

**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**

**CRISTIAN ISNARDO GIL GÓMEZ**

**SERGIO ANDRÉS GIL GÓMEZ**

**DOCENTE SUPERVISOR**

**Ing. SERGIO MANUEL PINEDA VARGAS PhD.**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**BUCARAMANGA**

**2018**

## Tabla de Contenido

<b>GLOSARIO.....</b>	<b>2</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>7</b>
Objetivo general: .....	7
Objetivos específicos: .....	7
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>39</b>
3.1 Revisión bibliográfica .....	40
3.2 Filtración de información compatible con suelos santandereanos.....	42
3.3 Extracción y caracterización del suelo seleccionado.....	51
3.4 Construcción de muretes y briquetas.....	57
<b>4. PRUEBAS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>61</b>
4.1 Granulometría.....	61
4.2 Proctor estándar .....	63
4.3 Cilindros tierra compresión.....	65
4.4 Muretes tracción indirecta.....	69
<b>5. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES .....</b>	<b>71</b>
<b>6. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>73</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>80</b>

## GLOSARIO

**Ancestral:** Que tiene un origen muy antiguo

**Apique:** Excavación realizada en el suelo a una profundidad de 1,50 por 0,50 metros, con el propósito de inspeccionar y estudiar el suelo.

**Apisonar:** Proceso en el cual se compacta y allana la tierra por medio de pisones, rodillos o elementos que permite llevar al suelo a un grado de compactación deseado.

**Briqueta:** Cilindro o elemento de prueba con dimensiones definidas según norma o necesidad, que puede ser de madera, tierra, concreto, etc.

**Biodegradación:** Descomposición natural y no contaminante de una sustancia o producto por acción de agentes biológicos

**Cimentación:** Conjunto de elementos estructurales de una edificación cuya misión es transmitir adecuadamente las cargas de la misma al suelo.

**Chaveta:** Pieza de sección definida según necesidad que se inserta entre dos elementos que deben ser solidarios entre sí para transmitir potencia y evitar que se produzcan deslizamientos de un elemento sobre el otro.

**Dintel:** Elemento de refuerzo que se coloca horizontalmente sobre los huecos de las puertas y ventanas y distribuyen los esfuerzos superiores.

**Eco amigable:** que es amigable con el medio ambiente

**Encofrado:** Consiste en moldes de madera u otros materiales rígidos que tienen como función contener la tierra mientras es trabajada en el armado de los muros.

**Empírico:** Es aquel conocimiento basado en la experiencia.

**Humedad optima:** Es aquella humedad en la que el suelo consigue la máxima densidad seca, para la energía de compactación.

**Idiosincrasia:** Conjunto de rasgos, temperamento, carácter, distintivos y propios de un individuo o de una colectividad.

**Juntas:** Espacio pequeño que queda entre dos superficies contiguas que pueden unirse o ligarse.

**Lineamiento:** Es una tendencia, dirección o un rasgo característico de algo.

**Murete:** Muro de bajas dimensiones o pequeño.

**Patrimonio histórico:** Es la herencia de artefactos, elementos y conocimientos de una sociedad heredado de generaciones pasa y otorgado para el beneficio de las próximas generaciones.

**Pisón:** Herramienta de madera formada por un cuerpo con figura cuadrada o redonda y un mango, Usada para compactar la tierra en la construcción de un muro de tapial.

**Sismo resistencia:** Característica de edificaciones con dimensiones apropiadas y materiales con proporción y resistencia adecuados para soportar la acción de fuerzas causadas por sismos.

**Sistema Constructivo:** Es un conjunto de elementos y unidades que, puestas juntas con una técnica adecuada forman una organización funcional con el fin de dar confort.

**Superficie de ruptura:** Falla activa cuando se localizan focos de sismos o bien, se tiene evidencia por esa sección pueden ocurrir desplazamientos.

**Tierra armada:** Consiste en intercalar suelo y refuerzos con el fin de crear una unión permanente y predecible.

**Tapieros:** Personas encargadas de apisonar la tierra y realizar el armado de encofrados para construcción de viviendas en tapia pisada.

**Tapia pisada:** Técnica constructiva que utiliza la tierra como materia prima para la construcción de edificaciones, apisonando tierra preparada capa por capa, en medio de dos tablones de madera u otro material que cumpla con las funciones de molde y guía para poder llevar a cabo el proceso de apisonamiento.

**Tierra:** Materia prima para construcción en tapia pisada, compuesto de material grueso y fino.

**Vernácular:** Se dice de la técnica constructiva propia y ancestral, de un país o región, que aún permanece viva en su cultura.

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** 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

**AUTOR(ES):** Cristian Isnardo Gil Gómez, Sergio Andrés Gil Gómez

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** PhD Sergio Manuel Pineda

### RESUMEN

Esta investigación recopila el resultado de la búsqueda de normas sismo resistentes y pruebas de laboratorio existentes y necesarias alrededor del mundo para la construcción en tapia pisada, como apoyo técnico preliminar a esta arquitectura Vernácula en Santander, Colombia. De esta forma se pudo llegar al encuentro de doce (12) normas y treinta (30) documentos adicionales, entre ellos libros y artículos científicos de países desarrollados y en vías de desarrollo en donde se combina el concreto y el acero con la técnica tradicional de tierra armada, brindando seguridad a las sus estructuras. Inicialmente se hace un análisis de lineamientos sismos resistentes para el desarrollo de esta técnica, los cuales se encaminan a la aplicabilidad de ensayos que se encuentran en las normas de diferentes países. Vemos como estos se enfocan, principalmente, en realizar ensayos para conocer la resistencia y propiedades de los suelos. Entre los ensayos que se hallaron hacen parte pruebas de goteo, aspersion y cortante que pueden ser de gran relevancia en la durabilidad y respuesta a los esfuerzos dinámicos producidos por los sismos que se presentan en las zonas que se encuentran dentro del denominado Cinturón de fuego del Pacífico, el cual representa la zona de más alta sismicidad en el mundo, y a la que pertenecen países que cuentan con normas o especificaciones para una construcción en tapia pisada sismo resistente. Dentro de este análisis cabe resaltar normas de países como Australia (HB 195), Alemania (Stampflehmwande), Perú (E080) y Nueva Zelanda (NZS 4297 y 4298), siendo este último uno de los países que realiza un gran aporte al eje investigativo de los códigos sismo resistentes, ya que se enfoca en la proposición de modelos matemáticos para el diseño de estructuras y pruebas de laboratorio, brindando soporte técnico a la construcción de viviendas en tierra.

### PALABRAS CLAVE:

juntas, dintel, chavetas, tapia pisada, apique, apisonar, encofrado

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** STATE OF THE ART OF THE NORMATIVIDAD FOR THE CONSTRUCTION OF BUILDINGS IN ARMED LAND AND ITS APPLICABILITY IN THE ANDEAN AREA OF THE DEPARTMENT OF SANTANDER

**AUTHOR(S):** Cristian Isnardo Gil Gómez, Sergio Andrés Gil Gómez

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR:** PhD Sergio Manuel Pineda

### ABSTRACT

This research compiles the results of the search for seismic resistant standards and existing and necessary laboratory tests around the world for construction in rammed earth, as a preliminary technical support to this vernacular architecture in Santander, Colombia. Thus, it was possible to found twelve (12) norms and thirty (30) additional documents, among books and scientific articles, from developed and developing countries, where concrete and steel are combined with the traditional technique of the rammed earth, providing security to the structures. Initially an analysis of seismic resistant guidelines for the development of this technique is made, which are directed to the applicability of tests that are found in the norms of different countries. We saw how these were focused, mainly, in carrying out tests to know the resistance and properties of the soil. The tests that were found are: drip, spray and shear tests that can be of great relevance in the durability and response to the dynamic efforts produced by earthquakes, that occur in areas within the so-called Fire Belt of the Pacific, which it represents the zone of highest seismicity in the world, and in which the countries have standards or specifications for a seismic resistant construction. Within the analysis it is worth to highlight standards from countries such as Australia (HB 195), Germany (Stampflehmwände), Peru (E080) and New Zealand (NZS 4297 and 4298), being the last one the country that makes a great contribution to the research of earthquake resistant codes, since it focuses on the proposal of mathematical models for the design of structures and laboratory tests, providing technical support to the construction of this kind of housing.

### KEYWORDS:

together, lintel, keys, tread wall, apique, tamp, formwork

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

## OBJETIVOS

### **Objetivo general:**

Revisar las normas existentes a nivel global para la construcción de edificaciones mediante la técnica de tierra armada en zonas de alta sismicidad, y su aplicabilidad en las técnicas vernáculas santandereanas.

### **Objetivos específicos:**

1. Compilar información normativa referente a la técnica de construcción con tierra armada en zonas con actividad sísmica.
2. Identificar los diferentes sistemas de pruebas a los que se ven sometidos los muros de tierra armada para generar los parámetros de una posible normatividad de este tipo de construcciones y encontrar su relación, por similitud, con la composición de algunas tierras disponibles en Santander.
3. Elaborar material didáctico basado en la revisión bibliográfica para incentivar el desarrollo y la investigación de ensayos que soporten la capacidad de la técnica de la tierra apisonada (cartilla, diapositivas, ensayos).
4. Recomendar un conjunto de pruebas estructurales para los muros de tapia pisada en Santander, encaminadas a la generación de una normatividad local en este tema.
5. Analizar el comportamiento a compresión de cilindros de tierra utilizando el suelo existente en la Universidad Pontificia Bolivariana.

# 1. INTRODUCCIÓN

La constante necesidad de la ingeniería civil por reinventar e incluir un enfoque sostenible, hace centrar las miradas en una técnica de construcción consolidada a principios del siglo XIX en Colombia, llamada la arquitectura en tierra armada (Higuera, 2007). Según datos del libro *Building With Earth*, se estima que, a nivel mundial, un tercio de la población vive en viviendas construidas con esta técnica (Tom, 2001). Los grandes beneficios económicos y ambientales que posee la misma, permite que esta forma de construcción tenga acceso a las poblaciones más vulnerables de la sociedad como alternativa de solución de vivienda digna.

La arquitectura Ancestral, dentro de la cual también se incluye la arquitectura en tierra, no cuenta con suficiente soporte técnico y académico para desarrollar, de forma más eficiente y con mejor calidad, este tipo de actividades constructivas. La falta de normatividad para la construcción de edificaciones en tierra armada en zonas de amenaza sísmica ha sido uno de los mayores inconvenientes a la hora de utilizar estos sistemas constructivos. De esta manera, esta investigación buscó recopilar y evaluar normas existentes en otras zonas geográficas del mundo similares a las condiciones de la zona andina del departamento de Santander, con el fin de generar material académico y técnico a este tipo de construcción de vivienda eco amigable, en pro de impulsar la aceptación y desarrollo dentro de las comunidades científicas e ingenieriles.

La construcción civil en Colombia se ha ido desarrollando a través de la historia. (Bolaños, 2007) Desde comienzos del siglo XIX (Higuera, 2007), los proyectos de viviendas han tenido

una gran diversidad de técnicas constructivas que buscan satisfacer la necesidad de las personas que pertenecen a la sociedad, permitiendo que las comunidades de bajos recursos tengan la oportunidad de adquirir un hogar, y así se respete uno de los derechos fundamentales más importantes: la vivienda digna. Según los datos registrados por el Departamento de Estadística Nacional (DANE, 2005), las viviendas en Colombia están construidas en su mayoría de bloques, ladrillos, piedras o madera pulida con una participación del 80,2%. Dentro de esta variedad de técnicas también se usa la tapia pisada, el adobe o el bahareque que representa el 9,8%; la madera burda, tabla o tablón con una participación del 6,4%; los prefabricados con el 1,0%; guadua, caña, esterilla y otros vegetales 2,0%. Otros materiales y viviendas sin paredes se engloban en el 0,6% como muestran en las siguientes imágenes 1 y 2 (DANE, 2005).

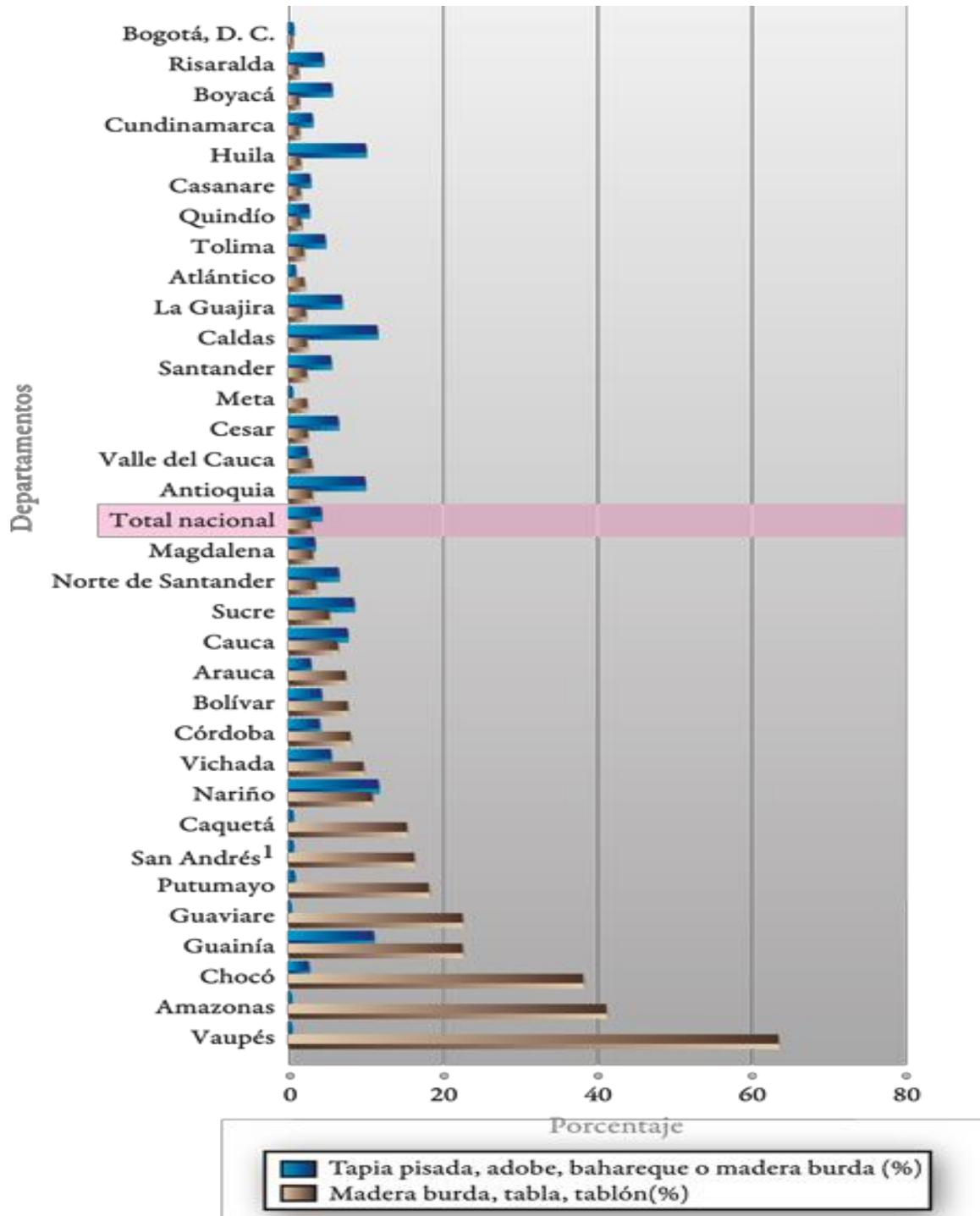


Imagen 1. Comparativo de departamentos que implementan esta técnica (DANE, 2005)



Basándonos en las estadísticas presentadas por el DANE podemos evidenciar que estas técnicas ancestrales y auto sostenibles representan la mayor parte de la construcción de vivienda. Convirtiéndose así en una necesidad latente la preservación de esta técnica ancestral en cada una de las poblaciones que conforman estos territorios en los cuales se ha desarrollado su economía, estado y sociedad. De igual forma, la UNESCO y diferentes grupos sociales, instituciones y gobiernos, nos hacen ver la necesidad de preservar los patrimonios culturales de la humanidad como alternativa sostenible eco amigable, con el objetivo de disminuir los impactos medio ambientales que causan deterioro al planeta tierra.

De esta manera, se debe garantizar la existencia de normas que se enfoquen en la seguridad y calidad de este tipo de edificaciones, pues la deficiencia de una normativa nacional o departamental para la regularización, soporte técnico y especificación de estas construcciones dificulta la ejecución de proyectos financiables bajo esta estructuración.

La creación e implementación de estas técnicas de construcción beneficiarían al sector rural ya que las comunidades que allí habitan no cuentan con los suficientes recursos económicos, ni con el apoyo del gobierno nacional, para tener una vivienda digna.

Esta investigación se enfocó en realizar una revisión bibliográfica profunda de material a nivel mundial, sobre técnicas, especificaciones y nuevas alternativas para la construcción en tierra armada, tapia pisada o también conocida como tapial, con el fin de implementarla en zonas donde se evidencia que este tipo de construcción hace parte de su historia, por ejemplo, el departamento de Santander.

Es así como se explora la posibilidad de aplicar estas técnicas a nivel local y posteriormente a nivel nacional, pues es notorio que durante diferentes periodos de la historia, esta fue una técnica de gran usabilidad por parte de los ancestros que habitaron en territorio santandereano (Juaspuezán, 2015). Se dice que, en Colombia, en regiones como la zona andina, se han tenido iniciativas para conservar y reforzar esta tradicional forma de edificar basada en el uso de la tierra. Para este fin, se recomienda la utilización y guía de normas como la de Nueva Zelanda, Australia e incluso la norma Peruana, las cuales cuentan con códigos sismo resistentes basados en la experiencia e investigación a fondo, y permiten realizar cálculos estructurales y diseños similares a los que se realizan con la NSR-10 en el título C para las estructuras en concreto, y así no permitir que se siga perdiendo vigencia esta técnica del tapial con la implementación de materiales y técnicas modernas que se encuentran como primera elección al momento de construir viviendas como es el caso del hormigón armado.

En la actualidad, las grandes temáticas que han cobrado importancia debido a los diferentes efectos, acciones y dificultades que ha tenido el hombre en su relación con el medio ambiente, hacen que nuestros esfuerzos este enfocado en conceptos de una sociedad auto sostenible, a través de una construcción civil en la que la utilización de materiales que demandan un alto proceso químico y energético se reduzcan, y así se retomen sistemas constructivos como el tapial, con el fin de contribuir a la preservación y conservación del medio ambiente, y que se disminuya la ocupación de espacios para la depósito de residuos generados por la construcción con técnicas modernas de concreto y acero. Según (Castaño, Rodríguez, & Lasso, 2013), el sector de la construcción en ciudades

como Bogotá ha crecido de forma constante en los últimos años, concentrando entre el 20 y 30% del PIB de la construcción colombiana. Esto quiere decir que hasta el 2013, se producían en Bogotá, cerca de 15 millones de ton/año de RCD, algo como 2000 kg.hab/año. Estos residuos a nivel general producen un desequilibrio en la meta de los buenos hábitos en la construcción civil, exponiendo a sus habitantes a un perjuicio ambiental. Es por esto que se encuentra necesario recopilar material normativo, científico y técnico que sea suficientes para seguir avanzando en la motivación de empresas de construcción, ingenieros y arquitectos a la implementación de la tapia en la construcción actual. Esta técnica incorpora múltiples ventajas en temas económicos y de confort, como sus características de sustentabilidad, la baja emisión de carbono, el uso eficiente de recursos finitos, minimización de la polución, minimización de residuos, uso de materiales benignos, abastecimientos locales y biodegradación entre otros.

Por tal motivo, el presente proyecto de grado se basa en una investigación que involucro, primero la revisión bibliográfica de aproximadamente 50 documentos, normas e investigaciones realizadas alrededor del mundo, las cuales nos brindaron aportes sobre la construcción civil y arquitectónica en tierra armada, dando unos primeros pasos en la ampliación del conocimiento empírico que se ha desarrollado a través de la historia en el departamento de Santander. En segunda instancia, se generó un análisis sobre las diferentes particularidades que estas presentaban en común. Por ejemplo, en una de ellas se pudo observar que los procesos de cimentación que se realizan en países como Nueva Zelanda o Australia, con la utilización de este sistema constructivo, lo desarrollan por medio de refuerzos de acero y concreto obteniendo como resultado una mejor adherencia y

trasmisión de cargas entre los muros y el suelo, notándose una de las primeras diferencia entre la construcción de tapia pisada en estos y la construcción empírica realizada en Santander, la cual se lleva a cabo por medio de la colocación de material ciclópeo como estructura de cimentación.

