determinación de densidad de la biomasa (Ver Anexo A.4.). En esta fase, se determinan el volumen (Ver Ecuación 14) y peso (Ver Ecuación 15) de la fibra saturada superficialmente seca (SSS), además, de la densidad absoluta de la fibra (Ver Ecuación 16).

$$\text{volumen de la fibra SSS} = \frac{(W2-W1)-(W4-W3)}{\text{Densidad del agua}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$\text{peso de la fibra SSS} = W3 - W1 \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$\text{Densidad absoluta de la fibra} = \frac{\text{peso de la fibra SSS}}{\text{volumen de la fibra SSS}} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Con las densidades de suelo y biomasa, como último se termina de diligenciar la tabla para hallar las cantidades.

| ESPECIMEN | CANT. DE ENSAYOS | % BIOMASA | DENSIDAD BIOMASA (g/cm ³) | % SUELO | DENSIDAD SUELO (g/cm ³) | VOLUMEN DE ESPECIMEN (cm ³) | MASA DE BIOMASA A (g) | MASA DE BIOMASA * N° espécimen (g) | MASA DE SUELO (g) | MASA DE SUELO * N° espécimen (gr) |
|-----------|------------------|-----------|---------------------------------------|---------|-------------------------------------|---|-----------------------|------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 1 | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | (Ecuación 17) | (Ecuación 18) | (Ecuación 19) | | |
| 3 | | | | | | | | | | |

Ilustración 25. Tabla para determinar cantidades.

Fuente: Autor (Ver Anexo A.5)

- Volumen del espécimen (cm³):

$$\text{vol. espécimen} = \text{ancho} * \text{alto} * \text{profundo} \quad (\text{Ecuación 17})$$

- Masa biomasa (g):

$$\text{Masa biomasa} = \text{Densidad biomasa} * \text{volumen espécimen} \quad (\text{Ecuación 18})$$

- Masa suelo (g):

$$\text{Masa suelo} = \text{Densidad suelo} * \text{volumen espécimen} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Al tener las cantidades se procede a la elaboración de los especímenes, los cuales, se dejarán en el laboratorio en proceso de curdo durante 14 días. Con los especímenes ya curados se realiza el ensayo, sometiendo cada espécimen a compresión para obtener el esfuerzo que serán registrados en el formato de Ensayo de Resistencia a la Compresión (Ver Anexo A.5).

Etapa III. Ensayo de conductividad térmica.

Lo que se busca con este ensayo es determinar el coeficiente de conductividad térmica “k” de la materia prima para construcción (Suelo), con diferentes porcentajes de biomasa (Ver Tabla 10).

Tabla 10. Especificaciones de especímenes para ensayo de conductividad térmica.

| ESPECIMEN | CANT. DE ENSAYOS | % BIOMASA | DIMENSIONES | |
|-----------|------------------|-----------|---------------|--------------|
| | | | DIÁMETRO (cm) | ESPESOR (cm) |
| 1 | 4 | 0 - 20 | 2,5 | 0,3 |
| 2 | 4 | 20 - 45 | 2,5 | 0,3 |
| 3 | 4 | 45 - 60 | 2,5 | 0,3 |
| 4 | 4 | 60 - 75 | 2,5 | 0,3 |
| 5 | 4 | 75 - 100 | 2,5 | 0,3 |

Fuente: Autor

Este coeficiente se determinará con la ley de Fourier (Ver Ecuación 20) utilizando un módulo de conducción de calor lineal TXC-CL.

$$k = \frac{Q}{A} * \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde:

k = Coeficiente de conductividad térmica.

Q = Potencia suministrada. (W)

A= Sección transversal de la barra de metal. ($=\pi*r^2$)

Δx = Distancia entre los dos puntos de muestreo de temperatura. (m)

ΔT = Variación de la temperatura con una distancia Δx .

Este módulo está conformado por 19 sensores controlados, una sección fija segmentada, una sección intercambiable y una caja-interface de control (Ver Ilustración 26). La sección fija que se encuentra segmentada en dos partes (4 sensores por segmento) y es la encargada de generar las temperaturas a las que se someten los especímenes, es decir, en zona de entrada

de calor (parte izquierda) se encuentran una resistencia eléctrica que proporciona las altas temperaturas necesarias en el ensayo; para la zona de refrigeración (parte derecha) se hace uso del agua para generar temperaturas frías, circulándola por el conducto de refrigeración.

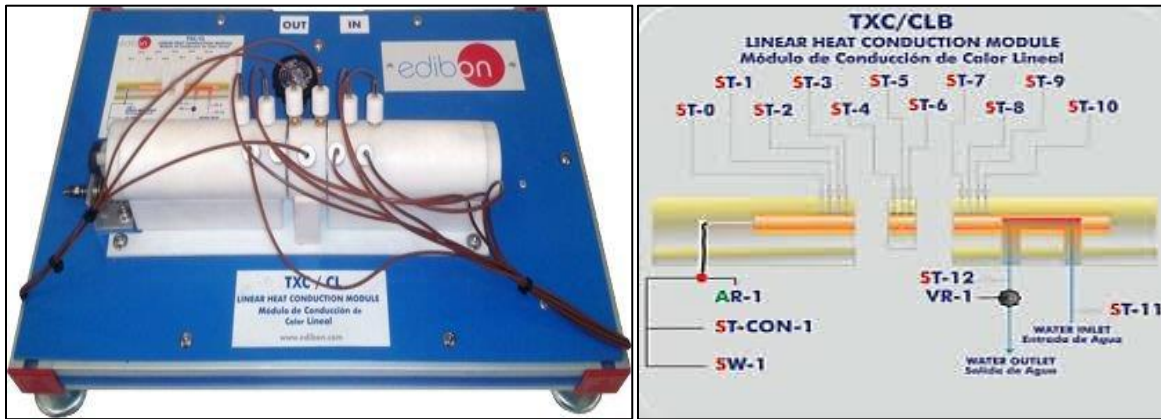


Ilustración 26. Módulo de conducción de calor lineal. TXC-CL

Fuente: Autor

La sección intercambiable que contiene tres sensores es en donde va a ir ubicado el material al que se le quiere determinar la conductividad térmica. Y la caja interfase de control es el equipo que nos muestra la temperatura en todos los sensores, además, nos ayuda a mantener el control con la potencia introducida. Durante la normalización de la potencia se registran los datos de las temperaturas de la zona fría, zona caliente y potencia en un rango de tiempo (Ver AnexoA.6.).

IMPLEMENTACIÓN Y EJECUCIÓN DE PRUEBA

Ejecución de etapa I. Recolección de Información

En esta etapa, se identificó la normativa necesaria para la realización de los ensayos necesarios para el desarrollo del proyecto, además, se definió el lugar de procedencia del suelo y la biomasa. La muestra de suelo a usar fue tomada del campus de la Universidad Pontificia Bolivariana ubicada en el kilómetro 7 entre Floridablanca y Piedecuesta (Ver Ilustración 27), ya que en este sitio el suelo presenta características aceptables para la ejecución del proyecto.



Ilustración 27. Ubicación del lugar de extracción de suelo.

Fuente: (MAPS, 2018)

En el caso de la biomasa, se realizó una investigación previa de las zonas en donde existen cultivos de caña de azúcar para poder identificar donde se genera mayor producción de bagazo, sabiendo que es un residuo proveniente de la extracción del jugo de la caña de azúcar o panela generado después del CATE (Corte, Alce, Transporte y Entrega de la caña). La zona donde se identificó mayor producción en Colombia es el valle del Cauca, con una generación

de 12'667.620 (t/año) en residuos (UPME, UIS, IDEAM, 2010). CENICAÑA (Centro de Investigación de la caña de azúcar de Colombia) ubicada en el Valle del Cauca, es una corporación sin ánimo de lucro enfocada a la generación de investigación y desarrollo en el sector azucarero y es el lugar de donde provienen las muestras de biomasa a utilizar.

Para la investigación se utilizaron dos tipos de bagazo, el primero “Tipo A” (Ver Ilustración 28) es el resultado del proceso de la extracción del jugo de caña, con evidencia de posible exposición a los diversos factores climáticos (lluvia, agua, luz y temperatura) es decir el nulo cuidado en su almacenamiento; el segundo tipo es, el “Tipo B” el cual, es generado por el bagazo procesado (molido y compactado) y almacenado, en forma de briquetas para ser incineradas y generar calefacción.



Ilustración 28. Tipos de Bagazo provenientes de CENICAÑA “Tipo A” (izquierda), “Tipo B” (derecha)

Fuente: Autor

Ejecución de etapa II. Extracción y Clasificación del Suelo Usado en la investigación.

Fase 1. Método de Apique para Extracción de Suelo

En este método se realizó la extracción del material. Para comenzar se colindó la zona con un área de aproximadamente 6 m² para brindar seguridad a las personas que transitaban y generar un espacio de confort al realizar el trabajo. En el área delimitada se realizó la

remoción de la capa vegetal y se realizó el apique con las dimensiones indicadas en diseño metodológico de esta fase (Ver Ilustración 10).



Ilustración 29. Ejecución de la técnica de apique.

Fuente: (Gil & Gil, 2017)

En la extracción del material se utilizó una barra de 161,2 cm de altura un ancho de 10 cm y un peso de 8,172 kg, una pica de 50 cm de alto y una pala calibre 16. Después de realizada la extracción, se transportaron al laboratorio tres sacos de 25 kilos cada uno para ser usados en los ensayos referentes al desarrollo de la investigación.

Fase2. Ensayos de Clasificación del Suelo.

Determinación de los Tamaños de las Partículas de los Suelos

Como primer paso en este ensayo se tomó una muestra de 1496,72 gr, a los cuales se les realizó un lavado dejando la muestra en un platón sumergida por 10 minutos revolviendo en forma circular. Este procedimiento de lavado se realizó entre 5 y 7 veces hasta que el agua que sale de la muestra fuera de un color claro, siempre con ayuda del tamiz N°200. La muestra lavada registra un peso de 743,31 gr, después de ser secada al horno a una temperatura constante de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante un día.



Ilustración 30. Serie de tamices para granulometría.

Fuente: Autor

El siguiente paso fue armar la serie de tamices (Ver Ilustración 30) descrito en el diseño metodológico (Ver Tabla 5) según la norma INV E – 123 -13 (Ver Anexo C.1.1), para realizar el tamizado. Se comenzó con los movimientos y vibraciones después de agregar el suelo en la serie, que duraron alrededor de 3 minutos. Al realizar el desmonte de los tamices, el material retenido por cada tamiz se depositó en platones para determinar la cantidad por tamiz. Cada uno de estos valores fueron registrados (Ver Tabla 12).

Tabla 11. Suelo retenido por tamiz.

| MALLA | ABERTURA | PESO DEL SUELO RETENIDO |
|----------|----------|-------------------------|
| ---- | mm | gr |
| 3/8" | 9,5 | 14,01 |
| N°4 | 4,75 | 12,06 |
| 10 | 2 | 30,7 |
| 20 | 0,84 | 103,85 |
| 40 | 0,42 | 248,61 |
| 60 | 0,25 | 118,95 |
| 100 | 0,149 | 124,41 |
| 200 | 0,074 | 82,99 |
| Pasa 200 | ---- | 7,71 |

Fuente: Autor (Ver Anexo B.1)

Entre la suma de los pesos retenidos por la serie de tamices que fue de 743,29gr y el peso del suelo del suelo después del lavado de 743,31 gr, se puede evidenciar una diferencia de 0,27% (Ver Ecuación 21) lo que indica la buena ejecución en el tamizado ya que no es mayor ni menor al 1% como lo establece la norma INV E – 123 -13 (Ver Anexo C.1.1).

$$\frac{P_{\text{desp.lavado}} - P_{\text{retenido}}}{P_{\text{desp.lavado}}} * 100 = \text{diferencia de \%} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Calculo realizado para determinar el % de diferencia:

$$\frac{743,31 - 743,29}{743,31} * 100 = 0,27\%$$

Con los pesos obtenidos anteriormente se comenzó a diligenciar el formato de granulometría (Ver Tabla 13), determinado los valores del porcentaje retenido parcial (Ver Ecuación 1) y porcentaje que pasa (Ver Ecuación 2) (Ver Ecuación 3), y se realizó el grafico de diámetro de malla vs porcentaje que pasa (Ver Ilustración 31), el cual será necesario para la clasificación del suelo.

Tabla 12. Tabla granulométrica.

| MALLA | ABERTURA | PESO DEL SUELO RETENIDO | PORCENTAJE RETENIDO PARCIAL | PORCENTAJE QUE PASA |
|----------|----------|----------------------------|--------------------------------|------------------------|
| ---- | mm | gr | % | % |
| 3/8" | 9,5 | 14,01 | 1,88 | 98,12 |
| N°4 | 4,75 | 12,06 | 1,62 | 96,49 |
| 10 | 2 | 30,7 | 4,13 | 92,36 |
| 20 | 0,84 | 103,85 | 13,97 | 78,39 |
| 40 | 0,42 | 248,61 | 33,45 | 44,94 |
| 60 | 0,25 | 118,95 | 16,00 | 28,94 |
| 100 | 0,149 | 124,41 | 16,74 | 12,20 |
| 200 | 0,074 | 82,99 | 11,16 | 1,04 |
| Pasa 200 | ---- | 7,71 | 1,04 | 0,00 |
| | | 743,29 | 99,997 | |

Fuente: Autor (Ver Anexo B.1)

Cálculos realizados para la Tabla 13:

- Porcentaje retenido parcial (%RP) (Ver Ecuación 1)

$$\frac{14,01 * 100}{743,31} = 1,88\%$$

$$\frac{12,06 * 100}{743,31} = 1,62\%$$

$$\frac{30,7 * 100}{743,31} = 4,13\%$$

$$\frac{103,85 * 100}{743,31} = 13,97\%$$

$$\frac{248,61 * 100}{743,31} = 33,45\%$$

$$\frac{118,95 * 100}{743,31} = 16,00\%$$

$$\frac{124,41 * 100}{743,31} = 16,74\%$$

$$\frac{82,99 * 100}{743,31} = 11,16\%$$

$$\frac{7,71 * 100}{743,31} = 1,04\%$$

- Porcentaje que pasa (%P) (Ver Ecuación 2) (Ver Ecuación 3)

$$100 - 1,88 = 98,12\%$$

$$98,12 - 1,62 = 96,49\%$$

$$96,49 - 4,13 = 92,36\%$$

$$92,36 - 13,97 = 78,39\%$$

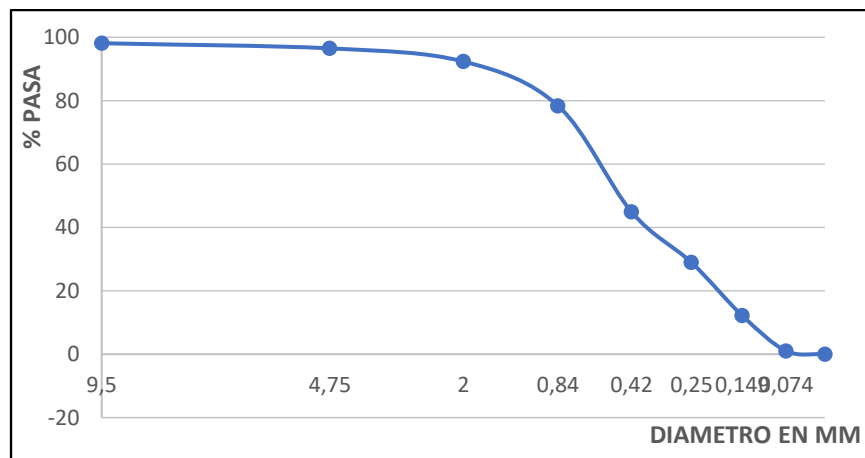
$$78,39 - 33,45 = 44,94\%$$

$$44,94 - 16,00 = 28,94\%$$

$$28,94 - 16,74 = 12,20\%$$

$$12,20 - 11,16 = 1,04\%$$

$$1,04 - 1,04 = 0\%$$



*Ilustración 31. Gráfico de granulometría,
(Diámetro de malla (mm) vs Porcentaje que pasa (%)).*

Fuente: Autor (Ver Anexo B.1)

Para finalizar, con los valores y grafico se procedió a determina el coeficiente de uniformidad (Cu) de 4,69 (Ver Ecuación 4) y el coeficiente de curvatura (Cc) de 0,85 (Ver

Ecuación 5). Para determina estos coeficientes primero se hallaron los valores de D60, D30 y D10 (Ver Figura 26).