Por otra parte, se vio la necesidad de realizar extracción de material y ejecutar ensayos de laboratorio con una muestra de suelo santandereano, esperando obtener una representación conforme a las características con las que se cuenta en el departamento de Santander, y así tener una práctica que nos aproximara a ratificar algunas de las fuentes bibliográficas citadas. Estas referencias nos brindaron información acerca de ensayos y ejecución de pruebas que conducen a que esta técnica constructiva tenga soportes técnico-prácticos que permiten mejorar y dar soluciones con la utilización de reforzamientos y aditivos, con el objetivo de aumentar la capacidad de respuesta de las viviendas de tierra a los movimientos dinámicos producidos por los sismos.

## 2. MARCO TEÓRICO

La tierra como material de construcción es definida por conceptos y procesos constructivos que permiten evaluar y comparar diferentes técnicas, sistemas constructivos y normativas sismo resistente para construir con tierra. Como primer concepto de investigación debemos definir la tierra como un material de construcción en los cuales se habla; que desde inicios de la humanidad ya los primeros hombres construían con tierra, formando con ella paredes protectoras para encubrir entradas a sus cavernas. (Pons, 2001) De esta manera la tierra ha sido un material de construcción usado en todos los lugares y en todos los tiempos, permitiendo la familiarización con sus características y aprendiendo a mejorarlas de diferentes formas. (Pons, 2001) Es por esto que se pueden evidenciar diferentes técnicas y procesos a la hora de construir con tierra a través del mundo en poblaciones en vías de desarrollo y de primer mundo, como se puede observar en el libro de Becky & Tom quienes estiman que un tercio de la población mundial vive en casas construidas en tierra, con viviendas que en algunos casos son modernos o tradicionales sin importar las culturas y condiciones climatológicas. (Becky & Tom, Building With Earth in Scotland, Innovative design and sustainability, 2001) Incluso en países desarrollados aún sigue siendo una de las técnicas más utilizada a la hora de desarrollar centros culturales, museos y bibliotecas (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014) es por esto que se observa un sin número de técnicas constructivas con la utilización de diferentes tipos de suelos a través de las diferentes poblaciones alrededor del mundo, esto debido a que ha logrado adaptarse a diferentes necesidades a las que se han visto expuestos sus habitantes y brindar una

solución de vivienda digna a las comunidades albergadas (Garcia-Reyes & Anzellini, 2016). En Colombia se evidencia que esta técnica fue de gran importancia en el desarrollo de varios municipios e incluso departamentos que hoy son patrimonio cultural de la humanidad, entre ellos se resaltan poblaciones como el municipio de Barichara que se encuentra ubicado en el departamento de Santander en el cual se estima que casi la totalidad de las antiguas y nuevas construcciones se levantan en tapia pisada. (Bolaños, 2007) Estas construcciones requieren un mantenimiento rutinario debido a que son estructuras que se deben protegerse ante los efectos del ambiente, cabe resaltar que estas construcciones presentan una resistencia a esfuerzos de cargas estáticas inferior a las de estructuras convencionales de concreto. Si a esto le sumamos que muchas de estas construcciones están ubicadas en zonas de actividad sísmica y que su resistencia a los esfuerzos dinámicos no ha sido estudiada a profundidad, el asunto de su durabilidad queda expuesto a la duda (Imagen 3). Un detalle adicional que puede perjudicar la durabilidad de estas estructuras es la incorrecta intervención de las mismas por parte de los propietarios quienes, por desconocimiento, pueden debilitar las construcciones en procesos de adecuaciones locativas. Aun así, existen muchas construcciones en tierra armada que han soportado devastadores terremotos y siguen siendo habitables (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014).

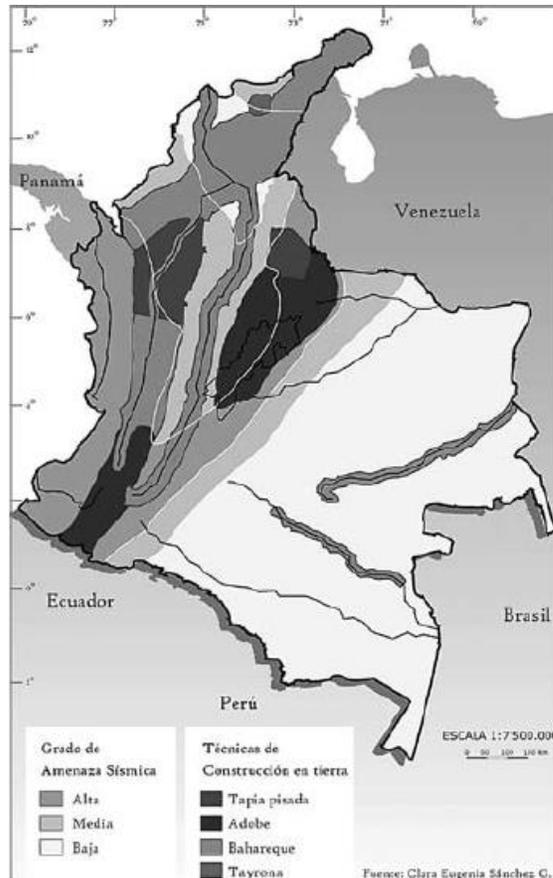


Figura 3. Mapa de construcciones en tierra y amenaza sísmica. Tomado de (Sánchez, 2007)

Por tal motivo se puede percibir que en Santander y en otros lugares de Colombia la técnica de tapia pisada se ha realizado de manera Ancestral debido a que solo se usa suelo en estado natural que se obtiene por lo general del sitio de construcción, en el que únicamente se hace un cernido, aireado y humedecimiento del mismo previo a su compactación, dentro de un encofrado denominado tapial (Maldonado Ramos, Castilla Pascual, & Vela Cossio, 1997) como se muestra en la imagen 4, y que se ha utilizado encofrados de manera artesanal permitiendo que se cree juntas, aunque las diferentes juntas creadas entre todos

los bloques compactos hacen que la construcción completa no sea estrictamente considerada monolítica (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014).



Imagen 4. Construcción muro en tapia pisada con encofrados artesanales tomado (Rivero Bolaños, 2007)

En las diferentes construcciones realizadas en Santander se cometen diferentes tipos de errores que en algunos casos conllevan a que la estructura no tenga un comportamiento adecuado frente a los sismos que se presentan en la zona, debido a que uno de los puntos en lo que más se comenten errores es en la construcción de la cimentación, realizándose sin ningún tipo de refuerzo de acero u otro tipo de estabilizante que permita una mejor respuesta ante cualquier esfuerzo dinámico que pueda presentarse durante un sismo. Tradicionalmente en Santander y Colombia la construcción de viviendas en tapia pisada se ha realizado con cimentaciones donde se realiza una excavación lineal que posteriormente

es llenada con rocas (angulosas o redondeadas) similares en tamaño a las utilizadas en los concretos ciclópeos (Imagen 5) (Yamin Lacouture, Bernal, Reyes Ortiz, & Valencia, 2007).

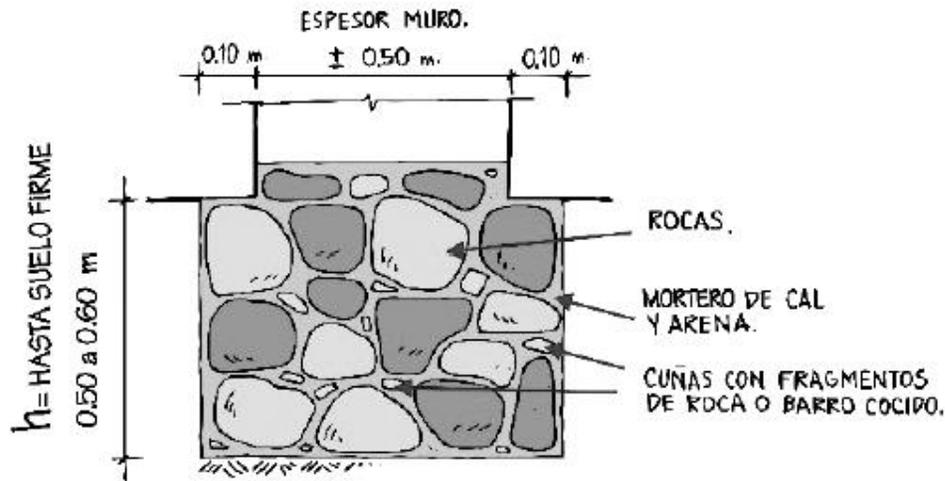


Imagen 5. Cimentación de un muro de tapia pisada. Tomado de (Yamin Lacouture, Bernal, Reyes Ortiz, & Valencia, 2007).

Continuando con el proceso constructivo de viviendas en tapia pisada la preparación y adecuación de una buena formaleta o encofrado permitirá que se realice la construcción de manera rápida y segura brindando una de las principales ventajas de construir en tapia pisada, en nuestra región este proceso se inicia aceitando y brindando un espacio cómodo para trabajar dentro de ella. Esta formaleta debe ser fácil de desmontar y desplazar para, una vez terminado un bloque de tapia pisada, se pueda continuar con la construcción de otro muro de manera sistemática. En el medio local los espesores de los muros de tapia pisada varían entre  $0.5$  m y  $1.2$  m (A mayor espesor del muro, mejor estabilidad y tendrá mayor capacidad para contrarrestar esfuerzos laterales) (Gernot, 2001). Las construcciones de muros completos de tapia pisada se realizan por medio de trabazón de bloques

compactos, similar a la construcción de mampostería, solo que en bloques considerablemente más grandes (aproximadamente 140 veces mayores en volumen que un bloque H15). Estos bloques son generados por medio de un proceso de compactación in situ de capas de tierra que no superan los 15 cm y que al ser compactadas por medio de un pisón de madera alcanzan un espesor de aproximadamente 10 cm, La tradición “tapiera” considera que una capa queda compactada cuando el sonido del pisón al golpear la tierra cambia y el pisón no deja marca considerable en la superficie; este proceso es repetido hasta que se alcance la altura del bloque para luego proceder con el desplazamiento horizontal de la formaleta e iniciar la compactación del bloque contiguo. Una vez terminada la primera hilera de bloques se desplaza la formaleta de manera vertical para de esta forma continuar con la siguiente hilera, la cual debe ir desplazada para generar la trabazón requerida en estas construcciones (SENA , pág. 18). Previo a disponer la primera capa de suelo sobre la junta, se suele colocar una capa o “cama” de cal y arena, y unas piedras planas con la intención de que, al empezar la compactación de la tierra, la tierra se filtre por las juntas de las rocas del sobre cimiento (SENA , pág. 18). Todas las capas deben tener entre 10 y 15 cm, ya que se ha demostrado que capas con más de 15 cm no son compactadas adecuadamente (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014).

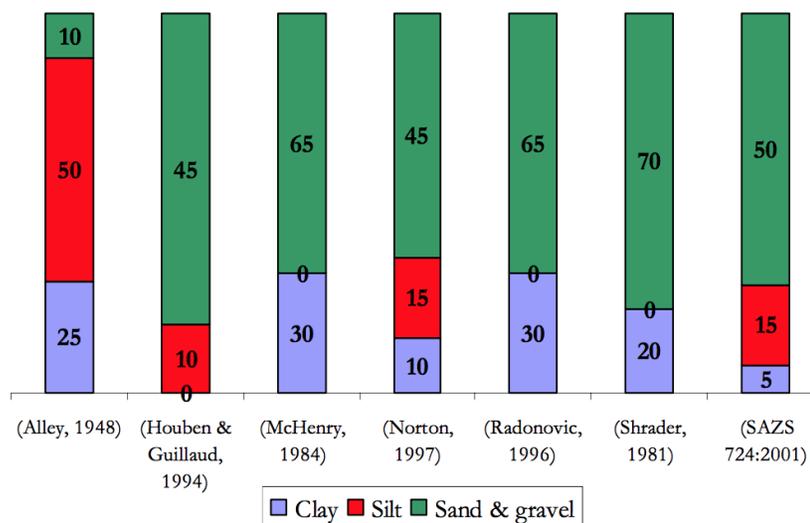
El departamento de Santander ha sido una de las poblaciones de Colombia donde aún hoy en día se mantiene preservando y conservando algunas tradiciones que se han transmitido de generación en generación a través de su historia, la tapia pisada ha sido una técnica de construcción utilizada en este departamento y ha sido parte de la idiosincrasia santandereana permitiendo desarrollar una técnica amigable con el medio ambiente,

siendo la tierra el material con el cual se desarrolla esta técnica; pero esto ha traído consigo también una mala interpretación sobre la elección del suelo apto para construir viviendas en tapia pisada ya que se tiene la creencia de que todo suelo no orgánico se puede utilizar para realizar la construcción en tierra. Hecho que han llevado a los investigadores e instituciones educativas a realizar proyectos de investigación que han permitido dar pautas que contribuyan al mejoramiento de la técnica constructiva brindando información acerca del tipo de tierra y composiciones adecuadas para la construcción en tapia pisada. Por ejemplo, en el manual de construcción de tapia pisada del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) se muestra que la granulometría ideal de material para realizar construcciones en tapia pisada debe ser de: gravillas (0 al 15%), arenas (40 al 50%), limos (20 al 35%) y arcillas (15 al 25%) (SENA ). La norma de Nuevo México condiciona las características del suelo restringiendo las partículas de agregado grueso mayor a 38 mm y sin la acumulación de grumos mayores a 13 mm (NMAC14.7.4, 2016). Por otra parte, un estudio reciente publicado en la revista *Construction and Building Materials* apunta a que el suelo ideal para la construcción en tapia pisada consiste en una combinación de arcillas (10-40%), limos (10-40%) y arenas del (35-65%), señalando también que el contenido de arcilla en el suelo es el más importante debido a que la arcilla es la que brinda la cohesión entre todas las partículas del suelo compactado, mientras se ve sometido al fenómeno de contracción durante el secado posterior a la construcción del bloque de tapia pisada. Los estudios de igual forma se refieren a que el tamaño máximo de las partículas de suelo debe ser de 2 mm como tamaño mínimo para la construcción con esta técnica y el tamaño máximo del agregado debe ser de 20-25 mm (Emin Arslan, Emiroglu, & Yalama, 2017). En España las normas

MOPT Y IETcc describen diferentes porcentajes de material de suelo para tres tipos de construcción, en tapia pisada porcentajes de arcilla más limo entre 30 y 60%, en tapia pisada reforzada porcentajes de grava fina entre 10 y 20 %, arena entre 10 y 40 %, limos entre 20 y 40 % arcilla entre 10 y 40 % y que la suma de arcilla más limo no excedan el 45% del porcentaje de la muestra y en tapia pisada con porcentajes de arena menor a 33% y la suma de arcilla y limo menor a 30% (Delgado & Guerrero, 2006), también menciona tamaños de los diferentes estratos de partículas, para arcillas el diámetro de las partículas debe ser menor que 0,002 mm; para limos su diámetros deben ser mayor que 0,002 mm pero menor que 0,5 mm; para arenas sus diámetros deben estar entre 0,5 y 5 mm en cuanto a la grava fina debe encontrarse en los rangos de 5 a 20 mm. Mientras que el código de prácticas de Zimbabue ZAZS 724 propone porcentajes que van de 50% a 70% de grava fina y arena, de 15% a 30% de limo y de 5 a 15% de arcilla; esto con una rotura 80 mm y 120 mm por el método del “rollo” (Zimbabwe, 2001). Mientras que una revisión patentada por varios grupos y organizaciones reúne información de varios libros y archivos sobre los valores mínimos y máximos en el porcentaje de las partículas de suelo que se resume en las imágenes 6 y 7 (Maniatidis, Walker, & Otros, 2003). Hay pocas normas que dan especificaciones sobre los límites líquidos, plásticos e índices de plasticidad, en cuanto a la norma MOPT recomienda un límite líquido menor 40%, un límite plástico menor a 25% pero mayor a 10% y un Índice de plasticidad entre 6 y 22%, la revista preparada por Vasiliou recomiendan valores del límite líquido aconsejablemente entre 25% - 50% (Preferiblemente 30% - 35%) y un límite plástico entre 10% - 25% (Preferiblemente 12% - 22%).

La norma australiana tiene algunas observaciones sobre la determinación de los suelos en la construcción de tierra pisada, por ejemplo, la plasticidad ideal para la estabilización de suelos con cemento debe estar entre 2% y 30%, teniendo en cuenta proporciones del cemento deben estar entre el 4% y el 15%.

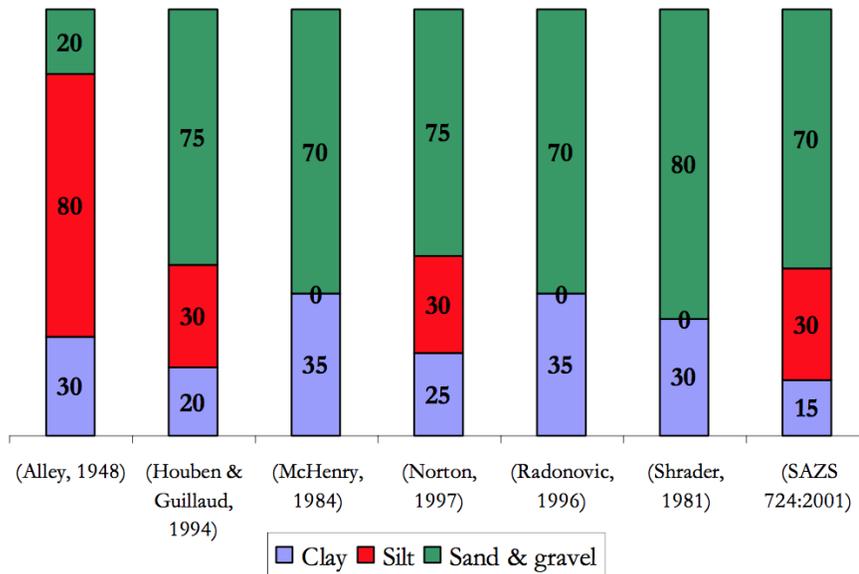
Un estudio publicado en la revista Applied Clay Science concluye que se produce mayor plasticidad en la tierra a utilizar, al usar un porcentaje de arcillas similar al considerado ideal para construir tapia pisada y un agregado de un tamaño máximo de 4 mm, es decir arenas. De igual forma concluyeron que al usar una dosificación 1:1 de arcilla y arena se evitan fisuras por contracción. (Emiroğlu, Yalama, & Erdoğan, 2015).



Limites de rangos inferiores para la distribución de tamaño de partículas para la tierra pisada

Imagen 6. Límites de rangos inferiores distribución de tamaño partículas tapia

(Maniatidis, Walker, & Otros, 2003)



Limites de rangos maximos para la distribución de tamaño de partículas para la tierra pisada

Imagen 7. Límites de rangos máximos distribución de tamaño partículas tapia (Maniatidis, Walker, & Otros, 2003)

Cada uno de estos factores que influyen en la selección del suelo permiten obtener una resistencia de la tapia pisada en la cual también están involucrados parámetros como la granulometría del suelo, el contenido de humedad, la compactación y las estabilizaciones que se le hayan realizado al suelo, para valores de densidad aparente entre un rango de 1700 y 2400 kg/m<sup>3</sup> se obtienen, según los registros de investigación, resistencias a la compresión entre 1,5 a 4Mpa (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014). Con el paso de los años se han invertido recursos a nivel mundial para la investigación de la implementación y mejoría de los diferentes materiales de construcción como lo muestra el estudio hecho en Madrid agregando a un tipo de suelo diferentes tipos de aditivos como Sikacem, linaza, Sika, yeso, azufre y cal, cenizas aceite de oliva entre otros, realizando diferentes tipos de ensayos como humedad, hielo-deshielo, compresión simple, goteo y ensayos de campos

que se realizaron a muros de 1m por 1 m; Donde se obtuvieron diferentes resistencias a la compresión como se muestra en la imagen 8 (Ramos & Pascual, 1997).