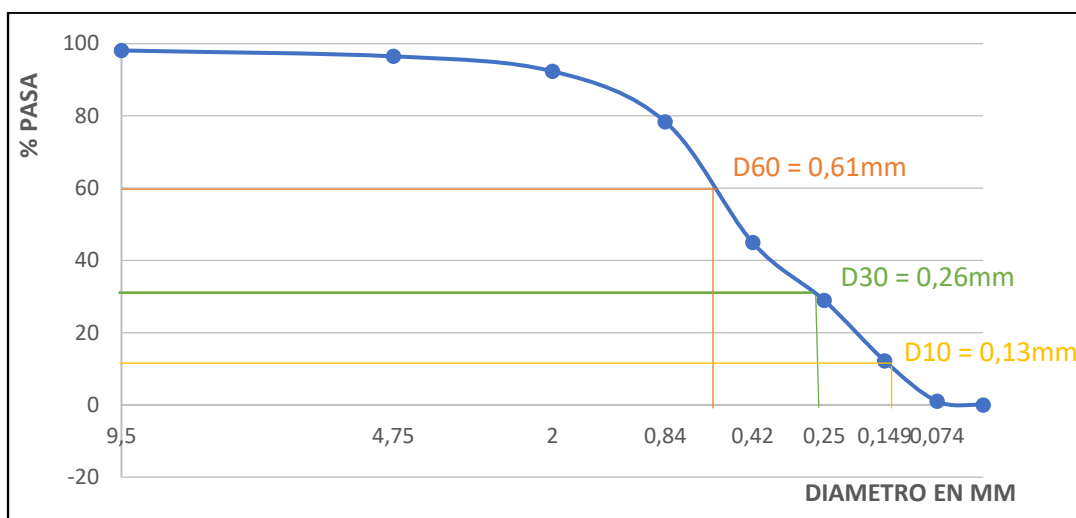


Ilustración 32. Gráfico de granulometría, valores de D60, D30 y D10 para Cu y Cc.

Fuente: Autor (Ver Anexo B.1)

Los cálculos usados para determinar los valores de Cu y Cc son los siguientes:

$$Cu = \frac{0,62}{0,13} \quad Cu = 4,69$$

$$Cc = \frac{(0,26)^2}{0,61 \cdot 0,13} \quad Cc = 0,85$$

Determinación del Límite Líquido de los Suelos.

El primer paso en este ensayo fue preparar la muestra por el método de vía seca, como lo indica la norma INV E- 125 -113 (Ver Anexo C.1.2.). Se tomaron 3000 gr de la muestra de suelo (Ver Ilustración 33), la cual se secó en el horno a una temperatura no superior a 60°C hasta que la muestra quedo completamente seca para que los terrones de suelo se pudieran disgregar con la ayuda de un mortero.



Ilustración 33. Muestra de suelo para ensayo de limite líquido y plástico.

Fuente: Autor

Al terminar de disolver los terrones, se pasó el material por tamiz No.40 (425 μm) (Ver Ilustración 34), para asegurar la separación de la fracción fina. En ningún caso se obligó a pasar suelo por el tamiz y este material retenido fue descartado.



Ilustración 34. Muestra de suelo tamizada para ensayo de limite líquido y plástico.

Fuente: Autor

De la muestra previamente preparada, para cada contenido de agua (Ver Tabla 6) se tomaron 200 g en un recipiente al cual se añadieron pequeños incrementos de agua, que fueron mezclados con la ayuda de una espátula (Ver Ilustración 35).



Ilustración 35. Mezcla de la muestra previamente preparada y agua, buscando contenidos adecuados.

Fuente: Autor

Al encontrar el contenido, se extendió una porción de la mezcla de suelo desde donde comienza la cazuela, hasta el punto de su máximo espesor (Ver Ilustración 36).



Ilustración 36. Colocación de la mezcla de suelo dentro de la cazuela.

Fuente: Autor

Con el material en la cazuela se dividió con una pasada firme de ranurador, hundiéndolo el lado biselado de este hacia adelante en una línea desde el punto más alto hasta el más bajo del borde de la cazuela. Se puso en funcionamiento el equipo registrando el número de golpes requerido para cerrar la ranura a una distancia de 13mm aproximadamente (Ver

Tabla 14). En cada prueba se verifico que el número de golpes para cada contenido de agua se encontrara entre los indicados anteriormente (Ver Tabla 6).

Tabla 13. Resultados de ensayo de límite líquido.

| CAPSULA N° | NUMERO DE GOLPES | PESO DE CAPSULA + SUELO HUMEDO | PESO DE CAPSULA + SUELO SECO | PESO DE LA CAPSULA |
|------------|------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------|
| --- | --- | gr | gr | gr |
| 129 | 33 | 46,72 | 38,92 | 21,20 |
| 17 | 28 | 47,14 | 38,93 | 21,27 |
| 28 | 24 | 49,71 | 40,39 | 20,82 |

Fuente: Autor (Ver Anexo B.2)

Para finalizar en capsulas se tomaron muestras de la mezcla en cada prueba y se llevaron al horno termostáticamente controlado a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas. En esta parte del ensayo se tomaron pesos de las capsulas antes y después de agregar la mezcla, y después del secado en horno (Ver Tabla 14). Después de finalizado el ensayo para calcular este límite y realizar el análisis, se determinó el peso del agua (la diferencia entre el peso de capsula + suelo húmedo y el peso de capsula + suelo seco), peso del suelo seco (la diferencia entre el peso de capsula + suelo seco y el peso de la capsula) y el contenido de agua (Ver Ecuación 6), (Ver Tabla 15).

Tabla 14. Resultados completos del ensayo de límite líquido.

| CAPSULA N° | NUMERO DE GOLPES | PESO DE CAPSULA + SUELO HUMEDO | PESO DE CAPSULA + SUELO SECO | PESO DEL AGUA | PESO DE LA CAPSULA | PESO DEL SULO SECO | CONTENIDO DE AGUA (W) |
|------------|------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| --- | --- | gr | gr | gr | gr | gr | % |
| 129 | 33 | 46,72 | 38,92 | 7,8 | 21,20 | 17,72 | 44,02 |
| 17 | 28 | 47,14 | 38,93 | 8,21 | 21,27 | 17,66 | 46,49 |
| 28 | 24 | 49,71 | 40,39 | 9,32 | 20,82 | 19,57 | 47,62 |

Fuente: Autor (Ver Anexo B.2)

Los cálculos para el ensayo de limite liquido son los siguientes:

- Peso del agua (gr)

$$46,72 - 38,92 = 7,8 \text{ gr}$$

$$47,14 - 38,93 = 8,21 \text{ gr}$$

$$49,71 - 40,39 = 9,32 \text{ gr}$$

- Peso del suelo seco (gr)

$$38,92 - 21,20 = 17,72 \text{ gr}$$

$$38,93 - 21,27 = 17,66 \text{ gr}$$

$$40,39 - 20,82 = 19,57 \text{ gr}$$

- Contenido de agua (%)

$$\frac{7,8}{17,72} * 100 = 44,02\%$$

$$\frac{8,21}{17,66} * 100 = 46,49\%$$

$$\frac{9,32}{19,57} * 100 = 47,62\%$$

Al terminar de diligenciar el formato se realizó la curva de fluidez (Ver Ilustración 37), que representa la relación entre el contenido de humedad y el número de golpes.

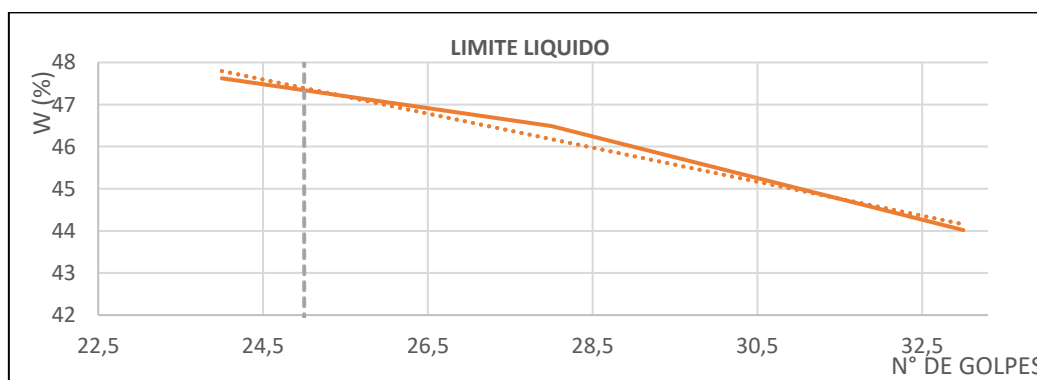


Ilustración 37. Curva de fluidez.

Fuente: Autor (Ver Anexo B.2)

El valor de **límite líquido** que arrojo el ensayo fue de 47%, el cual se determinó como la intersección entre la curva de fluidez y la abscisa de 25 golpes (Ver Ilustración 37) redondeado al número entero más cercano.

Límite Plástico e Índice de Plasticidad en los Suelos.

Para realizar este ensayo se tomaron 20 gramos de la muestra preparada en el ensayo anterior y se aumentó el contenido de agua, como lo indica la norma INV E-126-13, (Ver Ilustración 38).



Ilustración 38. Preparación de material para ensayo de límite plástico.

Fuente: Autor

Este contenido se redujo extendiendo o mezclando sobre una la placa de vidrio, hasta que la consistencia de la muestra permitiera realizar rollos de suelo de diámetro uniforme (1/8") en toda su longitud, sin que se pegaran en las manos.

Este procedimiento de partiendo, juntando, amasando y enrollando, se reprodujo hasta que los rollos se desmoronaron bajo la presión requerida para el enrollamiento y el suelo no se pudo enrollar más al diámetro indicado. Al final, se depositaron muestras de suelo

desmoronado en el horno durante 24 horas (Ver Ilustración 39). Los pesos registrados fueron de las capsulas solas, con el material y después del secado en el horno.

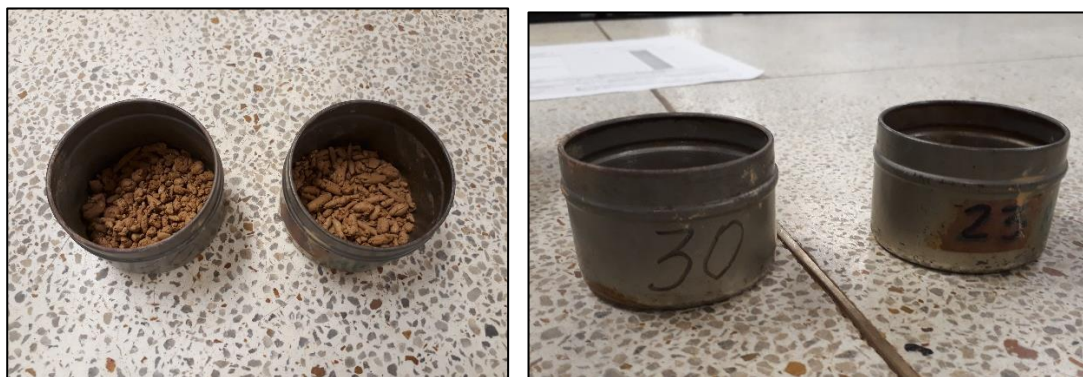


Ilustración 39. Muestras de suelo desmoronado listas para secar en horno.

Fuente: Autor

Tabla 15. Pesos registrados del ensayo de limite plástico.

| CAPSULA N° | PESO DE CAPSULA + SUELO HUMEDO | PESO DE CAPSULA + SUELO SECO | PESO DE LA CAPSULA |
|------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------|
| --- | gr | gr | gr |
| 23 | 39,97 | 35,91 | 21,13 |
| 30 | 40,49 | 36,3 | 20,85 |

Fuente: Autor (Ver Anexo B.2)

Con los pesos obtenidos en el ensayo se calculó el peso del agua (la diferencia entre el peso de capsula + suelo húmedo y el peso de capsula + suelo seco), peso del suelo seco (la diferencia entre el peso de capsula + suelo seco y el peso de la capsula) y el contenido de agua (Ver Ecuación 6), (Ver Tabla 17).