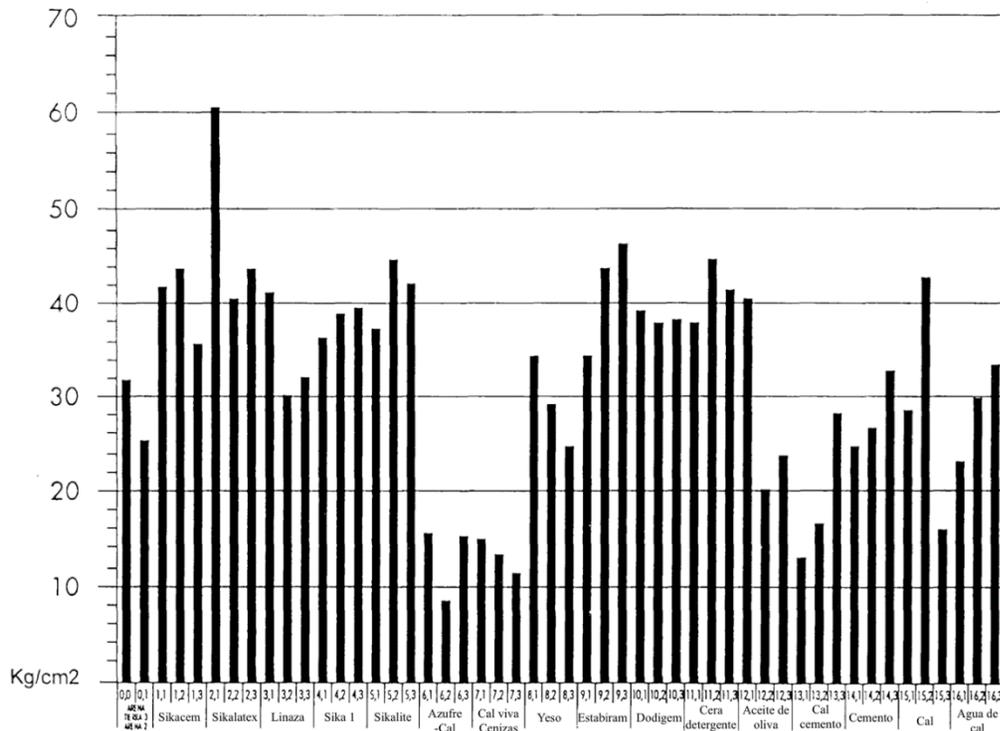


Imagen 8. Estadística utilización de aditivos en kg/cm<sup>2</sup> (Ramos & Pascual, 1997)

La tapia pisada ha tenido en la actualidad un significativo auge alrededor del mundo, principalmente por motivos culturales, artísticos y estéticos. Es por esto por lo que se han realizado estudios para comprender el comportamiento de este tipo de edificaciones y buscar alternativas para mejorar su vida útil. Por tal motivo a través del mundo existen diferentes normas de sismo resistencia, códigos y manuales para la construcción de viviendas en tapia pisada con el fin de garantizar un buen comportamiento ante este tipo de eventos que pueden ocurrir en cualquier parte del mundo, en la revista “The earth building normative documents in the world” los investigadores J. Cid, F.R.Mazarron, I.

Cañas hicieron un análisis y recopilación de las diferentes normas existentes en el mundo sobre construcción de viviendas en tapia pisada sismo-resistentes con el fin de dar a conocer cuáles de las normas estaban más completas y buscaban dar una mejor solución a los diferentes fallos y problemas que pudiesen presentar las estructuras en tierra de las cuales se demostró que actualmente estas normas tienen un enfoque y han ayudado a mejorar esta técnica de construcción ecológica

Tabla 1. Normas de construcción en tapia sismo resistente existentes (J Cid, 2011)

País	Norma/Reglamento	ORG	REF	EST	Adobe	BTC	Tapial	Notas				
Brasil	NBR 8491, 1986.	ABNT	7	X				BTC estabilizado con cemento especifica, métodos de ensayo.				
	NBR 8492, 1986.		8									
	NBR 10832, 1989		9									
	NBR 10833, 1989		10					X				Procedimiento fabricación BTC con prensa manual/hidráulica
	NBR 10834, 1994.		11									
	NBR 10835, 1994		12									
	NBR 10836, 1994		13									Especificaciones y métodos de ensayo de bloques de suelo- cemento
	NBR 12023, 1992		14									
	NBR 12024, 1992		15									
	NBR 12025, 1990		16									
	NBR 13554, 1996		17									
	NBR 13555,1996		18									
	NBR 13553, 1996		19									
							Métodos de ensayo para suelo-cemento					
						X	Tapia con cemento					
Colombia	NTC 5324,2004	ICONTEC	20	X		X		Estabilizado con cemento				
EEUU	NMAC, 14.7.4, 2004	CID	21		X	X	X	Reglam. Estatal de Nuevo México.				
	ASTM E2392 M-10	ASTM	22		X		X					
España	UNE 41410:2008	AENOR	23			X		Primera norma Europea				
Francia	XP P13-901,2001	AFNOR	24			X		Norma experimental				
India	IS 2110 : 1980	BIS	25	X			X	Paredes de suelo-cemento				
	IS 1725 : 1982.	BIS	26	X			X					
	IS 13827 : 1993	BIS	27		X		X	Directrices resistencia a terremotos				
Italia	Ley nº 378, 2004		28			X	X	Leyes para la conservación del patrimonio de tierra				
	L.R. 2/06 2 2006		29			X	X					
Kenya	KS 02-1070: 1999.	KEBS	30	X			X					
Nigeria	NIS 369:1997.	SON	31	X			X					
Nueva Zelanda	NZS 4297, 1998.	SNZ	32		X	X	X					
	NZS 4298, 1998.		33									
	NZS 4299, 1999.		34									

Tabla 2. Normas de construcción en tapia sismo resistente existentes (Cont.) (J Cid, 2011)

Perú	NTE E 0.80, 2000	SENCICO	35		x		
	NTP 331.201, 1979	INDECOP I	36				
	NTP 331.202, 1979.		37	x	x		
	NTP 331.203, 1979.		38				
Regional África	ARS 670, 1996	ARSO	39			x	
	ARS 671, 1996		40				
	ARS 672, 1996		41				
	ARS 673, 1996		42				
	ARS 674, 1996		43				
	ARS 675, 1996		44				
	ARS 676, 1996		45				
	ARS 677, 1996		46				
	ARS 678, 1996		47				
	ARS 679, 1996		48				
	ARS 680, 1996		49				
	ARS 681, 1996		50				
	ARS 682, 1996		51				
	ARS 683, 1996		52				
Sri Lanka	SLS 1382-1:2009	SLSI	53	x		x	Bloques de suelo comprimido
	SLS 1382-2:2009		54				estabilizados
	SLS 1382-3:2009		55				
Túnez	NT 21.33:1996	INNORPI	56			x	En francés
	NT 21.35:1996		57				En francés
Turquía	TS 537, 1985.		58	x			En turco
	TS 2514, 1985.	TSE	59		x		
	TS 2515, 1985.		60				
Zimbabue	SAZS 724, 2001.	SAZ	61			x	

Abreviaturas: ORG (Organismo); REF (Referencia, ver en bibliografía el número); EST (Estabilización, si solo contempla el uso de tierra estabilizada)

Adicional a estas normas existen normas sismo resistente para viviendas en tapia pisada. Existen normas en países como, Francia, Alemania, Australia y Turquía, Túnez las cuales brindan mayor información acerca de los diferentes procesos que se llevan a cabo en esta

técnica constructiva permitiendo obtener un gran número de referencias y normas con el fin de realizar una aplicabilidad en el departamento de Santander con el fin de generar beneficios y mayor tecnificación de este sistema constructivo para poder brindar que se logre la preservación y se corrijan los diferentes errores que se han realizado a través de su recorrido en el tiempo.

Para dar continuidad con la descripción de la normativa mundial se procederá a dar los puntos más relevantes de cada una de las normas con el fin de realizar un análisis de aplicabilidad en Santander y generar un comparativo que permita analizar los puntos comunes entre cada una de las normas y libros de construcción en tierra, para poder llevar un proceso exitoso y buscar corregir los posibles fallos en la construcción en tierra en el departamento de Santander.

Las primeras normas sismo resistentes empiezan hacerse visible en los años 80 en ciudades de África y Europa, siendo estos continentes los que dieron los primeros pasos para brindar mayor seguridad y confort en este tipo de estructuras. La primera de las normas sismo resistente a analizar es la NMAC 14.7.4 esta norma es aplicada en el estado de nuevo México en estados unidos el cual tiene una temperatura promedio anual de 24°C y una altitud de 691m.s.n.m (climate.org, 2016) asemejándose a la temperatura promedio del departamento de Santander, esta norma no permite la construcción de edificios mayores a dos niveles(pisos) e indica que el diseño y ejecución será implementado por un ingeniero registrado en el estado, también nos indica que para la construcción de muros o paredes los espesores deben ser como mínimo de 46 cm para paredes externas y 5 cm para paredes

internas, dejando una excepción de aquellas paredes de masa solar, no podrán tener una distancia libre mayor a 7,3 m, para esto deben construirse contrafuertes y arrostramientos, deben contener una primera elevación por encima del piso de no menos 9cm, estabilizada o hecha en concreto de por lo menos 2500psi con anclajes de pared a pared por medio de chavetas y dando especificaciones a las uniones con diferentes materiales. En las cimentaciones que es uno de los puntos más críticos en donde fallan las estructuras en Santander esta norma propone y buscar legislar la ejecución cimentaciones de concreto no inferior a 2500psi, con anchos iguales o mayores que el de la pared y espesores no menores a 25 cm, utilizando un refuerzo mínimo de 3 varillas #4 ( $d=1,27\text{cm}$ ) con recubrimiento de 2,54 cm. Además de eso sugiere construir una chavetera de 5cm de altura con un ancho de 15 cm cuando no se vaya a utilizar refuerzo # 4 incrustado sobre la pared 5 cm y espaciado a 1,20 m cada vez que se intercepte un muro o pared a la cimentación, por otra parte se deben crear vigas de unión en todas la paredes exteriores que permitan transferir las cargas de un muro a otro de la manera correcta y en casos en donde la estructura se vea sometida a sismos u otro fenómeno natural. (NMAC14.7.4, 2016); Esta norma se dirige a la construcción con suelo estabilizado o no, e indica que para ser estabilizado deberá contener más del 6% de cemento portland por peso, esto genera paredes mucho más altas y delgadas, por lo que la norma indica la esbeltez máxima para los muros en tierra pisada mostrados en la siguiente tabla 3.

Tabla 3. Espesor paredes y altura máxima según (NMAC14.7.4,

Máximo de Sds	Espesor de pared	Altura máxima	Máximo de Sds	Espesor de pared	Altura máxima
.25		12	.40	10	120
	12	128		12	128
	14	144		14	144
	16	144		16	144
	18	144		18	144
	24	144		24	144
.30	10	120	.45	10	104
	12	128		12	128
	14	144		14	144
	16	144		16	144
	18	144		18	144
.35	24	144	.50	24	144
	10	120		10	96
	12	128		12	112
	14	144		14	136
	16	144		16	144
	18	144		18	144

Por otra parte la norma sismo resistente de Zimbabue nos permite conocer los porcentajes mencionados anteriormente de cada tipo de suelo que debe tener el material utilizado para construir muros en tierra apisonada, cada uno de estos tipos de suelo deben ser evaluados por el método de “rollo” y ruptura (Zimbabue, 2001) , adicionalmente esta norma nos indica la esbeltez, teniendo en cuenta que el espesor mínimo de los muros debe ser de 300 mm.

Tabla 4. Esbeltez para muros de tierra armada en la norma sismo resistente de Zimbabue SAZS 724, (Zimbabue, 2001)

Longitud máxima (m)	Restricción	Estabilizado	Relación (Ancho: alto)
9	No restringida	No estabilizado	1: 8
9	No restringida	Estabilizado con cemento	1: 10
9	Restringida	No estabilizado	1: 12
9	Restringida	Estabilizado con cemento	1: 16

Nota: Una pared restringida es aquella que está al menos unida por rodadura de recorridos alternos a una pared de retorno y / o un muelle de no menos de 450 mm de longitud, en ambos extremos;

Permitiendo la utilización de estabilizantes como cemento portland, cal hidratada o no, ceniza combustible pulverizada, estipula una resistencia a la compresión mínima a los 7 días de 1,5 Mpa a paredes con alturas menores a 3 metros y para alturas entre 3 y 6 metros una resistencia mínima a la compresión de 2,0 Mpa, pudiendo levantar altas paredes escalonadas que no interrumpen la esbeltez ya mencionada, estas paredes deben estar con un 95% de la densidad seca máxima obtenida en los ensayos previamente realizados. El encofrado ha sido otro de los factores que ayudado a que ocurren diferentes tipos de fallos debido a que como los encofrados se realizan de manera artesanal permiten que se generen juntas horizontales y verticales, por tal motivo la norma de Zimbabue nos sugiere que el encofrado no supere deformaciones de 3mm cuando se le aplique una carga de 150kg mediante el tramo de los tirantes o los soportes. Esto con el fin de que se puedan cumplir con las juntas verticales en secciones de pared adyacentes que bloqueen y no permitan movimientos laterales sobre el plano de falla por mínimo unos 25mm cada cierta distancia. (Zimbabue, 2001) Los muros antisísmicos de tapia pisada se proponen hacerlos

en forma de L, T, U, X, Y O Z ( como se muestra en la imagen 9) (Gernot, 2001) que solo por su forma proveen resistencia al volcamiento y al colapso construyendo en sus esquinas chaflanes manteniendo la proporción del espesor que no debe ser menor a  $1/3$  de la altura para lograr transmitir las fuerzas diagonales a los cimientos. Y cuando se realizan con alturas superiores es recomendable hacer columnas con reforzamiento de hormigón y tapia. (minke, 2003) Estas especificaciones más importantes de cada una de las normas sísmicas permiten realizar un análisis comparativo con la forma en que se realiza la construcción en tapia pisada en Santander para así mismo poder aplicarlas en zona del departamento de Santander, para realizar la aplicabilidad se deben realizar diferentes ensayos de laboratorio para determinar las características mecánicas de los suelos existentes y mirar que resistencias presenta.

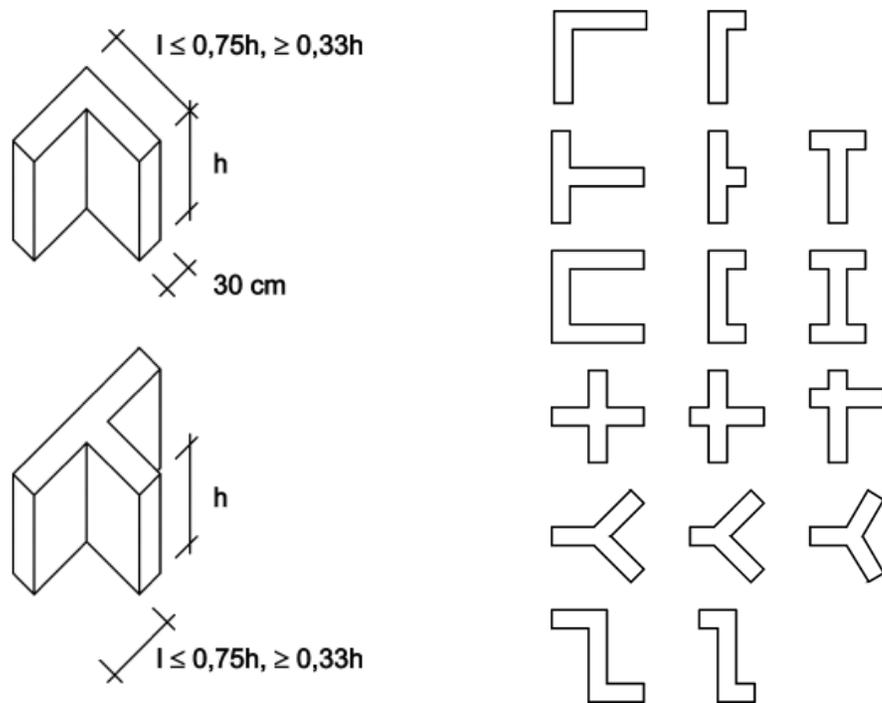


Imagen 9. Formas de muros tapia pisada antisísmicos (Gernot, 2001)

En Nueva Zelanda, por otra parte, nos brinda tres normas compactas, la primera está basada en su historial sísmico, el cual solo puede ser ejecutada por medio de ensayos muy estrictos y un ingeniero inscrito en el territorio de nueva Zelanda, otra generando valores para los tipos de suelo y sus ensayos mínimos de laboratorio y una tercera que contempla la construcción en tapia pisada para un nivel más común. La norma NZS 4299 describe el diseño de estructuras en tierra pisada a nivel más profesional, con factores sísmicos, esfuerzos de diseño basados en el estudio de cargas y la resistencia nominal basada en los ensayos procedentes al material, esta norma es basada en el diseño de las normas en concreto reforzado, propone relaciones de esbeltez para cada uno de los elementos teniendo en cuenta los vales del factor sísmico representados, teniendo en cuenta que el espesor mínimo (Subcomité de Nueva Zelandia, NZS 4298 (Materials And Workmanship For Earth Buildings) - 1998, 1998) (Subcomité de Nueva Zelandia, NZS 4299 (Earth Buildings Not Requiring Specific Design) - 1998, 1998) (Hidalgo, 2011) (GmbH) (Lehm, 2009) de una pared será de 250 mm (Subcomité de Nueva Zelandia, BD/83/2, 1998).

Tabla 5. Factores de seguridad y resistencia de muros según norma de Nueva Zelanda (Subcomité de Nueva Zelandia, BD/83/2, 1998)

Factor de zona del terremoto:	$Z \leq 0.6$	$Z > 0.6$
(a) muro sin carga reforzada	10	6
(b) Muro de carga reforzado	16	10
(c) Columnas no reforzadas	4	3
(d) Columnas reforzadas	8	6
(e) Muro no reforzado sin carga	12	8
(f) Muro reforzado sin carga	18	12
(g) Ladrillo cimba reforzado	24	16

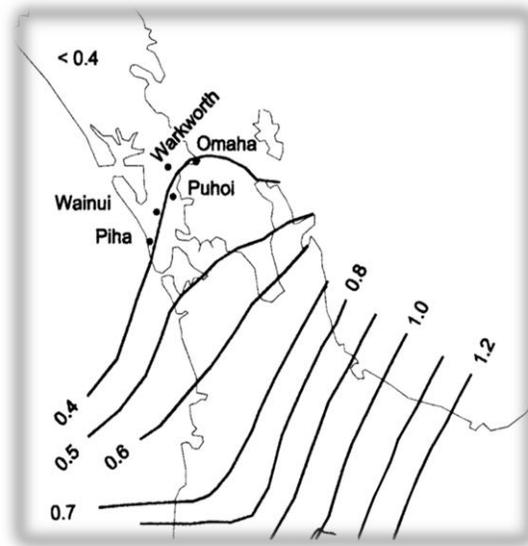


Imagen 10. factor seismic Nueva Zelanda (Subcomité de Nueva Zelandia, NZS 4299 (Earth Buildings Not Requiring Specific Design) - 1998, 1998)

Por otro lado a diferencia de las anteriores normas que permiten realizar edificios con más de un piso, esta norma restringe la ejecución de viviendas con más de 1 nivel, a menos que cuando el factor de zona sísmica sea mayor a 0,6 la norma limita el área de la planta baja no excediendo  $600 \text{ m}^2$  para edificios de una sola planta, ni  $200 \text{ m}^2$  para edificios de dos pisos, ni  $300 \text{ m}^2$  para edificios de dos pisos donde el piso superior está construido de madera y las paredes del piso inferior son de tierra (Subcomité de Nueva Zelandia, BD/83/2, 1998). A diferencia de otras normas, esta permite mediante el estudio detallado, la ejecución de cimentaciones de concreto reforzado o de mampostería de ladrillos o de piedra reforzado con concreto, las tres opciones con anchos mínimos al espesor de la pared.

En España estas formalizadas dos normas relacionadas con la construcción en tapia pisada o tapial, implementando cuatro diferentes, la tierra apisonada, reforzada, estabilizada o calicostrada. Estas normas son la IETcc y la MOPT que conforme fue mencionado, la norma IETcc da para cada tipo de construcción su límite mínimo de espesor y de resistencias a la compresión; los espesores mínimos para muros estabilizados son de 30 cm, para los reforzados de 50 cm y para los más comunes de 70 cm (Delgado & Guerrero, 2005). Por otra parte la norma MOPT propone diferentes factores para tres tipos diferentes de construcción en cuanto a su importancia de ejecución, ya que para los proyectos más importante es recomendable obtener resistencias características del laboratorio, para proyectos de bajo riesgo propone las tensiones mencionadas, Mientras que para la mayoría de los casos se dan factores que serán multiplicados a unas resistencias descritas a compresión, flexión y cortante, estas resistencias son mostradas, junto con sus factores de mayoración.