Tabla 16. Resultados completos del ensayo de limite plástico.

| CAPSULA N° | PESO DE CAPSULA + SUELO HUMEDO | PESO DE CAPSULA + SUELO SECO | PESO DEL AGUA | PESO DE LA CAPSULA | PESO DEL SULO SECO | CONTENIDO DE AGUA (W) |
|------------|--------------------------------|------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| --- | gr | gr | gr | gr | gr | % |
| 23 | 39,97 | 35,91 | 4,06 | 21,13 | 14,78 | 27,47 |
| 30 | 40,49 | 36,3 | 4,19 | 20,85 | 15,45 | 27,12 |

Fuente: Autor (Ver Anexo B.2)

Los cálculos necesarios para determinar el peso del agua, peso del suelo seco y contenido de agua, son los siguientes:

- Peso del agua (gr)

$$39,97 - 35,91 = 4,06 \text{ gr}$$

$$40,49 - 36,3 = 4,19 \text{ gr}$$

- Peso del suelo seco (gr)

$$35,91 - 21,13 = 14,78 \text{ gr}$$

$$36,3 - 20,85 = 15,45 \text{ gr}$$

- Contenido de agua (%)

$$\frac{4,06}{14,78} * 100 = 27,47\%$$

$$\frac{4,19}{15,45} * 100 = 27,12\%$$

Para determinar el valor de **límite plástico** (LP) de 27% se promediaron los contenidos de agua, redondeando al valor entero más cercano. El valor del **índice de plasticidad** del 20% se determinó como la resta entre el límite líquido y e límite plástico (Ver Ecuación 7).

$$47 - 27 = 20\%$$

Relación humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación)

Para realizar el ensayo antes del procedimiento, se identificó el método A como el método a utilizar para la compactación para cuatro humedades diferentes. Esto se debe a que solo el 3,5%, es decir menos del 25% de la muestra al realizar la granulometría se queda retenida en el tamiz N°4.

Para este método A, se tomaron 23 kg de masa húmeda. Se ejecuto con tres capas de compactación, de 25 golpes cada una con un matillo de 24,5 N el cual, debe caer desde una altura de 305 mm. al molde de 4" de diámetro como lo indica la norma (Ver Tabla 18).

Tabla 17. Detalle de método A, para realizar el ensayo normal de compactación.

| | |
|--------------------|--|
| MÉTODO | A |
| DIÁMETRO DEL MOLDE | 101.6 mm (4") |
| MATERIAL | Pasa tamiz de 4.75 mm (No. 4) |
| CAPAS | 3 |
| GOLPES/CAPA | 25 |
| USO | Si 25% o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) (Ver numeral 1.4) |
| OTRO USO | Si este requisito de |

Fuente: (INVIAS, 2013)

Durante el desarrollo del procedimiento, diligencio el formato de ensayo de Proctor (Ver Anexo B.3.) para el cual fueron necesario los siguientes cálculos:

- Peso de suelo húmedo compactado (PSHC)

$$5.950 - 4.230 = 1.720 \text{ g}$$

$$6.060 - 4.230 = 1.830 \text{ g}$$

$$6.150 - 4.230 = 1.920 \text{ g}$$

$$6.070 - 4.230 = 1.840 \text{ g}$$

- Peso del agua (PA)

$$74,30 - 69,55 = 4,75 \text{ g}$$

$$91,30 - 83,5 = 7,78g$$

$$73,00 - 66,43 = 6,57g$$

$$80,50 - 71,74 = 8,76g$$

- Peso del suelo seco (PSS)

$$69,55 - 26,98 = 42,57g$$

$$83,52 - 27,29 = 56,23g$$

$$66,43 - 27,00 = 39,43g$$

$$71,74 - 21,1 = 50,64g$$

- Contenido de agua (CA)

$$\frac{4,75}{42,57} * 100 = 11,36\%$$

$$\frac{7,78}{56,23} * 100 = 13,84\%$$

$$\frac{6,57}{39,43} * 100 = 16,66\%$$

$$\frac{8,76}{50,64} * 100 = 17,30\%$$

- Densidad del suelo húmedo (DSH)

$$\frac{1.720}{943,94} = 1,82 \frac{g}{cm^3}$$

$$\frac{1.830}{943,94} = 1,94 \frac{g}{cm^3}$$

$$\frac{1.920}{943,94} = 2,03 \frac{g}{cm^3}$$

$$\frac{1.840}{943,94} = 1,95 \frac{g}{cm^3}$$

- Densidad del suelo seco (DSS)

$$\frac{1,82}{11,16 + 100} * 100 = 1,64 \frac{g}{cm^3}$$

$$\frac{1,94}{13,84 + 100} * 100 = 1,70 \frac{g}{cm^3}$$

$$\frac{2,03}{16,66 + 100} * 100 = 1,74 \frac{g}{cm^3}$$

$$\frac{1,95}{17,30 + 100} * 100 = 1,66 \frac{g}{cm^3}$$

Después de realizados los cálculos se elaboró la gráfica de Contenido de agua (%) vs Densidad del suelo seco (g/cm^3) (Ver Ilustración 40), en la cual se puede observar como resultado la curva de compactación y con el vértice se determinó, la humedad óptima con un valor de 16,7% y una densidad seca máxima de 1,74 g/cm^3 .

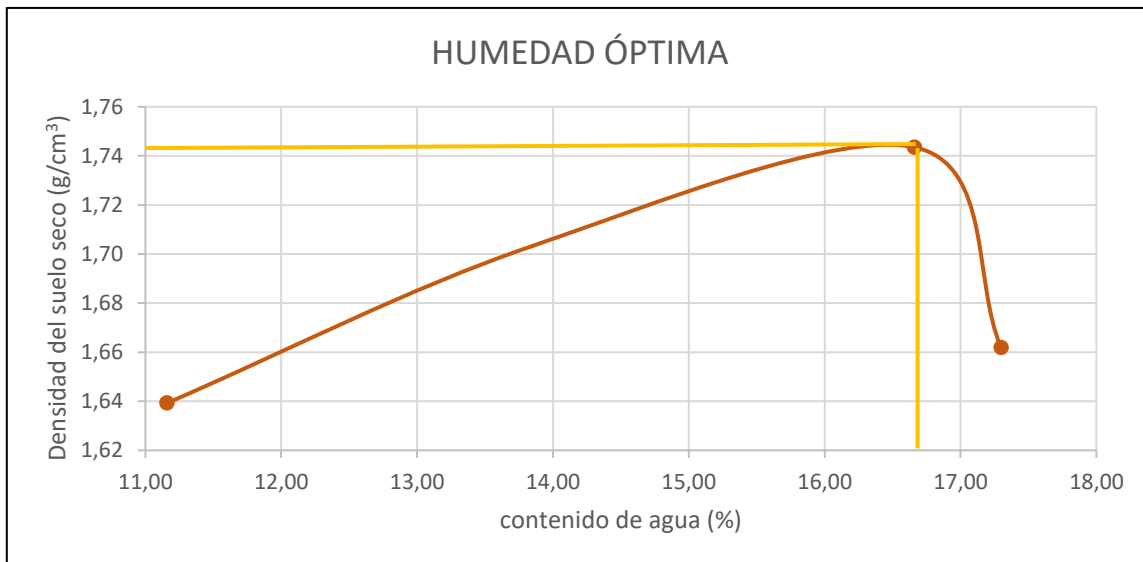


Ilustración 40. Curva de compactación.

Fuente: Autor (Anexo B.3)

Fase 3. Clasificación de la materia prima.

Con los ensayos realizados anteriormente (límites líquido, plástico y granulometría), se procedió a caracterizar el suelo con los métodos de clasificación AASTHO y SUCS.

METODO 1. Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)

El primer fue identificar el porcentaje de suelo que pasa por el tamiz N°200, el cual fue del 50,85%, es decir que es un suelo fino ya que pasa más del 50%.

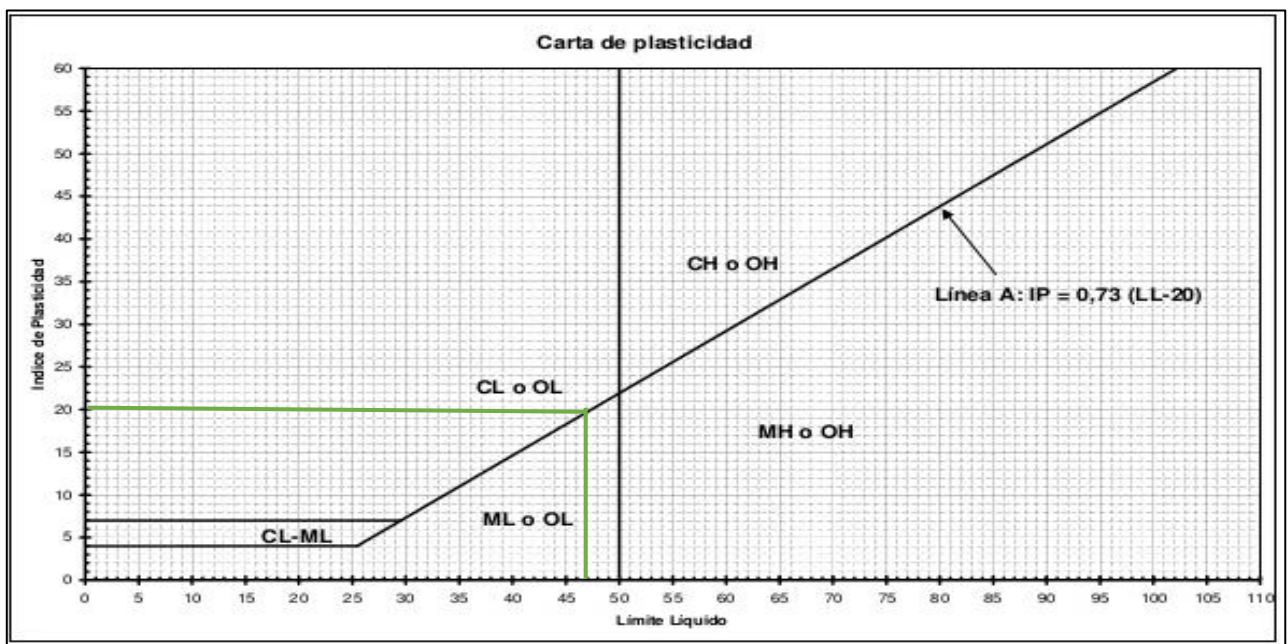


Ilustración 41. Carta de plasticidad para el suelo en análisis.

Fuente: (Gradiz, 2013)

Para la clasificación de este tipo de suelo fue necesario el uso de la carta de plasticidad (Ver Ilustración 41), que depende de los valores del 47% del límite líquido y el 20% del índice de plasticidad. Esta carta dio como resultado unas **arcillas inorgánicas de baja compresibilidad (CL)**.

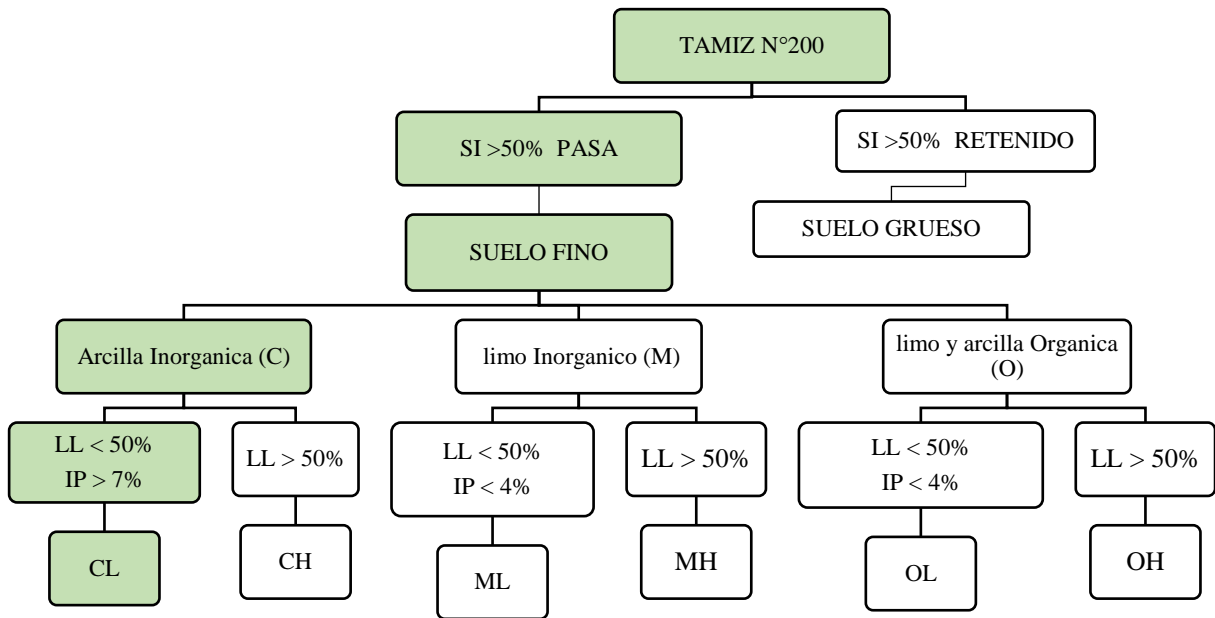


Ilustración 42. Sistema de clasificación SUCS, Clasificación de Suelos finos, ANALIZADO.

Fuente: Autor.

Etapa III. Desarrollo del ensayo de resistencia a la compresión.

Para la determinación de esta propiedad mecánica, el primer paso fue la preparación de la materia prima y biomasa (Bagazo). Se tomo un saco de suelo obtenido en el apique de aproximadamente 20 kilos, dispuesto en un platón, secado al aire libre durante un día, cuarteado y secado al horno un día más (Ver Ilustración 43). Con la muestra seca para eliminar bolas de suelo y contenido de humedad, se procede a cernir el material por el tamiz N° 4 (Ver Ilustración 44) y se dispone de nuevo en un saco.



Ilustración 43. Muestra secada al aire libre y en el horno.

Fuente: Autor.



Ilustración 44. Tamizado de la materia prima.

Fuente: Autor.

Para la preparación de la biomasa (Bagazo), también se realizaron procesos. A la biomasa tipo A (Bagazo no procesado), (Ver Ilustración 45), por el gran tamaño y grosor del residuo se le realizó un proceso de triturado en picadora (Ver Ilustración 46), y adicionalmente fue cernida por el tamiz N° 4 eliminando fibras que debido a la poca presión no pudieron ser procesadas (Ver Ilustración 47).



Ilustración 45. Bagazo tipo A. (Sin proceso)

Fuente: Autor.



Ilustración 46. proceso de triturado de bagazo tipo A.

Fuente: Autor.



Ilustración 47. Cernida del material triturado.

Fuente: Autor.

El estado de la biomasa (Bagazo) tipo B era mucho mejor que la anterior, ya procesada pero comprimida en rollo (Ver Ilustración 48). Para descomprimir se utilizó la máquina de los

ángeles (usada para ensayo de desgaste) (Ver Ilustración 49), ya que el uso de herramienta menor no ayudo. Adicionalmente, se cernió con el tamiz N°8 (Ver Ilustración 50).



Ilustración 48. Bagazo tipo B. (Procesada y compactada)

Fuente: Autor.



Ilustración 49. Trituración en la máquina de los ángeles (Bagazo tipo B).

Fuente: Autor.



Ilustración 50. Cernida del material triturado.

Fuente: Autor.

Con los materiales listos, se procede a determinar la densidad del suelo y de los dos tipos de biomasa. Para la densidad del suelo el único procedimiento necesario es el del ensayo de

Proctor ya realizado anteriormente, que da como resultado que la densidad seca máxima y la humedad óptima (Ver Tabla 18).

Tabla 18. Humedad y densidad del suelo.

| RESULTADOS DE ENSAYO DE PROCTOR | |
|---|------|
| Densidad seca máxima (g/cm ³) | 1,74 |
| Humedad óptima (%) | 16,7 |

Fuente: Autor.

Para la biomasa (Bagazo), fue necesario determinar la densidad con el método del picnómetro. Para realizar el ensayo, se tomó una porción de las dos fibras saturada superficialmente seca (SSS), es decir, sumergida durante 24 horas (Ver Ilustración 51) y secada eliminando los excesos de agua superficial (Ver Ilustración 52).



Ilustración 51. Bagazo en estado saturado (tipo A y tipo B)

Fuente: Autor.



Ilustración 52. Secado superficial del bagazo (tipo A y tipo B)

Fuente: Autor.

En la siguiente parte del ensayo con la muestra en estado SSS, se procede a pesar el matraz (por el tamaño de las fibras no fue posible usar el picnómetro) solo (W1) y también, con agua (W2) (Ver Ilustración 53).

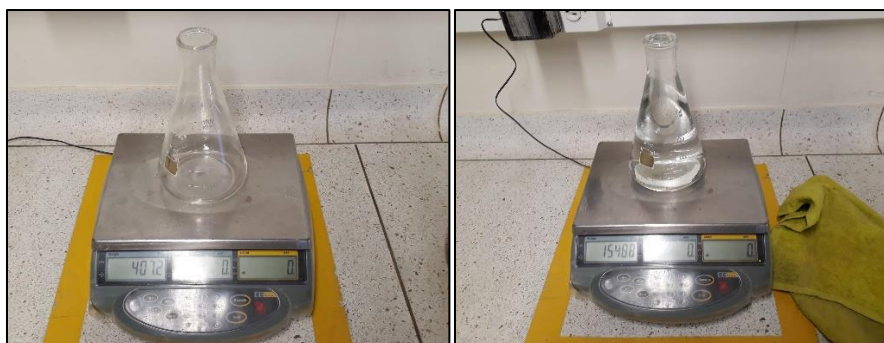


Ilustración 53. Proceso de pesaje del matraz (vacío - con agua)

Fuente: Autor.

Las muestras en estado saturado superficialmente seco (SSS), se dividieron en dos partes y se registraron los pesos adicionando el del matraz solo (W3) (Ver Ilustración 54); otro de los pesos registrados es el de la fibra saturada superficialmente seca con agua dentro del matraz(W4) (Ver Ilustración 55). Los pesos tomados en los pasos anteriores se registraron en formato de determinación de densidad de la biomasa (Ver Anexo B.4.) en la Fase 1.



Ilustración 54. Pesaje de la fibra SSS. (tipo A - tipo B)

Fuente: Autor.



Ilustración 55. Pesaje de la fibra en matraz con agua. (tipo A - tipo B)

Fuente: Autor.

Los pesos tomados de los pasos anteriores se registraron en formato de determinación de densidad de la biomasa (Ver Anexo B.4.) en la Fase 1, con ellos se realizaron los siguientes cálculos.

Para Bagazo tipo A:

- W2-W1 (g)

$$1547 - 407,2 = 1139,8 \text{ g}$$

$$1547 - 407,2 = 1139,8 \text{ g}$$

- W4-W3 (g)

$$1536,6 - 457 = 1079,6 \text{ g}$$

$$1537,2 - 441 = 1096,2 \text{ g}$$

- (W2-W1) -(W4-W3) (g)

$$(1547 - 407,2) - (1536,6 - 457) = 60,2 \text{ g}$$

$$(1547 - 407,2) - (1537,2 - 441) = 43,6 \text{ g}$$

Para Bagazo tipo B:

- W2-W1 (g)

$$1548 - 407,4 = 1140,6 \text{ g}$$

$$1547,6 - 407,4 = 1140,2 \text{ g}$$

- W4-W3 (g)

$$1557,4 - 477,4 = 1080 \text{ g}$$

$$1558,8 - 478 = 1080,8 \text{ g}$$

- (W2-W1) -(W4-W3) (g)

$$(1548 - 407,4) - (1557,4 - 477,4) = 60,26 \text{ g}$$

$$(1547,6 - 407,4) - (1558,8 - 478) = 59,4 \text{ g}$$

Después de realizar el paso anterior, se comenzó con la fase dos del formato de determinación de densidad de la biomasa (Ver Anexo B.4.). En esta fase, se determinó el volumen y peso de la fibra saturada superficialmente seca (SSS), además, de la densidad absoluta de la fibra.

Para Bagazo tipo A:

- Volumen de la fibra SSS (cm³)

$$\frac{60,2}{1} = 60,2 \text{ cm}^3$$

$$\frac{43,6}{1} = 43,6 \text{ cm}^3$$

- Peso de la fibra SSS (g)

$$457 - 407,2 = 49,8 \text{ g}$$

$$441 - 407,2 = 33,8 \text{ g}$$

- Densidad absoluta de la fibra (g/cm³)

$$\frac{49,8}{60,2} = 0,83 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\frac{33,8}{43,6} = 0,78 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Para Bagazo tipo B:

- Volumen de la fibra SSS (cm^3)

$$\frac{60,2}{1} = 60,2 \text{ cm}^3$$

$$\frac{43,6}{1} = 43,6 \text{ cm}^3$$

- Peso de la fibra SSS (g)

$$477,4 - 407,4 = 70 \text{ g}$$

$$478 - 407,4 = 70,6 \text{ g}$$

- Densidad absoluta de la fibra (g/cm^3)

$$\frac{70}{60,6} = 1,16 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\frac{70,6}{43,6} = 1,19 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Con las densidades de suelo y biomasa, se terminó de diligenciar la tabla dos para determinar las cantidades de cada material (Ver Anexo B.5.1)(Ver Anexo B.5.2) para seis (6) muestras comprimidas de forma cubica, como lo indica la Norma Peruana 080 (Ministerio de vivienda, contruccion y saneamiento, 2017), en su artículo 8.1 (Ver Anexo C.2.1). Utilizando (Ecuación 17), (Ecuación 18), (Ecuación 19).

La elaboración de los especímenes se realizó como lo indica la Norma Peruana 080 (Ministerio de vivienda, contruccion y saneamiento, 2017), con moldes de menor medida (5cm por lado), dos capas de compactación utilizando un mazo de 2,5 kg (Ver Ilustración 56).



Ilustración 56. Molde y mazo de compactación.

Fuente: Autor.

Durante la preparación de las mezclas de biomás y suelo, se realizó el ensayo de determinación de humedad en campo (Ver Anexo C.2.2) y se verificó que la humedad se encontrara ente el 16,7%. La humedad de los especímenes del 0% se mantuvo en la indicada por el Proctor, pero para los otros porcentajes este aumento un 10%.



Ilustración 57. Ensayo de contenido de humedad en campo.

Fuente: Autor

Después de elaborar los especímenes se dejaron en curado durante 14 días. A los tres días de este curado, los especímenes elaborados con bagazo tipo A para los porcentajes superiores al 50%, presentaron modificaciones en su forma (cambio de tamaño y bultos). Por lo cual, se replantearon los porcentajes entre el 0% y 50% de contenido de biomasa (Ver Tabla 19) ,(Ver Anexo B.5.3), (Ver Anexo B.5.4).



Ilustración 58. Especímenes con alteraciones (Bagazo tipo A)

Fuente: Autor

Tabla 119. Especificaciones de especímenes para ensayo a compresión con nuevos porcentajes.

| ESPECIMEN | CANT. DE ENSAYOS | % BIOMASA | DIMENSIONES | | |
|-----------|------------------|-----------|-------------|--------------|------------------|
| | | | ALTURA (cm) | ESPESOR (cm) | PROFUNDIDAD (cm) |
| 1 | 6 | 0 | 5 | 5 | 5 |
| 2 | 6 | 10 | 5 | 5 | 5 |
| 3 | 6 | 20 | 5 | 5 | 5 |
| 4 | 6 | 25 | 5 | 5 | 5 |
| 5 | 6 | 50 | 5 | 5 | 5 |

Fuente: Autor



Ilustración 59. Especímenes con bagazo tipo A, reformulados.

Fuente: Autor



Ilustración 60. Especímenes con bagazo tipo b, reformulados.

Fuente: Autor

Con los especímenes ya curados se realizó el ensayo, sometiendo cada espécimen a compresión obteniendo el esfuerzo registrados en el formato de Ensayo de Resistencia a la Compresión (Ver Anexo B.5.1) (Ver Anexo B.5.2). Durante el ensayo en los especímenes

realizados con la biomasa tipo A, se presentaron fallas tipo como comunes en este tipo de ensayo. En los especímenes superiores al 10% durante los ensayos, el aplastamiento se presentó antes de que se observara algún tipo de falla y con contenidos del 50%, este comportamiento no permitió obtener valores de compresión. Para los especímenes realizados con la biomasa tipo B solo se pudieron detectar fallas en los que contenían 0%, ya que también el comportamiento fue de aplastamiento durante todo el ensayo sin detección de falla en los porcentajes más altos.



Ilustración 61. Especímenes fallados a compresión, Bagazo tipo A.

Fuente: Autor



Ilustración 62. Especímenes fallados a compresión, Bagazo tipo B.

Fuente: Autor

Etapa III. Ejecución del ensayo de conductividad térmica.

Para este ensayo solo se trabajaron especímenes con biomasa tipo B, ya que en el ensayo anterior solo en estos registraron se falla. El primer paso es la preparación de la materia prima, la cual se realiza de la misma manera que en el ensayo anterior; para la biomasa también se realiza el mismo procedimiento. Se determinan las cantidades con los valores de

densidad de suelo y biomasa hallados anteriormente, cambiando el volumen de la muestra (Ver Tabla 20).

Tabla 20. Cantidades para ensayo de conducción térmica.

| TIPO | CANT. DE ENSAYOS | % BIOMASA | DENSIDAD BIOMASA (g/cm ³) | % SUELO | DENSIDAD SUELO (g/cm ³) | VOLUMEN DE ESPECIMEN (cm ³) | MASA DE BIOMASA (g) | MASA DE BIOMASA * N° espécimen (g) | MASA DE SUELO (g) | MASA DE SUELO * N° espécimen (gr) |
|------|------------------|-----------|---------------------------------------|---------|-------------------------------------|---|---------------------|------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 1 | 4 | 0 | 1,17 | 100 | 1,74 | 1,47 | 0,00 | 0,0 | 2,56 | 10,25 |
| 2 | 4 | 10 | 1,17 | 90 | 1,74 | 1,47 | 0,17 | 0,7 | 2,31 | 9,22 |
| 3 | 4 | 20 | 1,17 | 80 | 1,74 | 1,47 | 0,34 | 1,4 | 2,05 | 8,20 |
| 4 | 4 | 25 | 1,17 | 75 | 1,74 | 1,47 | 0,43 | 1,7 | 1,92 | 7,69 |
| 5 | 4 | 50 | 1,17 | 50 | 1,74 | 1,47 | 0,86 | 3,4 | 1,28 | 5,12 |

Fuente: Autor

El módulo de conducción de calor lineal TXC-CL, en su segmento móvil contiene tres sensores (S4, S5 y S6) que no serán necesarios para el ensayo. Esta sección ahora contiene tres piezas (dos cunas y un aro) (Ver Ilustración 64) (Ver Ilustración 65), diseñadas para poder evaluar la conductividad en otros materiales (sólidos-no metales). En su segmento fijo, este módulo contiene 4 sensores en su sección caliente (S0, S1, S2, S3) y otros cuatro en su sección refrigerada (S7, S8, S9, S10), los cuales, se utilizaron para el ensayo.



Ilustración 63. Piezas cuna.

Fuente: Autor



Ilustración 64. Pieza cuna y aro (con espécimen).

Fuente: Autor

El ensayo se comenzó encendiendo caja-interface de control e introduciendo la potencia de 10w a la que se trabajó. Se sacó la muestra de suelo ya en el aro, se armó la cuna con la muestra adentro y coloco en el segmento fijo donde se localizaría la sección movable. Durante todo el ensayo se tomaron registros, cada 5 minutos de las temperaturas y potencias (Ver Anexo B.6).

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Análisis de la Clasificación del Suelo Usado en la investigación.

En la fase de clasificación del suelo con los resultados obtenidos en la granulometría, se pudo determinar los porcentajes de participación de los diferentes componentes del suelo con el que se trabajará el proyecto (Ver Tabla 22). Al analizar y comparar los porcentajes con los propuestos en la carilla de construcción de muros tapia y bareque del SENA (Ver Tabla 23), podemos concluir que el suelo cumple con las cualidades necesarias de composición para ser usado como materia prima para construcciones en tapia pisada.

Tabla 20. Composición del suelo para construcción en tapia.

| COMPONENTE | PORCENTAJE (%) |
|------------|----------------|
| Gravilla | 0 - 15 |
| Arena | 40 - 50 |
| Limos | 20 - 35 |
| Arcilla | 15 - 25 |

Fuente: (Gallego, 2012)

Tabla 21. Composición del suelo utilizado en el proyecto.

| COMPONENTES | PORCENTAJE (%) |
|----------------|----------------|
| GRAVA | 1,74% |
| ARENA | 47,40% |
| LIMOS-ARCILLAS | 50,85% |

Fuente: Autor

Análisis de resultados del ensayo de resistencia a la compresión.

Con los valores carga obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión simple, se determinó el esfuerzo para cada porcentaje y al ser graficando (Ver Ilustración 63), se puede observar una mejora en el comportamiento mecánico de los cubos con porcentajes entre el

10% y el 20% de biomasa. En los porcentajes superiores al 20% se pudo observar una disminución en comparación a los esfuerzos obtenidos en los porcentajes anteriores, pero aun así con un esfuerzo superior a los especímenes con el 0% de contenido de biomasa.