Tabla 6. Tensiones de trabajo permisibles para paredes de tierra no estabilizadas y sin hornear (N/mm<sup>2</sup>)

Tensiones de trabajo permisibles para paredes de tierra no estabilizadas y sin hornear (N/mm <sup>2</sup> )			
	Compresión	Tensión	Cortante
Paredes interiores sin contacto con ambiente húmedo	0,2	0,02	0,03
Paredes exteriores o en contacto con ambientes húmedos	0,1	0,01	0,01

Tabla 7. Esfuerzo de trabajo para casos comunes siguiendo el MOPT

Esfuerzo de trabajo para casos comunes siguiendo el MOPT			
	Esfuerzo admisible de trabajo (N/mm <sup>2</sup> )		
	Tipo de esfuerzo	Pared seca e interior	Pared mojada o exterior
Tierra apisonada Esbeltez=6	Compresión	0,2	0,1
	Tensión	0,02	0,010
	Cortante	0,025	0,012

Tabla 8. Factores de seguridad para obtener fuerza de diseño

Factores de seguridad para obtener fuerza de diseño		
	Paredes exteriores o en contacto con ambiente húmedo	Paredes interiores sin contacto con ambiente húmedo
Control de ejecución de laboratorio considerable	6	3
Resto de casos	8	4

La norma MOPT también menciona aporta valores característicos del suelo recomendables para la selección del suelo en la construcción de tierra pisada, estos valores son valores probables que aumentan el confort y las propiedades mecánicas de los elementos, no necesariamente el suelo debe contenerlos todo. Entre ellos están valores como un coeficiente de dilatación térmica de 0,0012 mm/mm K, un índice de permeabilidad de 1/1,000,000 cm/s, un aislamiento de 58 dB, entre otros.

Todas las normas están basadas en un análisis semejante, realizando briquetas que son falladas posteriormente a compresión en ambientes no confinados, así, la norma australiana menciona un límite para la resistencia a compresión con un valor entre 0,40 N/mm<sup>2</sup> y 0,60 N/mm<sup>2</sup>. También se pueden encontrar restricciones entre los valores mínimos para espesores de las paredes, estos son, 125 mm para paredes internas y 200 para paredes externas, de igual manera recomienda que la altura de una pared independiente no exceda de 10t. Para una pared lateralmente contenida arriba y abajo su altura no debe exceder 18t. En ambos casos la longitud libre no soportada de la pared no debe exceder 30t.

### 3. METODOLOGÍA

El desarrollo de esta investigación se llevó a cabo por medio de la definición de cuatro (4) etapas principales que tenían como objetivo encauzar el proyecto investigativo hacia la utilización del método científico y otros modelos de investigación, en aras de propender un medio óptimo. En primera medida permitiría realizar una recolección de información bibliográfica en busca de conocer el estado, cantidad y calidad de información con la que se contaba a nivel mundial sobre la construcción sismo resistente de viviendas en tierra o tapia pisada. Posteriormente se realiza un análisis con en base de la sismicidad y su ubicación en el cinturón de fuego del pacífico de cada uno de los países con los que se contaba con algún tipo de documentación o norma, y así verificar que presentaban comportamientos similares a los obtenidos en el departamento de Santander. Seguidamente de la extracción de material para poder ejecutar ensayos de compresión y tracción indirecta que eran mencionados en la gran mayoría de las fuentes encontradas en la primera etapa. Y por último se siguió con la metodología hasta construir cilindros y muretes de tierra con la idea de conocer el comportamiento del suelo seleccionado y sus características mecánicas.

### 3.1 Revisión bibliográfica

Este proyecto de investigación tuvo como objetivo la utilización del método científico que consiste en la aplicación de un proceso que tiene como finalidad el establecimiento de relaciones entre hechos, para enunciar leyes que están fundamentadas desde la razón, produciendo ideas y conceptos que permiten verificar y explicar el porqué (conceptos, 2017) de las propuestas planteados como solución a la problemática sismo resistente para la construcción en tapia pisada en la zona andina del departamento de Santander, se realizó la delimitación del problema el cual radica en que la zona andina colombiana cuenta con técnicas de construcción en tapia pisada las cuales se realizaron de manera empírica y sin tener en cuenta los fenómenos naturales como lo son los eventos sísmicos, los cuales son uno de los mayores causantes de deformaciones y colapso de viviendas con este sistema constructivo, generando hoy por hoy un problema debido a que se hace necesario preservar pueblos y ciudades que son patrimonio histórico de la humanidad e igualmente poder brindar un sistema constructivo que permita realizar construcción de viviendas a menor costo amigables con el medio ambiente debido a que en este tiempo cada vez más observamos como el planeta está sufriendo cambios drásticos como el calentamiento global contribuyendo a que la calidad de vida de las personas y su seguridad esté en riesgo.

Esta etapa consistió en la búsqueda de información relacionada a la construcción en tierra pisada, preferencialmente la normatividad vigente en los diferentes países, como primera medida acudimos a la búsqueda en las bases de datos de la Universidad Pontificia Bolivariana teniendo en cuenta palabras claves como tapia pisada, normatividad, construcción, especificaciones, en los que se hallaron y analizaron diferentes artículos en

los que se procedía a realizar una lectura de su título ,resumen y conclusiones para así obtener una mejor agilidad para recopilación de fuentes concernientes con nuestro objetivo, así también se realizó este proceso mencionado anteriormente con libros, artículos, normas de los diferentes sitios web y enciclopedias que nos llevaron a la identificación de las diferentes normas, como su nombre y su fecha de implementación como se puede observar en las tablas 1 y 2 en las cuales se resaltan las normas que presentan un acceso libre a la comunidad educativa. Recolectando los nombres se dirigió a la lectura de cada normativa seleccionada como se argumenta en el texto anterior, organizándola por temáticas y grupos de propiedades mecánicas (resistencia mínima a la compresión, tensión y cortante), ensayos (granulometría, compresión no confinada, goteo, tensión indirecta, aspersión) y especificaciones como aberturas, instalaciones eléctricas e hidráulicas, para las que se realizaron tablas y diapositivas para el mejor manejo de la información y material didáctico de apoyo a los futuros trabajos que se desarrollen dentro de la comunidad académica (estos elementos se encuentran adjuntos dentro de los anexos de este documento .

Para dar continuidad a este proceso, se evidenció que se encontraron aproximadamente 50 fuentes bibliográficas de todo tipo (libros, artículos, ensayos, normas, tesis entre otros) de los que se extrajo la mayor parte de la información en cuanto a las experiencias y características de los suelos, sismicidad y alineamientos básicos de estos países, que son claves en el proceso de lineamientos básicos para el departamento de Santander.

### **3.2 Filtración de información compatible con suelos santandereanos.**

La identificación de la sismicidad en los diferentes países donde se cuenta con normas para la construcción de viviendas en tapia pisada o tierra es uno de los factores a analizar más importantes a la hora de seleccionar las normas más idóneas para la zona andina del departamento de Santander debido a que es una de las zonas más activas sísmicamente del país.

De esta manera se procedió a realizar la búsqueda en la página conocida como [meteosolana.net](http://meteosolana.net) la cual se encarga de realizar el registro de los diferentes movimiento telúricos en las diferentes partes del mundo, en nuestro análisis tuvimos en cuenta los movimientos sísmicos que se han presentado últimamente en los países como España, Australia, Nueva Zelanda, Estados Unidos, Perú, Zimbabue, Alemania y Colombia para poder realizar un comparativo y poder tener como guía la norma que más se acerque al comportamiento sísmico de Colombia.

Tabla 9. Comportamiento sismicidad últimos 30 sismos en Colombia (meteosolana, 2018)

COLOMBIA			
#	LUGAR	MAGNITUD	PROFUNDIDAD (Km)
1	Zapatoca	2,9	147
2	Iquira	3,2	4
3	Zapatoca	3,4	142
4	Uramita	4,3	120
5	Buenaventura	3	69
6	Argelia	2,2	40
7	Zapatoca	2,9	141
8	Floridablanca	3,5	165
9	Cantagallo	2,4	17
10	Argelia	2,6	99
11	Zapatoca	2,9	141
12	Lenguazaque	3,4	152
13	San Vicente de Chucuri	3,6	122
14	Zapatoca	2,6	143
15	Majagual	2,5	2
16	Samaca	2,8	170
17	Zapatoca	3,8	143
18	Zapatoca	4	146
19	Zapatoca	3,4	143
20	Villarica	3,2	16
21	El Paso	2,5	85
22	Alcala	2,3	145
23	Ituango	3,6	22
24	Zapatoca	2,8	142
25	Cubaral	4,1	70
26	Mesa de los Santos	3,9	143
27	San Vicente de Chucuri	2,8	160
28	Floridablanca	3,6	120
29	Zapatoca	2,7	140
30	Zapatoca	3,9	143

Tabla 10. Comportamiento sismicidad últimos 30 sismos en Perú (meteosolana, 2018)

PERU			
#	LUGAR	MAGNITUD	PROFUNDIDAD (Km)
1	Quebrada Honda	4,2	30
2	Papayal	3,6	10
3	Zorritos	4,8	30
4	Sacsamarca	5	66
5	La Breita	3,5	10
6	Sinchao	4,6	10
7	Palca	4,9	110
8	Aucayacu	4,8	40
9	Celica	3,9	19
10	Minas Marco	4,4	66
11	Masisea	4,3	30
12	Cañaverall	4,6	167
13	Nuevo Progreso	4	128
14	Kelluyo	3,6	167
15	Huaraz	3,6	23
16	Sechura	3,9	33
17	Ocucaje	4,5	10
18	Chipao	3,2	24
19	Trompeteros	3,5	124
20	San Clemente	4	34
21	Puerto Galilea	4,4	90
22	Masisea	4,2	137
23	Sangallaya	4,4	90
24	Santa Rosa	3,8	53
25	Pucusana	3,7	37
26	Paratia	4,2	219
27	Puerto Bolivar	3,6	191
28	Matucana	3,5	130
29	Chivay	3,6	105
30	Breita	3	80

Tabla 11. Comportamiento sismicidad últimos 30 sismos en Estados Unidos (meteosolana, 2018)

ESTADOS UNIDOS			
#	LUGAR	MAGNITUD	PROFUNDIDAD (Km)
1	Volcano	2,1	20
2	Talkeetna	1,6	114
3	E de Cape	1,5	7
4	Larsen	2,4	60
5	Cape Yakatague	1,7	2
6	N de Kodiak	2,4	42
7	ENE de Aguanga	0,6	4
8	NNE Borrego	1,1	10
9	Fallbrook	0,5	31
10	Tres Pinos	2,1	8
11	Idyllwild	0,8	15
12	Anza	0,4	2
13	Lake Elsinore	0,9	8
14	Tres Pinos	1,5	5
15	Nikiski	3,1	86
16	North Nenana	1,5	9
17	Orinda	2,1	18
18	Morongo valley	0,7	13
19	ENE de Beatty	1	8
20	Tres Pinos	1,6	32
21	Tres Pinos	2,6	5
22	ENE de Cantwell	2	12
23	North Nenana	1	14
24	S de Esther	1,2	17
25	ESE de Lincoln	3,4	10
26	Madisonville	1,9	13
27	Niland	1,2	5
28	Murrieta	1,3	11
29	SW de Anza	1	2
30	W de Willow	1,8	84

Tabla 12. Comportamiento sismicidad últimos 30 sismos en Alemania (meteosolana,  
2018)

ALEMANIA			
#	LUGAR	MAGNITUD	PROFUNDIDAD (Km)
1	Weil am Rhein	1,5	3
2	Waldighofen	1,7	18
3	Erstein	2,3	2
4	Mebstetten	2,2	4
5	Langwedel	2,5	4
6	Norvenich	1,9	16
7	Blodelsheim	1,6	23
8	Hinterzarten	1,7	1
9	Hurth	2	10
10	Gutttau	2,9	20
11	Schallstadt	2,2	20
12	Maulburg	1,5	15
13	Braunlingen	1,8	10
14	Heidenheim	2,2	3
15	Hain Grundau	2,5	3
16	Schonenbuch	1,8	17
17	Auggen	1,7	16
18	Hecken	2,5	10
19	Ober Ramstadt	2,7	3
20	Gorwihl	1,5	3
21	Ostrach	2,1	20
22	Pliening	2,4	2
23	Heidenheim	2,3	12
24	Hinterzarten	2	16
25	Blodelsheim	1,8	3
26	Koblenz	1,5	20
27	Alemania	2	12
28	Alemania	2,8	10
29	Alemania	1,5	7
30	Alemania	1,7	12

Tabla 13. Comportamiento sismicidad últimos 30 sismos en España (meteosolana, 2018)

ESPAÑA			
#	LUGAR	MAGNITUD	PROFUNDIDAD (Km)
1	Figueres.gi	1,5	9
2	Seixal	2,2	10
3	Alboran	2	33
4	Pombal	2,5	11
5	Rio Maior	2,5	10
6	Arudy	1,9	29
7	Atlantico Canarias	1,8	24
8	Arudy	1,7	30
9	Arudy	1,9	12
10	W.Anaiao	2,6	15
11	Tavira	2,1	29
12	Zorita del Mestrazghe	1,8	11
13	Golfo Cadiz	1,8	11
14	Alboran	2,3	18
15	Evora	1,9	12
16	Almeria	2,1	11
17	Torremolinos	3,1	79
18	Alboran	2,4	23
19	Torre vieja	1,5	5
20	Cabo San Vicente	2,8	29
21	Torremolinos	3	79
22	Agron	2	10
23	Vilanova de Arousa	1,9	12
24	Viator	1,5	32
25	Alboran	2,5	22
26	Cabra del Santo Cristo	2	11
27	Frontera	1,5	22
28	Evora	1,9	12
29	Atlantico Canarias	1,9	33
30	Alboran	2,3	25

Tabla 14. Comportamiento sismicidad últimos 30 sismos en Australia (meteosolana, 2018)

AUSTRALIA			
#	LUGAR	MAGNITUD	PROFUNDIDAD (Km)
1	Broome	3,4	10
2	Alice Springs	2,6	28
3	Red Hill	2	2
4	Bridport	2,1	8
5	Kojonup	2,1	2
6	Cunderdin	2	10
7	Lakes Entrance	2,1	1
8	Swam Hill	2,6	2
9	Cooma	2,1	15
10	Bombala	2,3	10
11	Katanning	2,2	10
12	Port Hedland	3,1	10
13	Carnarvon	3,4	10
14	Tumby bay	2,5	2
15	Beverley	2	2
16	Narrogin	2,8	9
17	Peterborough	2,3	10
18	Parkes	2	10
19	Cooranbong	2,6	17
20	Kingscote	2,2	2
21	Kendenup	2,5	12
22	Mount Beauty	2,3	10
23	Orange	2,5	2
24	Oakdale	2	10
25	Katanning	2,2	10
26	Wooroloo	2	2
27	Beverley	2,7	10
28	Stoneville	2,6	10
29	Mansfield	2,4	2
30	Beverley	2,3	2

Tabla 15. Comportamiento sismicidad últimos 30 sismos en Nueva Zelanda(meteosolana, 2018)

NUEVA ZELANDA			
#	LUGAR	MAGNITUD	PROFUNDIDAD (Km)
1	Wanaka	2,3	18
2	Foxton	2,4	49
3	Masterton	3	25
4	Masterton	3,2	26
5	Blenheim	2,2	18
6	Masterton	3,2	26
7	Blenheim	2,5	7
8	Hawera	3,2	176
9	Kaikoura	2,4	26
10	Kaikoura	2,7	17
11	Whakatane	2,8	82
12	Opotiki	2,7	93
13	Waiouru	2,7	15
14	Whitianga	3,1	51
15	Patea	2,4	89
16	Whitianga	2,8	82
17	Taupo	3	145
18	Blenheim	3	49
19	Kaikoura	2,4	12
20	Patea	2,5	74
21	Edgecumbe	2,6	136
22	Wakefield	2,4	88
23	Opotiki	2,3	24
24	Whakatane	2,3	8
25	Blenheim	3,5	21
26	Rotorua	2,1	15
27	Kaikoura	2,6	18
28	Wanganui	2,3	34
29	Maketu	3	172
30	Wanganui	2,3	34

De esta manera podemos observar que alrededor del mundo existen países en donde cuentan con normas de construcción en tierra que presentan una actividad sísmica significativa a menores profundidades que las que se presentan en el territorio colombiano, como se muestra en las tablas 10,12,14,15 en las que se puede realizar un comparativo con los presentado en nuestro país y se logra evidenciar esta observación.

De igual manera se puede observar que dentro del cinturón de fuego del pacífico se encuentran la gran mayoría de países los cuales fueron participes en la obtención de información relevante acerca de normas y especificaciones para la implementación de la técnica de tapia pisada, en este se encuentran países referentes como lo son Estados Unidos, Perú, Nueva Zelanda, Australia con sus normativas (NMAC 1474, NTE E.080, NZS 4297, 4298, 4299, HB195) respectivamente, esto se da debido a que el cinturón de fuego del pacífico cuenta con una superficie de aproximadamente 40.000km que rodea el océano pacífico desde Nueva Zelanda hasta la costa oeste de sudamericana, a través de las costas del este de Asia y Alaska y las del noreste de Norteamérica y Centroamérica conformando lugares con altísima actividad sísmica y volcánica del mundo como se observa en la imagen 11. Permittiéndonos tener un concepto más claro y eficiente que con lleva a desarrollar lineamientos básicos en busca de una aplicabilidad y aceptación en Colombia que conduzcan las diferentes investigaciones sobre este sistema constructivo a la creación de una norma sismo resistente para la construcción en tierra con los suficientes conceptos ingenieriles y científicos con base en la teoría y la práctica que se posee.

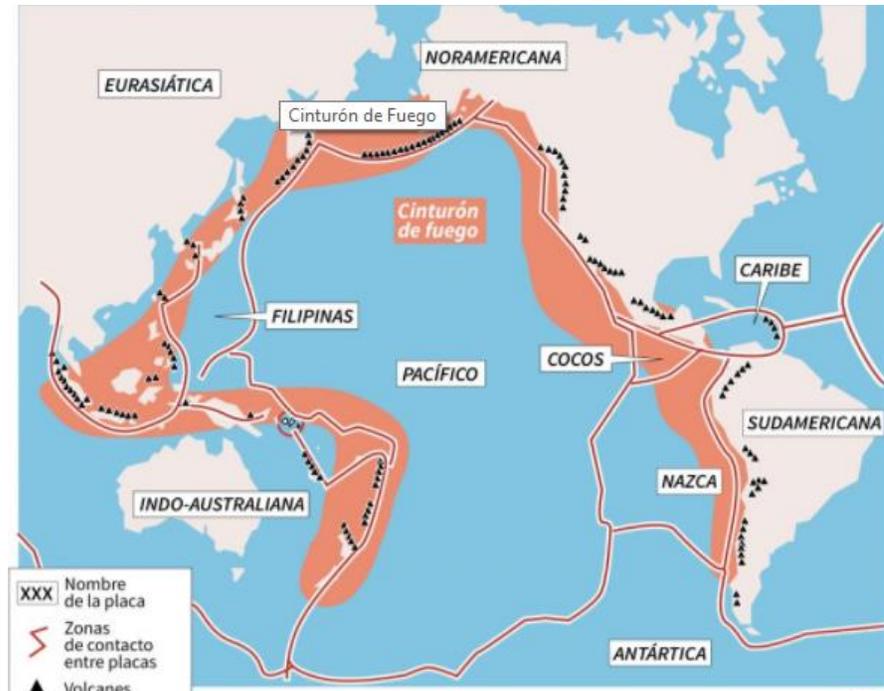


Imagen 11. Cinturón de fuego del pacifico (Daza, 2017)

### 3.3 Extracción y caracterización del suelo seleccionado.

En la extracción de material se utilizó la técnica para investigación y toma de muestras de suelo llamada apique, la cual inicia con la selección de un lugar que no haya sido alterado antropicamente para continuar con la utilización de herramienta menor (pica, azadón, pala, barra, etc.) para realizar la excavación y remoción del suelo superficial compuesto de materia orgánica principalmente como son raíces, humus, organismos vivos, para luego dar inicio al dimensionamiento del apique el cual consiste en la realización de una perforación de 1m x 1m de área x 1,80m de profundidad, en la ejecución de esta actividad se debe garantizar que la perforación se realice de manera nivelada y que se cuente con las suficientes medidas de seguridad para evitar accidentes o que se vaya a dificultar la continuidad hasta la profundidad deseada.