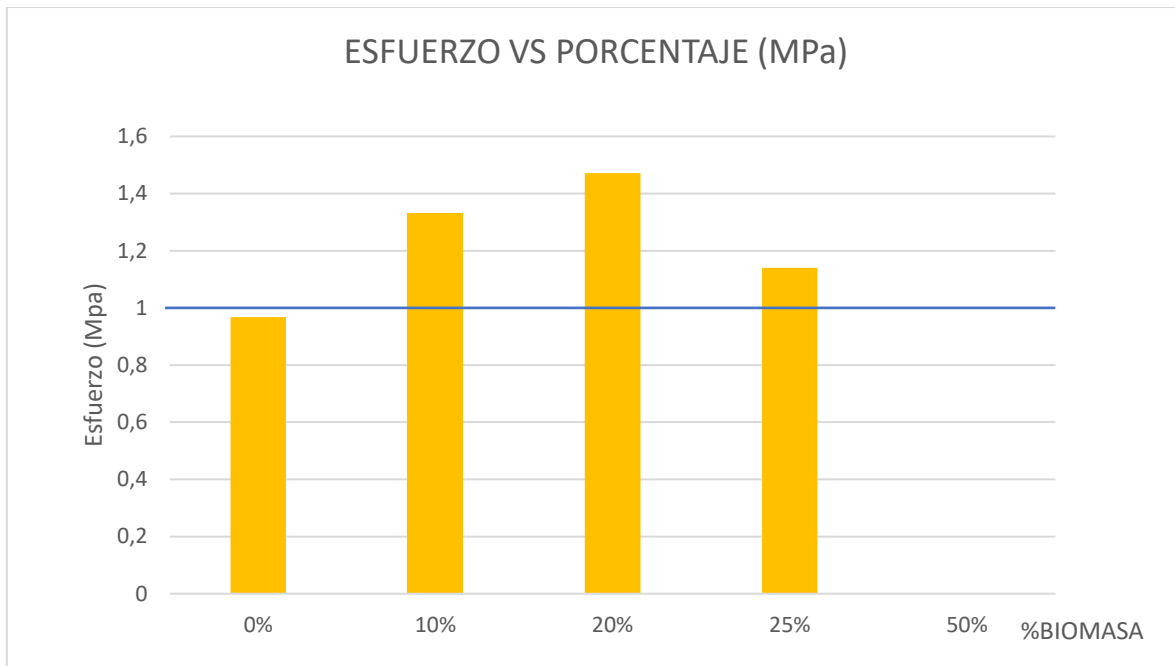


Ilustración 65. Resultados de ensayo a compresión, Bagazo tipo B.

Fuente: Autor

Análisis de resultado del ensayo de conductividad térmica.

Con los resultados obtenidos en este ensayo de conductividad, para cada porcentaje se tomaron los cuatro especímenes y se realizó una curva promedio (Ver Ilustración 66). Si analizamos la curva promedio de cada porcentaje (Ver Ilustración 67) podemos observar que algunas de estas curvas son más cortas que otras, esto se presentó ya que en algunas muestras el equipo usado para medir esta propiedad ya se encontraba a la temperatura indicada para que la muestra se estabilizara en menos tiempo.

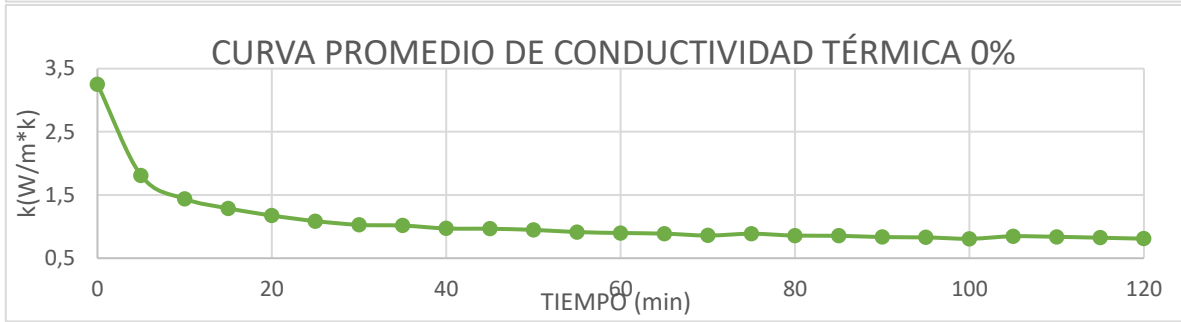
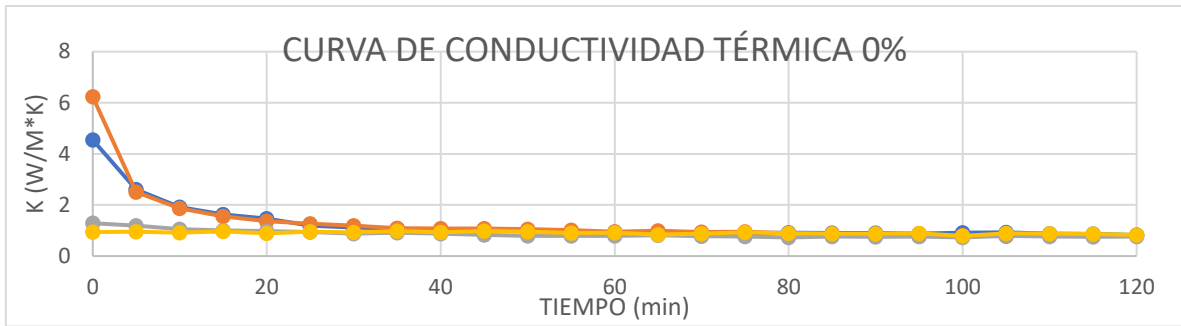


Ilustración 66. Conductividad térmica de especímenes con el 0% de contenido.

Fuente: Autor

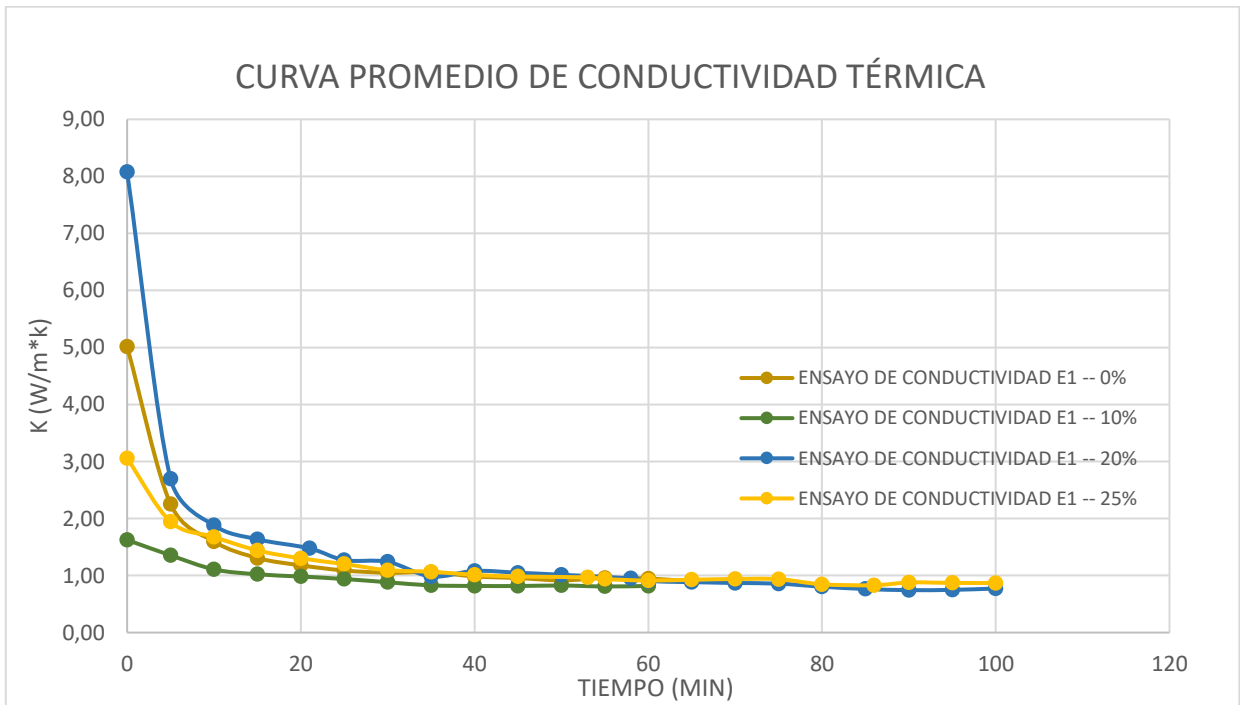


Ilustración 67. Conductividad térmica de los diferentes porcentajes durante los ensayos.

Fuente: Autor

Los valores de conductividad para cada porcentaje (Ver Tabla 23), se determinaron como el promedio de la parte estable de las curvas.

Tabla 22. Conductividad térmica por porcentaje.

| % BIOMASA | K (W/K*m2) |
|-----------|------------|
| 0% | 1,00 |
| 10% | 0,84 |
| 20% | 0,83 |
| 25% | 0,89 |

Fuente: Autor

También al realizar un acercamiento en los puntos en donde se estabiliza el sistema para el material (Ver Ilustración 68), podemos observar claramente la variabilidad entre los especímenes. Se evidencia una disminución en el valor de la conductividad en los especímenes del 10% y 20%, y un aumento en los especímenes del 25% como ocurrió en el ensayo de resistencia a la compresión simple. Esto quiere decir que como para el ensayo anterior, los porcentajes adecuados para trabajar están entre el 0% y 20%.

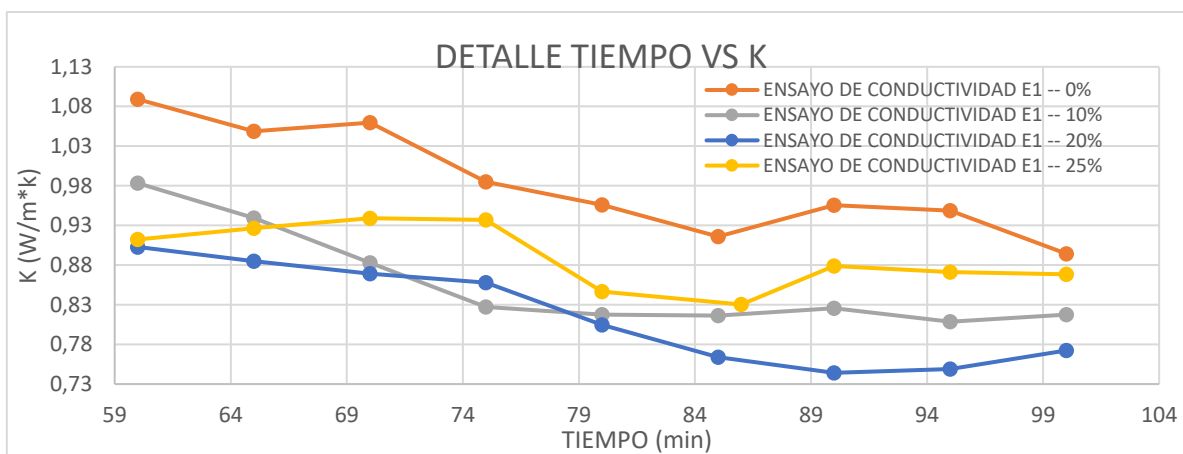


Ilustración 68. Detalle de Conductividad térmica de los diferentes porcentajes durante los ensayos.

Fuente: Autor

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se recomienda para futuros análisis el usar suelo del lugar en donde se espera se construya la vivienda, ya que las propiedades analizadas en cada uno de los ensayos cambian con el material.
- Con los resultados de los ensayos de clasificación se puede concluir que los componentes se encuentran entre los porcentajes adecuados para la construcción en tapia pisada propuestos por (Gallego, 2012).
- De los resultados obtenidos en los ensayos a compresión de los cubos podemos concluir que cumplen con el esfuerzo ultimo indicado en la NORMA 080 de 1,0 MPa, a excepción de los cubos con 0% de biomasa que fue de 0,97 MPa. Además, se recomendar para este tipo de ensayo, el trabajar porcentajes de biomasa entre 10% y 20%, ya que presentan una mejora en el 20% con una resistencia de 51,5%.
- Es recomendable en futuras investigaciones, realizar un tratamiento de sellado a la biomasa para evitar crecimientos y deformaciones en los especímenes como ocurrió con los especímenes con porcentajes de bagazo tipo B, además, de trabajar con una sola capa de compactación.
- Para el ensayo de conducción térmica se recomienda la realización de más ensayos por espécimen, así como el incremento en el tiempo del ensayo. Esto ayudara a determinar con mayor precisión el comportamiento del material con una muestra más significativa.

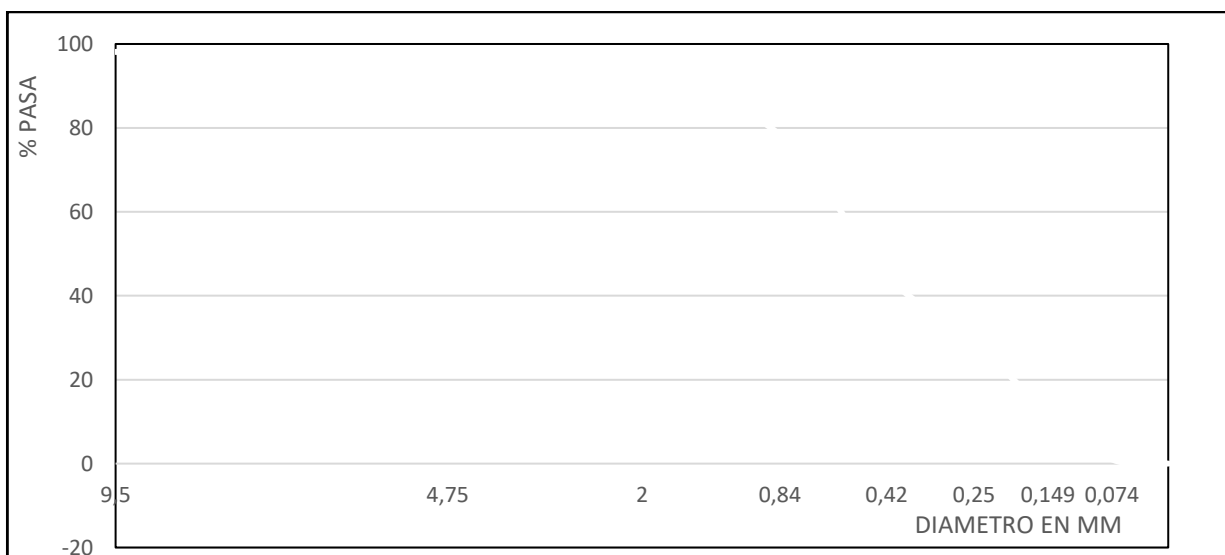
- También se recomienda, en el módulo de conducción de calor lineal, incorporar un sensor de flujo de calor. Este sensor permitirá calcular con más precisión las pérdidas que para este ensayo que fueron superiores al 50%.
- En cuanto a los resultados obtenidos en el ensayo térmico, podemos observar un comportamiento similar a los resultados del ensayo de resistencia a la compresión, recomendando trabajar también con porcentajes entre 0% y 20%. Una mejora en la conductividad del 17% también se evidenció en los especímenes con 20% de biomasa.