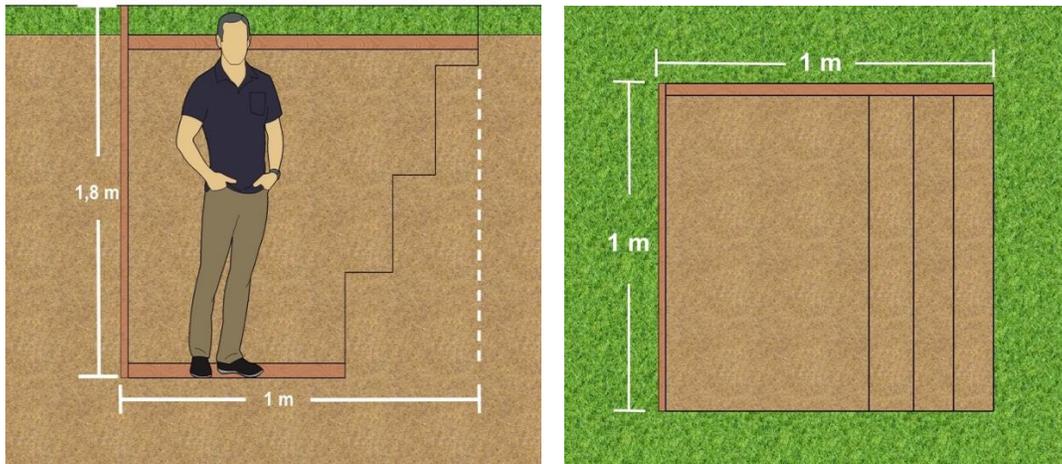


Imagen 12. Técnica de apique, excavación (Autores)

A medida que se avanza en la profundidad del apique se debe extraer el material sobrante con una pala para luego de este proceso realizar la toma de las suficientes muestras y cantidad necesaria con el fin de llevarlas al laboratorio para caracterizar, analizar y emitir un criterio científico e ingenieril sobre las muestras que se tienen y comportamiento del suelo en la zona de análisis.

Con la aplicación de esta práctica se pudo realizar una primera inspección directa del perfil del suelo mediante la excavación a una profundidad conocida e igualmente geométrica que permiten el examen visual de los estratos, condiciones del nivel freático, interface suelo, roca, discontinuidades y superficies de ruptura.

La muestra de material usado fue tomada en el kilómetro 7 entre Floridablanca-Piedecuesta con coordenadas  $7^{\circ}02'20,9''$  N;  $73^{\circ}04'16,4''$  W, Se escogió este sitio por las características físicas del suelo, el cual es un suelo areno-arcilloso adaptable a la ejecución del proyecto, también por la facilidad de permisos y requisitos para la extracción del

material ya que pertenece a territorio de la Universidad Pontificia Bolivariana. En el sitio donde se realizó la extracción de material se delimitó con un área de 6 m<sup>2</sup> con el fin de brindar la seguridad y advertencia para las personas que transitaban por esta zona en donde se realizaban los trabajos como lo recomienda la norma de construcción de excavaciones, las cuales se tuvieron en cuenta las realizadas por las entidades como EPM (EPM, 2017) y la guía de trabajo seguro en excavaciones del ministerio de trabajo (Trabajo, 2014) para la extracción de material se utilizó una barra de 1612 mm de altura, un ancho de 100 mm y un peso de 8,172 Kg, una pica de 500 mm x 220 mm x 220 mm x 100 mm y una pala de 527 mm x 226 mm, calibre 16 y cabo largo de madera de 1450 mm.



Fotografía 1. Excavación y toma de muestra por medio de técnica apique (Autores)

Con la intención de realizar llenado de sacos y llevar estas muestras al laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga y poder dar inicio al siguiente proceso el cual consistió en la preparación del material y muestras para obtener datos de clasificación de suelo, granulometría, Proctor estándar, humedad óptima entre otros ensayos técnicos que son necesarios para la debida compactación de un suelo. Pues

fue este mismo suelo el utilizado en la construcción de los cilindros y muretes de este material.

El transporte al laboratorio fue hecho en sacos de fibra por medio de un vehículo automotor, cada saco con un peso aproximado de 25 Kg.

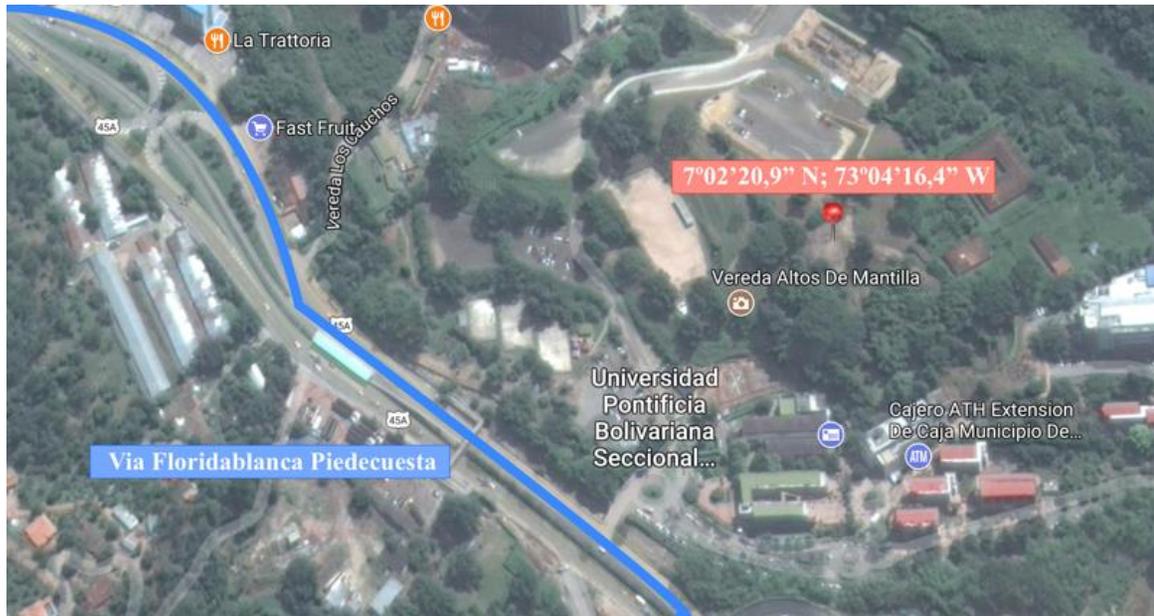


Imagen13. Google Mapas ubicación terreno muestra (MAPS, s.f.)

Uno de los primeros ensayos realizados fue el ensayo de granulometría para la identificación del tipo de muestra que se tenía y su clasificación, con la idea de determinar si era optima la muestra de acuerdo a las referencias bibliográficas encontradas, como se plantea en el documento construcción de muros en tapia y bahareque mostrado en la tabla 16 (SENA )en que hace referencia a los porcentajes de las cantidades optimas de cada mineral y compuesto de suelo que permitan obtener una adherencia ideal con las cantidades de agua necesarias en la construcción de tapia pisada.

Tabla 16. Componentes tierra para construcción en tapia pisada (SENA )

Componente mineral	Porcentaje (%)
Gravillas	0 al 15%
Arenas	40 al 50%
Limos	20 al 35%
Arcillas	15 al 25%

**Ensayo granulométrico:** Para realizar el ensayo de granulometría se refirió a la norma colombiana I.N.V.E – 123 – 13. Se seleccionó un saco al azar donde el material estuviera menos compacto para no tritararlo, se mezcló, se pasó por el tamiz de 3/8” con el fin de seleccionar lo suficiente y aportando una muestra que al cuartearla se obtuvieran sub-muestras con un peso por encima de los 500 g de tal manera que al lavar y secar el material diera un peso mayor o igual a los 500g, enseguida se pesó cada platón donde se dispuso cada muestra y luego se pesaron las muestras encima del platón, se procedió hacer el lavado de cada muestra hasta eliminar toda partícula capaz de pasar por el tamiz N.º 200, continuando con el secado durante 24 horas en el horno a una temperatura de 110º más o menos 5º, finalmente se pesaron las muestras salientes del horno y se pasaron por los tamices procedentes al tamiz de 3/8”. La figura presenta las granulometrías hechas para el material existente.



Fotografía 2. Muestras tomadas para realización de ensayo granulométrico. (Autores)

**Ensayo Proctor estándar:** Para realizar el ensayo de Proctor estándar se refirió a la norma colombiana I.N.V.E – 141 – 13, método A, un molde de diámetro 101,6 mm (4”) y material de suelo que pasa por el tamiz de 4,75 mm (Nº4). Se extrajo del mismo saco para granulometría, una muestra representativa de 3,5 Kg la cual fue extendida sobre un platón y secada al aire libre, se mezcló perfectamente adicionando un porcentaje de agua menor que el contenido óptimo de humedad, se cogió una sub-muestra que equivaliera a la masa del molde aproximadamente y se compacto por medio de 3 capas aparentemente iguales de 25 golpes cada una, posteriormente se retiró el collar y se procedió a pesar, luego se extrajo del molde el material y se hizo un corte longitudinal en el centro tomando una muestra de material para pesarlo y secarlo en el horno a 110º durante 24 horas, el material restante se deshizo y desmorono para poderlo mesclar junto con el restante de material, se aumentó en un 4% el contenido de agua y se repitió el procedimiento, esto durante 3 muestras más consiguiendo una gráfica de 4 puntos de densidad vs contenido de agua.

### **3.4 Construcción de muretes y briquetas.**

Con el proceso de filtración y caracterización de cada uno de las normativas obtenidas con sus respectivas características se procedió a desarrollar la construcción de cilindros en tierra pisada para posteriormente ejecutar los ensayos de compresión no confinada en cilindros de tierra y como anexo a esta investigación se desarrolló el ensayo de tracción indirecta en muretes, esto debido a que en la mayoría de las normas se encuentran propuestos estos ensayos y cuentan con valores mínimos de la resistencia a la compresión y tensión, por tal motivos los resultados de los ensayos de laboratorio fueron analizados y comparados acorde a las diferentes normativas y según lo plasmado para estos factores, con lo que se buscó identificar algunos de los lineamientos básicos que se han desarrollado en otros países y con los cuales se buscan brindar soluciones prácticas y científicas a la problemática planteada al inicio de nuestro proyecto.

#### **3.4.1 Cilindros en tierra**

Para la ejecución de esta etapa se fabricó un pisón circular utilizando como material una lámina de acero circular de calibre “5mm”, un tubo de “1,5m” de largo y un peso cilíndrico hueco de “6,3kg” con un diámetro de “12,5cm” como se muestra en la fotografía 3, el cual se desliza a determinada altura según la energía de compactación deseada sobre el tubo, dejándose caer de manera libre sobre la lámina de acero comprimiendo así las capas de suelo que se encuentran en la formaleta cilíndrica. El procedimiento se realizó extendiendo el material de los sacos sobre un platón rectangular de aproximadamente 1 m<sup>2</sup> donde se dejó secar el suelo al aire libre, luego del proceso de secado, se realizó el procedimiento de

cernir con un harnero el material que se iba utilizar para construir la briqueta, la muestra de suelo que pasaba por el harnero caía directamente a otro platón con las mismas dimensiones del anterior, el cual se procedía a mezclar con un contenido de agua del 16,8% a poner en el punto óptimo de humedad el material para garantizar un buen desarrollo en la fabricación de las briquetas, como sustancia desmoldante se aplicó ACPM a las camisas o formaletas cilíndricas para evitar la unión del suelo a la formaleta, posteriormente se realizó llenado de la formaleta cilíndrica llevándose a cabo por medio 3 capas iguales, golpeando cada capa 12 veces con el pisón, dejándolo caer a una altura de 40 cm para generar una buena energía de compactación, como último proceso de esta fabricación de cilindros de tierra se dejaban secar por un tiempo aproximado de media hora y se retiraban las formaletas, para dejar los cilindros secando totalmente descubiertos durante un periodo de 28 días a una temperatura ambiente.



Fotografía 3. Herramientas y material utilizado para proceso constructivo de cilindros.

(Autores)

### 3.4.2 Muretes en tierra

Para la construcción de los muretes como primer paso se realizó la selección del material necesario para la construcción de los mismos, continuando con la preparación de la muestra seleccionada con una humedad óptima de 16,8% obtenida del ensayo de laboratorio llamado Proctor estándar, para continuar el proceso se procedió a pasar el material por una malla de acero la cual permitía el paso de material con un tamaño de partículas uniforme e impidiendo el paso de material mayor a los rangos propuestos en las normas consultadas para la construcción e implementación de la técnica de tapia pisada, luego de este proceso se adicionaba el contenido de agua necesaria para alcanzar su contenido óptimo de humedad, en esta ocasión fue necesario utilizar un nuevo pisón con un área transversal cuadrada o rectangular el cual fue obtenido por medio de un grupo de compañeros que simultáneamente realizaban una tesis enfocada en la construcción de muros en tapia pisada, este pisón tenía unas dimensiones de (1,8m, 21,5cm x 29cm con un peso de 5kg) y fue elaborado de madera dura. Se dispuso de un encofrado rectangular con 4 láminas de acero, 2 láminas de 20cm por 50cm y 2 láminas de 40cm por 50 cm, como lo muestra las (figuras 15 y 16), para poder apisonar hasta una altura de 40 cm como se había planteado en el momento que se decidió realizar estos muretes e igualmente como se había tenido en cuenta en la referencia bibliográfica de (Afanador, 2013), antes de verter la tierra dentro del encofrado se aplicó por medio de una brocha la lubricación con la sustancia desmoldante en este caso ACPM a cada cara del encofrado para evitar que la

tierra se uniera a la formaleta, posteriormente se vertió la tierra con palas en 3 capas de 15 a 20 cm apisonándola una tras otra con el pisón de madera con los golpes suficientes hasta obtener un sonido seco y uniforme como se hacía mención en las fuentes bibliográficas para así obtener una máxima compactación, finalmente se dejaban por un tiempo de 30 minutos encofrados y se retiraba las formaletas y se dejaron secar al aire libre durante 28 días.

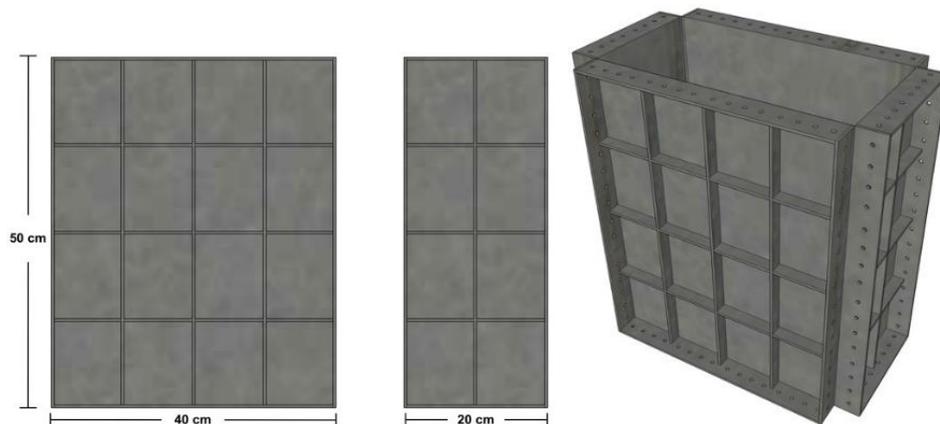


Imagen 14. Dimensiones formaleta para construcción muretes (Autores)



Fotografía 4. Proceso construcción muretes (Autores)

## 4. PRUEBAS EXPERIMENTALES

### 4.1 Granulometría

El ensayo de granulometría se llevó a cabo 3 veces con tres muestras diferentes, con el fin de tener una buena identificación del tipo de suelo con el que se trabajaría para la realización de los demás ensayos y poder tener en cuenta algunas características físico-mecánicas; a continuación, se observan los resultados obtenidos en una de estas pruebas granulométricas con su respectiva curva granulométrica.

Tabla 17. Distribución granulométrica por tamizado (Autores)

Distribucion Particulas Tamices					
peso antes de lavar		623,73	g		
peso despues de lavar		431,40	g		
peso retenido 200		427,23	g		
No Tamiz	abertura mm	peso retenido	%retenido	%retenido acumulado	%pasa
3/8"	9,5	0	0	0	100
4"	4,75	8,18	1,90	1,90	98,10
10"	2	16,09	3,73	5,63	94,37
20"	0,859	52,06	12,07	17,69	82,31
60"	0,25	153,15	35,50	53,19	46,81
140"	0,106	91,03	21,10	74,30	25,70
200"	0,075	25,76	5,97	80,27	19,73
fondo		80,96	18,77	99,03	0,97
		427,23	99,03		

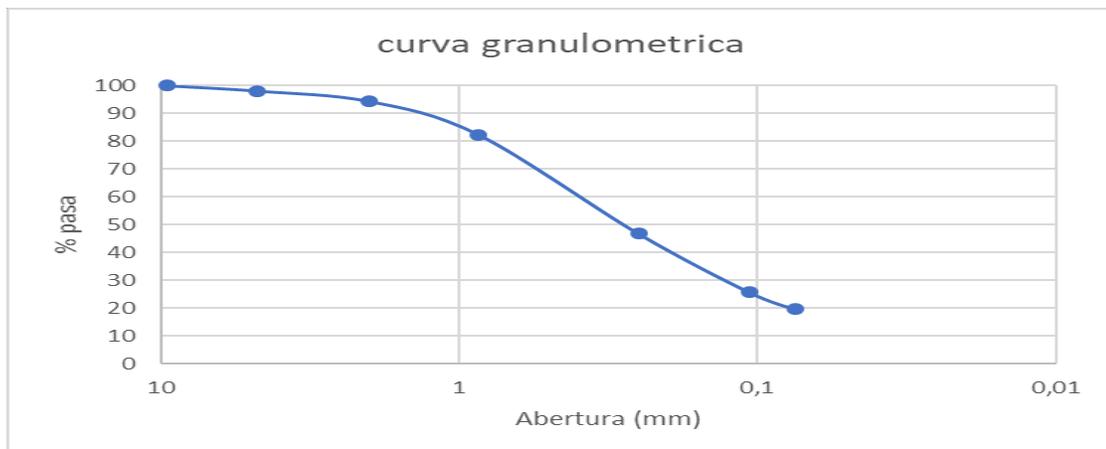


Imagen 15. Curva granulométrica (Autores)

Tabla 18. Valores referentes a límites líquido y plástico (Autores)

Límites					
Descripción	Límite Líquido			límite plástico	
	1	2	3	1	2
ensayo					
Peso Capsula (g)	26,74	21,39	20,89	26,95	27,24
Peso Capsula+ suelo humedo(g)	66,98	50,20	49,71	36,82	37,89
Peso + Suelo Seco (g)	56,33	41,74	42,69	34,84	35,13
peso agua	10,65	8,46	7,02	1,98	2,76
peso seco	29,59	20,35	21,80	7,89	7,89
contenido de humedad	35,99	41,57	32,20	25,10	34,98
golpes	28	22	18		
promedio humedad				30,04	

Límite líquido	34,86	%
Límite Plástico	30,04	%
Índice Plasticidad	4,82	%

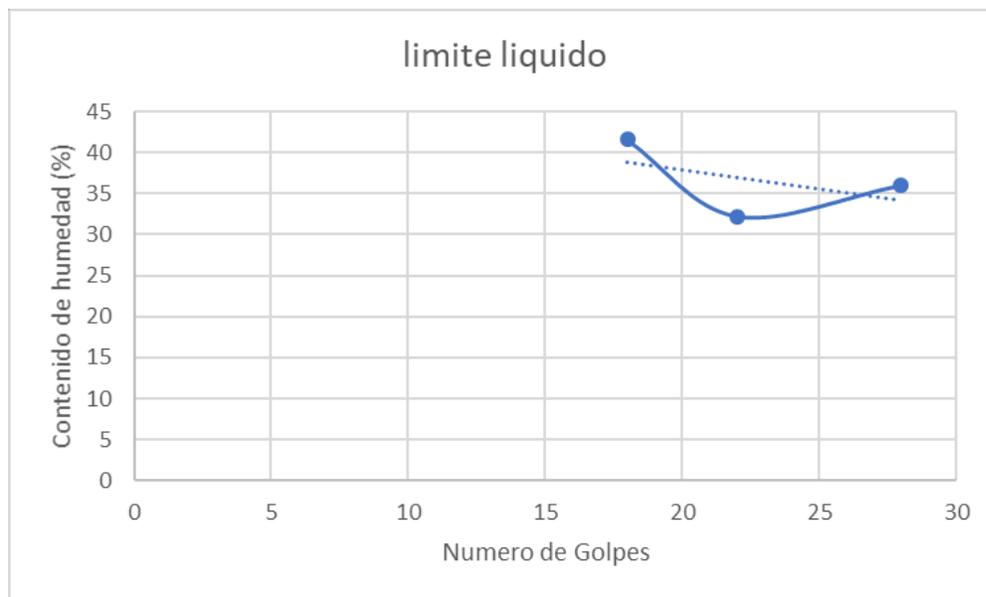


Imagen 16. Límite líquido (Autores)

TABLA 19. Clasificación de suelo teniendo en cuenta método AASTHO Y SUCS

MUESTRA DE SUELO COLOR AMARILLO
<b>SUELO GRUESO:</b> Se evidencia que es un suelo grueso debido a que más del 50% de la muestra utilizada en la granulometría no pasó el tamiz No.200
<b>ARENA:</b> se evidencia que más del 50% de la muestra paso por el tamiz No 4
<b>MAL GRADADA:</b> debido a que los valores de Cu y Cc no están dentro de los rangos permitidos para la clasificación como bien gradada y además el porcentaje de finos no es menor al 5%
No es ni <b>SW-SM, SW-SC, SP-SM ni SP-SC</b> por que el porcentaje de finos no está entre el 5% y 12%
El material se presenta como una arena limosa (SM) debido a que el porcentaje de finos es mayor al 12% se determina esta condición por medio de la ecuación de la carta de plasticidad.

Con esta información se llevó a cabo la clasificación del tipo de suelo con el que se realizarían los cilindros de tierra y los muretes, luego de haber realizado esta clasificación por el método AASTHO Y SUCS se logró obtener la información deseada la cual arrojó como resultado que nuestro material a trabajar era una ARENA LIMOSA.

## 4.2 Proctor estándar

El ensayo de Proctor estándar se llevó a cabo en 1 ocasión con el fin de tener conocimiento de la energía de compactación y la humedad óptima con la cual el material presentaba buenas condiciones para obtener buena adherencia entre las partículas para posteriormente aumentar sus condiciones de resistencia a la compresión, los resultados de este ensayo se encuentran relacionados en la siguiente tabla con su respectiva gráfica.

TABLA 20. Clasificación de suelo teniendo en cuenta método AASTHO Y SUCS

PRUEBA PROCTOR ESTANDAR				
volumen model	943,94			cm3
PRUEBA No	1	2	3	4
peso suelo + molde (g)	5950	6060	6150	6070
peso molde (g)	4230	4230	4230	4230
peso suelo humedo compactado (g)	1720	1830	1920	1840
peso suelo humedo + capsula (g)	74,30	91,30	73,00	80,50
peso suelo seco + capsula (g)	69,55	83,52	66,43	71,74
capsula (g)	26,98	27,20	27,00	21,10
peso agua (g)	4,75	7,78	6,57	8,76
peso del suelo seco (g)	42,57	56,32	39,43	50,64
contenido de agua (%)	11,16	13,81	16,66	17,30
densidad suelo humedo (g/cm3)	1,82	1,94	2,03	1,95
densidad suelo seco (g/cm3)	1,64	1,70	1,74	1,66

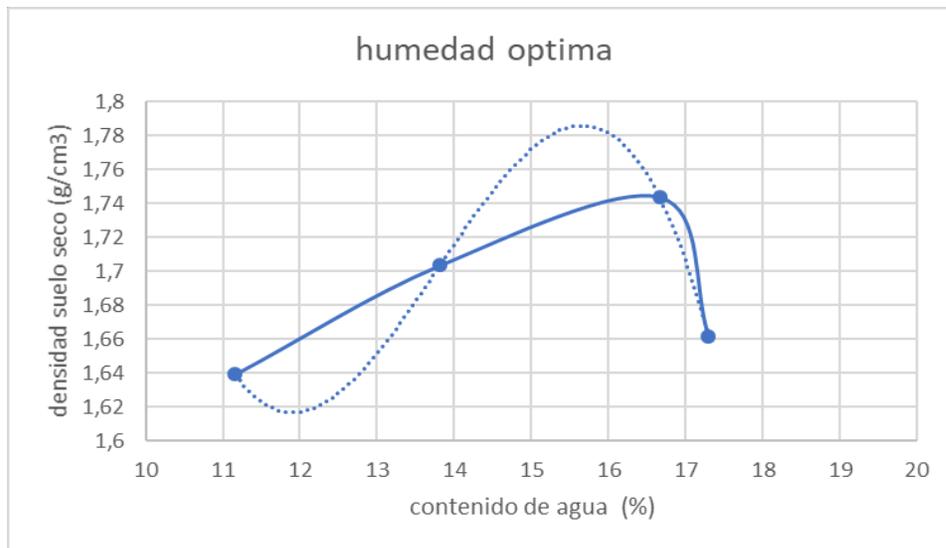


Imagen 17. Humedad óptima obtenida de ensayo Proctor estándar (Autores)

Se puede observar por medio del gráfico de humedad óptima (imagen 17) que la densidad seca máxima tiene un valor de 1,68 y la humedad óptima tiene un valor del 16,8%.

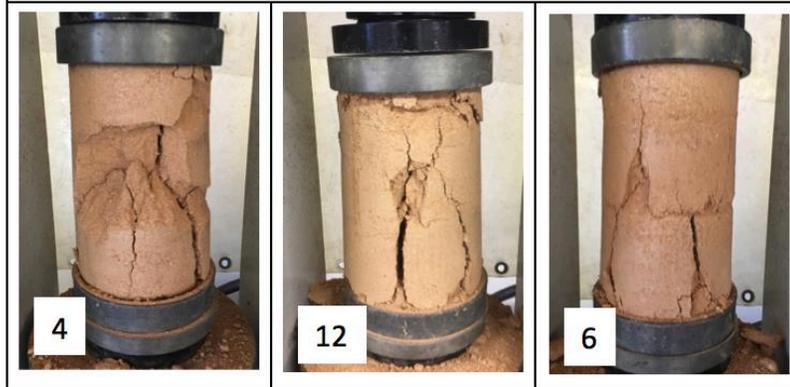
### 4.3 Cilindros tierra compresión

El ensayo de compresión se realizó a 10 cilindros + 6 de tierra para la precisión de los resultados de 25 muestras que se tenían, basándonos en la norma IETcc (España) que recomienda la ejecución de 10 muestras cubicas de 30 cm de lado. Debido a que durante el proceso de curado durante 28 días como no lo recomendaba la norma peruana y española en un lugar fresco y donde no se vieran cambios bruscos en su humedad, los resultados de este ensayo a compresión de los cilindros de tierra luego de 28 días se encuentran aquí relacionados:



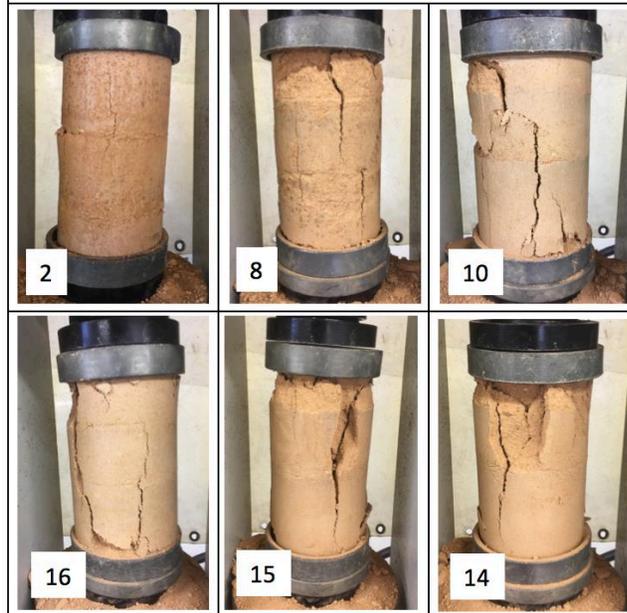
Fotografía 7. Compresión cilindros falla tipo corte (Autores)

Falla de tipo cono y hendidura en la que se muestra un fisura vertical y casi en el centro del cilindro se generan dos fallas de corte haciendo que por consiguiente el cilindro se debilite en gran manera

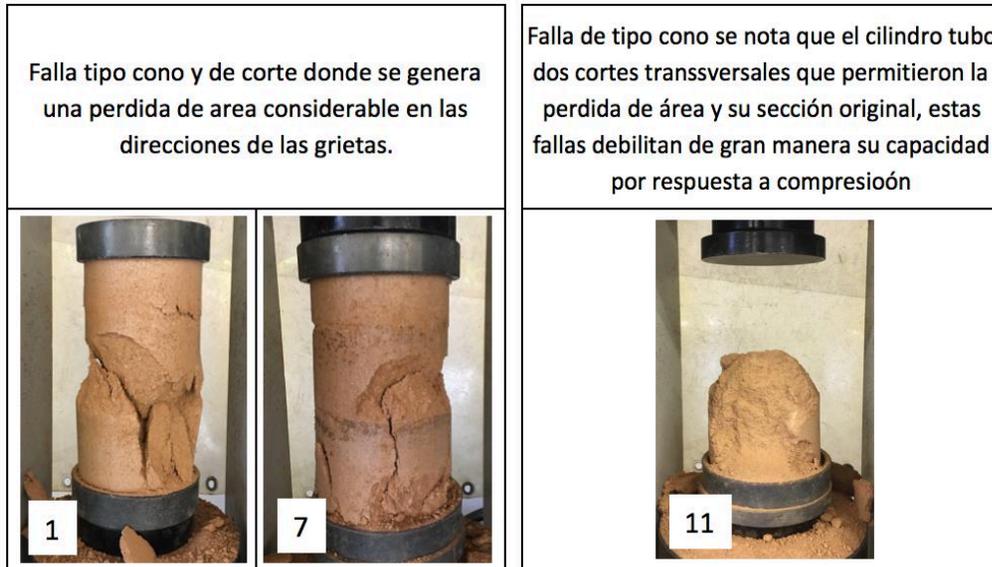


Fotografía 8. Compresión cilindros falla tipo cono y hendidura (Autores)

Falla de tipo columnar donde se nota una linea casi vertical la cual inicia desde la parte superior hasta el otro extremo, generando la separación de su nucleo



Fotografía 9. Compresión cilindros falla tipo columnar (Autores)



Fotografía 10. Compresión cilindros falla tipo cono y corte, cono (Autores)

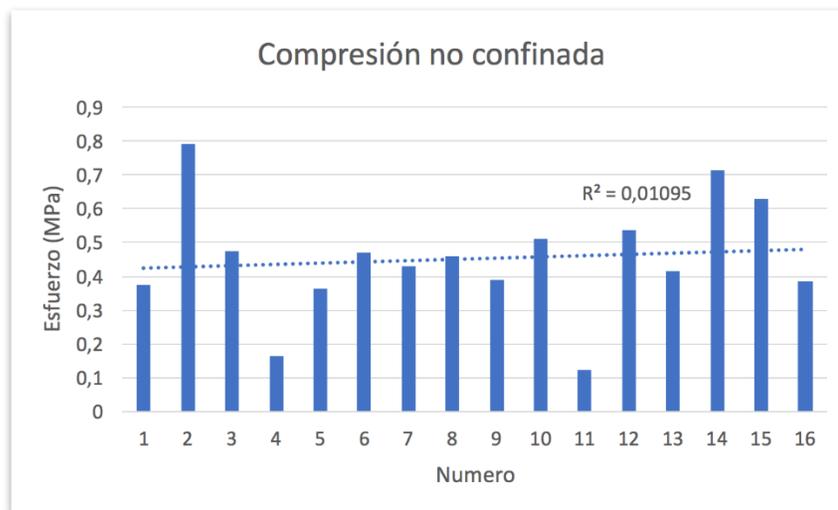
Durante este proceso se puede llegar a la determinación que las fallas de tipo columnar presentan una mayor resistencia y mejor respuesta a la compresión, en los que se evidencia que el proceso de compactación se llevó a cabo de manera más uniforme y su energía estuvo acorde durante su proceso, por otra parte se puede observar que las fallas de tipo cono junto con las de tipo corte presentan bajos niveles de resistencia e incitan a pensar que se realizaron con un proceso de compactación menor al de las demás tipo de fallas.

Luego de haber detallado el comportamiento que se obtuvo en cada uno de los cilindros que se sometieron a la prueba de compresión simple, podemos decir que durante los procesos constructivos del tapial se deben realizar refuerzos de manera vertical con el fin de que no se generen fisuras transversales que logren perdidas de material o sección y se obtenga una mayor resistencia como es lo esperado, de igual forma se hace la invitación a

la realización de más pruebas de este tipo incluyendo reforzamientos verticales y con un sistema que genere una energía de compactación un más constante y uniforme.

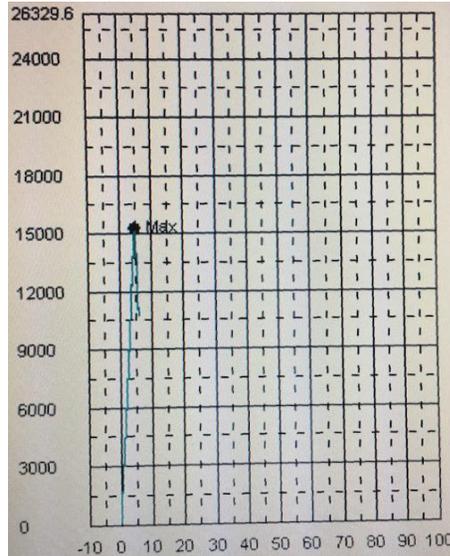
Los valores obtenidos en el ensayo de compresión están relacionados con su respectiva numeración de las fotografías 7,8,9,10 y las posiciones en la imagen 18.

Imagen 18. Compresión no confinada de cilindros (Autores)



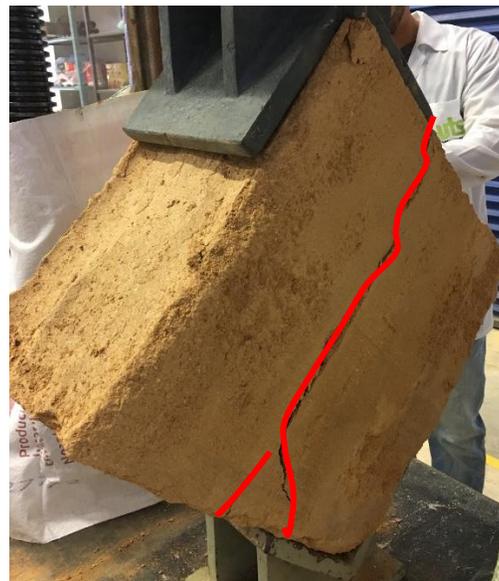
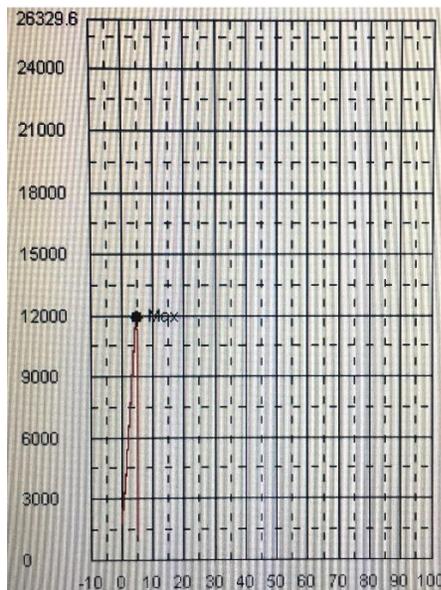
## 4.4 Muretes tracción indirecta.

### 4.4.1 Prueba número 1



Fotografía 11. Ensayo tracción indirecta en muretes 1 (Autores)

### 4.4.2 Prueba número 2



Fotografía 12. Ensayo tracción indirecta en muretes 2 (Autores)

Durante el desarrollo de las pruebas no se presentaron comportamientos dúctiles, y por lo cual no se generó ningún tipo desprendimiento de partículas, esto evidencia una alta cohesión entre partículas debido al alto contenido de limo. Es posible observar que los elementos presentan planos de falla casi idénticos por corte, la ubicación de estas fallas se dio en el centro de cada murete ensayado con un ángulo de aproximadamente  $45^\circ$  que se dirigió de un costado a otro del murete, ocasionando una división entre dos partes similares en el murete. Conforme se observa en las fotografías 11 y 12, de igual manera se puede contemplar un módulo de elasticidad constante y un rango de deformación bastante alto para ser un material poco resistente y sin refuerzo. Se evidencia también que el comportamiento de este ensayo estuvo hasta la zona de falla y por tal motivo no recupera su deformación al iniciar el proceso de descarga.

Tabla 21. Resultados de esfuerzo máximo, durante ensayo de tracción indirecta muretes (Autores)

Murete	Área (mm)	Carga máxima (kN)	Esfuerzo máximo (MPa)
1	80000	15,25	0,19
2	80000	11,89	0,15

Por cuestión de ausencia de mecanismos para la medición de deformaciones no se obtuvieron las deformaciones horizontales que permitirían obtener el coeficiente de Poisson y así mismo el módulo de cortante o módulo de elasticidad transversal.

## 5. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Mediante la búsqueda y recopilación de información bibliográfica se observó que debido a que solo un tercio de la población actual vive en viviendas construidas a base de tapia pisada, el estado de la normativa mundial es muy estrecho o débil, a pesar de que algunos países, incluyendo a Colombia, han puesto en tarea la investigación de los suelos y técnicas donde se realiza o se ha realizado este sistema constructivo, para el diseño de estructuras en tapia pisada, a través de análisis y métodos de construcción efectivos que lleven a la resolución de normas óptimas y conduzcan a la motivación en la ejecución de nuevos proyectos de tapia pisada.

Por consiguiente, se espera que con este proyecto se estimule al área de la construcción civil y se incrementen las investigaciones que dirijan a un análisis más profundo en las estructuras de tapia pisada.

Luego de la recopilación de información y lectura de las diferentes fuentes bibliográficas se pudo determinar que de las doce (12) normas que hacen parte de los diferentes códigos sismo resistentes, sólo la norma de nueva Zelanda, la NZS 4297, aporta un análisis completo a nivel sismo resistente con la implementación de coeficientes de zona sísmica y la formulación de ecuaciones matemáticas que permiten generar diseños con un apoyo más fiable y cercano a la idea de una construcción en tapia con soporte académico e ingenieril. Esto permitirá acoplar muchas de sus sugerencias y métodos de diseño a la zona de intereses, en este caso Santander, para evitar los muros de espesores excesivos por falta

de confiabilidad y conocimiento acerca del comportamiento estructural de los elementos de tapia pisada en eventos sísmicos.

El desarrollo y ejecución del ensayo de compresión en cilindros de tierra permitió evidenciar que luego de la manipulación y análisis de las propiedades mecánicas del suelo extraído, no se está cumpliendo con los resultados esperados obteniendo un valor de media  $0,315 \text{ N/mm}^2$ , impidiendo que el material sea referenciado o tenido en cuenta debido a que no cumple con los requisitos mínimos de compresión no confinada con forme a las normas, las cuales en su gran mayoría proponen valores de:  $2,07 \text{ N/mm}^2$ ,  $1,5 \text{ N/mm}^2$ ,  $0,5 \text{ N/mm}^2$ ,  $0,4 \text{ N/mm}^2$  para las normas NMAC 14.7.4., SAZS 724, NZS 4298, HB195 respectivamente.

Aun así, se hace una invitación a realizar futuras investigaciones con este tipo de material corrigiendo las posibles variables o desestimación de detalles que pudieron haber ocurrido durante los diferentes procesos, pues se hace notorio que se obtuvieron resultados favorables para casi un 63% de las muestras falladas en la máquina a compresión.

Se identificaron mediante la lectura de las diferentes normas pruebas como densidad máxima del suelo seco, humedad optima, granulometría, compresión no confinada de cilindros y cubos de tierra pisada, transferencia de calor y pruebas de erosión como goteo y rocío que son elementares para la buena elección de la tierra para la construcción de viviendas en tierra pisada.

## 6. RECOMENDACIONES

Se observó una alta variación en los resultados de compresión no confinada, esto debido al secado y el desencofrado de los cilindros de tierra, ya que estas al ser compactadas se adherían al encofrado impidiendo el fácil desmonte de esta misma, generando pequeñas grietas y deformaciones en las briquetas, por lo que se hace la recomendación para futuros procesos la evaluación de la manera como se llevó a cabo el proceso de revestir el encofrado con ACPM o parafina para la realización de los cilindros en tierra, como también se hace la aclaración que para la realización del desencofrado de las briquetas se realice inmediatamente luego de compactarlas para evitar la adherencia.

Recomendamos la realización de pruebas simulación sísmica en mesa vibratorias y con actuadores de cargas a elementos a escala real, goteo y aspersion de muros, transferencia de calor, ensayos de flexión con diferentes tipos de refuerzos. Se hace necesario realizar las anteriores pruebas con diferentes estabilizantes

Se aconseja realizar la experimentación de la construcción de la cimentación de viviendas en tapia pisada como lo recomiendan las normas halladas, así como los elementos de unión para un mejor tratamiento de las juntas entre muros. ( ver anexos)

Se sugiere nuevamente realizar las pruebas hechas durante el desarrollo de este documento con un cilindro modificado teniendo en cuenta que el utilizado no tenía las mismas dimensiones de las formaletas lo que hacía que la compactación no fuese uniforme y tuviese la misma energía de compactación.

## 7.BIBLIOGRAFÍA

Afanador Garcia, N., Carrascal Delgado, M., & Bayona Chinchilla, M. J. (2013). Experimentacion, comportamiento y modelacion de la tapia pisada. *Revista Facultad De Ingenieria, UPTC*, 47-59.