ANEXOS

ANEXO A. FORMATOS DE ENSAYOS

ANEXO A.1. Formato de Granulometría.

| GRANULOMETRÍA POR MALLAS | | | | |
|--|----------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|
| PESO DEL TAZON (gr) | | | | |
| PESO DE LA MUESTRA DESPUES DE LAVAR (gr) | | | | |
| PESO DE LA MUESTRA ANTES DE LAVAR (gr) | | | | |
| MALLA | ABERTURA | PESO DEL SUELO RETENIDO | PORCENTAJE RETENIDO PARCIAL | PORCENTAJE QUE PASA |
| ---- | mm | gr | % | % |
| 3/8" | 9,5 | | | |
| N°4 | 4,75 | | | |
| 10 | 2 | | | |
| 20 | 0,84 | | | |
| 40 | 0,42 | | | |
| 60 | 0,25 | | | |
| 100 | 0,149 | | | |
| 200 | 0,074 | | | |
| Pasa 200 | ---- | | | |
| | | | | |



ANEXO A.2. Formato de Límites.

| LÍMITES DE PLASTICIDAD Y HUMEDAD NATURAL | | | | | | | |
|--|------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| LÍMITE LÍQUIDO | | | | | | | |
| CAPSULA N° | NUMERO DE GOLPES | PESO DE CAPSULA + SUELO HUMEDO | PESO DE CAPSULA + SUELO SECO | PESO DEL AGUA | PESO DE LA CAPSULA | PESO DEL SULO SECO | CONTENIDO DE AGUA (W) |
| --- | --- | gr | gr | gr | gr | gr | gr |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

LÍMITE LÍQUIDO

| LÍMITE PLASTICO | | | | | | | |
|-----------------|------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| CAPSULA N° | NUMERO DE GOLPES | PESO DE CAPSULA + SUELO HUMEDO | PESO DE CAPSULA + SUELO SECO | PESO DEL AGUA | PESO DE LA CAPSULA | PESO DEL SULO SECO | CONTENIDO DE AGUA (W) |
| --- | --- | gr | gr | gr | gr | gr | gr |
| | --- | | | | | | |
| | --- | | | | | | |

a.

| RESULTADOS | | | |
|------------|--|----|----|
| LL | | LP | IP |

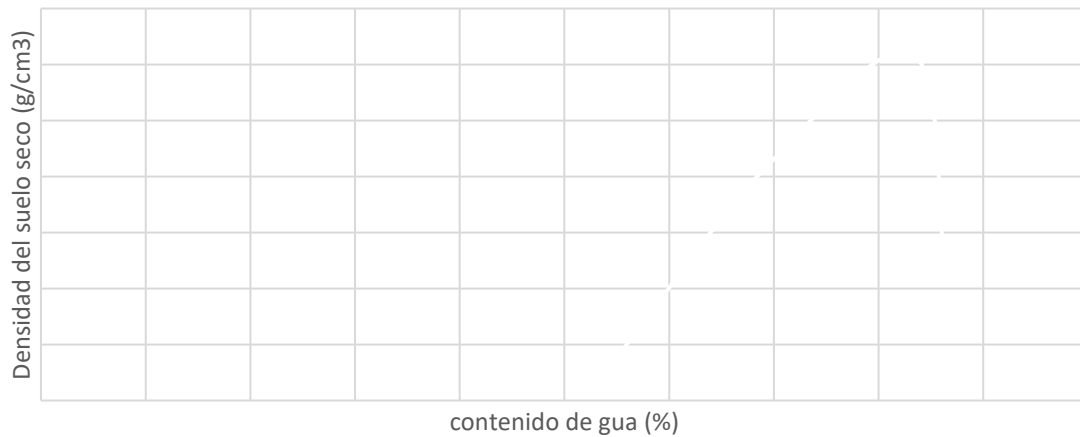
ANEXO A.3. Formato de Ensayo de Proctor Estándar.

ENSAYO DE PROCTOR ESTÁNDAR

VOLUMEN DEL MOLDE (cm) _____

| ENSAYO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|---|---|---|---|
| Peso del molde (g) | | | | |
| peso del molde + suelo húmedo compactado (g) | | | | |
| Peso de suelo húmedo compactado (g) | | | | |
| Peso de capsula (g) | | | | |
| peso de capsula + suelo húmedo (g) | | | | |
| Peso de la capsula + suelo seco (g) | | | | |
| Peso del agua (g) | | | | |
| Peso del suelo seco (g) | | | | |
| Contenido de agua (%) | | | | |
| Densidad del suelo húmedo (g/cm3) | | | | |
| Densidad del suelo seco (g/cm3) | | | | |

HUMEDAD ÓPTIMA



ANEXO A.4. Formato de determinación de densidad de la biomasa.

FASE 1. PESOS TOMADOS DEL ENSAYO CON PICNÓMETRO (BIOMASA TIPO A)

| N° MUESTRA | PESO | | | | w2-w1 (gr) | w4-w3 (gr) | (w2-w1) - (w4-w3) (gr) |
|------------|---------|---------|---------|---------|------------|------------|------------------------|
| | w1 (gr) | w2 (gr) | w3 (gr) | w4 (gr) | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

FASE 2. DETERMINACIÓN DE DENSIDAD

| N° MUESTRA | DENSIDAD DEL AGUA (gr/cm3) | VOLUMEN DE FIBRA SSS (cm3) | PESO DE FIBRAS SSS (gr) | DENSIDAD ABSOLUTA DE FIBRA (g/cm3) |
|------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| | | | | |
| | | | | |

PROMEDIO DE DENSIDAD ABSOLUTA DE FIBRA (g/cm3)

FASE 1. PESOS TOMADOS DEL ENSAYO CON PICNÓMETRO (BIOMASA TIPO B)

| N° MUESTRA | PESO | | | | w2-w1 (gr) | w4-w3 (gr) | (w2-w1) - (w4-w3) (gr) |
|------------|---------|---------|---------|---------|------------|------------|------------------------|
| | w1 (gr) | w2 (gr) | w3 (gr) | w4 (gr) | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

FASE 2. DETERMINACIÓN DE DENSIDAD

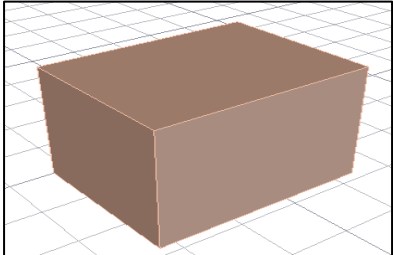
| N° MUESTRA | DENSIDAD DEL AGUA (gr/cm3) | VOLUMEN DE FIBRA SSS (cm3) | PESO DE FIBRAS SSS (gr) | DENSIDAD ABSOLUTA DE FIBRA (g/cm3) |
|------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| | | | | |
| | | | | |

PROMEDIO DE DENSIDAD ABSOLUTA DE FIBRA (g/cm3)

ANEXO A.5. Formato de ensayo a compresión.

FORMATO DE ENSAYO A COMPRESIÓN

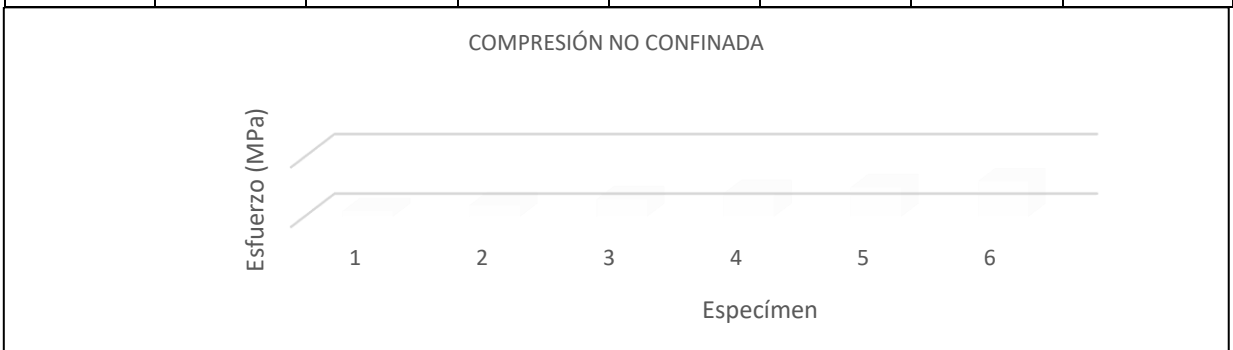
DETERMINACIÓN DE CANTIDADES DE BIOMASA Y SUELO

|  | ESPECIMEN | DIMENSIONES DE ESPECÍMENES | | |
|---|-----------|----------------------------|--------------|------------------|
| | | ALTURA (cm) | ESPESOR (cm) | PROFUNDIDAD (cm) |
| | 1 | | | |
| | 2 | | | |
| | 3 | | | |
| | 4 | | | |
| 5 | | | | |

| ESPECIMEN | CANT. DE ENSAYOS | % BIOMASA | DENSIDAD BIOMASA (g/cm ³) | % SUELO | DENSIDAD SUELO (g/cm ³) | VOLUMEN DE ESPECIMEN (cm ³) | MASA DE BIOMASA A (g) | MASA DE BIOMASA * N° espécimen (g) | MASA DE SUELO (g) | MASA DE SUELO * N° espécimen (gr) |
|-----------|------------------|-----------|---------------------------------------|---------|-------------------------------------|---|-----------------------|------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 1 | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | |

RESULTADOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN

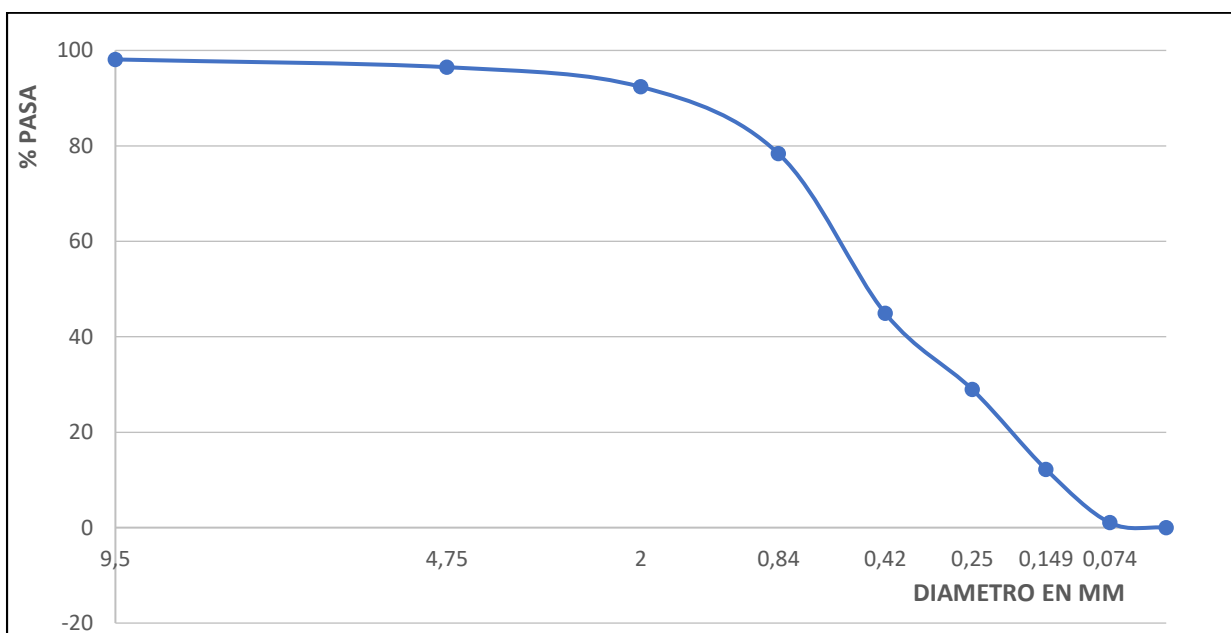
| % | CARGA POR ESPECIMÉN (MPa) | | | | | | PROMEDIO |
|---|---------------------------|---|---|---|---|---|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |



ANEXO B. RESULTADOS DE ENSAYOS

ANEXO B.1. Formato con Resultados de la Granulometría.

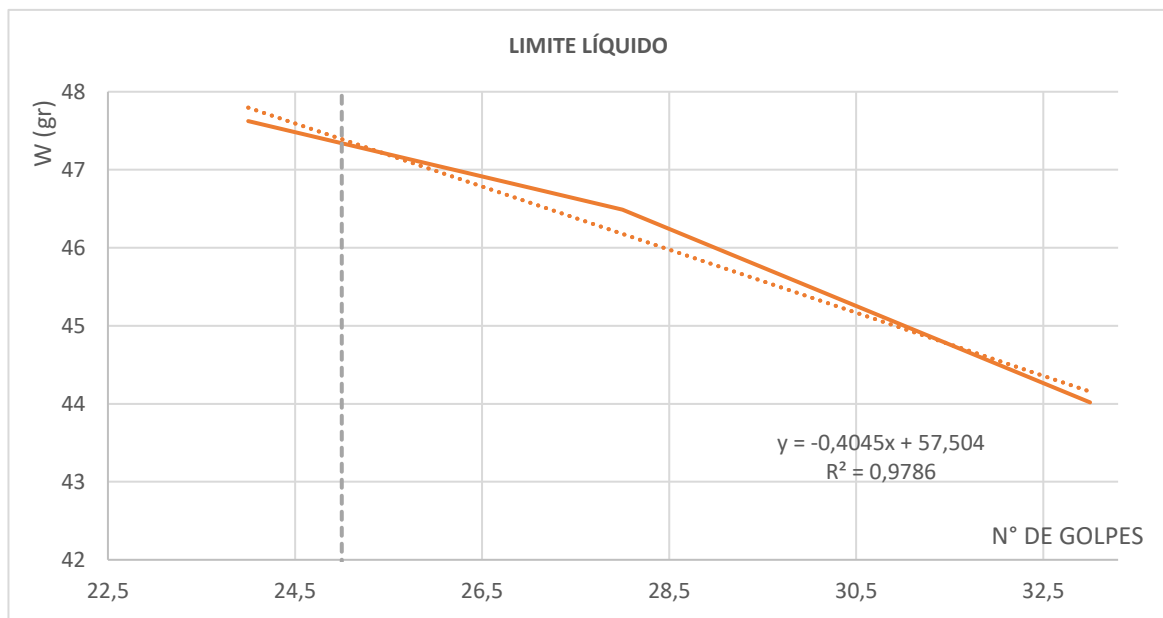
| GRANULOMETRÍA POR MALLAS | | | | |
|--|----------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|
| PESO DEL TAZON (gr) | | | | 204,19 |
| PESO DE LA MUESTRA DESPUES DE LAVAR (gr) | | | | 743,31 |
| PESO DE LA MUESTRA ANTES DE LAVAR (gr) | | | | 1496,72 |
| MALLA | ABERTURA | PESO DEL SUELO RETENIDO | PORCENTAJE RETENIDO PARCIAL | PORCENTAJE QUE PASA |
| ---- | mm | gr | % | % |
| 3/8" | 9,5 | 14,01 | 1,88 | 98,12 |
| N°4 | 4,75 | 12,06 | 1,62 | 96,49 |
| 10 | 2 | 30,7 | 4,13 | 92,36 |
| 20 | 0,84 | 103,85 | 13,97 | 78,39 |
| 40 | 0,42 | 248,61 | 33,45 | 44,94 |
| 60 | 0,25 | 118,95 | 16,00 | 28,94 |
| 100 | 0,149 | 124,41 | 16,74 | 12,20 |
| 200 | 0,074 | 82,99 | 11,16 | 1,04 |
| Pasa 200 | ---- | 7,71 | 1,04 | 0,00 |
| | | 743,29 | 99,97 | |



ANEXO B.2. Formato con Resultados de los Límites.