B. Bui, Q., Hans, S., C. Morel, J., & P. Do, A. (2011). First exploratory study on dynamic characteristics of rammed earth buildings. *Engineering Structures*, 3690-3695.

Becky, L., & Tom, M. (2001). *Building With Earth in Scotland, Innovative design and sustainability*. escocia : scottish executive central research unit .

Becky, L., & Tom, M. (2001). *Buildng With Earth in Scotland* (Vol. 1). (S. E. Unit, Ed.) Escocia.

Bolaños, S. R. (2007). el uso masivo de la tierra como material de construccion en colombia. *apuntes vol 20 num 2*, 354-363.

Cambridge Advanced Learner's Dictionary & Thesaurus. (2017). *Cambridge Dictionary*. Obtenido de <http://dictionary.cambridge.org/es/diccionario/ingles/vernacular>

Casa Editorial El Tiempo. (19 de Septiembre de 1996). EL TIEMPO. *LA HISTORIA DEL CEMENTO EN COLOMBIA*, pág. 1. Obtenido de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-516185>

CASTAÑO, J. O., RODRÍGUEZ, R. M., & LASSO, L. A. (2013). *Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes*. Pontificia Universidad Javeriana.

climate.org. (2016). *climate data*. Obtenido de climate data: <https://es.climate-data.org/location/873400/>

DANE. (2005). <https://geoportal.dane.gov.co>. (DANE) Obtenido de Condiciones de la vivienda: <https://geoportal.dane.gov.co/atlasestadistico/pages/tome02/tm02itm09.html>

Davila Corzo, S. P., & Puentes Puentes, J. E. (2004). *Determinación y análisis de la caracterización de los diferentes tipos de tierra utilizados en el proceso constructivo con tapia pisada por medio de ensayos geomecánicos y mineralógicos*. Bucaramanga: Tesis De Grado, Universidad Pontificia Bolivariana.

Delgado, M. C., & Guerrero, I. C. (2005). *The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review*.

Delgado, M. C., & Guerrero, I. C. (2006). Earth building in Spain. 12.

Emin Arslan, M., Emiroglu, M., & Yalama, A. (2017). Structural behavior of rammed earth walls under lateral cyclic loading: A comparative experimental study. *Construction and Building Materials*, 433-442.

Emiroğlu, M., Yalama, A., & Erdoğan, Y. (2015). Performance of ready-mixed clay plasters produced with different clay/sand ratios. *Applied Clay Science*, 221-229.

EPM. (2017). *Norma de construcción, Excavaciones*. Bucaramanga, Santander, Colombia.

Font, F., & Hidalgo, P. (2011). La tapia en España. Técnicas actuales y ejemplos. *Informes de la Construcción*, 21-34.

Gama Sanchez, C. E. (2007). La arquitectura de tierra en Colombia, procesos y culturas constructivas. *APUNTES, Universidad Nacional De Colombia*, 20(2), 242-255.

Gama, C. E. (2007). La arquitectura de tierra en Colombia, procesos y culturas constructivas. 15.

Garcia-Reyes, & Anzellini, M. (2016). *TÉCNICAS VERNÁCULAS*. Colombia: Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID).

Gernot, M. (11 de Febrero de 2001). *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra*. Kassel, Alemania: Forschungslabor für Experimentelles Bauen. Obtenido de [http://www.caminosostenible.org/wp-content/uploads/BIBLIOTECA/Tierra\\_pisada\\_\(Tapial\).pdf](http://www.caminosostenible.org/wp-content/uploads/BIBLIOTECA/Tierra_pisada_(Tapial).pdf)

GmbH, C. L. (s.f.). 1.1 Stampflehmwände und -böden.

GRAMLICH, A. N. (2013). *A concise history of the use of the rammed earth building technique including information on methods of preservation, repair and maintenance*. Oregon: Tesis, Universidad de Oregon.

Herbario Universidad de Antioquia, M. C. (08 de Agosto de 2008). *Banco de objetos de aprendizaje y de informacion*. Obtenido de <http://aprendeenlinea.udea.edu.co/ova/?q=node/575#>

Hidalgo, P. (2011). *La tapia en España. Técnicas actuales y ejemplos*. España.

J Cid, F. M. (2011). las normativas de construccion con tierra en el mundo . *the earth building normative documents in the world*, 159-160.

Juaspuezán, M. (05 de 03 de 2015). Tapia pisada, técnica que se resiste a desaparecer. (A. d. UN, Entrevistador) Bogotá.

Lehm, D. (2009). *Lehmbau Regeln*. Alemania.

Lyon, L. N. (2008). *THESE*. Francia.

Maldonado Ramos, L., Castilla Pascual, F. J., & Vela Cossio, F. (1997). La tecnica del tapial en la comunidad autonoma de Madrid. Aplicacion de nuevos materiales para la consolidacion de muros en tapia. *Informes de la construccion*, 49(452), 27-37.

Maniatidis, V., Walker, P., & Otros. (2003). *A Review of Rammed Earth Construction*.

Miccoli, L., Drougkas, A., & Müller, U. (2016). In-plane behaviour of rammed earth under cyclic loading: Experimental testing and finite element modelling. *Construction and Building Materials*, 144-152.

Miccoli, L., Urs, M., & Fontana, P. (2014). Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction And Building Materials*, 327-339.

Minke, G. (1994). *Manual de Construcción en Tierra*. Kassel : Fin de siglo .

minke, g. (2003). *manual de construccion antisismica en tierra*.

NMAC14.7.4, n. N. (2016). NMAC 14.7.4. nuevo mexico, estados unidos.

Parreira, D. J. (2007). *Análise Sísmica de uma Construção em Taipa*. Lisboa, Portugal.

Pons, i. G. (septiembre de 2001). *la tierra como material de construccion*. Obtenido de [www.ecosur.org](http://www.ecosur.org): [www.ecosur.org/index.php/.../manuales?...19:la-tierra-como-material-de-construccion](http://www.ecosur.org/index.php/.../manuales?...19:la-tierra-como-material-de-construccion)

Prada Diaz, W. A., & Rivero Bolaños, S. (2000). *Comportamiento estructural de muros en tierra apisonada, reforzados verticalmente con caña, sometidos a cargas horizontales*. Bucaramanga: Trabajo de grado (UIS).

Ramos, L. M., & Pascual, F. J. (1997). La técnica del tapial en la comunidad autonoma de madrid. Aplicación de nuevos materiales para la consolidación de muros de tapia.

Rivero Bolaños, S. (2007). El uso masivo de la tierra como material de construcción en Colombia. *APUNTES*, 354-363.

SENA . (s.f.). *CONSTRUCCION DE MURO EN TAPIA PISADA Y BAHAREQUE*. Manizales: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES.

Silva, R. A., Oliveira, D. V., Miranda, T. F., & otros. (2012). *Rammed Earth: Feasibility of a global concept applied locally*. Portugal.

STANDARDI, T. (1985). *TS-2515-Nisan*. Turkia.

Subcomité de Nueva Zelandia, B. /. (1998). *NZS 4298 (Materials And Workmanship For Earth Buildings) - 1998*. Nueva Zelanda.

Subcomité de Nueva Zelandia, B. /. (1998). *NZS 4299 (Earth Buildings Not Requiring Specific Design) - 1998*. Nueva Zelanda.

Subcomité de Nueva Zelandia, BD/83/2. (1998). *NZS 4297* . Nueva Zelanda.

T. Bui, T., B. Bui, Q., Limam, A., & Maximilien, S. (2014). Failure of rammed earth walls: From observations to quantifications. *Construction and Building Materials*, 295-302.

Tom, B. &. (2001). *Building With Earth* . Scotland .

TRABAJO, M. D. (2014). *GUIA TRABAJO SEGURO EN EXCAVACIONES*. Bogota, COLOMBIA.

Yamin Lacouture, L. E., Bernal, C. P., Reyes Ortiz, J. C., & Valencia, D. R. (2007). Estudios de vulnerabilidad sismica, rehabilitacion y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Apuntes, Universidad De Los Andes*, 20(2), 286-303.

ZIMBABUE, S. 7. (2001). *SAZS 724*. ZIMBABUE .

# ANEXOS

# Tapia pisada

Sergio A. Gil Gómez

Cristian I. Gil Gómez

PhD Sergio Manuel Pineda



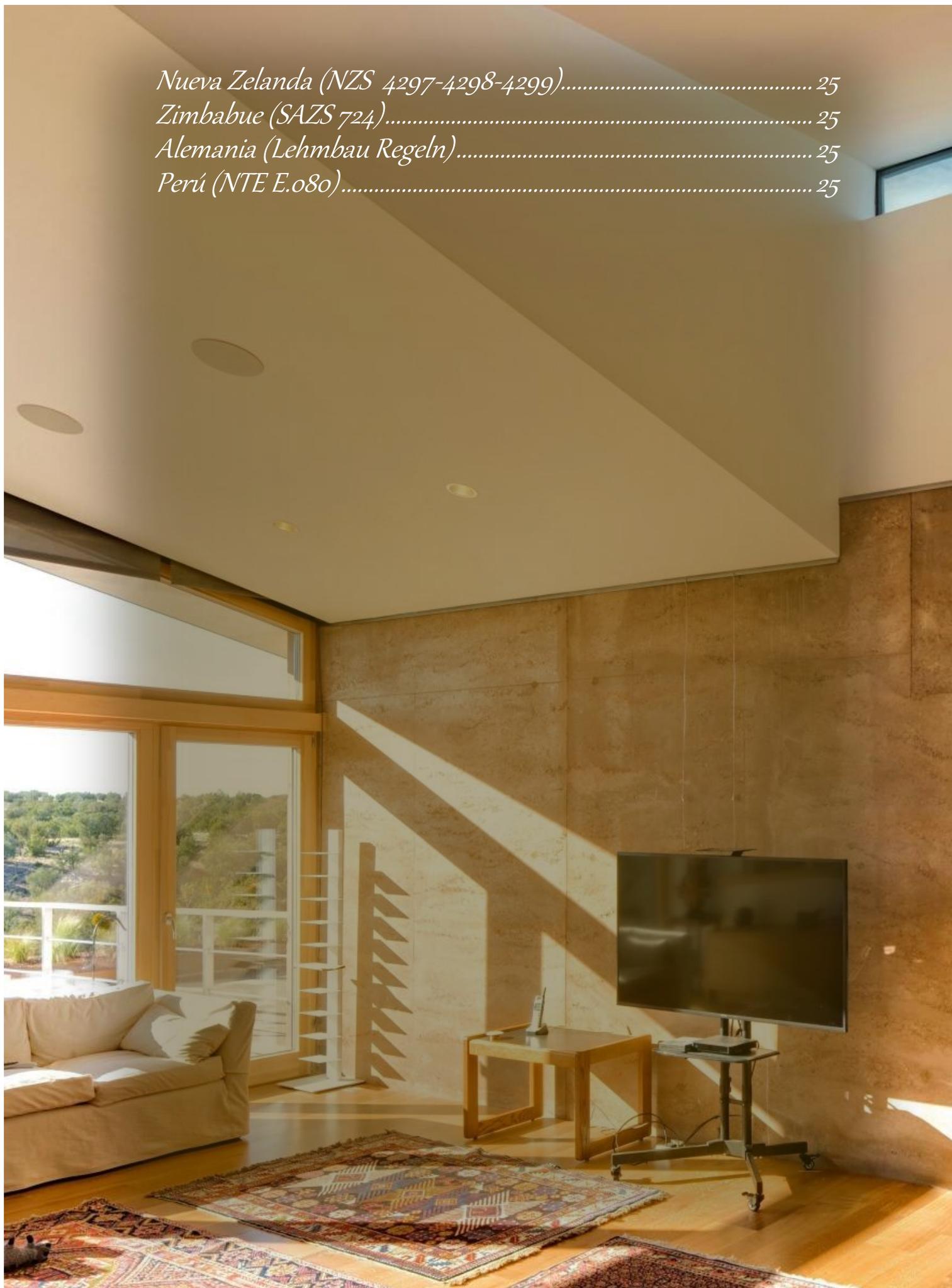
Universidad  
Pontificia  
Bolivariana  
SECCIONAL BUCARAMANGA



# Tabla de contenido

Introducción .....	3
Historia .....	4
Anillo de fuego .....	5
Aportes y especificaciones .....	7
Especificaciones para paredes.....	7
<i>Estados unidos (NMAC 14.7.4)</i> .....	7
<i>Nueva Zelanda (NZS 4297-4298-4299)</i> .....	9
<i>Zimbabue (SAZS 724)</i> .....	11
<i>España (IETcc-MOPT)</i> .....	11
<i>Australia (HB195)</i> .....	13
<i>Alemania (Lehmbau Regeln)</i> .....	13
Cimentaciones.....	13
<i>Estados unidos (NMAC 1474)</i> .....	13
<i>Nueva Zelanda (NZS 4297-4298-4299)</i> .....	14
<i>Zimbabue (SAZS 724)</i> .....	14
Clasificación de suelos .....	17
<i>Estados unidos (NMAC 1474)</i> .....	17
<i>Nueva Zelanda (NZS 4297-4298-4299)</i> .....	18
<i>Zimbabue (SAZS 724)</i> .....	18
<i>España (IETcc-MOPT)</i> .....	19
<i>Australia (HB195)</i> .....	20
Compresión .....	21
<i>Estados unidos (NMAC 1474)</i> .....	21
<i>Nueva Zelanda (NZS 4297-4298-4299)</i> .....	21
<i>Zimbábue (SAZS 724)</i> .....	22
<i>España (IETcc-MOPT)</i> .....	22
<i>Australia (HB195)</i> .....	24
Ensayos .....	25

*Nueva Zelanda (NZS 4297-4298-4299)..... 25*  
*Zimbabue (SAZS 724)..... 25*  
*Alemania (Lehmbau Regeln)..... 25*  
*Perú (NTE E.080)..... 25*



# Introducción

La constante necesidad de la ingeniería civil por reinventar e incluir un enfoque sostenible, hace centrar las miradas en una técnica de construcción consolidada a principios del siglo XIX en Colombia, llamada la arquitectura en tierra armada (Higuera, 2007). Según datos del libro *Building With Earth*, se estima que, a nivel mundial, un tercio de la población vive en viviendas construidas con esta técnica (Tom, 2001). Los grandes beneficios económicos y ambientales que posee la misma, permite que esta forma de construcción tenga acceso a las poblaciones más vulnerables de la sociedad como alternativa de solución de vivienda digna.

La arquitectura Ancestral, dentro de la cual también se incluye la arquitectura en tierra, no cuenta con suficiente soporte técnico y académico para desarrollar, de forma más eficiente y con mejor calidad, este tipo de actividades constructivas. La falta de normatividad para la construcción de edificaciones en tierra armada en zonas de amenaza sísmica ha sido uno de los mayores inconvenientes a la hora de utilizar estos sistemas constructivos. De esta manera, esta investigación buscó recopilar y evaluar normas existentes en otras zonas geográficas del mundo similares a las condiciones de la zona andina del departamento de Santander, con el fin de generar material académico y técnico a este tipo de construcción de vivienda eco amigable, en pro de impulsar la aceptación y desarrollo dentro de las comunidades científicas e ingenieriles.



# Historia

La tierra como material de construcción es definida por conceptos y procesos constructivos que permiten evaluar y comparar diferentes técnicas, sistemas constructivos y normativas sismo resistente para construir con tierra. Como primer concepto de investigación debemos definir la tierra como un material de construcción en los cuales se habla; que desde inicios de la humanidad ya los primeros hombres construían con tierra, formando con ella paredes protectoras para encubrir entradas a sus cavernas. (Pons, 2001) De esta manera la tierra ha sido un material de construcción usado en todos los lugares y en todos los tiempos, permitiendo la familiarización con sus características y aprendiendo a mejorarlas de diferentes formas. (Pons, 2001) Es por esto que se pueden evidenciar diferentes técnicas y procesos a la hora de construir con tierra a través del mundo en poblaciones en vías de desarrollo y de primer mundo, como se puede observar en el libro de Becky & Tom quienes estiman que un tercio de la población mundial vive en casas construidas en tierra, con viviendas que en algunos casos son modernos o tradicionales sin importar las culturas y condiciones climatológicas. (Becky & Tom, Building With Earth in Scotland, Innovative design and sustainability, 2001) Incluso en países desarrollados aún sigue siendo una de las técnicas más utilizada a la hora de desarrollar centros culturales, museos y bibliotecas (Miccoli, Urs, & Fontana, 2014) es por esto que se observa un sin número de técnicas constructivas con la utilización de diferentes tipos de suelos a través de las diferentes poblaciones alrededor del mundo, esto debido a que ha logrado adaptarse a diferentes necesidades a las que se han visto expuestos sus habitantes y brindar una solución de vivienda digna a las comunidades albergadas (Garcia-Reyes & Anzellini, 2016).



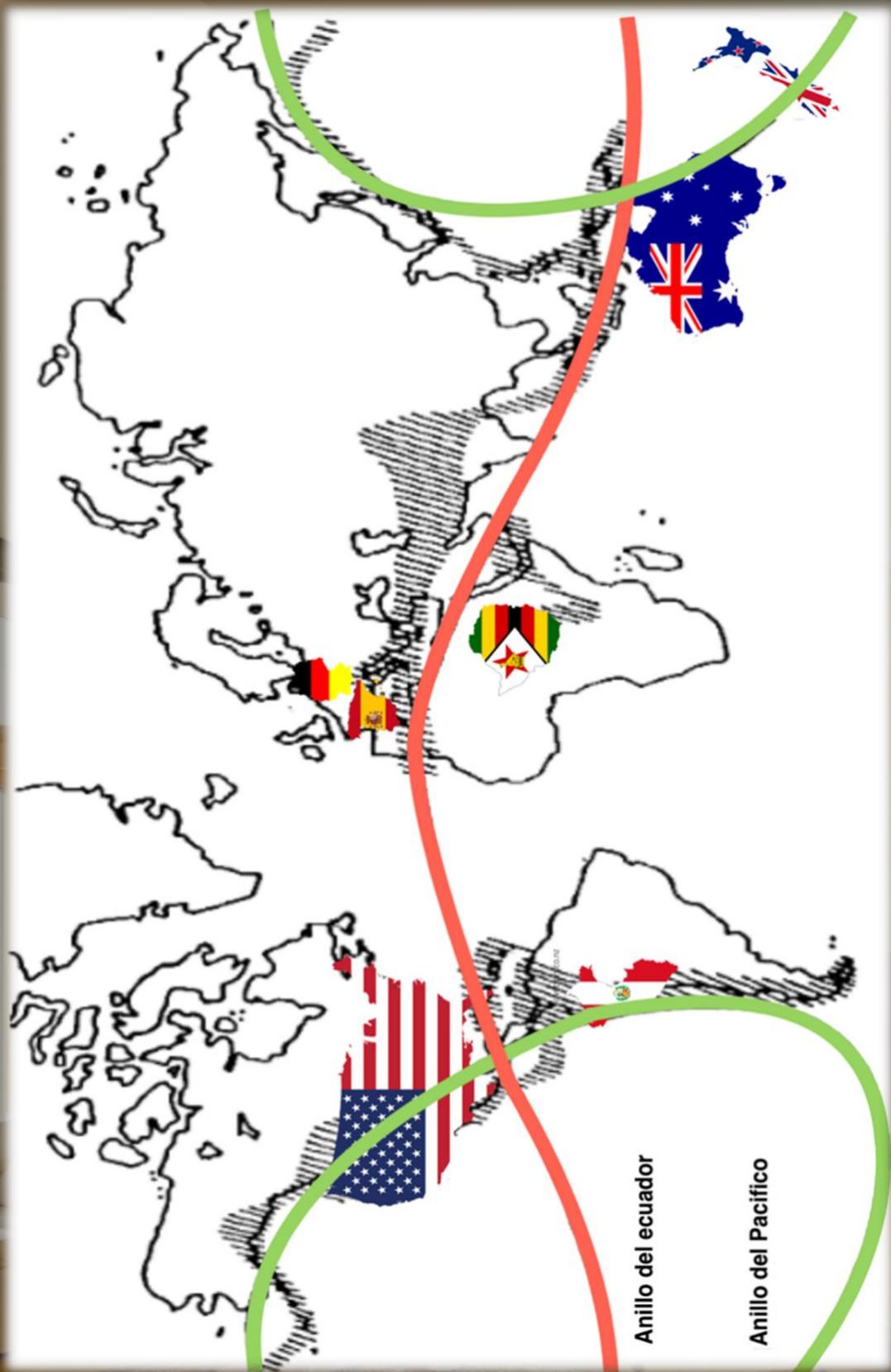
# Anillo de fuego

El también llamado cinturón de fuego del pacífico cuenta con una superficie de aproximadamente 40.000km que rodea el océano pacífico desde Nueva Zelanda hasta la costa oeste de sudamericana, a través de las costas del este de Asia y Alaska y las del noreste de Norteamérica y Centroamérica conformando lugares con altísima actividad sísmica y volcánica del mundo, este es mostrado en la figura 1.

Se puede observar que la gran mayoría de países los cuales fueron partícipes en la obtención de información relevante acerca de normas y especificaciones para la implementación de la técnica de tapia pisada, se encuentra dentro del cinturón de fuego y alrededor del cinturón del Ecuador, en este se encuentran países referentes como lo son Estados Unidos, Perú, Nueva Zelanda, Australia, Zimbabue, España y Alemania con sus normativas (NMAC 1474, NTE E.080, NZS 4297-4298-4299, HB195, SAZS 724, IETcc-MOPT y Lehmbau Regeln) respectivamente.



Figura 1. Anillo de fuego del pacifico y anillo del ecuador.



# Aportes y especificaciones

Adelante se realiza un resumen de los aportes y especificaciones importantes para la implementación en la construcción de tapia pisada en el departamento de Santander.

## Especificaciones para paredes

### Estados unidos (NMAC 14.7.4)

- Las paredes exteriores tendrán un espesor mínimo de 18" ( $\pm 46$  cm) y las paredes interiores un espesor mínimo de 2" ( $\pm 5$  cm)
- La primera elevación de no menos de 3,5" ( $\pm 9$  cm) de las paredes externas deberán estar estabilizadas o hechas con un concreto de por los menos 2500 psi.
- La construcción de apoyos laterales se debe hacer a distancias menores a 24 pies (7,31 m) entre el uno y el otro.
- Realizar contrafuertes que soporten por lo menos el 75% de la altura total de la pared, tengan una proyección de 3' ( $\pm 91$  cm) y un espesor mínimo de 18" ( $\pm 46$  cm) para tierra apisonada y 14" ( $\pm 36$  cm) para adobe.
- La NMAC 14.7.4 presenta la tabla 1 con los valores maximos de su altura respecto a los porcentajes de cemento para su estabilizacion de paredes.



Máximo de Sds	Espesor de pared	Altura máxima	Máximo de Sds	Espesor de pared	Altura máxima
.25	10	120	.40	10	120
	12	128		12	128
	14	144		14	144
	16	144		16	144
	18	144		18	144
	24	144		24	144
.30	10	120	.45	10	104
	12	128		12	128
	14	144		14	144
	16	144		16	144
	18	144		18	144
	24	144		24	144
.35	10	120	.50	10	96
	12	128		12	112
	14	144		14	136
	16	144		16	144
	18	144		18	144
	24	144		24	144

## Nueva Zelanda (NZS 4297-4298-4299)

- La construcción de tierra no debe exceder los 6.5 m de altura desde la parte superior de la zapata hasta la parte superior de la pared de tierra.
- Generalmente se requiere un espesor de pared externo mínimo de 280 mm para satisfacer sin aislamiento.
- La altura total de la pared desde la superficie superior de la cimentación no deberá exceder los 6,5 m.
- Las paredes de tierra apisonada deben tener un espesor mínimo de 250 mm.
- Se debe proporcionar una restricción lateral adecuada en la parte superior de la pared mediante un diafragma, una viga de enlace u otro dispositivo similar.
- Las restricciones laterales deberán construirse con madera, acero o concreto reforzado.
- El espesor mínimo en la dirección horizontal, donde las paredes no soportan o se unen a tabiques u otras construcciones que puedan dañarse con grandes deflexiones, no debe ser menor que el siguiente el de la tabla 2:

Tabla 2. Espesor mínimo en la dirección horizontal.

Simplemente apoyada	$h/18$ o $L/18$
Un extremo continuo	$h/21$ o $L/21$
Ambos extremos continuos	$h/22$ o $L/22$
Voladizo	$h/8$ o $L/8$

- Las dimensiones mínimas de la columna cuadrada deben ser de 250 mm si están reforzadas y de 580 mm si no están reforzadas.
- Para chimeneas las columnas se construirán de modo que cualquier conducto vertical tenga una dimensión mínima clara de 60 mm y un área mínima de 9000 mm<sup>2</sup>.

- Un conducto de una columna que contenga 4 barras deberá tener unas dimensiones mínimas de combustión clara de 150 mm x 150 mm.

Tabla 3. Relación de esbeltez en miembros sobre un eje principal.

Relación de esbeltez ( $S_r$ )	Factor de reducción ( $k$ )				
	Excentricidad a relación de espesor ( $e/tw$ )				
	$\leq 0.05$	0.10	0.20	0.30	0.332
6	1.00	0.78	0.56	0.38	0.32
8	0.94	0.73	0.54	0.34	0.29
10	0.88	0.67	0.49	0.31	0.35
12	0.82	0.62	0.45	0.27	0.22
14	0.76	0.56	0.40	0.23	0.18
16	0.70	0.51	0.35	0.20	0.15
18	0.64	0.45	0.31	0.16	0.11

- Para un miembro vertical que se apoya lateralmente a lo largo de uno o ambos extremos superior e inferior:

$$S_r = a_v h/t$$

$a_v = 0.75$  para un miembro sostenido lateralmente y restringido rotacionalmente en la parte superior e inferior;

$a_v = 0.85$  para un miembro lateralmente soportado tanto en la parte superior como en la inferior y restringido de forma rotatoria en solo uno de estos;

= 1.00 para un miembro con soporte lateral y libre de rotación en la parte superior e inferior;

= 2.00 para un miembro sostenido lateralmente y restringido rotacionalmente solo en su parte inferior.

### Zimbabue (SAZS 724)

- El ancho mínimo de una pared es de 300 mm.
- Las relaciones de esbeltez para las paredes de tierra apisonada deben cumplir los límites de la Tabla 4

Tabla 4. Relación de esbeltez para las puertas de Santander

Longitud máxima (m)	Restricción	Estabilizado	Relación (Ancho : alto)
9	No restringida	No estabilizado	1 : 8
9	No restringida	Estabilizado con cemento	1 : 10
9	Restringida	No estabilizado	1 : 12
9	Restringida	Estabilizado con cemento	1 : 16

Nota: Una pared restringida es aquella que está al menos unida por rodadura de recorridos alternos a una pared de retorno y / o un muelle de no menos de 450 mm de longitud, en ambos extremos;

### España (IETcc-MOPT)

- La norma IETC propone.
- Los muros no podrán medir más de 2 metros de largo y 0.8 m de alto.
- Espesores mínimos para muros:

1. Para muros estabilizados 30 cm.
  2. Para muros reforzados 50 cm.
  3. Para muros revestidos de barro 70 cm.
- Las paredes deben construirse sobre un zócalo de piedra o ladrillo de concreto de más de 25 cm de altura.
  - La MOPT propone factores de esbeltez para verificar la compresión, flexión y cortante.

Tabla 5. Factores de esbeltez

Factores de esbeltez siguiendo el MOPT							
Esbeltez	18	14	12	10	8	6	4
Factor de esbeltez	4	2	1,7	1,4	1,2	1	0,8

Tabla 6. Arriostramiento para paredes en tierra pisada

Arriostramiento necesario siguiendo el MOPT				
Distancias máximas entre arriostramientos (m)				
Esbeltez	Pared sin aberturas	Abertura en el tercio medio	Abertura en tercio lateral	30% del área en aberturas
4	12	10	9	8
6	10	8,5	7,5	6
8	9	7,5	6,5	5

## Australia (HB195)

- La Australian Earth Building Handbook recomienda que la altura de una pared independiente no exceda de 10t.
- Para una pared lateralmente contenida arriba y abajo su altura no debe exceder 18t.
- En ambos casos la longitud libre no soportada de la pared no debe exceder 30t.

## Alemania (Lehmbau Regeln)

- Las paredes deben ser de material arcilloso con espesores entre 30 y 65cm.
- La altura de las paredes no debe ser superior a los 4m.
- Dependiendo de la utilidad que vaya a tener el muro dentro de la construcción se define su espesor y calidad de refuerzo.
- Las paredes que no soportan carga tienen 20cm de espesor, las paredes exteriores deben ser  $\geq 32,5\text{cm}$  y las paredes internas que soportan cargas deben tener 24cm bajo ciertas condiciones obteniendo de esta manera esfuerzos permisibles de  $0,3\text{N/mm}^2$ .

## Cimentaciones

### Estados unidos (NMAC 1474)

- Cada zapata deberá tener una base debajo de la misma con una superficie de 16" ( $\pm 41\text{ cm}$ ) por 16" y un espesor de 4" ( $\pm 10\text{ cm}$ ).
- Se pueden utilizar dos bloques de 8" ( $\pm 20\text{ cm}$ ) por 16" ( $\pm 41\text{ cm}$ ) y un espesor de 4" ( $\pm 10\text{ cm}$ ) para cada zapata siempre y cuando se coloquen paralelos y juntos con la costura.
- El refuerzo mínimo debe ser de por lo menos 3 varillas #4 continuas en los zócalos de concreto que soportan la pared de tierra pisada.
- Las bases(cimentaciones) o zapatas deben tener un espesor mínimo de 10" ( $\pm 25\text{ cm}$ ) y debe ser de concreto de 2500 PSI y deberán tener el ancho total de la pared de tierra pisada.

- Se construirá una chavetera continua cada vez que se intersecte una pared de tierra pisada con la cimentación, esta chavetera deberá de 2" ( $\pm 5$  cm) de espesor y 6" ( $\pm 15$  cm) de ancho, a excepción de disponer de varillas #4, incrustadas en la cimentación, espaciadas a 48" ( $\pm 1,2$  m) y extendiéndose a 2" ( $\pm 5$  cm) en la pared de tierra pisada.

### Nueva Zelanda (NZS 4297-4298-4299)

- Los cimientos deben ser de concreto reforzado del mismo ancho que la pared de tierra que soporta, o de mampostería de ladrillos o mampostería de piedra de concreto reforzado con relleno sólido.
- Para muros de más de 300 mm se deben utilizar zapatas de concreto reforzado y deben ser del ancho total de la pared.
- El concreto debe ser de grado ordinario o superior.
- Se debe proporcionar refuerzo a la parte superior e inferior de las bases de las tiras para resistir las cargas de diseño y no debe ser inferior a 200 mm<sup>2</sup> de acero en total.
- Se debe proporcionar un refuerzo de cortante mínimo y su espaciamiento debe estar a una distancia no mayor de 600 mm de centro a centro.

### Zimbabue (SAZS 724)

- La cimentación debe ser de albañilería que cumpla con los requisitos de los reglamentos de construcción.
- El espesor mínimo será por lo menos igual al espesor de la pared adyacente, de lo contrario deberán tener las dimensiones de la tabla 7.



Tabla 7. Especificaciones de cimentaciones

Tipo de subsuelo	Condición	Prueba de campo	Ancho de la fundación	Espesor de la fundación
I Roca	No inferior a arenisca, piedra caliza o tiza firme	Requiere al menos operación mecánica para la excavación.	Igual al ancho de la pared	No aplica (N/A)
II - Grava - Arena	- Denso  - Denso	- Requiere selección para la excavación. clavija de madera de 50 mm cuadrados. - Difícil de conducir más allá de 150 mm.	Igual al ancho de la pared	(N/A)
III - Arcilla - Arcilla arenosa	- Rígido  - Rígido	- No se puede moldear con los buscadores y requiere un pico o mecánicamente.	400 mm	- $(F-W)/2$ o - El ancho de la pared, el que sea más grande.

		- Espada accionada para la eliminación.		
IV - Arcilla - Arcilla arenosa	- Firme  - Firme	- Puede ser moldeado firme. - Presionar con los dedos y se puede excavar con pala.	500 mm	- $(F-W)/2$ o - El ancho de la pared, el que sea más grande.

Tipo de subsuelo	Condición	Prueba de campo	Ancho de la fundación	Espesor de la fundación
V - Arena - Arena-sedimentos a - Arena-arcillosa	- - Suelto  - Suelto  - Suelto	-Se puede excavar con una pala. - La clavija de madera de 50 mm cuadrados puede manejarse fácilmente.	- Es mejor cavar más profundo en un subsuelo más firme y luego aplicar el ancho necesario para ese tipo de suelo	

VI - Limo - Arcilla (y arcillas arenosas/limosas)	- Suave - Suave	Moldeado con bastante facilidad en los dedos y fácilmente excavado	- Escavar más profundo en un subsuelo más firme
VII - Limo - Arcilla (y arcillas arenosas/limosas)	- Muy suave - Muy suave	Muestra natural exuda en temporada de lluvia cuando es exprimido en el puño	- Escavar más profundo en un subsuelo más firme

## Clasificación de suelos

### Estados Unidos (NMAC 1474)

- No podrán contener material grueso con un diámetro mayor a 1,5" ( $\pm 38$  mm).
- No podrán contener grumos de arcilla con diámetros mayores a  $\frac{1}{2}$ " ( $\pm 13$  mm).
- No podrán contener más de 2% de sales solubles.
- Deberá estar libre de toda materia orgánica.
- Suelo estabilizado:
  - ✓ No se podrán utilizar emulsiones de asfalto.
  - ✓ Un suelo estabilizado adecuado es aquel que contiene un 6% o más de cemento Portland por peso.
  - ✓ El suelo deberá tener una resistencia mínima de 200 psi después de 7 días.

- Suelo no estabilizado:
  - ✓ Un suelo no estabilizado es aquel que contiene menos de 6% de cemento Portland por peso.

### Nueva Zelanda (NZS 4297-4298-4299)

- No se utilizaran aquellos que contienen materia orgánica de un tipo propenso a pudrirse y descomponerse dentro de la pared.
- No se utilizaran aquellos que contienen sales solubles en agua hasta un punto que perjudicará la resistencia o durabilidad de una pared.
- No se utilizaran suelos que no superan la prueba de evaluación húmeda/seca.

### Zimbabue (SAZS 724)

- El suelo utilizado para la construcción de tierra apisonada debe estar libre de materia orgánica y otras sustancias que no sean del suelo, tales como basura, materiales con sulfatos, escombros, etc.
- El suelo debe tener:
  - ✓ 50% a 70% de grava fina y arena.
  - ✓ 15% a 30% de limo.
  - ✓ 5% a 15% de arcilla.
- Puede lograrse un suelo ideal mezclando diferentes porcentajes para esto dichas mezclas de suelo se deben ensayar mediante el método de "rollo" y la rotura debe ser entre 80 mm y 120 mm.
- Si hay más de una fuente de suelo, se añaden estabilizantes o se adiciona agua para alcanzar su contenido óptimo de humedad este debe estar debidamente mezclado.
- El suelo puede mezclarse mediante máquina de mezclado o a mano.

## España (IETcc-MOPT)

- Tamaño máximo de partícula de 20 mm.
- Los tamaños de partícula son: arcilla  $d < 0.002$  mm; limos  $0.002 < d < 0.5$  mm; Arena  $0.5 < d < 5$  mm; Grava fina  $5 < d < 20$  mm.

Tabla 8. Porcentajes óptimos de partículas.

Recomendaciones para la selección del suelo en tierra apisonada		
Clases de tierra apisonada	Clasificación de suelos	Plasticidad
Tierra apisonada	Arcilla + limo 30 - 60 %	-
Tierra apisonada reforzada	Grava fina : 10 - 20 %	-
	Arena : 10 - 40 %	
	Limo : 20 - 40 %	
	Arcilla : 10 - 40 %	
	Arcilla + limo < 45%	
Tierra apisonada estabilizada		LL < 40%
	Arena > 33%	10 < LP < 25
	Arcilla + limo < 30%	Mejor
		12 < LP < 20
		IP = 6 - 22%

# Australia (HB195)

Figura 2. Rangos máximos para porcentajes de partículas.

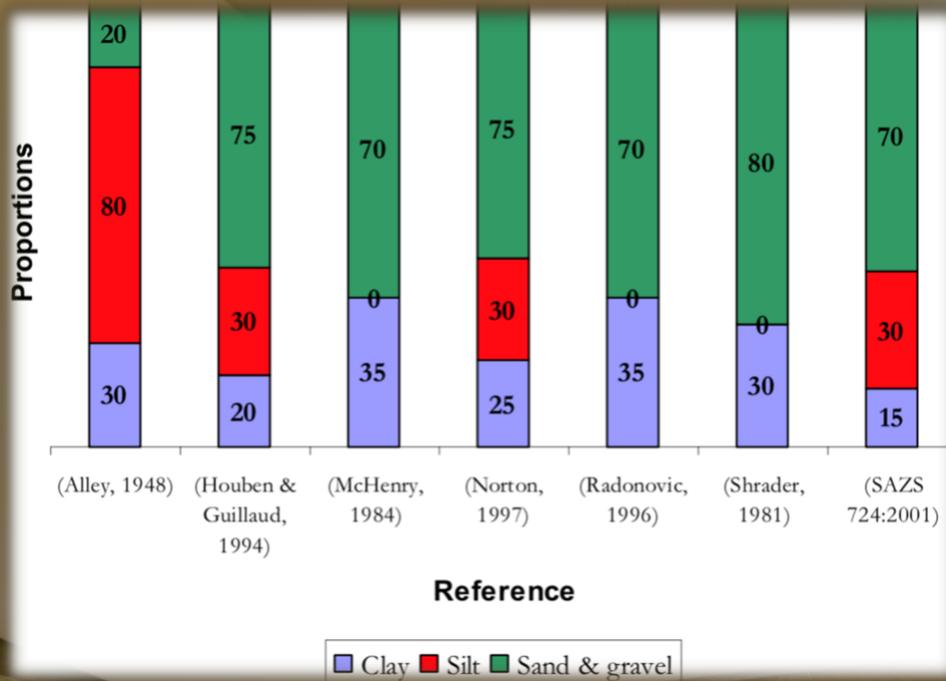
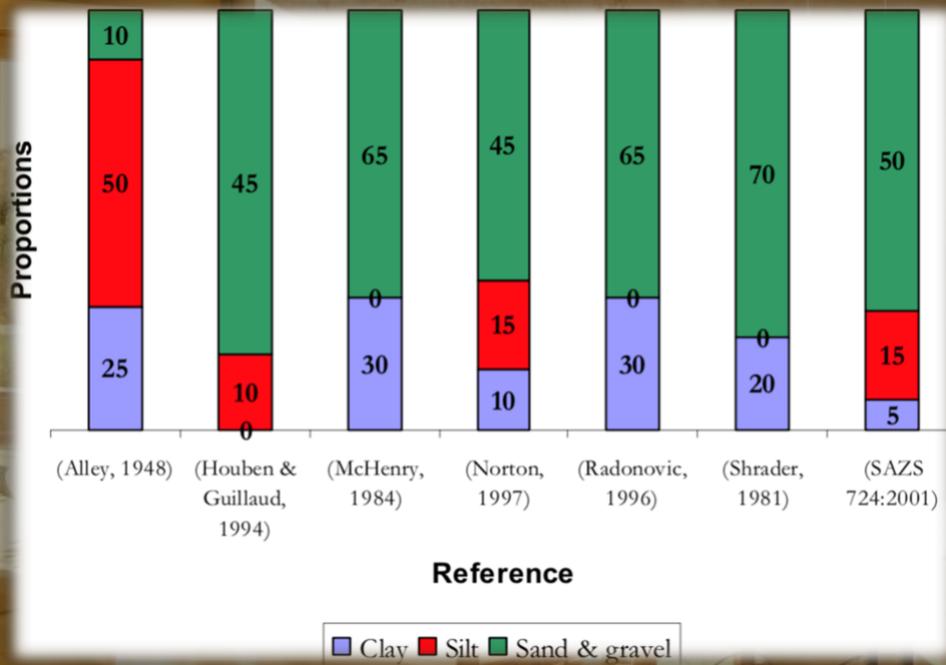


Tabla 3. Rangos mínimos para porcentajes de partículas.



## Compresión

### Estados Unidos (NMAC 1474)

- El suelo dispuesto para la construcción en tierra pisada deberá ser ensayado en laboratorio antes de la construcción por medio de ensayo de compresión no confinada, totalmente curada deberá contar con una resistencia mínima a la compresión de 300 psi.
- El suelo estabilizado es aquel que contiene más de 6 % de cemento portland, este deberá tener una resistencia mínima de 200 psi después de 7 días.

### Nueva Zelanda (NZS 4297-4298-4299)

- La norma de nueva Zelanda propone los siguientes valores mostrados en la tabla 9.

Tabla 9. Especímenes para ensayo a compresión no confinada.

Referencia	Detalles del espécimen					Mínimo número de especímenes necesarios
	Cilindro		Prisma			
	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	
NZS 4298	N/A	N/A	N/S	N/S	2xh	5