LÍMITES DE PLASTICIDAD Y HUMEDAD NATURAL

| LÍMITE LÍQUIDO | | | | | | | |
|----------------|------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| CAPSULA N° | NUMERO DE GOLPES | PESO DE CAPSULA + SUELO HUMEDO | PESO DE CAPSULA + SUELO SECO | PESO DEL AGUA | PESO DE LA CAPSULA | PESO DEL SULO SECO | CONTENIDO DE AGUA (W) |
| --- | --- | gr | gr | gr | gr | gr | % |
| 129 | 33 | 46,72 | 38,92 | 7,8 | 21,20 | 17,72 | 44,02 |
| 17 | 28 | 47,14 | 38,93 | 8,21 | 21,27 | 17,66 | 46,49 |
| 28 | 24 | 49,71 | 40,39 | 9,32 | 20,82 | 19,57 | 47,62 |



| LÍMITE PLASTICO | | | | | | | |
|-----------------|------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| CAPSULA N° | NUMERO DE GOLPES | PESO DE CAPSULA + SUELO HUMEDO | PESO DE CAPSULA + SUELO SECO | PESO DEL AGUA | PESO DE LA CAPSULA | PESO DEL SULO SECO | CONTENIDO DE AGUA (W) |
| --- | --- | gr | gr | gr | gr | gr | % |
| 23 | --- | 39,97 | 35,91 | 4,06 | 21,13 | 14,78 | 27,47 |
| 30 | --- | 40,49 | 36,3 | 4,19 | 20,85 | 15,45 | 27,12 |

| RESULTADOS | | | | | | | |
|------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|--|--------|
| LL | 47,39 | LP | 27,29 | IP | 20,10 | | 18,965 |

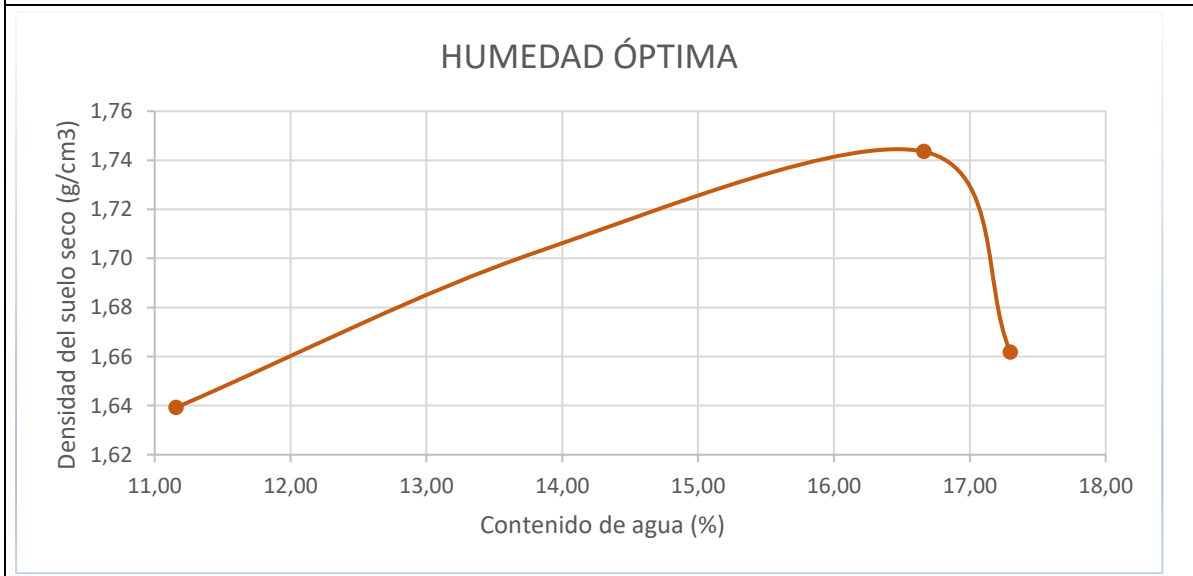
ANEXO B.3. Formato de Ensayo de Proctor Estándar.

ENSAYO DE PROCTOR ESTÁNDAR

| | |
|------------------------|--------|
| VOLUMEN DEL MOLDE (cm) | 943,94 |
|------------------------|--------|

| ENSAYO | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|-------|-------|-------|-------|
| Peso del molde (g) | 4230 | 4230 | 4230 | 4230 |
| peso del molde + suelo húmedo compactado (g) | 5950 | 6060 | 6150 | 6070 |
| Peso de suelo húmedo compactado (g) | 1720 | 1830 | 1920 | 1840 |
| Peso de capsula (g) | 26,98 | 27,29 | 27,00 | 21,1 |
| peso de capsula + suelo húmedo (g) | 74,30 | 91,30 | 73,00 | 80,50 |
| Peso de la capsula + suelo seco (g) | 69,55 | 83,52 | 66,43 | 71,74 |
| Peso del agua (g) | 4,75 | 7,78 | 6,57 | 8,76 |
| Peso del suelo seco (g) | 42,57 | 56,23 | 39,43 | 50,64 |
| Contenido de agua (%) | 11,16 | 13,84 | 16,66 | 17,30 |
| Densidad del suelo húmedo (g/cm3) | 1,82 | 1,94 | 2,03 | 1,95 |
| Densidad del suelo seco (g/cm3) | 1,64 | 1,70 | 1,74 | 1,66 |

| |
|--|
| |
|--|



ANEXO B.4. Formato de determinación de densidad de la biomasa.

FASE 1. PESOS TOMADOS DEL ENSAYO CON PICNÓMETRO (BIOMASA TIPO A)

| N° MUESTRA | PESO | | | | w2-w1 (g) | w4-w3 (g) | (w2-w1) - (w4-w3) (g) |
|------------|--------|--------|--------|--------|-----------|-----------|-----------------------|
| | w1 (g) | w2 (g) | w3 (g) | w4 (g) | | | |
| 1 | 407,2 | 1547 | 457 | 1536,6 | 1139,8 | 1079,6 | 60,2 |
| 2 | 407,2 | 1547 | 441 | 1537,2 | 1139,8 | 1096,2 | 43,6 |

FASE 2. DETERMINACIÓN DE DENSIDAD

| N° MUESTRA | DENSIDAD DEL AGUA (g/cm ³) | VOLUMEN DE FIBRA SSS (cm ³) | PESO DE FIBRAS SSS (g) | DENSIDAD ABSOLUTA DE FIBRA (g/cm ³) |
|------------|--|---|------------------------|---|
| 1 | 1 | 60,2 | 49,8 | 0,83 |
| 2 | 1 | 43,6 | 33,8 | 0,78 |

PROMEDIO DE DENSIDAD ABSOLUTA DE FIBRA (g/cm³)

0,80

FASE 1. PESOS TOMADOS DEL ENSAYO CON PICNÓMETRO (BIOMASA TIPO B)

| N° MUESTRA | PESO | | | | w2-w1 (g) | w4-w3 (g) | (w2-w1) - (w4-w3) (g) |
|------------|--------|--------|--------|--------|-----------|-----------|-----------------------|
| | w1 (g) | w2 (g) | w3 (g) | w4 (g) | | | |
| 1 | 407,4 | 1548 | 477,4 | 1557,4 | 1140,6 | 1080 | 60,6 |
| 2 | 407,4 | 1547,6 | 478 | 1558,8 | 1140,2 | 1080,8 | 59,4 |

FASE 2. DETERMINACIÓN DE DENSIDAD

| N° MUESTRA | DENSIDAD DEL AGUA (g/cm ³) | VOLUMEN DE FIBRA SSS (cm ³) | PESO DE FIBRAS SSS (g) | DENSIDAD ABSOLUTA DE FIBRA (g/cm ³) |
|------------|--|---|------------------------|---|
| 1 | 1 | 60,6 | 70 | 1,16 |
| 2 | 1 | 59,4 | 70,6 | 1,19 |

PROMEDIO DE DENSIDAD ABSOLUTA DE FIBRA (g/cm³)

1,17

ANEXO B.6. Resultados de Ensayo de Conductividad Térmica.

| ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD ESPECIMEN: 0% DE BIOMASA | | | | | | | | |
|--|--------------|--------------------------------|------------|----------------------------|----------|------------|---------------------|------|
| TIEMPO (min) | POTENCIA (W) | TEMPERATURA CALIENTE MAX. (°C) | ΔT | TEMPERATURA FRIA MAX. (°C) | AREA (m) | Δx | $\Delta x/\Delta T$ | k |
| 0 | 5,25 | 33,00 | 6,40 | 26,60 | 0,0005 | 0,003 | 0,00047 | 5,01 |
| 5 | 5,2 | 41,30 | 14,10 | 27,20 | 0,0005 | 0,003 | 0,00021 | 2,25 |
| 10 | 5,15 | 47,70 | 19,70 | 28,00 | 0,0005 | 0,003 | 0,00015 | 1,60 |
| 15 | 5,05 | 52,40 | 23,60 | 28,80 | 0,0005 | 0,003 | 0,00013 | 1,31 |
| 20 | 5,15 | 56,00 | 26,70 | 29,30 | 0,0005 | 0,003 | 0,00011 | 1,18 |
| 25 | 5,15 | 58,90 | 28,90 | 30,00 | 0,0005 | 0,003 | 0,00010 | 1,09 |
| 30 | 5,25 | 61,40 | 30,60 | 30,80 | 0,0005 | 0,003 | 0,00010 | 1,05 |
| 35 | 5,6 | 63,70 | 32,30 | 31,40 | 0,0005 | 0,003 | 0,00009 | 1,06 |
| 40 | 5,4 | 65,50 | 33,50 | 32,00 | 0,0005 | 0,003 | 0,00009 | 0,99 |
| 45 | 5,35 | 66,50 | 34,20 | 32,30 | 0,0005 | 0,003 | 0,00009 | 0,96 |
| 50 | 5,2 | 67,50 | 34,70 | 32,80 | 0,0005 | 0,003 | 0,00009 | 0,92 |
| 55 | 5,55 | 68,60 | 35,50 | 33,10 | 0,0005 | 0,003 | 0,00008 | 0,96 |
| 60 | 5,65 | 69,80 | 36,40 | 33,40 | 0,0005 | 0,003 | 0,00008 | 0,95 |
| 65 | 5,4 | 70,70 | 36,90 | 33,80 | 0,0005 | 0,003 | 0,00008 | 0,89 |

| ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD ESPECIMEN: 10% DE BIOMASA | | | | | | | | |
|---|--------------|--------------------------------|------------|----------------------------|----------|------------|---------------------|------|
| TIEMPO (min) | POTENCIA (W) | TEMPERATURA CALIENTE MAX. (°C) | ΔT | TEMPERATURA FRIA MAX. (°C) | AREA (m) | Δx | $\Delta x/\Delta T$ | k |
| 0 | 5,05 | 49,80 | 19,00 | 30,80 | 0,0005 | 0,003 | 0,0001579 | 1,62 |
| 5 | 5,3 | 55 | 23,90 | 31,1 | 0,0005 | 0,003 | 0,0001255 | 1,36 |
| 10 | 4,95 | 58,9 | 27,30 | 31,6 | 0,0005 | 0,003 | 0,0001099 | 1,11 |
| 15 | 4,95 | 61,5 | 29,60 | 31,9 | 0,0005 | 0,003 | 0,0001014 | 1,02 |
| 20 | 5,1 | 63,8 | 31,70 | 32,1 | 0,0005 | 0,003 | 9,464E-05 | 0,98 |
| 25 | 5,15 | 65,8 | 33,50 | 32,3 | 0,0005 | 0,003 | 8,955E-05 | 0,94 |
| 30 | 5,1 | 67,8 | 35,30 | 32,5 | 0,0005 | 0,003 | 8,499E-05 | 0,88 |
| 35 | 4,9 | 68,8 | 36,20 | 32,6 | 0,0005 | 0,003 | 8,287E-05 | 0,83 |
| 40 | 4,95 | 69,7 | 37,00 | 32,7 | 0,0005 | 0,003 | 8,108E-05 | 0,82 |
| 45 | 5,05 | 70,7 | 37,80 | 32,9 | 0,0005 | 0,003 | 7,937E-05 | 0,82 |
| 50 | 5,2 | 71,7 | 38,50 | 33,2 | 0,0005 | 0,003 | 7,792E-05 | 0,83 |
| 55 | 5,2 | 72,7 | 39,30 | 33,4 | 0,0005 | 0,003 | 7,634E-05 | 0,81 |
| 60 | 5,35 | 73,5 | 40,00 | 33,5 | 0,0005 | 0,003 | 0,000075 | 0,82 |
| 65 | 4,55 | 74,3 | 40,70 | 33,6 | 0,0005 | 0,003 | 7,371E-05 | 0,68 |

| ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD ESPECIMEN: 20% DE BIOMASA | | | | | | | | |
|---|--------------|--------------------------------|------------|----------------------------|----------|------------|---------------------|------|
| TIEMPO (min) | POTENCIA (W) | TEMPERATURA CALIENTE MAX. (°C) | ΔT | TEMPERATURA FRIA MAX. (°C) | AREA (m) | Δx | $\Delta x/\Delta T$ | k |
| 0 | 5,55 | 30,10 | 4,20 | 25,90 | 0,0005 | 0,003 | 0,0007143 | 8,08 |
| 5 | 5,65 | 39,80 | 12,80 | 27,00 | 0,0005 | 0,003 | 0,0002344 | 2,70 |
| 10 | 5,7 | 46,70 | 18,50 | 28,20 | 0,0005 | 0,003 | 0,0001622 | 1,88 |
| 15 | 6,1 | 51,80 | 22,80 | 29,00 | 0,0005 | 0,003 | 0,0001316 | 1,64 |
| 21 | 6,55 | 57,30 | 27,10 | 30,20 | 0,0005 | 0,003 | 0,0001107 | 1,48 |
| 25 | 6,3 | 61,30 | 30,30 | 31,00 | 0,0005 | 0,003 | 9,901E-05 | 1,27 |
| 30 | 6,7 | 64,8 | 33,00 | 31,8 | 0,0005 | 0,003 | 9,091E-05 | 1,24 |
| 35 | 5,7 | 68,00 | 35,40 | 32,60 | 0,0005 | 0,003 | 8,475E-05 | 0,98 |
| 40 | 6,6 | 70,30 | 37,30 | 33,00 | 0,0005 | 0,003 | 8,043E-05 | 1,08 |
| 45 | 6,75 | 72,80 | 39,30 | 33,50 | 0,0005 | 0,003 | 7,634E-05 | 1,05 |
| 50 | 6,8 | 74,80 | 41,00 | 33,80 | 0,0005 | 0,003 | 7,317E-05 | 1,01 |
| 58 | 6,75 | 77,80 | 43,40 | 34,4 | 0,0005 | 0,003 | 6,912E-05 | 0,95 |
| 60 | 6,5 | 78,50 | 44,00 | 34,50 | 0,0005 | 0,003 | 6,818E-05 | 0,90 |
| 65 | 6,5 | 79,60 | 44,90 | 34,70 | 0,0005 | 0,003 | 6,682E-05 | 0,88 |
| 70 | 6,5 | 80,60 | 45,70 | 34,90 | 0,0005 | 0,003 | 6,565E-05 | 0,87 |
| 75 | 6,5 | 81,40 | 46,30 | 35,1 | 0,0005 | 0,003 | 6,479E-05 | 0,86 |
| 80 | 6,15 | 81,9 | 46,70 | 35,2 | 0,0005 | 0,003 | 6,424E-05 | 0,80 |
| 85 | 5,85 | 82,00 | 46,80 | 35,20 | 0,0005 | 0,003 | 6,41E-05 | 0,76 |
| 90 | 5,65 | 81,7 | 46,40 | 35,3 | 0,0005 | 0,003 | 6,466E-05 | 0,74 |
| 95 | 5,65 | 81,3 | 46,10 | 35,2 | 0,0005 | 0,003 | 6,508E-05 | 0,75 |
| 100 | 5,8 | 81,1 | 45,90 | 35,2 | 0,0005 | 0,003 | 6,536E-05 | 0,77 |

| ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD ESPECIMEN: 25% DE BIOMASA | | | | | | | | |
|---|--------------|--------------------------------|------------|----------------------------|----------|------------|---------------------|------|
| TIEMPO (min) | POTENCIA (W) | TEMPERATURA CALIENTE MAX. (°C) | ΔT | TEMPERATURA FRIA MAX. (°C) | AREA (m) | Δx | $\Delta x/\Delta T$ | k |
| 0 | 10,50 | 5,25 | 10,50 | 28,40 | 0,0005 | 0,003 | 0,0002857 | 3,06 |
| 5 | 10,50 | 5,25 | 16,50 | 29,40 | 0,0005 | 0,003 | 0,0001818 | 1,94 |
| 10 | 11,80 | 5,9 | 21,50 | 30,30 | 0,0005 | 0,003 | 0,0001395 | 1,68 |
| 15 | 11,50 | 5,75 | 24,40 | 30,90 | 0,0005 | 0,003 | 0,000123 | 1,44 |
| 20 | 11,80 | 5,9 | 27,70 | 31,70 | 0,0005 | 0,003 | 0,0001083 | 1,30 |
| 25 | 11,80 | 5,9 | 30,00 | 32,40 | 0,0005 | 0,003 | 0,0001 | 1,20 |
| 30 | 11,60 | 5,8 | 32,40 | 32,80 | 0,0005 | 0,003 | 9,259E-05 | 1,09 |
| 35 | 11,90 | 5,95 | 34,10 | 33,30 | 0,0005 | 0,003 | 8,798E-05 | 1,07 |
| 40 | 11,80 | 5,9 | 35,60 | 33,80 | 0,0005 | 0,003 | 8,427E-05 | 1,01 |
| 45 | 11,90 | 5,95 | 37,00 | 34,10 | 0,0005 | 0,003 | 8,108E-05 | 0,98 |
| 53 | 12,30 | 6,15 | 38,80 | 34,60 | 0,0005 | 0,003 | 7,732E-05 | 0,97 |
| 55 | 12,00 | 6 | 39,10 | 34,60 | 0,0005 | 0,003 | 7,673E-05 | 0,94 |

| | | | | | | | | |
|-----|-------|------|-------|-------|--------|-------|-----------|------|
| 60 | 12,00 | 6 | 40,20 | 34,90 | 0,0005 | 0,003 | 7,463E-05 | 0,91 |
| 65 | 12,40 | 6,2 | 40,90 | 35,30 | 0,0005 | 0,003 | 7,335E-05 | 0,93 |
| 70 | 13,00 | 6,5 | 42,30 | 35,50 | 0,0005 | 0,003 | 7,092E-05 | 0,94 |
| 75 | 13,40 | 6,7 | 43,70 | 35,80 | 0,0005 | 0,003 | 6,865E-05 | 0,94 |
| 80 | 12,30 | 6,15 | 44,40 | 36,00 | 0,0005 | 0,003 | 6,757E-05 | 0,85 |
| 86 | 12,20 | 6,1 | 44,90 | 36,20 | 0,0005 | 0,003 | 6,682E-05 | 0,83 |
| 90 | 13,00 | 6,5 | 45,20 | 36,40 | 0,0005 | 0,003 | 6,637E-05 | 0,88 |
| 95 | 13,00 | 6,5 | 45,60 | 36,40 | 0,0005 | 0,003 | 6,579E-05 | 0,87 |
| 100 | 13,10 | 6,55 | 46,10 | 36,50 | 0,0005 | 0,003 | 6,508E-05 | 0,87 |

ANEXO C. NORMATIVA USADA EN ENSAYOS

ANEXO C.1. I.N.V. E -13

ANEXO C.1.1. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.

ANEXO C.1.2. Determinación del límite líquido de los suelos.

ANEXO C.1.3. Determinación de límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.

ANEXO C.1.4. Relación humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación)

ANEXO C.2. NORMA 080

ANEXO C.2.1. ARTICULO 8. Ensayo de compresión en cubos.

- 8.1 Los ensayos de laboratorio de esfuerzos de rotura mínimos para medir la Resistencia del material tierra a la compresión (ensayo de compresión en cubos) se realiza conforme al procedimiento siguiente:
- La resistencia se mide mediante el ensayo de compresión del material en cubos de 0.1 m de arista.
 - La resistencia última se calcula conforme a la expresión siguiente: $f_o = 1.0MPa = 10.2 \text{ kgf/cm}^2$
 - Los cubos de adobes o muestras de tapial deben cumplir con que el promedio de las cuatro mejores muestras (de seis muestras) sea igual o mayor a la resistencia última indicada.
 - En el caso del tapial, de no existir muestras secas, se recomienda elaborar muestras comprimidas en moldes de 0.1 x 0.1 x 0.15 m. con 10 golpes de un mazo de 5 kg de peso.

ANEXO C.2.2. Anexo N°3. Prueba "Contenido de humedad" para la construcción con tapial.

ANEXO N° 3. Prueba "Contenido de humedad" para la construcción con tapial.

- Formar una bola con tierra de la zona del tamaño de un puño y comprimirla fuertemente. Soltarla a un suelo firme y plano desde una altura de 1.10 m.
- Si la bola se desintegra en el piso, el suelo es demasiado seco.
- Si la bola de tierra se rompe en 5 pedazos o más, el contenido de humedad es correcto.
- Si la bola se aplasta sin desintegrarse, el contenido de humedad es demasiado alto.



REFERENCIAS

- IRAM. (2002). *Aislamiento Termico de edicifios IRAM 11601*. Argentina.
- ATECOS. (s.f.). *Miliarium.com*. Recuperado el 11 de 06 de 2017, de www.miliarium.com/ATECOS/HTML/Soluciones/Fichas/Aislamiento_con_materiales_de_origen_sintetico.PDF
- ATECOS. (s.f.). *Miliarium.com*. Recuperado el 10 de 06 de 2017, de http://www.miliarium.com/ATECOS/HTML/Soluciones/Fichas/Aislamiento_con_materiales_de_origen_vegetal.PDF
- Callister, W. (21 de 04 de 2007). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2*. Barcelona, ESPAÑA: Reverté. Recuperado el 10 de 02 de 2017, de <https://es.slideshare.net/guest2515e/balance-energetico>
- César A. Juárez Alvarado, P. R. (2004). Uso de fibras naturales de lechugilla como refuerzo en concreto . *Ingenierias* , 7- 19. Obtenido de file:///C:/Users/mafer_000/Desktop/DOC.TESIS/usodefibras.PDF
- Creara Internacional. (17 de 10 de 2012). *Unidad de Planeacion Minero Energetico "UPME"*. Recuperado el 06 de 06 de 2017, de [file:///C:/Users/mafer_000/Downloads/Curso_UPME_EE_VIS_1%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/mafer_000/Downloads/Curso_UPME_EE_VIS_1%20(1).pdf)
- Cuchillo, O. (07 de 11 de 2015). *civilgeeks.com*. Obtenido de civilgeeks.com: <https://civilgeeks.com/2015/07/11/apuntes-del-sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-s-u-c-s/>
- Energesis. (2016). *Sliderplyer.es*. Obtenido de Sliderplyer.es web site: <http://slideplayer.es/slide/10248952/>
- Gallego, J. (2012). *Biblioteca Virtual del SENA*. Recuperado el 23 de Mayo de 2017, de Biblioteca Virtual del SENA: https://repositorio.sena.edu.co/sitios/albanileria_restauracion_edificaciones/construccion_muros_tapia_bahareque.html
- Gatti, F. (05 de 09 de 2012). Recuperado el 13 de 06 de 2017, de <https://core.ac.uk/download/pdf/41807254.pdf>
- Gatti, F. (05 de 09 de 2012). *Arquitectura y Construcción en Tierra*. Recuperado el 13 de 06 de 2017, de <https://core.ac.uk/download/pdf/41807254.pdf>
- Gil, S., & Gil, C. (2017). *ESTADO DEL ARTE DE LA NORMATIVIDAD PARA LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICACIONES EN TIERRA ARMADA Y SU APLICABILIDAD EN LA ZONA ANDINA DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER*. Bucaramanga.
- Gradiz, H. (7 de Agosto de 2013). Obtenido de <https://es.slideshare.net/hugogradiz/carta-de-plasticidad>

- INGEAS S.A.S. (s.f.). INGEAS S.A.S. Obtenido de INGEAS S.A.S.:
<https://www.dropbox.com/s/xifs0pl8owwlypa/clasificacion-de-los-suelos.pdf?dl=0>
- INVIAS. (2013). *I.N.V. E- 141-13 Relación humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación)*. INVIAS. Obtenido de I.N.V. E- 141-13 Relación humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación):
file:///C:/Users/mafer_000/Desktop/TESIS/SECCI%C3%83%20N%20100%20INV%20E-13.pdf
- INVIAS. (2013). *INV E-123-13*. INVIAS.
- Jaramillo, A. S. (03 de Septiembre de 2012). *UPME Unidad de Planeación Minero Energética*. Recuperado el 29 de Junio de 2017, de
<http://www.si3ea.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=6G1VGDdWfHc%3d&tabid=135&mid=449&language=en-US>
- MAPS, G. (2018). *Google MAPS*. Obtenido de Google MAPS:
<https://www.google.com.co/maps/place/Universidad+Pontificia+Bolivariana+Seccional+Ucaramanga/@7.0385008,-73.0722689,315m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x8e6840b36653b9c5:0x4dcbc55842151df!8m2!3d7.038142!4d-73.072204?hl=es-419>
- Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento. (7 de 04 de 2017). *Diario Oficial del Bicentenario "EL PERUANO"*. Obtenido de Diario Oficial del Bicentenario "EL PERUANO":
file:///C:/Users/mafer_000/Downloads/E.080%20Construcci%3Bn%20con%20tiera.pdf
- Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento. (05 de 04 de 2017). *Norma 080*. Obtenido de Norma 080: https://upbeduco-my.sharepoint.com/personal/sergio_pineda_upb_edu_co/_layouts/15/onedrive.aspx?slrid=41445c9e-e0c6-5000-96c0-cf0b6f66595d&FolderCTID=0x012000C1B5995CECAFE345B27BEFA66CD6E51F&id=%2Fpersonal%2Fsergio_pineda_upb_edu_co%2FDocuments%2FInvestiga
- S. Bestraten, E. Hormías, & A. Altemir. (2010). Construcción con tierra en el siglo XXI. *Informes de la Construcción*, 5-20.
- SIREWALL. (2018). Obtenido de SIREWALL: <https://sirewall.com/sirewall-system/>
- Steiner, A. (10 de 04 de 2016). América latina innova en sostenibilidad ambiental. *EL TIEMPO*, págs. <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16560303>.
- UPME. (2010). *UPME*. Recuperado el 09 de 04 de 2018, de
http://www.upme.gov.co/docs/energia/proyecc_demanda_energia_octubre_2010.pdf
- UPME. (03 de 2017). *UPME*. Recuperado el 04 de 04 de 2018, de
http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2017/Informe_de_variables_Mar_2017.pdf
- UPME, UIS, IDEAM. (2010). *UPME*. Obtenido de UPME:
<https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/ATLAS%20POTENCIAL%20ENERGETICO%20BIOMASA%20RESIDUAL%20COL.%20UPME.pdf>

XM. (2016). XM. Recuperado el 04 de 04 de 2018, de
<http://informesanuales.xm.com.co/2015/SitePages/operacion/2-4-Generaci%C3%B3n-del-SIN.aspx>